

分类号: \_\_\_\_\_ 密级: \_\_\_\_\_

U D C: \_\_\_\_\_

# 华东理工大学

## 学位论文

木质纤维素预处理反应器的流体

力学性质研究

李传航

指导教师姓名: 鲍杰 教授

华东理工大学生物工程学院

申请学位级别: 硕士 专业名称: 化学工艺

论文定稿日期: 2012-05-25 论文答辩日期: 2012-05-23

学位授予单位: 华东理工大学

学位授予日期: \_\_\_\_\_

答辩委员会主席:

评 阅 人:

---

## 作者声明

我郑重声明：本人恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的结果。除文中明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何他人已经发表或撰写过的内容。论文为本人亲自撰写，并对所写内容负责。

论文作者签名：

年 月 日

## 木质纤维素预处理反应器的流体力学性质研究

### 摘要

木质纤维素的预处理是实现其有效利用的关键工艺过程，高固体含量下的预处理工艺因其能够极大的降低工艺成本而成为预处理技术的发展趋势，与之相匹配的预处理反应器的研究与开发已成当务之急。由于高固体含量下木质纤维素物料的特殊性，反应器中需要机械搅拌强化传热和传质过程，本研究选择的是在处理高固体含量和高粘度的物料的混合过程表现良好的螺带搅拌桨。首先，本研究通过玉米秸秆与水分的预混合试验确定最佳的  $d/D=0.9$ 。随后，在三个不同尺度的冷模搅拌槽中研究了影响玉米秸秆与水分混合时间和能耗的因素，包括：装料量、搅拌转速、颗粒粒径分布和含湿量，其中混合的快慢和能耗主要是取决于玉米秸秆颗粒之间的相互碰撞频率和摩擦力的大小。反应器研究的前提条件是对所处理物料的流变学性质的研究，本文赋予木质纤维素物料表观粘度的概念，并使用间接的测量方法测定了不同含湿量下的玉米秸秆和预处理玉米秸秆的幂律模型参数，结果表明，玉米秸秆和预处理玉米秸秆均表现出剪切变稀的性质，且随着含湿量增加，剪切变稀的强度变弱。最后，本研究建立了包含流体幂律模型的 CFD 模型，并根据不同尺度搅拌槽下的功率和混合时间数据进行了验证，结果吻合良好。本研究为极限高固体含量木质纤维素搅拌预处理反应器的开发提供了依据，也为高固体含量物料的流变学性质测量提供了可借鉴的方法。

**关键词：**木质纤维素；预处理反应器；螺带桨；流变性；CFD

## Fluid Dynamics Study of Lignocellulosic Pretreatment Reactor

### Abstract

As the first step in the biochemical conversion process to produce bioethanol, pretreatment plays a critical role in preparing biomass for enzymatic conversion to C5 and C6 sugars. The high solids loading in the pretreatment resulted in the significant reduction on steam consumption and waste water generation. Therefore, it's an urgent task to develop the reactor that can handle this kind of material. It is necessary to use mechanical mixing to enhance the heat and mass transfer. Helical impeller is preferred in this study because of its good performance in the mixing of high solid content and high viscosity materials. Firstly, we carried out the pre-mixed experiment to find optimal impeller geometry ( $d/D=0.9$ ). Secondly, the mock-up experiments were carried out in three different scale stirred vessels, the results shows that, rotation speed, particle size distribution and moisture content are the factors that effect on the mixing process. Both mixing time and power consumption depends on the collision frequency and the friction among the particles of CS. Thirdly, the power-law model parameters of CS/PCS in different moisture content were measured using the impeller method., all of them shows shear-thinning properties, the index number decrease with the increase of the moisture content; Finally, this study established CFD model that contains the power-law model was validated according to the power and mixing time data in different scale stirred vessels, the results are in good agreement.

**Keywords:** Lignocellulosic biomass; Pretreatment reactor; Helical impeller; Rheology; CFD

## 目录

第 1 章 前言.....	1
1.1 纤维素乙醇生产工艺.....	1
1.2 木质纤维素的预处理方法和进展.....	2
1.2.1 木质纤维素的主要预处理方法.....	2
1.2.2 木质纤维素预处理工艺发展.....	4
1.3 木质纤维素预处理反应器.....	4
1.3.1 木质纤维素预处理反应器概述.....	4
1.3.2 木质纤维素浆液流变学性质研究进展.....	6
1.3.3 螺带搅拌桨.....	10
1.4 计算流体力学.....	10
1.4.1 计算流体力学在搅拌反应器研究中的应用.....	10
1.4.2 计算流体力学求解原理.....	11
1.4.3 计算流体力学数值模拟的过程.....	11
1.5 本文研究的内容和意义.....	12
1.5.1 本文研究的目的与意义.....	12
1.5.2 本文研究的主要内容.....	13
第 2 章 搅拌预处理反应器的冷模试验研究.....	14
2.1 引言.....	14
2.2 材料和方法.....	15
2.2.1 试验材料.....	15
2.2.2 主要试验仪器和设备.....	15
2.2.3 试验方法.....	17
2.3 结果与讨论.....	20
2.3.1 预处理前后颗粒粒径的变化.....	20
2.3.2 玉米秸秆与水分的预混合试验.....	20
2.3.3 不同装料量对混合过程的影响.....	21
2.3.4 不同终了含湿量对混合过程的影响.....	24
2.3.5 搅拌器转速对混合过程的影响.....	26
2.3.6 颗粒粒径分布对混合过程的影响.....	31
2.3.7 大尺度搅拌槽的冷模试验.....	34
2.4 小结.....	37

第 3 章 流变学性质的表征.....	39
3.1 引言.....	39
3.2 材料与方法.....	39
3.2.1 材料.....	39
3.2.2 试验方法.....	39
3.2.3 数值方法.....	40
3.3 有效表观粘度 $\eta_a$ .....	41
3.3.1 搅拌器功率准数的计算.....	41
3.3.2 搅拌桨几何参数数群 $C$ 的计算.....	43
3.3.3 物料表观粘度的计算.....	45
3.4 全槽有效表观剪切速率的计算.....	45
3.4.1 有效表观剪切速率的提出.....	45
3.4.2 Metzner 常数 $K_s$ .....	46
3.5 幂律模型参数的拟合.....	47
3.5.1 流变指数的 $n$ 的拟合.....	47
3.5.2 稠度系数 $K_{pl}$ 的拟合.....	48
3.6 含湿量对幂律参数的影响.....	49
3.6.1 含湿量对搅拌扭矩的影响.....	49
3.6.2 含湿量对幂律模型参数的影响.....	50
3.7 小结.....	52
第 4 章 搅拌预处理反应器的 CFD 研究.....	54
4.1 引言.....	54
4.2 计算流体力学模拟流程.....	54
4.2.1 搅拌反应器的几何结构.....	55
4.2.2 网格划分与无关性验证.....	56
4.2.3 搅拌桨旋转的模拟方法.....	58
4.2.4 混合时间的模拟方法.....	58
4.3 结果与讨论.....	59
4.3.1 试验功率与计算模拟功率的对比.....	59
4.3.2 CFD 模型中示踪剂响应曲线与冷模试验监测点含湿量变化曲线的对比.....	61
4.4 小结.....	65
第 5 章 结论与展望.....	66
5.1 结论.....	66
5.2 展望.....	67

---

参考文献..... 68

## 符号说明

	搅拌桨直径, mm
	搅拌槽直径, mm
	同轴圆柱等效直径,
$e$	mm
	弗鲁德准数, 无量纲
$r$	
	稠度系数, Pa S <sup>n</sup>
$pl$	
	Metzner 常数, 无量
$s$	纲
	螺带搅拌桨浸入高
	度, mm
	搅拌扭矩, N m
	流变指数, 无量纲
	搅拌转速, rev/s 或
	rev/min
	搅拌器功率准数, 无
$p$	量纲
	螺带数量, 无量纲
$r$	
	搅拌功率, w
	搅拌雷诺数, 无量纲
$e_m$	
	螺带桨螺距, mm
	螺带桨直径比, 无量
$e$	纲
	螺带桨宽度, mm
希腊字母	
	有效剪切速率, s <sup>-1</sup>
$eff$	
	牛顿流体粘度, Pa S
	表观粘度, Pa S

$\rho$  校正用流体密度,  
' kg/m<sup>3</sup>  
, ' 松散堆积密度, kg/m<sup>3</sup>



## 第 1 章 前言

### 1.1 纤维素乙醇生产工艺

约四十年前,木质纤维素原料的生物降解第一次被提出,这种以生物酶作为催化剂的降解方式具有反应底物单一、副产物较少,并能极大的减少对后续工艺的抑制作用等优点。图 1.1 表示的是以玉米秸秆为原料的典型的纤维素乙醇的生产工艺流程,其主要包括以下 5 个工段<sup>[1-4]</sup>。

#### (1) 原料的前处理工段

玉米秸秆原料主要包括玉米芯、茎叶和玉米壳三部分。玉米秸秆的前处理工段主要分为三个工序:收集、粉碎和储存。玉米秸秆的收集主要是将秸秆在田间打捆之后,由卡车运送至工厂,在拆包之后,还要经过清洗台将秸秆中的沙砾和灰尘洗掉,必要时还要通过磁性分离器将秸秆中的金属物质除去;清洗好的玉米秸秆会被运送至粉碎机进行破碎以降低物料的尺寸;由于玉米秸秆的收获期非常短,还需要有大量的场地进行长期储存。

#### (2) 原料的预处理工段

如果木质纤维素原料没有经过预处理,则以生物酶作为催化剂的转化反应将会进行的非常缓慢。因此,预处理的目的是溶解纤维素原料中的部分木质纤维素,同时降低纤维素的结晶度,将其“暴露”在外面更利于纤维素酶解反应的进行。预处理后的物料产生了大量的对糖化和发酵过程具有抑制作用的抑制物(如糠醛和羟甲基糠醛等),还要使用特定的方法对物料进行脱毒处理,如闪蒸和生物脱毒;此外,还要对预处理后的物料进行冲洗、挤压和“过碱化”处理。

由于预处理效果的好坏直接影响到后续水解和发酵工艺能否高效的进行,且预处理过程中蒸汽与稀酸的加入量也直接影响到整个后处理过程的含酸废水处理及能量消耗,因此,预处理工段是整个生产纤维素乙醇生产工艺中最为重要的阶段,其成本也约占到整个乙醇生产成本的 18%<sup>[5]</sup>。

#### (3) 糖化与发酵阶段

该工段主要包括两个操作过程:一是使用纤维素酶将纤维素等成分转化为可利用的糖的糖化操作;二是将获得的葡萄糖和其他可溶性糖通过发酵而产生乙醇的操作。也可将这两个操作过程结合起来进行,这种工艺称之为同步糖化与发酵。

#### (4) 乙醇产品的回收工段

此工段目的是从发酵液中回收乙醇并进行其他固体和水的回收,包括精馏、脱水、蒸发和固液分离等操作。

#### (5) 后处理工段

此工段主要包括两个操作过程:一是废水处理(Wastewater Treatment):将工艺中所产生的废水进行有氧或者厌氧消化处理;二是木质素残余物的处理操作:将工艺过程中的

残余固体送进燃烧室进行燃烧处理，可用来发电或者产生蒸汽等。

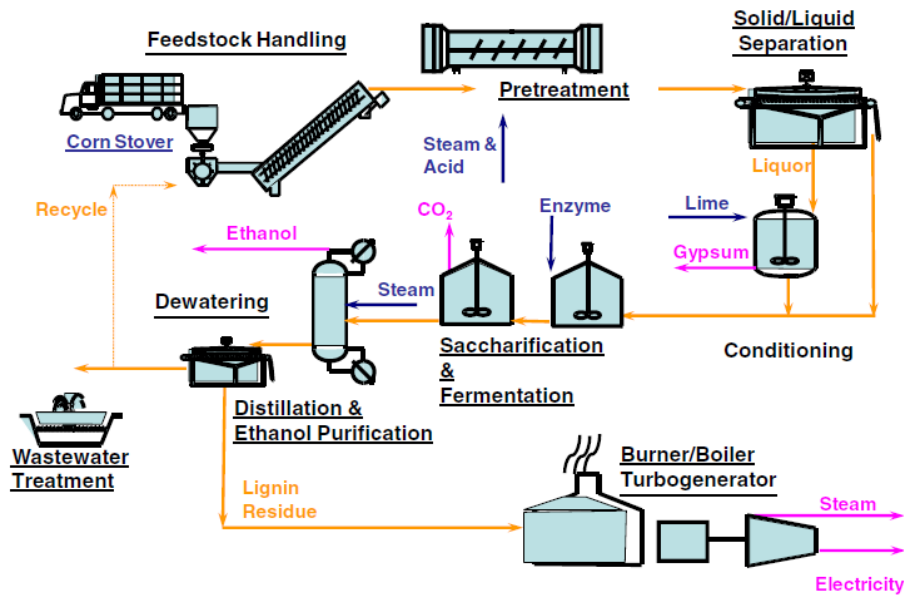


图 1.1 木质纤维素乙醇生产工艺流程图<sup>[6]</sup>

Fig. 1.1 Flow chart of lignocellulosic ethanol production

## 1.2 木质纤维素的预处理方法和进展

由于木质素的存在、纤维素结晶度和颗粒粒度等原因，使得木质纤维素原料中纤维素和半纤维素的可降解性很低。因此，预处理的作用主要是破坏纤维素周围的碳水化合物-木质素“护盾”，降低其自然抗性。预处理技术必须考虑工艺中糖释放的模式和固体含量等因素，其必须与整个的生产工艺所用到的原料、酶、微生物相互协调和兼容，研究者已做了大量的试验研究来寻找合适、经济且简便易行的预处理方法。

考虑到预处理工艺对产品成本经济性的重要性，一种有效的预处理工艺必须包含以下所列出的绝大数的特性：（1）预处理工艺中、后续工艺中和与发酵调节中所用到的化学品必须容易获得；（2）鉴于生物质颗粒的磨碎是非常耗能的工艺，预处理必须能有效的处理具有相对偏大颗粒粒径分布的木质纤维素原料；（3）预处理工艺中的半纤维素糖类产率应接近 100%；（4）由预处理和酶法水解所得到的糖浓度须达 10% 以上以保证后续的发酵过程获得足够的乙醇浓度；（5）预处理反应器制造成本要小，且要最大可能的降低其体积，不需要用特殊的材料来防腐蚀；（6）预处理工艺所得到的水解产物的调节工序必须是低成本、高产率；（7）经过预处理所得到的纤维素等主要成分必须利于水解反应的进行，在纤维素酶量为 10 FPU/g 纤维素时，持续少于五天最好是少于三天时的纤维素水解率须达到 90%；（8）木质素和其他一些化学成分必须能够回收以转化为其他有价值的副产品；（9）预处理中所需要的能量必须较低以降低成本<sup>[5]</sup>。

### 1.2.1 木质纤维素的主要预处理方法

在生物质工业中，众多的研究者和单位对木质纤维素的预处理方法进行了很多研究，以往的文献中主要的木质纤维素的预处理方法归结起来可分为以下几类。

### (1) 机械预处理工艺

机械预处理 (Mechanical pretreatment) 即使用机械的方法减小木质纤维素的颗粒尺寸和降低纤维素的结晶度, 主要操作是磨碎, 这种方法增加了颗粒的表面积, 降低了木质纤维素物料内高分子的聚合度。有文献报道其能将纤维素和半纤维素的水解率提高 5%-25%, 降低降解时间 23%-59%<sup>[7]</sup>。但是, 机械磨碎是一种能耗非常高的工艺, 加之日益升高的能源价格, 其并不是经济上可行的一种预处理方式。

### (2) 热预处理工艺

顾名思义, 热预处理 (Thermal pretreatment) 就是将木质纤维素生物质进行加热处理, 处理温度一般在 150-180℃ 之间, 或者更高的温度, 加热过程中半纤维素水解生成酸; 当温度超过 160℃ 时, 除了半纤维素, 部分木质素也发生了水解。热预处理过程中, 所生成的一些可溶的纤维素、半纤维素和木质素的化合物会生成一些酚类、醛类以及杂环化合物 (如香草醛、香草醇、糠醛和羟甲基糠醛等), 这些产物会对发酵过程产生抑制作用。

热预处理的主要有以下两种作用方式: (1) 蒸汽处理和蒸汽膨爆: 蒸汽预处理过程为将生物质放入大的反应槽中施以高温高压 (240℃) 的蒸汽, 处理相应的时间, 然后, 释放蒸汽并将物料迅速冷却。蒸汽膨爆与蒸汽处理的主要区别在于, 蒸汽膨爆处理后, 压力迅速的释放且物料迅速的冷却; (2) 液态热水预处理 (Liquid hot water, LHW): 这种热处理方法是使用液态热水替代上述两种过程中所使用的蒸汽, 同时使 pH 保持在 4.0-7.0 之间, 以减少抑制物的生成。LHW 预处理和蒸汽预处理的不同之处在于生成的可溶性产物的量和浓度, LHW 预处理法所生成的可溶性的产物量要高于蒸汽预处理法, 但是浓度较蒸汽预处理法低, 这是由于 LHW 法在预处理过程中加入了大量的水<sup>[7]</sup>。

热预处理方法的优势是可以除去原料中大部分的半纤维素, 使更多的纤维素“暴露”在外面, 但是也增加了糠醛和羟甲基糠醛和一些可溶性酚类化合物等抑制物的生成几率。

### (3) 稀酸预处理工艺

在生物质燃料的生产中, 稀硫酸预处理工艺已经有数十年的研究历史了。美国国家可再生能源实验室 (The National Renewable Energy Laboratory, NREL), 世界上最大的生物质乙醇研究单位, 也倾向于使用稀酸预处理工艺, 这可能是因为这种工艺中所产生的 80%-90% 的半纤维素糖类都是可回收的。各种研究表明, 虽然在稀酸预处理过程中, 少部分的木质素被溶解掉了, 但是反过来这可以增加纤维素对纤维素酶在接受性。也有研究表明, 反应器中压力“爆发式”的释放对预处理效果的贡献不大<sup>[5, 8, 9]</sup>。

木质纤维素酸预处理的一般条件为: 稀硫酸浓度为 0.5-2.5%, 反应温度为 120-200℃ 不等, 停留时间一般少于 60 min<sup>[10]</sup>。这种方法能很有效的将半纤维素水解为可溶性的糖, Donohoe 和 Johnson 报道<sup>[11]</sup>在酸预处理过程中仅很少部分的木糖被水解, 但是扫描电镜显示木质素的结构已经被破坏; 大部分的半纤维素被水解成了可溶性单糖 (木糖、甘露糖、阿拉伯糖和葡萄糖等), 同时, 酸预处理过程中也生成了乙酸, 并可形成一些对后续的发酵过程有抑制作用的产物 (如糠醛和羟甲基糠醛等)<sup>[12]</sup>。

早在 2000 年成立的生物质加工联合体 (Consortium for Applied Fundamentals and

Innovation, CAFI)就使用相同的木质纤维素原料、酶加量和分析方法系统的比较了不同预处理工艺的优劣性,稀酸高温预处理工艺被认为是最有商业应用前景的预处理过程<sup>[5]</sup>。

### 1.2.2 木质纤维素预处理工艺进展

预处理技术是生物质能源以及其他以木质纤维素为原料的产品生产过程中的关键技术。大部分的预处理工艺都需要在高温下进行,表 1.1 列出了一些文献研究中预处理工艺所使用的木质纤维素原料和固体含量。可以看出,大部分的预处理过程的固体含量都在 10%左右。分析现在的预处理技术,总结起来,主要有以下几个不足之处:(1)过程需要大量的新鲜水,稀酸溶液的量约是固体质量的 6-10 倍,且产生了大量的含酸废水;(2)需要大量的高压蒸汽维持预处理过程所需要的高温,能耗较大;(3)反应过程中产生了大量的降解产物如呋喃化合物和酚类化合物等,可溶解的有机酸(如乙酸等)以及腐蚀性产物(如金属离子等),这些都对下游发酵过程有抑制作用,这些抑制产物必须通过碱化、蒸汽剥离等其他方法去除;(4)反应是在酸性的腐蚀环境中进行的,对反应器设备的制造材料具有较高的要求,从而增加了成本<sup>[7, 13]</sup>。

因此,预处理技术要降低成本,就要减少过程中所需要的新鲜水的量,就要降低反应器的尺寸、降低过程中的能耗,可见,高固体含量下的生物质预处理是预处理技术的发展趋势,这样不仅可以减少蒸汽的使用量,还可以极大的减少预处理过程中所排放的酸性废水的量。

## 1.3 木质纤维素预处理反应器

### 1.3.1 木质纤维素预处理反应器概述

如何降低纤维素乙醇的生产成本是其工业化生产的关键,包括 NREL 在内的众多研究机构和研究者提出其中一个降低纤维素乙醇成本的可行措施是尽可能的减小生产过程中的新鲜水用量,这样可以降低纤维素生物质上游工段(预处理、糖化和发酵等)所使用的各种反应器的体积,从而减少设备投资等操作费用,同时较少用的水还可以降低乙醇产品蒸馏过程中的能耗,降低下游工段中废水的回收和处理成本<sup>[14-17]</sup>。

在以往的研究中,关于木质纤维素预处理反应器的研究并不多,大部分研究者的目光都集中在了对木质纤维素预处理工艺的研究和条件的优化上。这里我们总结了不同研究者进行预处理研究时所使用的反应器。

帕尔反应器(Parr Instrument Company)是在木质纤维素预处理中使用的比较多的一种反应器,其具体结构示意图见图 1.2,反应器的容积从 300-3750 mL 不等,最高可承受的压力为 20 MPa。可以看出,反应器装配有平叶式搅拌桨和冷却系统。Esteghlalian 等<sup>[18]</sup>在帕尔反应器中进行了原料为玉米秸秆、白杨木和柳枝稷的稀硫酸预处理研究,其所使用的反应器容积为 600 mL,固体含量为 10% (w/w)。2002 年,Garrote 等<sup>[19]</sup>在体积为 3750 mL 的帕尔反应器中进行了玉米芯的预处理研究。

还有一些研究者使用的是自行开发的反应器,这种类型的反应器一般体积较小且没有搅拌装置。2005 年, Sun 等<sup>[20]</sup>在一个高压反应釜中进行了稀酸预处理小麦秆和狗牙草的

研究，其物料的固体含量为 10% (w/w)，反应温度为 121℃。

表 1.1 中总结了典型的预处理研究所使用的反应器。由表 1.1 可以看出，以前的预处理研究中仅帕尔反应器装有搅拌桨，其搅拌桨型式为六斜叶涡轮式，所处理的固体含量仅为 10% (w/w)左右；此外，大部分研究者所使用的稀酸预处理反应器为自行开发的，且均体积较小。2011 年，Zhang 等<sup>[21, 22]</sup>针对传统稀硫酸预处理方法中废水多、能耗高的缺点，在自行设计的圆柱形静态反应器中开发出了极限高固含量下“干式”高温蒸汽稀硫酸预处理技术，其所使用的为圆柱形的无搅拌静态反应器，这种预处理方法能极大的降低水和蒸汽用量，降低能耗，其预处理结束后的预处理物料固体含量为 50.1%，可以直接用来做高固体含量同步糖化和发酵，该工艺具有很强的经济性和工业应用价值。

前面我们提到，大部分研究者对木质纤维素预处理的研究都集中在条件和方法的优化上，对于预处理反应器的研究没有给予足够的重视。基于对预处理工艺的进展和分析，高固体含量下的木质纤维素预处理技术是预处理工艺的发展趋势。而现在预处理研究中所使用反应器都是针对较低固体含量的，高固体含量下的预处理过程存在很严重的传热和传质问题：高温蒸汽遇固体玉米秸秆颗粒物料冷凝，秸秆吸水结团，进而使蒸汽在反应器中不能均匀分布，形成温度梯度，严重限制了对流传热，使得同一批反应器中物料的预处理效果不同，进而影响后续的糖化和发酵过程。机械搅拌能强化传热和传质，但是现在预处理反应器中所使用的平叶桨并不适合较高固体含量下的生物质浆液或颗粒的搅拌。

因此，开发适合较高固体含量下的木质纤维素预处理反应器具有重要的意义。不仅可以提高木质纤维素的预处理效果，还可以极大的降低预处理的成本，对整个木质纤维素利用工业的发展都是至关重要的。

表 1.1 文献中报道稀酸预处理的典型反应器

Table 1.1 Reactor reported in part of the literature for pretreatment of corn residues

References	Substrate	Reactor	Solid Content/ Solid liquid ratio
Garrote et al. <sup>[19]</sup>	Corn cob	Parr: Double six-blade turbine impeller, 600 mL	1:8
Torget et al. <sup>[23]</sup>	Corn Stover	Parr: Carpenter 20 Cb-3, Moline, 1 L	10% (w/w)
Esteghlalian et al. <sup>[18]</sup>	Corn Stover	Parr: Double six-blade turbine impeller, 1 L	10% (w/w)
Tucker et al. <sup>[24]</sup>	Corn Stover	NREL digester	55-63% (w/w)
Schell et al. <sup>[25]</sup>	Corn Stover	Vertical pulp digester	20% (w/w)
Saha et al. <sup>[10]</sup>	Wheat Straw	Autoclave without impeller	7.83% (w/v)
Zhu et al. <sup>[26]</sup>	Corn Stover	Percolation reactor without impeller	9-14% (w/w)
Yan et al. <sup>[27]</sup>	Corn Stover	DCF reactor without impeller, 182 mL	---
Zhang et al. <sup>[21]</sup>	Corn Stover	Selfmade cylinder	2:1

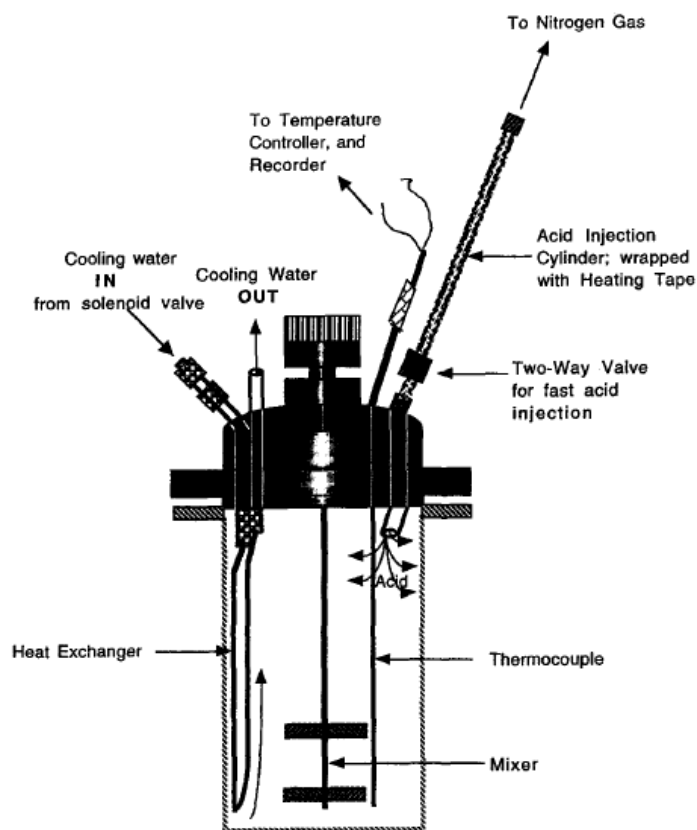


图 1.2 带有搅拌和冷却系统的不锈钢帕尔反应器（型号：4563）

Fig. 1.2 Stainless-steel Parr reactor (#4563) with mixer and cooling coil

### 1.3.2 木质纤维素浆液流变学性质研究进展

对所处理的流体或者物料的流变学性质的研究和掌握是进行反应器开发和工艺设计的前提条件，这样才能设计合适的搅拌桨，不仅能提高传热和传质的效率，还能极大的减少对反应器的磨损，降低操作过程中的能量消耗。

生产过程中尽可能少的新鲜水用量也就意味着预处理与后续的糖化和发酵工段须在条件所允许的尽可能高的固体含量下进行，随着研究技术的不断发展，玉米秸秆等木质纤维素为原料的乙醇生产工艺中的不溶固体含量也在不断的增加。2003年NREL发布的生物能源技术报告<sup>[28]</sup>，是以玉米秸秆为原料生产纤维素乙醇，其模型中预处理后玉米秸秆不溶固体的含量为10% (w/w)以上；2002年，Tolan等<sup>[29]</sup>报道由加拿大艾欧基公司（Iogen Corporation）所开发的纤维素乙醇生产过程最高不溶固体含量可达到15%-20% (w/w)；2002年，De Bari等<sup>[30]</sup>研究了基于白杨木原料的纤维素乙醇实验室规模的生产工艺，最高固含量为16% (w/w)；Mohagheghi等<sup>[14]</sup>开发的以稀酸预处理后小麦秸秆为原料的纤维素乙醇同步糖化发酵生产工艺固含量可以达到24.4% (w/w)；2009年，Kristensen等<sup>[15]</sup>报道了初始固体含量为40% (w/w)下的木质纤维素的液化研究；2011年，Zhang等<sup>[17, 22]</sup>在带有螺带搅拌桨的新型反应器中研究了初始不溶固体含量高达40% (w/w)的纤维素乙醇生产工艺，其原料为高温稀酸预处理玉米秸秆。有研究者认为，基于纤维素的乙醇生产工艺不溶固体含量应该与基

于淀粉的乙醇生产工艺不溶固体含量相当, 约为33%-37% (w/w)<sup>[31]</sup>。

与任何事物一样, 高固体含量木质纤维素处理工艺有其优点, 也有其不可避免的缺点。工艺中所处理的木质纤维素物料为固体含量非常高的木质纤维素浆液, 为了设计合适的工艺和设备, 研究其流变学性质就显得尤为重要。

这种高固体含量纤维素颗粒浆液的流变学性质非常复杂, 具有很高的剪切应力和粘度<sup>[32]</sup>, 使得反应器中物料间热量和质量的传递变得不可预测性, 从而影响糖化和发酵工段的效率, 同时也会增大整个过程的能量消耗。

众多研究发现, 影响木质纤维素浆液流变学性质和生产工艺能耗、成本的主要因素是固体含量 (Solids Concentration/Content)。例如, 2003 年 Fan 等<sup>[33]</sup>发现造纸浆液搅拌的能量消耗随浆液中不溶固体含量的增加而迅速的增加: 固体含量增加 4%, 而能量消耗则增加了 5 倍之多。研究表明, 皂土凝胶、发酵浆液和造纸浆液等流体的屈服应力是与浆液中的固体含量 (如体积分率或者干固体质量分率) 成幂律函数关系, 其幂律指数随浆液的不同从 1 到 3 不等; 还有一些浆液的屈服应力随固体浓度的不同而成指数变化, 如二氧化钛悬浮液、废水淤泥浆和玉米秸秆颗粒悬浮液等; 2007 年, Laera 等<sup>[34]</sup>发现极低固体含量浆液 (<2.3%, w/v) 的屈服应力与固体颗粒的浓度是呈线性关系。可见, 流变学性质对浆液本身不溶固体含量敏感这一特性也并非玉米秸秆等木质纤维素浆液独有的性质。

物料的流变学性质对生产过程中所使用的设备 (反应器、输送管道等) 的设计、操作和放大起到决定作用, 2007 年, Wyman 等<sup>[35, 36]</sup>研究表明工艺的操作成本占到了木质纤维素燃料生产成本的三分之二以上。因此, 对预处理玉米秸秆物料的流变学性质的研究是开发和建立技术上和经济上可行的纤维素乙醇生产工艺的前提条件。

近年来, 研究者对预处理木质纤维素生物质特别是预处理后玉米秸秆的流变学性质的研究表现出了越来越浓厚的兴趣, 也有一些测量方法与流变学性质的表征模型被开发了出来。但是, 木质纤维素生物质浆液的壁面滑移、固体含量较低时的颗粒沉降和测量过程中水的蒸发等特性也为其流变学性质的精确测量提出了挑战。

一直以来, 流变学生物质浆液的流变学性质的研究对象均是糖化以及发酵过程中的浆液, 也有很多的研究者使用不同的测量方法对其进行了研究和测量, 主要有两种方法: 一是流变仪器的直接测量方法; 二是间接测量方法。

#### 1.3.2.1 流变仪器的直接测量

平行平板粘度仪是使用较为广泛的粘度测量仪器, 在生物质浆液流变学性质的研究中也得到了应用, 其主要结构为: 两层圆形平板, 其中上层平板为旋转式, 下层平板固定且直径要大于上层平板。2009 年, Viamajala 等<sup>[37]</sup>使用布鲁克菲尔德 R/S 型流变仪 (布鲁克菲尔德工程试验公司, 美国), 其所使用的上层平板直径为 25 mm, 下层为 50 mm, 研究了不溶固体含量在 10%-40% (w/w) 的玉米秸秆浆液的流变学性质并使用卡森模型 (Casson model) 对这种剪切变稀性质进行了表征; 该研究发现, 预处理和未预处理玉米秸秆浆液的表现粘度均随着不溶固体含量的增加而增加; 相同不溶固体含量下, 预处理玉米秸秆浆液的表现粘度要小于未预处理的玉米秸秆浆液, 这是由于预处理使玉米秸秆的颗粒直径变

小而导致的,同时作者也使用平行平板粘度仪测定了不溶固体含量高于 40% (w/w)的玉米秸秆浆液,发现此时其表观粘度并不随着不溶固含量的变化而变化。

另外一种较为经常使用的流变性质测量仪器如图 1.3c 所示,装配有数量不等的叶片。2010 年, Dunaway 等<sup>[38]</sup>使用 MCR300 型流变仪 (Anton Parr Inc., 奥地利安东帕有限公司) 测量了预处理玉米秸秆浆液在糖化过程中的流变学性质,其不溶固体含量为 10%-25% (w/w),作者将 7 天的糖化过程分为两个阶段:(1)前 8 h,不溶固体含量和浆液的表观粘度均变化较快;(2)8 h 以后至糖化过程结束,浆液的不溶固体含量较低,此时粘度并不随不溶固体含量的变化而变化。2007 年, Dasari 和 Berson<sup>[39]</sup>使用带有叶片的粘度仪测量了木屑浆液的粘度,并研究了粒度对水解效率的影响;2007 年, Rosgaard 等<sup>[40]</sup>测量了大麦杆浆液的粘度,研究了加料量对水解效率和粘度的影响,其最高不溶固体含量均在 15% 以内;2010 年, Ehrhardt 等<sup>[41]</sup>也使用这种流变性质测量仪器测定了酸水解玉米秸秆浆液的流变学性质,并分析了不同固含量的影响;2011 年, Samaniuk 等<sup>[42]</sup>使用这种流变仪测定了最高固含量在 35% 时的玉米秸秆悬浮液的流变学性质。

2009 年, Knutsen 等<sup>[43]</sup>总结了以上几种测量方法的优缺点,发现具有叶片的流变仪能较为准确的测量较高固体含量下的生物质浆液的流变学性质,这主要是因为生物质浆液中的固体含量比较大时,具有叶片的流变仪器能够促使颗粒悬浮,从而增加了测量的准确性。

### 1.3.2.2 间接测量方法

另外一种测量方法不是直接获得物料的流变学性质,而是通过一系列的参数求解获得,本研究中称之为间接测量方法,具体步骤在第3章中介绍。1986年, Kembrowski等<sup>[44]</sup>使用间接测量方法测定了有固体存在是的发酵浆液的流变学性质;2003年, Pimenova and Hanley等<sup>[45, 46]</sup>使用装备有搅拌桨(一般为螺带搅拌桨)的流变仪测定了固含量在5%-30%之间的玉米秸秆悬浮浆液的流变学性质,并使用幂律模型对其进行了拟合,同时分析了不同固体含量下的悬浮浆液的幂律参数变化,其所使用的搅拌桨的具体型式见图1.3d。

还有一些与生物质浆液较为相似性质的物料的流变学研究也为其流变性测量提供了借鉴。在造纸工业中,对木浆纤维悬浮液的流变学性质的研究已经比较成熟,其与生物质浆液具有相似的流变学性质。例如,2004年, Bennington等<sup>[47]</sup>使用装有挡板的同轴圆柱型流变仪研究了其流变学性质;2004年, Houchin等<sup>[48]</sup>使用了螺带桨式流变仪测定了酒糟浆液的流变学性质。

表1.2总结了不同研究单位和研究人员所使用的生物质浆液流变学性质测量仪器和其最高的不溶固体含量。可以看出,在以往的研究中最高固含量为40% (w/w)左右。

研究发现,传统的流变测量仪器存在很多缺点:(1)纤维素生物质浆液中大量的纤维状颗粒,并且其粒度与宽高比分布不均匀,易沉降;(2)从表 1.2 可以看出传统的流变性质测量仪器尺寸均比较小,纤维状颗粒很容易造成间隙的堵塞;这些缺点会影响对生物质浆液流变学性质的精确测量,给测量结果造成很大的误差。

表 1.2 不同机构和研究者所使用的流变仪器和测量方法

Table 1.2 Instruments and measurement tools used by different laboratories or researchers

Laboratory/Researcher	Solids content	Rheometer	Tool(s)/mm
NREL	20%	Bohlin Gemini HR Nano	4-blade vane: $h=30, d=14, \text{gap}=7$ Parallel plates: $d=25, \text{gap}\approx 4$
CSM <sup>[49]</sup>	17%	TA Inst. AR-G2	4-blade vane: $h=42, d=28, \text{gap}=1$
U. Maine	20%	Bohlin CVO	Parallel plates: $d=40, \text{gap}\approx 3$
Viamajala et al. <sup>[37]</sup>	40%	Brookfield R/S	Parallel plates: $d=25, \text{gap}\approx 15$
U. Wisc. & FPL <sup>[49]</sup>	30%	Brabender Plasticorder	Impellers: $r_{\text{bowl}}=19.55, r_{\text{implr}}=18.7$
Dasari & Berson <sup>[39]</sup>	15%	Anton Parr Physic MCR 300	6-blade vane: $h=30, d=16, \text{gap}=1$
Dunaway et al. <sup>[38]</sup>	25%	Anton Parr Physic MCR 300	6-blade vane: $h=24.8, d=21, \text{gap}=6$
Ehrhardt et al. <sup>[41]</sup>	25%	Brabender Plasticorder	----
Rosgaard et al. <sup>[40]</sup>	15%	DV-III Ultra	Vane(No.72)
Wiman et al. <sup>[50]</sup>	25%	StressTech Inst.	4-blade vane: $h=45, d=10.5, \text{gap}=2.1$
Pimenova & Hanley <sup>[45]</sup>	30%	Impeller Device	Helical impeller: $d=40; \text{pitch}=20$

CSM: Colorado School of Mines; U.Mainie: University of Maine; FPL: Forest Service Forest Products Laboratory.

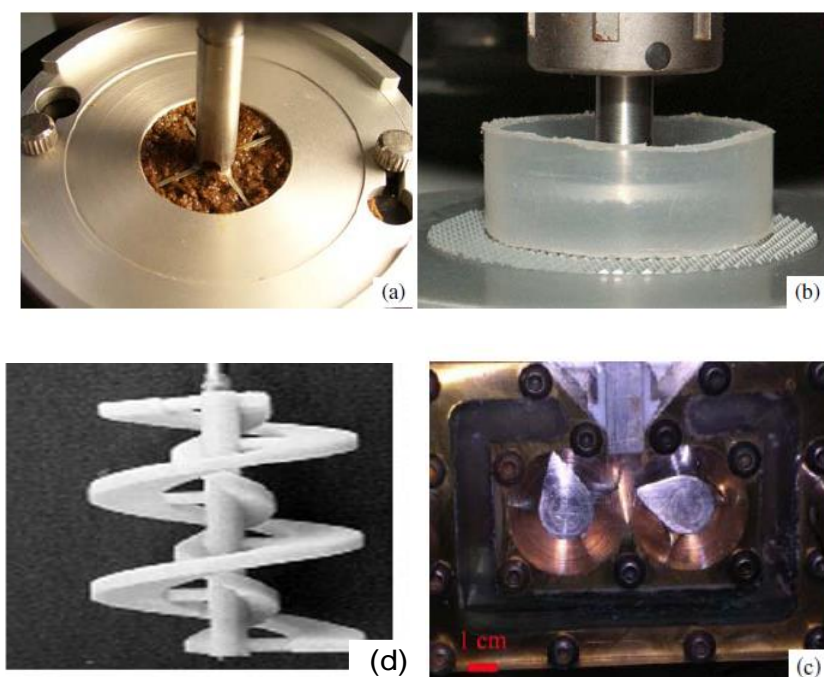


图 1.3 不同研究单位所使用的生物质浆液流变学性质测量仪器图

Fig. 1.3 Photograph of the viscometers used by different researchers

### 1.3.3 螺带搅拌桨

高固体含量和高粘度物料的混合一直是化工单元操作中非常常见的操作。搅拌桨与搅拌槽间隙较小的搅拌桨型式能很好的在整个搅拌槽内实现循环,所以这种搅拌桨非常适合高粘度流体的搅拌和混合。<sup>[51]</sup>在这些小间隙的搅拌桨中,螺带搅拌桨被认为是最有效果的搅拌桨型式,图 1.5 总结了六种螺带-螺杆搅拌桨的主要型式。

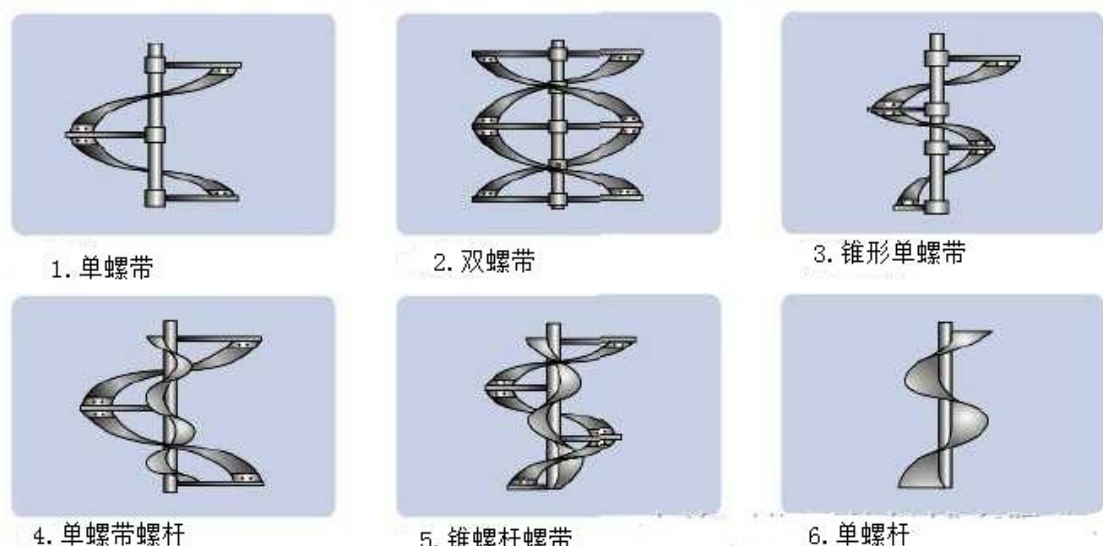


图 1.5 螺带-螺杆搅拌桨的主要型式

Fig. 1.5 Main types of helical ribbon impeller

## 1.4 计算流体力学

### 1.4.1 计算流体力学在搅拌反应器研究中的应用

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 是以离散化的数值方法和算法为基础,解决涉及到流体流动、传热等问题的一个流体力学分支<sup>[52]</sup>。20 世纪 80 年代开始,借助于计算机硬件和软件技术的发展,计算流体力学技术获得大范围应用,开始有学者将这种方法应用到搅拌式反应器这种古老的化工单元操作过程中<sup>[53]</sup>。

2007 年, Iranshahi 等<sup>[54, 55]</sup>在装备有组合搅拌桨的反应器中研究了其处理高粘度牛顿流体时的流体运动状态和混合过程。他们发现组合式的搅拌桨在有挡板存在的条件下表现出了比较好的效果。2008 年, Devals 等<sup>[56]</sup>使用 CFD 工具研究了这种组合式搅拌桨在处理高粘度牛顿和非牛顿流体时的流体的流动形态,主要分析了搅拌桨离底的距离和搅拌雷诺数对功率和剪切速率分布的影响。

2001 年, Yao 等<sup>[57]</sup>使用数值分析的方法研究了装备有标准型式的 Maxblend 搅拌桨和双螺带搅拌桨的搅拌槽中的分散混合情况,结果表明双螺带搅拌桨并不是一种很好的分散用搅拌桨。2006 年, Aubin 和 Xuereb<sup>[58]</sup>使用计算流体力学工具研究了装备有斜叶桨的搅拌槽在搅拌层流区的流动形态,他们研究了不同斜叶桨型式对搅拌槽中流动状态的影响。

1999 年, Bertrand 等<sup>[59]</sup>使用数值模拟的方法预测了处理物料的粘弹性对功率的影响, 他们将数值模拟的结果与装有螺带搅拌桨的搅拌槽中的试验数据进行了对比。2006 年, Alliet-Gaubert 等<sup>[60]</sup>使用 CFD 模型研究了带有多层搅拌桨中的搅拌槽中的单相流, 作者总结了分析输出结果的不同方法。2006 年, Barailer 等<sup>[61]</sup>使用 CFD 模型分析了装有转子的混合器中在层流状态下的混合情况, 他们研究了这种混合器在处理高粘度的牛顿流体时的混合频。2000 年, Pedrosa 和 Nunhez 等<sup>[62]</sup>使用 CFD 工具研究了带有锚式搅拌桨的搅拌槽中在层流状态下的混合情况, 在这个研究中作者开发了一个针对锚式搅拌系统的非常详细的计算流体力学模型。2006 年, Delaplace 等<sup>[63]</sup>开发了一种基于库艾特流分析方法的模型去预测螺带-螺杆搅拌系统在处理非牛顿流体时的功率消耗, 这个模型的适用范围是层流区, 在这篇文献中, 研究者将自己的研究结果与之前的大量的文献研究结果做了比较以证明模型的适用性。

#### 1.4.2 计算流体力学求解原理

流体流动的控制方程都是基于质量、动量和能量三大守恒方程, 见式 (1-1) 和 (1-2)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1-1)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = \rho g - \nabla P' + \nabla \cdot (\tau) \quad (1-2)$$

其中  $\tau$  可用式 (1-3) 计算。

$$\tau = \mu((\nabla U + \nabla U^D) = \frac{2}{3} \nabla \cdot UI) \quad (1-3)$$

式 (1-1) 表示的三维质量守恒方程的矢量形式, 式中  $U$  表示的是时均速度矢量,  $\rho$  表示液体的密度,  $\nabla \cdot ( )$  表示对括号中的变量进行散度运算。式 (1-2) 表示的动量守恒方程, 其中  $\tau$  表示的是应力张量,  $g$  为重力加速度, 单位为  $\text{m s}^{-1}$ ,  $I$  为单位张量,  $P'$  为时均压强,  $D$  为搅拌槽直径 (m) <sup>[53]</sup>。

求解牛顿流体流动过程的质量和动量守恒方程可以统一表示为纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes, N-S) 方程。为计算方便, Ranade 等<sup>[64]</sup>总结了应用于描述搅拌反应器中的流体介质流动的 N-S 方程的形式, 见式 (1-4)。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial(rU\phi)}{r\partial r} + \frac{\partial(V\phi)}{r\partial \theta} + \frac{\partial(W\phi)}{\partial z} = S_\phi + \frac{\partial}{r\partial r}(r\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{\partial}{r\partial \theta}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{r\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}) \quad (1-4)$$

#### 1.4.3 计算流体力学数值模拟的过程

计算流体力学数值模拟过程一般有以下四个步骤: (1) 建立能够代表解决物理问题或者工程问题的数学模型; (2) 对所建立数学模型中的方程进行准确、快速的求解; (3) 根据前面所确立的求解方法和条件进行求解; (4) 结果的输出与处理。

前面我们提到的商业计算流体力学软件, 就是应用比较成熟的 CFD 数值计算方法, 将前述四个步骤整合起来实现流体力学的数值模拟计算和分析。其求解过程也必然包含上述四个步骤, 图 1.6 表示的是商业软件 Ansys CFX 求解的软件模块和流程。

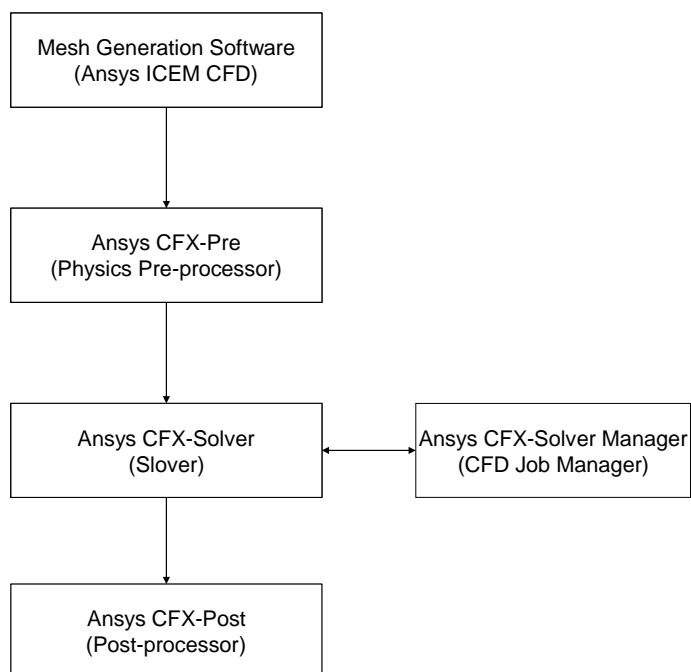


图 1.6 CFD 分析计算中用到的 Ansys CFX 的软件模块<sup>[65]</sup>

Fig. 1.6 Five software modules that required to perform a CFD analysis

## 1.5 本文研究的内容和意义

### 1.5.1 本文研究的目的与意义

利用木质纤维素原料大规模生产乙醇或其他生物基产品,不仅能够满足当今世界经济快速发展对能源的需求,减少温室气体的排放,有效缓解化石能源对环境的污染,而且能够提高农民收入,有利于解决三农问题。但是由于当前的纤维素乙醇生产成本和能耗较高,缺乏竞争力,还没能出现真正商业化运作的纤维素乙醇生产企业。

如前所述,木质纤维素预处理是纤维素乙醇能否成功商业化的关键工艺过程。但是,现行预处理方式高用水量、高含酸废水排放和高耗能的缺点严重限制了其发展,提高工艺过程中固体的含量能很好的解决这些问题。但是由于木质纤维素物料具有高吸水性、高粘弹性的特点,在传统的简单的反应器中进行预处理,往往蒸汽遇冷的秸秆冷凝,物料吸水后结团,会在反应器内形成温度梯度,这样就会使得同一批次预处理的物料暴露在不同的温度下,从而造成生物质物料的预处理效果不同,对下游的糖化、发酵和乙醇提取等工段都会产生很大的影响。

本研究即是针对高固含量下的预处理过程进行搅拌式反应器的开发。本文首先通过冷模试验研究了影响玉米秸秆与水分混合的因素,为处理这种物料的搅拌反应器的开发和设计提供了依据;同时,本研究所使用的测定高固体含量木质纤维素物料的流变学性质的方法也消除了传统流变仪器的劣势,为含有固体颗粒悬浮浆液的流变学性质的测量提供了依据。本文研究旨在为高固体含量预处理过程反应器的开发提供可行的依据和方法,以强化

预处理过程,提高预处理效果并降低木质纤维素预处理的成本,推动纤维素乙醇的产业化。

### 1.5.2 本文研究的主要内容

本研究的对象是高固体含量下玉米秸秆预处理过程,着点于反应器设计开发和高固体含量下玉米秸秆物料的流变学性质的研究,主要有三个方面的内容。

(1) 本文首先在不同尺度的冷模搅拌槽中研究了影响玉米秸秆与水分混合过程的因素,包括装料量、颗粒粒径分布、含湿量和搅拌转速。

(2) 使用了间接的流变学性质测量方法(搅拌桨)分别对 0%、10%、20%、30%、40%和 50%含湿量下的玉米秸秆和预处理后玉米秸秆的幂律模型参数(流变指数和稠度系数)进行了测量,并分析了含湿量对幂律模型参数的影响;

(3) 使用计算流体力学软件 Ansys CFX11.0 建立了包含幂律模型在内的 CFD 模型,并根据冷模试验中所得到的功率和监测点含湿量响应变化对模型进行了验证,结果符合良好,此模型为反应器搅拌桨的优化和放大提供了有力的工具。

## 第 2 章 搅拌预处理反应器的冷模试验研究

### 2.1 引言

在第 1 章前言中, 我们知道, 预处理工艺是木质纤维素利用过程中最为关键的一步, 因为木质纤维素预处理的效果直接影响到后续的糖化、发酵以至于产物的分离和废水的处理等后处理工段。

木质纤维素稀酸预处理工艺被认为是最有商业应用前景的预处理过程, 但是传统的稀酸高温蒸汽预处理工艺需要大量的新鲜水并且在后期排放了大量的酸性废水, 同时需要耗费大量的蒸汽去维持预处理物料的温度等缺点。2011 年, Zhang 等<sup>[21]</sup>在自行开发的圆柱形钢制反应器中开发出了极限高固含量下的“干法”稀酸预处理技术, 所使用的预处理条件如表 2.1 所示, 这种方法有极大的优势: (1) 极大的降低了蒸汽的消耗, 降低了整个过程的能耗; (2) 预处理结束后没有含酸废水的产生; (3) 预处理结束后物料的总固体颗粒含量为 50.1%, 因此, 可以直接用来进行高固体含量同步糖化发酵。这种工艺过程提供了一种非常实用的木质纤维素预处理方法, 从而增加了纤维素乙醇生产的经济可行性。

表 2.1 极限高固体含量下“干法”稀酸预处理技术最优条件<sup>[21]</sup>

Table 2.1 Optimal conditions of “Dry” Pretreatment Method at high solids loading

预浸固液比 (w/w)	温度	硫酸浓度 (w/w)
2:1	190℃	2.5%

在进行“干法”稀酸预处理的过程中, 我们发现其同样存在着一些亟待解决的问题: (1) 预浸过程困难, 表 2.1 中显示, 预处理木质纤维素物料的预浸固液比为 2:1 (w/w), 可以计算出其初始总固体含量约为 66.67% (w/w), 玉米秸秆是纤维状物料, 具有极强的吸水性, 2.5% (w/w) 的稀硫酸是作为催化剂使用, 在预浸阶段需要将其与玉米秸秆均匀的混合以保证预处理效果, 现工艺是人工将稀硫酸与玉米秸秆混合, 既耗时费力, 不适合工业放大, 且混合状况还存在很大的随机性。(2) 预处理进行时, 静态反应器内温度分布不均, 高温蒸汽遇到冷的秸秆会冷凝, 而玉米秸秆吸水后会膨胀结团, 造成颗粒之间的孔隙率减小, 蒸汽会随机的成直流穿过堆积的秸秆, 限制了对流传热, 在静态反应器内形成温度梯度, 使预处理物料所暴露在不同的温度下, 从而造成同一批次物料的预处理效果不同。

机械搅拌是强化传热和传质的常用方法和有效方式, 在静态反应器内加入搅拌桨进行混合, 可以强化反应器内的传热状况。螺带搅拌桨在处理高粘度物料时表现出了很好的性能, 2009 年, Zhang 等<sup>[17]</sup>也成功的将其用在了初始固体含量为 30% 时的玉米秸秆高固体含量同步糖化发酵过程中, 并与其他 Rushton 搅拌桨进行了对比, 分析了其优越性。

本章分别以预处理前后的玉米秸秆为原料, 使用不同的尺寸比例的螺带搅拌桨进行了

玉米秸秆与水分混合的冷态模型试验，随后使用所选定的螺带搅拌桨的尺寸，在不同尺度的冷模搅拌槽中进行试验，通过装料量、搅拌转速、玉米秸秆颗粒粒径分布以及含湿量四个方面探究影响高固体含量下玉米秸秆颗粒与水分混合的因素。

## 2.2 材料和方法

### 2.2.1 试验材料

冷模试验中所使用的玉米秸秆 (Corn Stover, CS) 于 2007 年秋季收获于中国吉林省。收集后，经由锤式粉碎机粉碎，然后进行洗涤除尘、压榨，再放于烘箱中在 105℃ 下烘干 8-12 小时至恒重，最后放入真空密封袋中保存备用，其形态见图 2.1。

冷模试验中所使用的预处理后玉米秸秆 (Pretreatment Corn Stover, PCS) 获得方法为：将玉米秸秆经过预处理 (参照 2.2.3.1)<sup>[21]</sup>后，放于烘箱中在 105℃ 下烘干 8-12 小时至恒重，最后放入真空密封袋中保存备用。



图 2.1 烘干后保存待用的玉米秸秆颗粒

Fig. 2.1 a Photograph of the undiluted CS

### 2.2.2 主要试验仪器和设备

#### 2.2.2.1 生物质预处理反应器

稀硫酸高温预处理试验所使用反应器为本实验室自制 10 L 圆柱形不锈钢反应槽 (直径为 180 mm, 高度为 400 mm), 高温蒸汽是由电加热蒸汽发生器 (DZFZ4.5C 型, 中国上海蒸源机电有限公司) 产生。

#### 2.2.2.2 冷模试验搅拌槽与搅拌桨

本研究中的冷模试验搅拌槽为圆柱形容器, 搅拌槽槽壁材质为有机玻璃; 所使用的三个不同直径的搅拌槽均装有正螺旋单螺带搅拌桨, 其材质为不锈钢。搅拌桨通过支撑轴固定在中心搅拌轴上; 搅拌轴上部装有扭矩信号耦合器 (HX-901 型, 北京三河燕郊华欣机电有限公司); 搅拌槽和搅拌桨的几何参数见表 2.2。

这里需要指出的是, 冷模试验搅拌槽 Vessel I 是由购自上海保兴生物工程设备有限

公司的 5 L 发酵罐改装，配有加热和保温装置，上端为平底型封头，配有加料口。Vessel II 和 Vessel III 均为自行设计的冷模试验搅拌槽，上端为开放式，无封头，其几何结构见图 2.2。

表 2.2 搅拌槽和螺带搅拌桨几何参数

Table 2.2 Dimension of the geometry of the three different helical ribbon impellers

Vessel	$D/mm$	$d/D$	$w/d$	$s/d$	$N_r$	$laps$
I	170	0.90	0.10	0.50	1	1.5
II	384	0.90	0.10	0.50	1	2
III	786	0.90	0.10	0.50	1	2

注： $d$ —螺带搅拌桨直径， $mm$ ； $D$ —搅拌槽直径， $mm$ ； $w$ —螺带搅拌桨桨叶宽度， $mm$ ； $s$ —螺带搅拌桨螺距， $mm$ ； $N_r$ —螺带搅拌桨螺带数； $laps$ —螺带搅拌桨圈数

为了选择合适的螺带搅拌桨，在搅拌槽 Vessel I 中进行了预混合试验，所使用的 4 个螺带搅拌桨为自行加工，材质为不锈钢，主要是搅拌桨直径与搅拌槽罐体直径的比例不同，其具体比例尺寸见表 2.3。

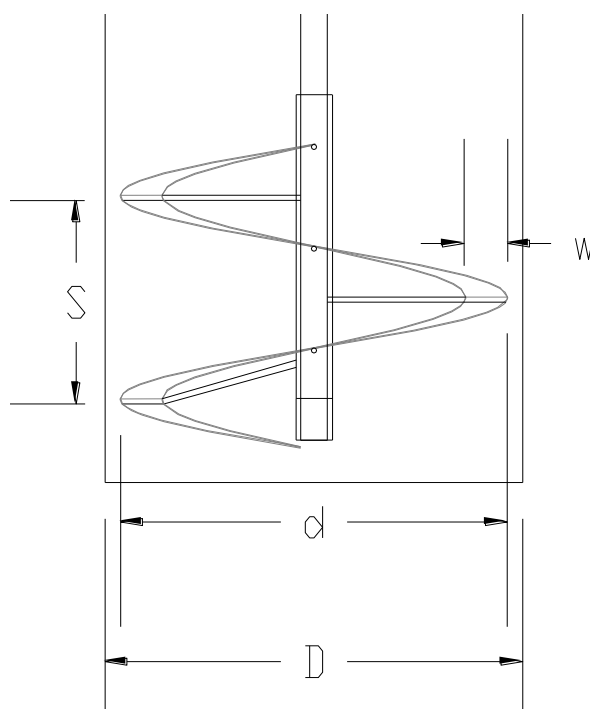


图 2.2 冷模试验螺带搅拌槽结构示意图

Fig. 2.2 Schematic of helical mock-up experiment vessels

表 2.3 预混合试验 (Vessel I) 所使用的螺带搅拌桨几何参数

Table 2.3 Dimension of the geometry of the three different helical ribbon impellers in Vessel I

Helical	$d/D$	$w/d$	$s/d$	$N_r$	$laps$
A	0.93	0.10	0.50	1	1.5
B	0.90	0.10	0.50	1	1.5
C	0.85	0.10	0.50	1	1.5
D	0.80	0.10	0.50	1	1.5

### 2.2.2.3 冷模试验所使用的其他设备和仪器

本研究冷模试验中使用到的其他主要设备和仪器详细信息列于表 2.4。

表 2.4 冷模试验所用其他设备和仪器明细

Table 2.4 Equipments of the mock-up experiments

仪器名称	型号	生产厂家
电子天平	AL104	瑞士梅特勒托利多仪器有限公司
电子天平	PL602-L	瑞士梅特勒托利多仪器有限公司
锤式粉碎机	SF-300	上海科太粉碎设备厂
恒温水浴器	HZ-9212S	江苏华利达试验设备厂
电热恒温鼓风干燥箱	DHG-9140A	上海一恒科学仪器有限公司
生物反应器	BIOTECH-5L	上海保兴生物设备工程有限公司
生物质压榨机	--	上海大张环保设备有限公司
生物质清洗机	XQ75-Y928	青岛海尔洗衣机有限公司
不锈钢筛网	标准筛	浙江上虞市肖金五金仪器厂

## 2.2.3 试验方法

### 2.2.3.1 玉米秸秆预处理方法

本研究中玉米秸秆预处理方法是极限高固体含量下的稀硫酸蒸汽预处理<sup>[17, 21, 22, 66]</sup>，具体方法如下。

(1) 预浸：固液比为 2:1，将 800 g 干物质置于塑料容器中，然后把配置好的 400 g 稀硫酸溶液 (2.5%, w/w) 缓慢倒入容器，并用震荡搅匀至无团状物料，最后将搅拌均匀的物料放入塑料袋中密封放置 12 h；

(2) 蒸汽预处理：将预浸好的玉米秸秆物料倒入自行设计的生物质预处理反应器中，反应器密封好后，开始通入高压蒸汽（由电加热式蒸汽发生器产生），当反应器内温度至 100℃ 时，打开放气阀排除冷凝水，然后关闭放气阀并持续通入蒸汽至反应器内温度至

190℃。此时，调节通气阀使反应器内温度维持在  $190 \pm 2^\circ\text{C}$ ，持续 3 min，然后彻底关闭通气阀，打开放气阀，使反应器内的蒸汽迅速释放；

(3) 物料冷却：取出反应器内物料，放入不锈钢容器中使之在冷水中迅速降温冷却，并测定其含湿量，然后放入烘箱中在  $105^\circ\text{C}$  下烘干至恒重，最后将物料放入真空袋中保存备用。

### 2.2.3.2 玉米秸秆颗粒粒径分布测定

为详细了解所使用玉米秸秆和预处理玉米秸秆的物理性质，本章对未掺水的玉米秸秆和预处理后的玉米秸秆的颗粒粒径分布进行了测定。所使用的是表 2.4 所列的不锈钢筛网，筛网共有 4 个规格：60 目、40 目、20 目和 10 目，这样共可筛出五种不同粒径范围的物料，分别是：<60 目，60~40 目，40~20 目，20~10 目和 >10 目，具体方法如下。

(1) 将 100 g 物料放到 10 目的筛网中，振动筛网约 15 分钟后称取筛网中残留物料的质量并记录；

(2) 继续震动筛网约 3~5 分钟，称取筛网中物料的质量，两次测量的误差在 1 g 内时记为最后粒径范围为 >10 目的物料质量；

(3) 重复上述方法测定筛网规格分别为 20 目、40 目和 60 目时的残留物料的质量。

### 2.2.3.3 物料松散堆积密度测定

筛分后的不同颗粒粒径范围的玉米秸秆和预处理后玉米秸秆物料以及原粉的松散堆积密度的测定方法如下：(1) 取 1000 mL 量筒，称取量筒的质量为  $m_0$ ；(2) 向量筒中加入某特定粒径范围的粉碎玉米秸秆至 500 mL，并称取总质量为  $m_1$ 。则物料的松散堆积密度  $\rho'$  可用式 (2-1) 计算，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。在装料过程中应尽量避免量筒的震动。

$$\rho' = 2m_1 - m_0 \quad (2-1)$$

### 2.2.3.4 混合时间的表征

为了考察玉米秸秆与水分的混合过程，需要对其混合的均匀度进行表征，这里取的是监测点玉米秸秆的含湿量，其测定和计算方法如下。

首先向搅拌槽中加入去离子水，然后加入准备好的秸秆；设定好搅拌转速，并开始搅拌。并分别在 0, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 720 s 时，关闭搅拌并使用取样勺在加料口处取样，取样深度约为液面下 2 mm。样品取出后放入平板中，并立即称量（为防止水分的挥发）记为  $m_1$ ，取样量每次约为 2 g。样品放入  $105^\circ\text{C}$  烘箱中烘干至质量恒定，也就是没有水分存在时，然后称重记为  $m_2$ ，平板的质量记为  $m_0$ 。则某一时刻监测点的含湿量由式 (2-2) 计算。

$$W\% = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_0} \quad (2-2)$$

考虑到玉米秸秆物料与水分混合过程的特殊性，以及冷模试验的误差比较大的特点，在不同尺度的搅拌槽中需要分别进行足够多的重复试验，以期发现监测点含湿量的变化规律。搅拌槽 Vessel I 中每组进行 8 个重复试验，搅拌转速分别为 10 rev/min、30 rev/min、

50 rev/min、60 rev/min、70 rev/min、80 rev/min、90 rev/min 和 110 rev/min；搅拌槽 Vessel II 中每组进行 6 个重复试验，转速为 50 rev/min、70 rev/min 和 90 rev/min；搅拌槽 Vessel III 中每组进行 2 个重复试验，转速为 50 rev/min 和 70 rev/min。三种不同尺度搅拌槽中所加水分和粉碎玉米秸秆质量如表 2.5 所示。搅拌槽 Vessel I 中不同含湿量的试验所需要加的水分的质量如表 2.6 所示。

表 2.5 终了含湿量为 50%下冷模试验的不同尺度搅拌槽的加料量

Table 2.5 CS and water loadings in Mock-up Experiments

Vesse	Water/kg	CS (PCS) /kg
1		
I	0.2	0.2
II	2.0	2.0
III	15	15

表 2.6 搅拌槽 Vessel I 中不同含湿量的试验所需要加的水分的质量

Fig. 2.6 the requirement of the water of different moisture content experiment in Vessel I

Moisture Content	0%	10%	20%	30%	40%	50%
Water/kg	0.0	0.022	0.05	0.86	0.133	0.2
CS(PCS)/kg	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

### 2.2.3.5 扭矩的测定

物料在搅拌过程中所消耗的扭矩数据是通过安装在搅拌轴上方的扭矩传感器获得。由于电机、扭矩传感器和搅拌轴三者存在摩擦以及搅拌轴在转动过程中的偏心，扭矩仪的读数会有少许波动。这里的最终扭矩获得方法为：加入搅拌物料，设定转速开始搅拌 5 分钟后，开始记录扭矩仪的读数，每隔 5 s 记录一次，共记录 20 次然后取平均值，并计算偏差。

### 2.2.3.6 固体含量和含湿量的表征

在以往的研究中玉米秸秆悬浮液均是以总固体 (Weight Fraction of Total Solids, FTS)、可溶固体质量分率 (Soluble Solids, FSS) 和不溶固体质量分率 (Insoluble Solids, FIS) 表示的<sup>[37, 45, 49]</sup>。

本研究中的固体含量是以总固体含量表示的，由于所处理的物料中固体含量最低为 50%，玉米秸秆颗粒之间已经不含有游离水，故本研究中均将固体含量以玉米秸秆的含湿量代替，例如 60% 固体含量的物料，其含湿量为 40%，且均是以质量百分比表示的。

## 2.3 结果与讨论

### 2.3.1 预处理前后颗粒粒径的变化

图 2.2 与表 2.7 分别表示了筛分后的玉米秸秆和预处理玉米秸秆 (PCS) 各粒径范围所占的质量百分比。从图中可以看出, 预处理之前的玉米秸秆颗粒粒径 <60 目、60~40 目和 40~20 目的质量分别占了 26.13%、26.12% 和 26.97%, 玉米秸秆物料颗粒粒径小于 850  $\mu\text{m}$  的约占 80%。而预处理之后的玉米秸秆 <60 目、60~40 目和 40~20 目这三个粒径范围的质量分率分别为 31.45%、30.24%、29.67%, 总约 90% 以上, 粒径范围在 20 目以上的颗粒较预处理之前明显减少。这说明预处理破坏了玉米秸秆颗粒的物理结构, 使其粒径减小。

表 2.7 玉米秸秆与预处理玉米秸秆颗粒粒径分布

Table 2.7 Particle diameter distribution of CS and PCS

粒径范围(目)	<60	60~40	40~20	20~10	>10	原粉
CS (w/w, %)	26.13 $\pm$ 0.014	26.12 $\pm$ 0.056	26.97 $\pm$ 0.078	14.55 $\pm$ 0.085	6.23 $\pm$ 0.064	100
PCS (w/w, %)	31.45 $\pm$ 0.036	30.24 $\pm$ 0.045	29.67 $\pm$ 0.071	6.34 $\pm$ 0.029	2.82 $\pm$ 0.084	100

注: 60 目=0.300 mm; 40 目=0.425 mm; 20 目=0.850 mm; 10 目=2.000 mm

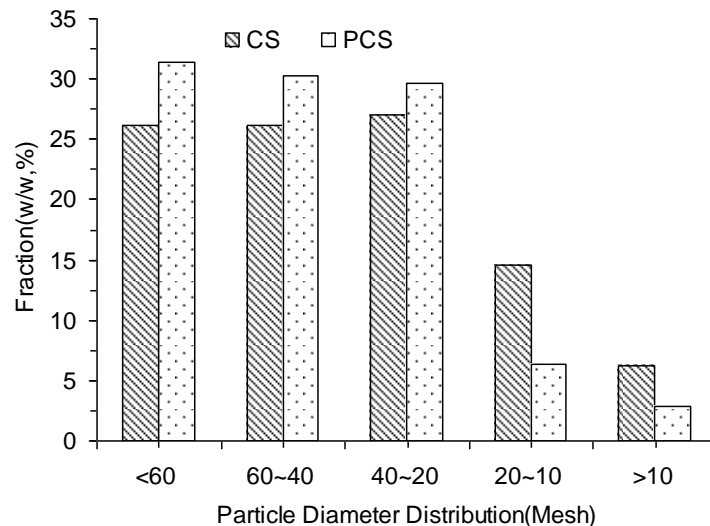


图 2.2 预处理后玉米秸秆颗粒粒径分布的变化

Fig. 2.2 Particle diameter distribution of undiluted CS and PCS

### 2.3.2 玉米秸秆与水分的预混合试验

为了选择合适尺寸的螺带搅拌桨, 本研究在冷模试验搅拌槽 Vessel I 中考察了四种

不同  $d/D$  直径比例的螺带桨 (A:  $d/D=0.93$ , B:  $d/D=0.90$ , C:  $d/D=0.85$ ,  $d/D=0.80$ ) A、B、C 和 D 在处理终了含湿量为 50% 时的玉米秸秆与水分时的混合情况。

结果表明, 搅拌桨 B、C、D 均能实现持续的搅拌, 搅拌桨 A 不能实现连续的搅拌。

(1) 在使用搅拌桨 A 时,  $d/D=0.93$ , 由于螺带搅拌桨外缘至搅拌槽内壁的间隙较小, 在搅拌进行时, 大的颗粒逐渐在槽内壁堆积, 最终搅拌停止, 即不能实现连续的搅拌;

(2) 在使用搅拌桨 B 时,  $d/D=0.90$ , 螺带搅拌桨外缘与搅拌槽内壁之间无死区, 即没有玉米秸秆颗粒的积累和堆积, 且槽底也没有明显的死区, 能实现连续的搅拌;

(3) 在使用搅拌桨 C 时,  $d/D=0.85$ , 螺带搅拌桨外缘与搅拌槽内壁间在搅拌开始时即有秸秆堆积, 即随着搅拌转速的增加, 堆积的秸秆减少, 当转速达到 130 rev/min 时, 死区消失, 说明其搅拌效果低于搅拌桨 B。

(4) 在使用搅拌桨 D 时,  $d/D=0.80$ , 的条件下, 螺带桨外缘与槽壁间有秸秆堆积, 且堆积量明显高于搅拌桨 B 的情况, 当转速升至 130 rev/min 后, 死区仍然没有消失, 说明螺带搅拌桨与搅拌槽内壁之间的间隙较大, 之间的颗粒不能形成连续的运动。

因此, 由以上预混合试验可以看出, 螺带搅拌桨与搅拌槽内壁之间的间隙大小对搅拌槽内物料的混合影响很大, 具体影响在后续的试验中会具体讨论。本研究选择螺带搅拌桨与搅拌槽直径比例为  $d/D=0.90$  的搅拌桨 B 研究玉米秸秆与水分在不同装料量、不同终了含湿量、不同搅拌转速和不同颗粒粒径分布下的混合过程。

### 2.3.3 不同装料量对混合过程的影响

在搅拌反应器的操作中, 搅拌桨能使搅拌槽内的流体产生轴向或者径向的运动, 但是搅拌桨的几何尺寸不同, 所作用的范围也不同。在本研究中, 所处理的物料为没有游离水存在的玉米秸秆颗粒, 搅拌槽内物料的运动更为复杂, 为确定合适的装料量, 本小节研究了搅拌槽中玉米秸秆物料的装料量对玉米秸秆和水分混合过程的影响。

图 2.3 表示了搅拌槽 Vessel I 中不同初始装料量监测点含湿量随时间的变化, 考虑到所处理物料的特殊性, 这里我们以初始装入玉米秸秆干物料 (Dry Mass, DM) 的质量为标准。试验条件为转速: 50 rev/min, 终了含湿量: 50%。试验所使用的螺带搅拌桨 B 螺旋为 1.5 圈, 其螺距  $s$  为  $1/2d$ ; 我们将螺带桨的安装高度定义为螺带桨的高度加上螺带桨离搅拌槽槽底的高度 6 mm, 可得其安装高度为 120 mm。

图 2.3 中 a 试验装料量为 150 g DM, 未开始搅拌时, 高度约为 95 mm, 当搅拌槽内的秸秆含湿量达到均匀时, 由于秸秆颗粒吸水膨胀, 加之搅拌的作用, 此时的物料高度约为 110 mm, 仍小于螺带搅拌桨的安装高度, 由图中可以看出玉米秸秆与水分能够实现混合, 且在取样的时间范围内, 最终的监测点秸秆含湿量能够达到 49% 左右。

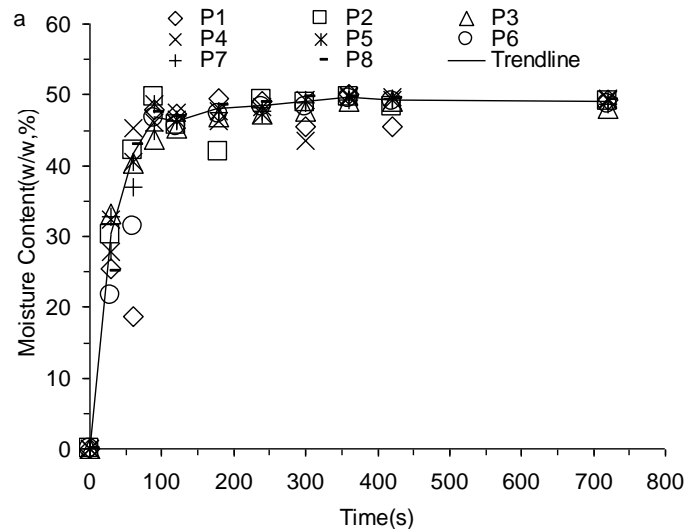
图 2.3 中 b 试验装料量为 200 g DM, 未开始搅拌时, 高度约为 103 mm, 当搅拌槽内的秸秆含湿量达到均匀时, 并在搅拌时的物料高度约为 125 mm, 稍高于螺带搅拌桨的安装高度, 由图可以看出玉米秸秆与水分亦能够实现混合, 且在取样的时间范围内, 最终的监测点秸秆含湿量能够达到 49% 左右。

图 2.3 中 c 试验装料量为 250 g DM, 未开始搅拌时, 高度约为 110 mm, 当搅拌槽内

的秸秆含湿量达到均匀时，并在搅拌时的物料高度约为 150 mm，远高于螺带搅拌桨的安装高度，从图中可以看出在取样时间范围内，搅拌终止时监测点玉米秸秆的含湿量为 43% 左右，且含湿量仍呈增加的趋势，在试验中也发现，由于装料量较多，超出了螺带桨的作用范围，整个搅拌槽中的玉米秸秆颗粒并不能形成较好的循环运动，故此时的玉米秸秆颗粒之间的相互碰撞频率和摩擦力较小，从而限制了玉米秸秆颗粒间水分的传递。

图 2.4 表示了三种不同装料量下监测点含湿量变化趋势的比较。同样可以明显的看出，在装料量为 250 g DM 时，玉米秸秆与水分的混合情况要差于装料量为 150 g 和 200 g DM 时的混合过程；装料量为 200 g DM 时的混合情况稍好于 150 g DM 装料量时，这说明 200 g DM 装料量时的高度仍在螺带搅拌桨的作用范围内。在后续搅拌槽 Vessel I 的研究中，均选择 200 g DM 的装料量。

以上的分析表明，对于螺带桨式搅拌系统而言，螺带桨有其作用的范围，当液面高度超过螺带桨的高度过多时，也就是说螺带搅拌桨浸入到流体介质中的较多时，会超过螺带桨的作用范围，不利于在整个搅拌槽中形成整个流体介质的径向运动；当液面的高度没有超过螺带桨的高度时，也就是说螺带桨没有完全浸入到液面以下时，这种情况下在搅拌槽内也不能形成较好的循环运动，同时还产生了能量的浪费。因此，螺带桨浸入到液面以下的深度需要由试验确定，同时这个高度范围还与流体的性质有关。



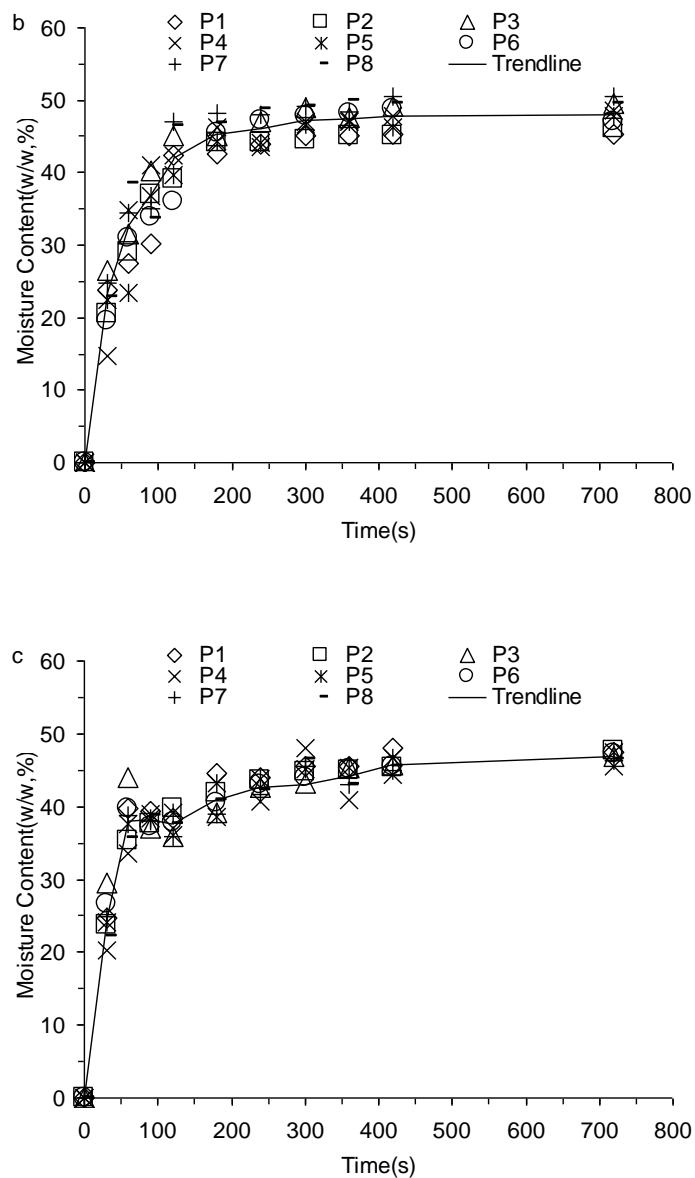


图 2.3 不同装料量下监测点点含湿量的变化 (a: 150 g DM; b: 200 g DM; c: 250 g DM; 试验条件: 50% 终了含湿量, 搅拌转速为 50 rev/min)

Fig. 2.3 Effect of DM loading on the mixture of CS and water (a:150 g DM; b:200 g DM; c: 250 g DM; Condition: 50% final moisture content, Rotation speed: 50 rev/min)

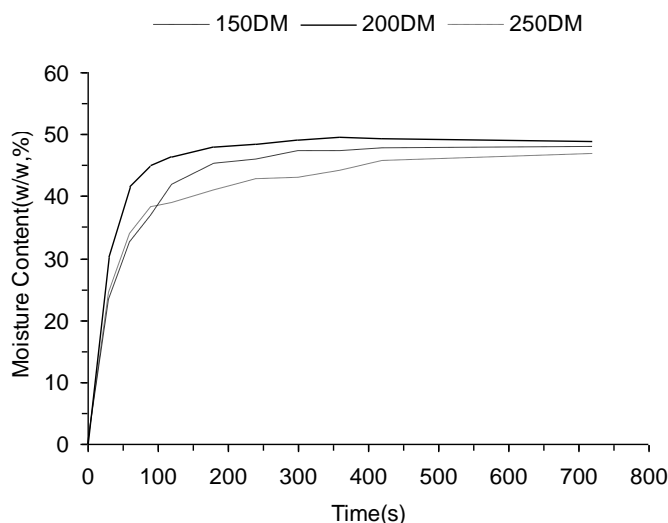


图 2.4 不同装料量下监测点含湿量的变化趋势（条件参照图 2.3）

Fig.2.4 Effect of DM loading on the mixing of CS and water

#### 2.3.4 不同终了含湿量对混合过程的影响

在研究搅拌过程中玉米秸秆颗粒与水分的混合时，含湿量是表示物料状态的一个重要参数，由于本研究所处理的玉米秸秆具有极强的吸水性，且在吸水后膨胀，造成颗粒的物理状态发生变化，这些因素都会影响混合的过程。本小节研究了不同终了含湿量，也就是混合开始时，所加入的水的质量的不同对混合过程的影响。

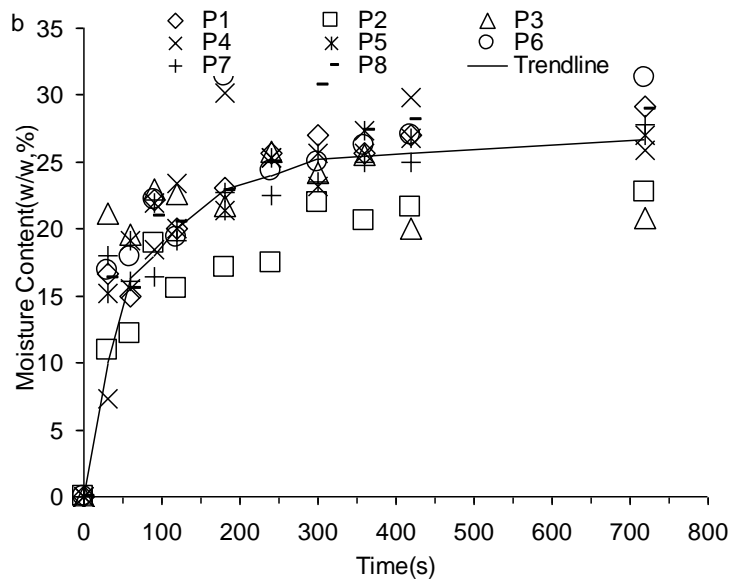
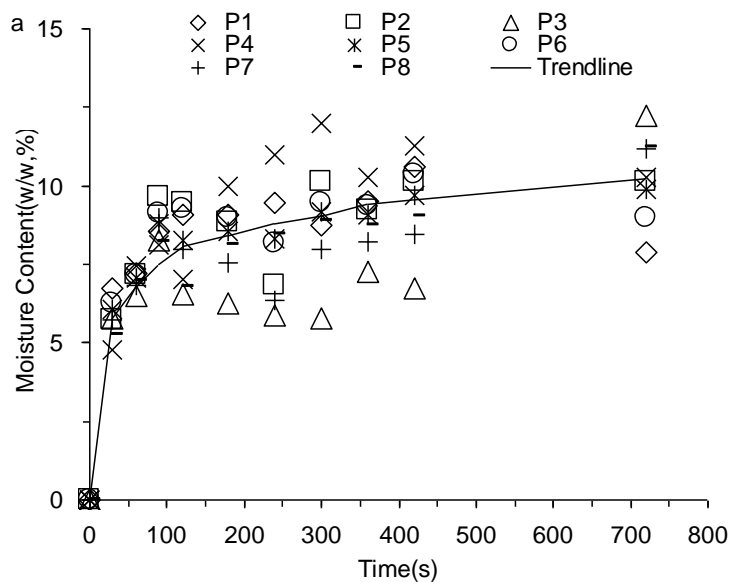
图 2.5 中 a、b 和 c 分别表示的是终了含湿量为 10%、30% 和 50% 时，监测点的含湿量随时间的变化趋势。可以看出，在整个搅拌混合过程中监测点的含湿量数据离散度很高；在试验中也发现，这两组试验中玉米秸秆颗粒之间的结团现象非常严重，这也是造成数据离散度高的原因。这可能是因为，此时虽然搅拌转速和装料量相同，也就是造成的玉米颗粒之间的碰撞频率和摩擦力没有差别，但是由于初始加入的水分质量较少，单个玉米秸秆颗粒的含湿量较小，远远没有达到饱和，也就是颗粒之间的“含湿量梯度”较小，从而限制了颗粒之间的水分传递。

图 2.6 表示的是终了含湿量分别为 10%、30% 和 50% 时，经过归一化处理后（即将监测点瞬时的含湿量比上理论上搅拌槽内玉米秸秆与水分混合均匀后所能达到的最大含湿量）的监测点含湿量变化趋势比较。可以看出，终了含湿量越大，玉米秸秆与水分混合所需要的时间越短。这可能是因为，终了含湿量较低时（10% 和 30%），初始混合时所加入的水的质量很小，干固体质量较多，玉米秸秆颗粒远远没有达到饱和含湿量，相同的碰撞频率和摩擦力下，含湿量较少的玉米秸秆水分质量传递较慢。事实上，50% 终了含湿量时的混合时间要远小于终了含湿量为 10% 和 30% 的情况。

这里还需要指出的是，由于单个玉米秸秆颗粒间的含湿量的不同，颗粒的膨胀度也不尽相同，也就是含湿量的不同影响到了玉米秸秆颗粒的粒径分布，这也会对玉米颗粒之间的碰撞频率产生影响，特别是对摩擦力和粘滞力产生影响，使问题变的更为复杂。关于玉

米秸秆颗粒粒径分布对混合过程的影响会在小节 2.3.6 中讨论。

由于实际极限高固含量的“干法”稀硫酸玉米秸秆预处理工艺结束时物料的含湿量为 50.1%，因此，这里以后的研究中我们均取终了含湿量为 50%。



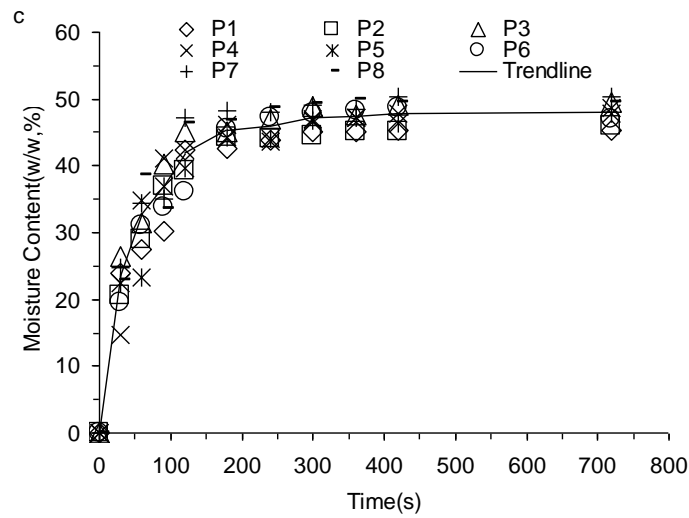


图 2.5 不同终了含湿量下监测点含湿量的变化(a: 10%; b: 30%; c: 50%;  
试验条件: 200 g DM 装料量, 搅拌转速为 50 rev/min)

Fig. 2.5 Effect of water loading on the mixing of CS and water(a: 10%; b: 30%; c: 50%;  
Condition: 200 g DM loading, Rotation speed: 50 rev/min)

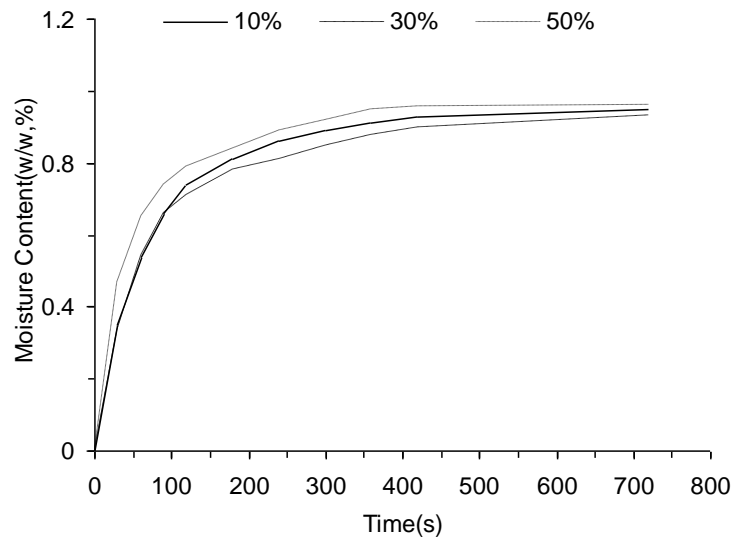


图 2.6 终了含湿量对玉米秸秆与水分混合过程的影响 (试验条件参照图 2.5)

Fig. 2.6 Effect of water loading on the mixing of CS and water

### 2.3.5 搅拌器转速对混合过程的影响

搅拌器的转速是影响搅拌槽内物料混合非常重要的因素。通常, 搅拌器转速是指搅拌器的轴速度, 轴速度的不同会影响搅拌桨叶片的线速度, 从而会对搅拌槽内物料的流动状态造成影响。一般情况下, 随着搅拌器转速的增加, 搅拌效率会增加。为了表示方便, 这一小节的搅拌转速单位均用 rev/min (转/分钟) 表示。

图 2.8 中 a、b、c、d、e、f 和 g 分别表示了搅拌槽 Vessel I 中终了含湿量为 50%,

装料量为 200 g DM 时，搅拌转速分别为 10 rev/min、30 rev/min、50 rev/min、70 rev/min、90 rev/min、110 rev/min、130 rev/min 时监测点玉米秸秆物料含湿量的变化，每个搅拌转速下做了 8 次重复试验，每一次试验监测点的含湿量分别用 P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7、P8 表示。可以看出：

(1) 随着混合时间的延长，监测点含湿量是逐渐增加的；且在前 60 s，每个搅拌转速下监测点的含湿量增加很快，能达到 35% 左右，在这段时间内，各个重复试验的数据点离散较大；仔细观察此时由监测点所取出的样品发现，有颗粒的结团现象，这是导致数据离散较大的原因；另外，还发现玉米秸秆颗粒的颜色并不均匀，而随着搅拌时间的延长，所取出样品物料的结团现象消失且颗粒颜色变的均匀。这说明在前 60 s 内，各个颗粒之间的含湿量并不相同，此时，玉米秸秆含湿量在宏观上达到了均匀，而在颗粒的维度上，含湿量并不均匀，这两种混合的状态可用图 2.7 表示。这两种状态的变化是由于随着混合时间的延长，在螺带搅拌桨的作用下，玉米秸秆颗粒之间的摩擦和碰撞次数增加，促进了玉米秸秆颗粒之间水分的传递。

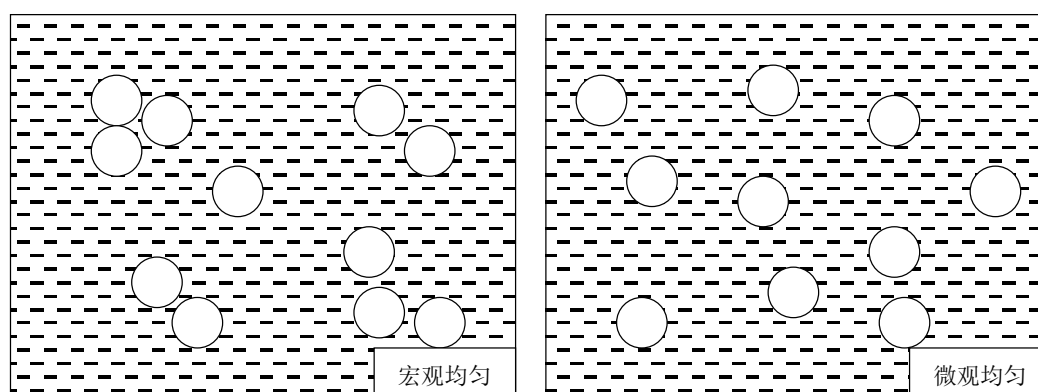


图 2.7 玉米秸秆颗粒的分布情况

Fig. 2.7 Distribution of CS particles

(2) 仔细观察图 a、b 和 g，也就是在搅拌器转速分别为 10 rev/min、30 rev/min 和 130 rev/min 时，整个混合过程的各个重复试验间的离散均较大，且在取样时间内，监测点的含湿量均没有达到一个稳定值，依然呈增加的趋势；图 c、d、e 和 f，也就是在转速分别为 50 rev/min、70 rev/min、90 rev/min 和 110 rev/min 时，在取样时间范围内，含湿量均能达到一个稳定值，且在整个的玉米秸秆与水分的混合过程中，各个重复试验的监测点含湿量数据较为集中。

图 2.9 表示的是不同搅拌转速下监测点含湿量的变化趋势的比较。可以看出，在转速为 10 rev/min 时，取样时间结束时的含湿量在 40% 左右，在转速为 30 rev/min 和 130 rev/min 时，取样时间结束时的含湿量在 45% 左右，这三个搅拌转速下的搅拌过程结束时，含湿量仍呈增加的趋势，说明混合过程仍在进行；在转速为 50 rev/min、70 rev/min、90 rev/min





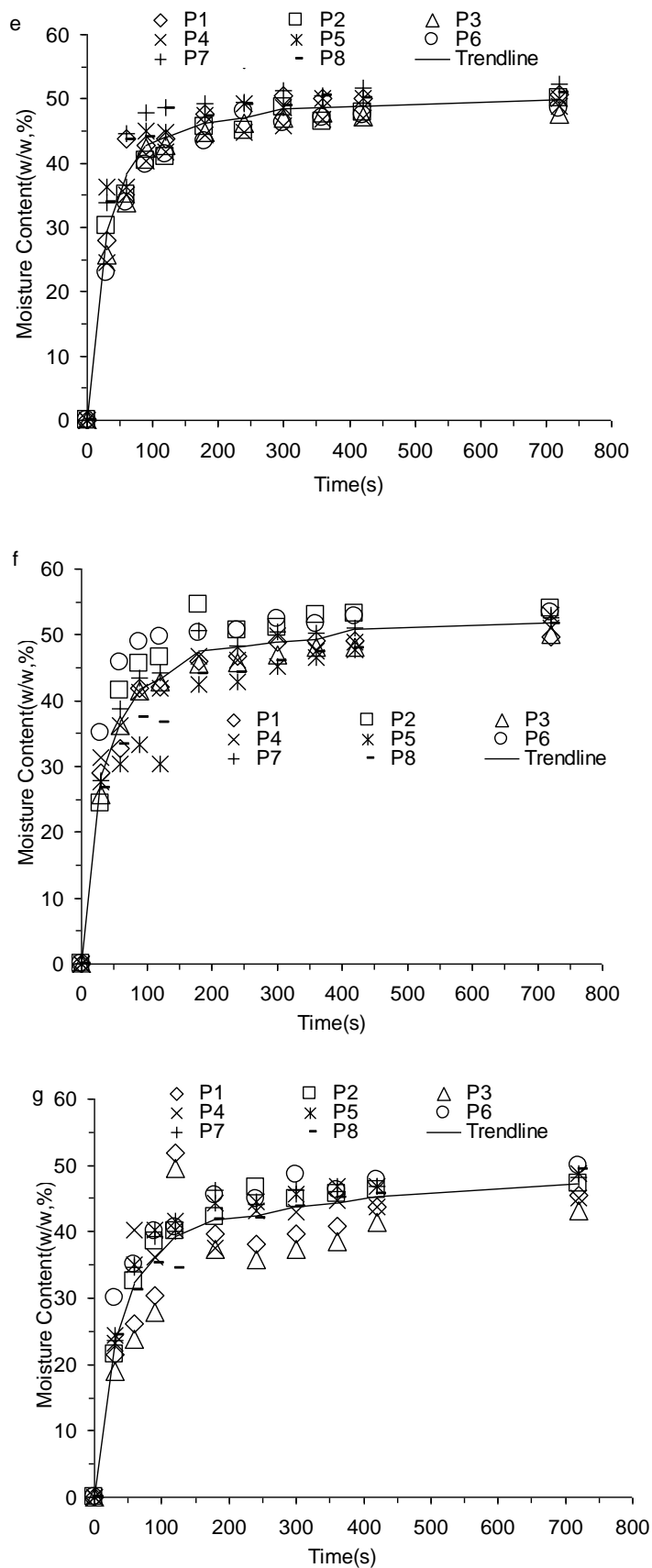


图 2.8 不同搅拌转速下监测点含湿量变化 (a: 10 rev/min; b: 30 rev/min; c: 50 rev/min; d: 70 rev/min; e: 90 rev/min; f: 110 rev/min; g: 130 rev/min;

试验条件为：50%终了含湿量，200 g DM 装料量，搅拌槽为 Vessel I )

Fig. 2.8 Effect of rotation speed on mixing of CS and water ( a: 10 rev/min; b: 30 rev/min; c: 50 rev/min; d: 70 rev/min; e: 90 rev/min; f: 110 rev/min; g: 130 rev/min; Condition: 50% final moisture content, 200 g DM loading, Vessel I )

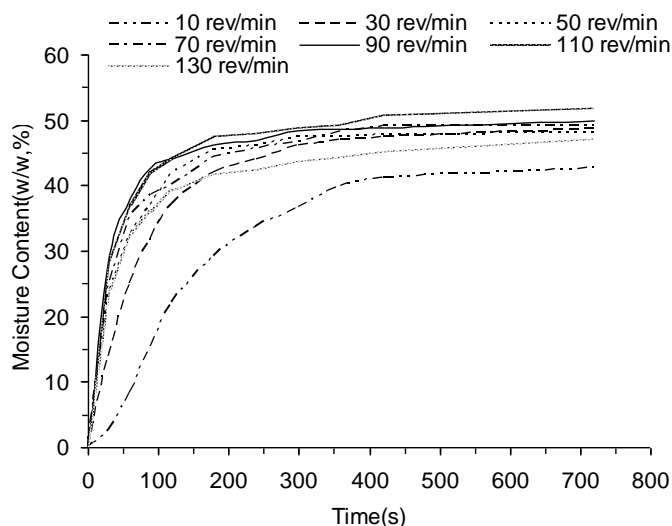


图 2.9 不同转速下监测点含湿量的变化趋势 (试验条件参见图 2.8)

Fig. 2.9 Effects of rotation speed on the mixing of CS and water)

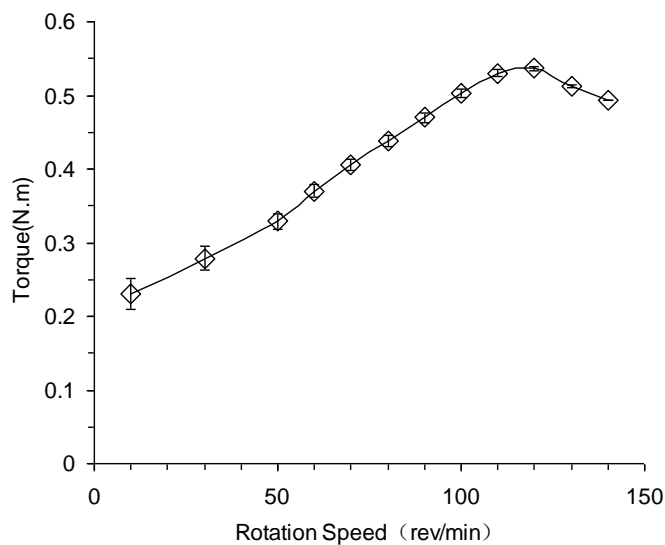


图 2.10 不同搅拌转速下的扭矩值 (试验条件参照图 2.8)

Fig. 2.10 Effects of rotation speed on the mixing torque of CS and water

### 2.3.6 颗粒粒径分布对混合过程的影响

由前面的分析可知，在没有游离水存在的条件下，影响搅拌槽中玉米秸秆颗粒与水分

混合的主要因素是玉米秸秆颗粒之间的相互碰撞频率和摩擦力。不同的颗粒粒径分布下对玉米秸秆颗粒间的相互碰撞频率和摩擦力会存在一定的影响,进而影响搅拌槽内物料的混合。本研究在搅拌槽 Vessel I 中对筛分后的不同粒径范围的玉米秸秆颗粒分别进行了其与水分的混合过程冷模试验,以考察颗粒粒径分布对混合过程的影响。

试验条件为:搅拌转速 50 rev/min, 终了含湿量 50%, 初始含湿量为 0%, 搅拌桨为搅拌桨 B ( $d/D=0.90$ ), 每一组试验做了 8 次重复试验, 用 P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7 和 P8 表示。试验发现, 当玉米秸秆颗粒粒径在大于 20 目 (0.850 mm) 的颗粒粒径范围时, 搅拌系统对物料并不能实现连续的搅拌, 玉米秸秆颗粒均堆积在了搅拌桨与搅拌槽内壁之间的空隙中, 是因为颗粒均不是规则的球形, 粒径较大, 纤维较长, 且吸水后膨胀, 当通过搅拌桨与搅拌槽之间较窄的间隙时, 受挤压而堵塞。我们在预混合试验中, 使用搅拌桨 A ( $d/D=0.93$ ) 时, 也发现了同样的试验现象。

图 2.9 中 a、b 和 c 分别表示了玉米秸秆颗粒粒径范围在 <60 目、60~40 目和 40~20 目时的监测点含湿量随时间的变化过程。图 2.10 表示的是不同玉米秸秆颗粒粒径范围下监测点含湿量随时间的变化趋势比较。

可以看出, 在粒径范围为 <60 目时, 最终的含湿量仅为 40% 左右, 且含湿量仍呈增加的趋势, 也就是说在试验所设定的时间内, 搅拌槽中的玉米秸秆和水分并没有混合均匀在试验中也发现, 在这个粒径范围内, 颗粒之间的结团现象较为严重。这可能是由于螺带搅拌桨与搅拌槽内壁之间的空隙较大, 物料不能形成较好的循环, 从而造成玉米秸秆颗粒之间的碰撞频率与摩擦力减小, 减弱了颗粒之间水分的相互传递, 使玉米秸秆与水分混合均匀所需要的混合时间变大。

当玉米秸秆颗粒粒径在 60~40 目的范围时, 监测点最终的含湿量在 45% 左右, 且图 2.10 中显示此时的含湿量变化曲线仍然呈增加的趋势。试验中所观察到的颗粒的结团现象也较粒径范围在 <60 目时少很多。当颗粒的粒径范围在 40~20 目时, 监测点最终的含湿量能达到 50%, 且此时变化趋势较粒径范围在 <60 目和 60~40 目时快, 整个试验过程中颗粒的结团很少, 这说明, 此时玉米秸秆颗粒之间的碰撞频率和摩擦力较大, 促进了颗粒之间的水分的传递。在图 2.10 中, 还可以看出, 玉米秸秆原粉 (未筛分之前的颗粒) 监测点的含湿量趋势线是介于粒径范围为 60~40 目和 40~20 目之间的。

由以上的分析可知, 在同一搅拌系统中, 不同的玉米秸秆颗粒粒径分布下, 玉米秸秆与水分混合所需要的混合时间也不相同。螺带搅拌桨外径与搅拌槽内壁之间的空隙大小跟所处理物料的颗粒粒径范围有着密切的关系, 当颗粒粒径范围较小时, 这个间隙也应相应的减小, 这样才能达到比较好的混合效果。

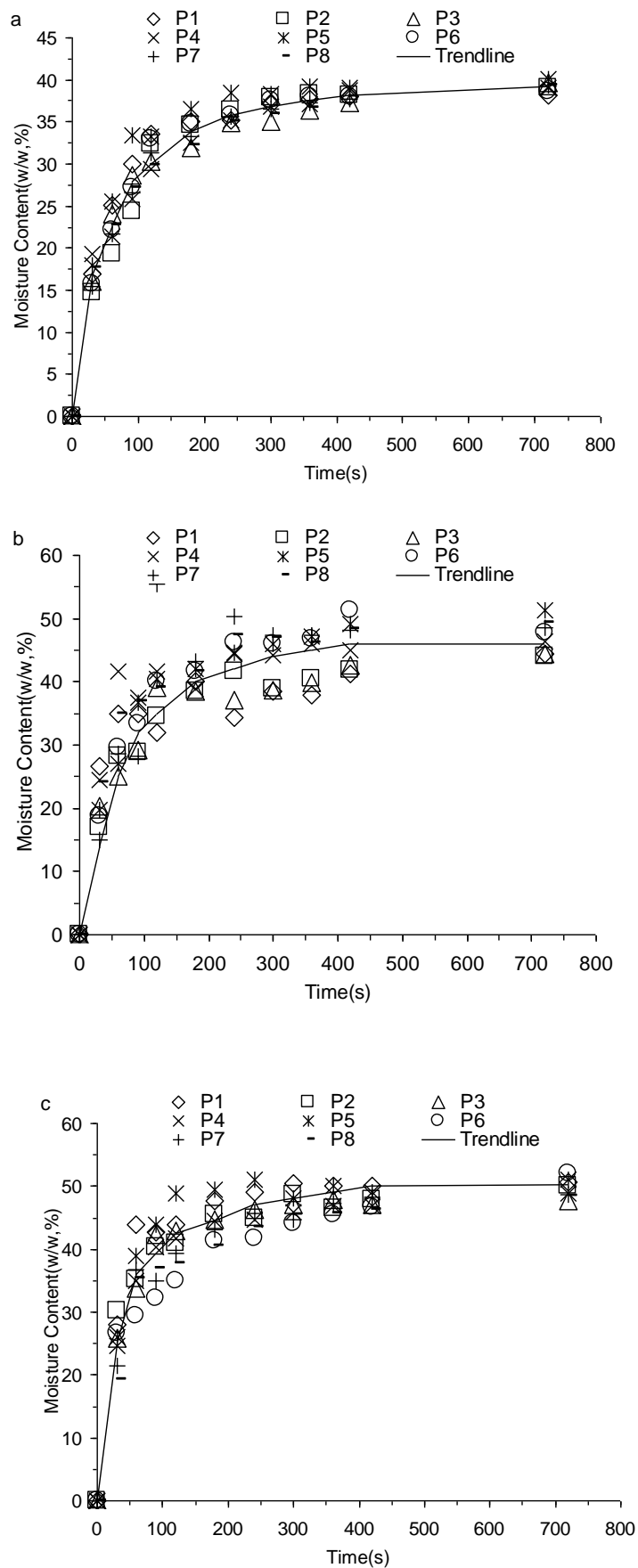


图 2.9 不同颗粒粒径分布下监测点含湿量的变化 (a: <60 目; b: 60~40 目; c: 40~20 目;

试验条件: 50%终了含湿量, 50 rev/min, 装料量为 200 g DM, 搅拌槽为 Vessel I)

Fig. 2.9 Effect of particle distribution on mixing of CS and water (a: <60 mesh; b: 60~40 mesh; c: 40~20 mesh; Conditions: 50% final moisture content, 50 rev/min, 200 g DM loading, Vessel I)

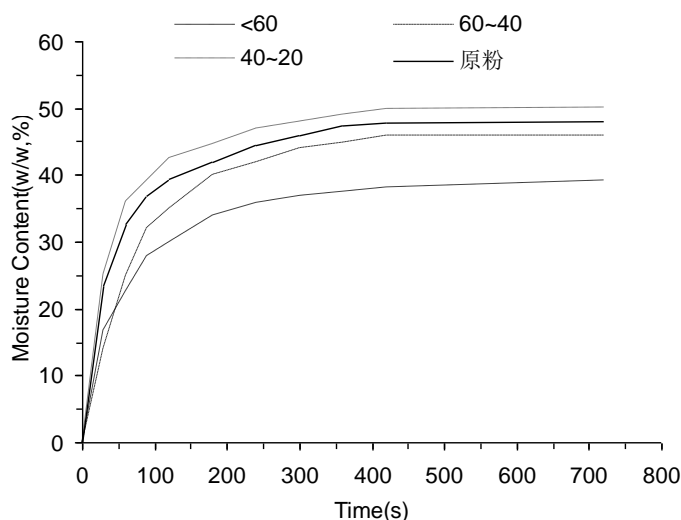


图 2.10 不同颗粒粒径分布下监测点含湿量的变化趋势 (试验条件参照图 2.9)

Fig. 2.10 Effect of particle diameter on the mixing of CS and water

### 2.3.7 大尺度搅拌槽的冷模试验

前面的研究中, 对冷模搅拌槽 Vessel I 中对极限高固含量下的玉米秸秆颗粒与水分的混合过程进行了研究, 发现螺带搅拌桨能实现很好的混合。为了能够实现工业化的应用并对搅拌桨和反应器的放大进行初步研究, 还需要在更大尺度的搅拌槽中进行冷模试验, 研究其中玉米秸秆颗粒和水分的混合过程。

本研究根据搅拌槽 Vessel I 中所确定的螺带搅拌桨的尺寸比例, 在两个更大直径 (分别为  $D=384$  mm 和  $D=786$  mm) 的冷模搅拌槽中进行了不同条件的玉米秸秆颗粒与水分的混合试验。

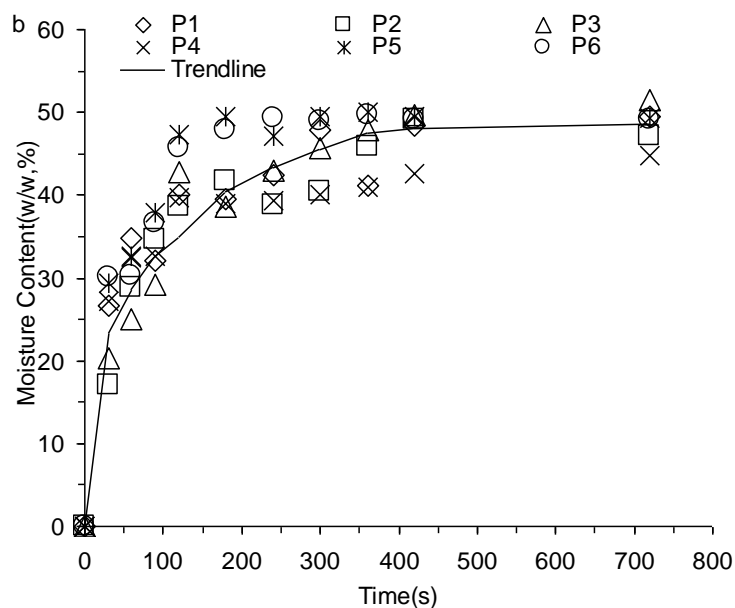
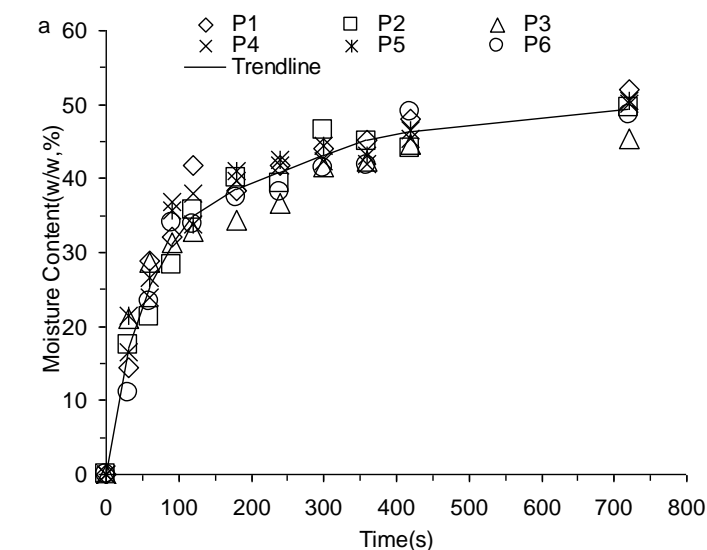
#### 2.3.7.1 搅拌槽 Vessel II 冷模试验

考虑到试验量和试验条件的限制, 本冷模试验每组有 6 次重复试验, 分别测量了搅拌转速为 50 rev/min、70 rev/min 和 90 rev/min 下的混合情况。

图 2.11 中 a、b 和 c 分别表示了冷模搅拌槽 Vessel II 中 50 rev/min、70 rev/min 和 90 rev/min 转速下监测点玉米秸秆颗粒含湿量的变化。可以看出, 转速为 50 rev/min 时, 在取样的时间范围内, 监测点的含湿量仍呈增加的趋势, 说明玉米秸秆与水分的混合过程仍在进行; 当转速为 70 rev/min 和 90 rev/min 时, 在取样的时间范围内, 监测点的终了含湿量达到 48% 左右, 且维持一段时间, 说明搅拌槽内玉米秸秆的含湿量已经均匀; 这也是因为, 随着搅拌转速的增加, 冷模搅拌槽内玉米秸秆颗粒之间的相互碰撞频率和摩擦力增大, 促进了颗粒之间水分的相互传递。

图 2.12 表示的是搅拌槽 Vessel II 中不同搅拌转速下监测点含湿量变化趋势的比较。也可以看出，随着搅拌转速的增加，冷模搅拌槽内玉米秸秆颗粒与水分的混合过程是逐渐加快的。

这说明当搅拌槽的直径增加时，螺带搅拌桨也能够实现玉米秸秆颗粒和水分的搅拌混合过程。搅拌槽 Vessel II 中玉米秸秆与水分的混合过程表现出与搅拌槽 Vessel I 中混合过程相似的规律和现象。由于本研究的重点不是预处理反应器的放大研究，本文对大尺度的搅拌槽（包括 Vessel III）中玉米秸秆与水分的混合过程只是做初步的研究，结果用来作为第 4 章中计算流体力学模型的验证标准。



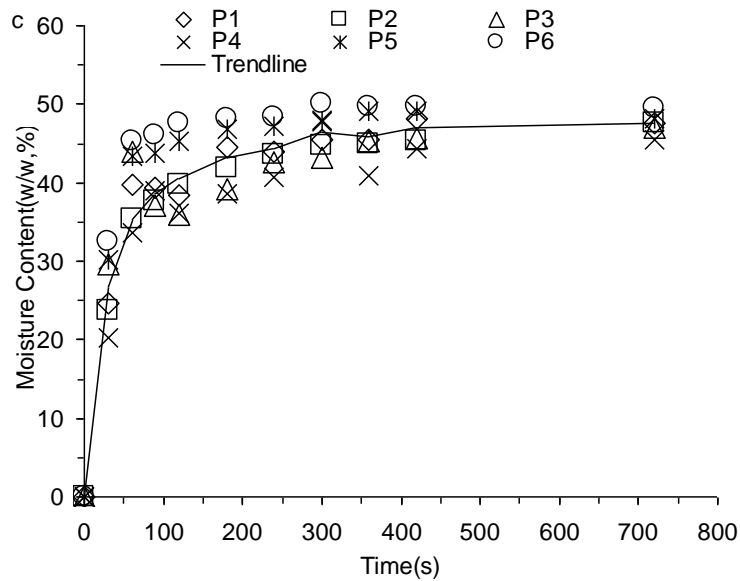


图 2.11 搅拌槽 Vessel II 中不同转速下监测点含湿量的变化 (a: 50 rev/min; b: 70 rev/min; c: 90 rev/min; 试验条件: 终了含湿量为 50%, 装料量为 2 kg DM)

Fig. 2.11 Effects of rotation speed on the mixture of CS and water in Vessel II

(a: 50 rev/min; b: 70 rev/min; c: 90 rev/min; Condition: 50% final moisture content, 2 kg DM loading)

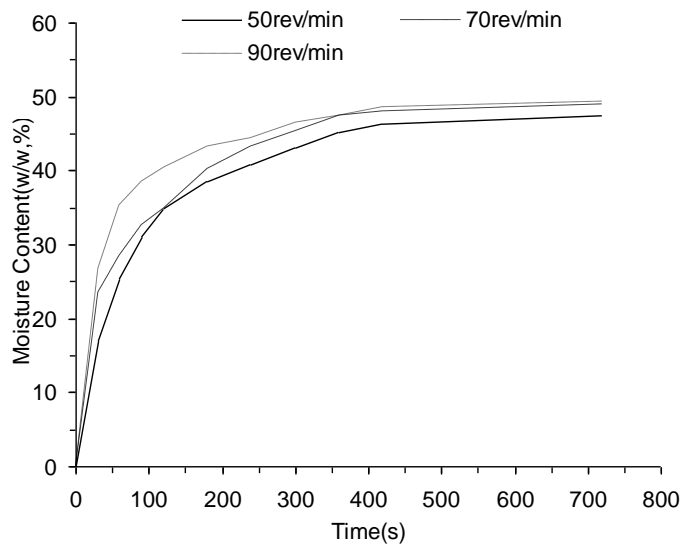


图 2.12 Vessel II 50%终了含湿量不同转速含湿量变化对比 (试验条件参照图 2.11)

Fig. 2.12 Effects of rotation speed on the mixture of CS and water in Vessel II

### 2.3.7.2 搅拌槽 Vessel III冷模试验

冷模试验搅拌槽 Vessel III 的直径为 786 mm, 其具体尺寸见表 2.1. 由于试验规模和试验条件的限制, 本组试验测定了 50 rev/min 和 70 rev/min 的玉米秸秆与水分的混合过程, 其中每个搅拌转速做了两次重复试验。

图 2.13 中 a 和 b 分别表示的是在搅拌转速为 50 rev/min 和 70 rev/min 时的监测点含

湿量的变化，终了含湿量均为 50%。可以看出，在此较大尺度的搅拌槽下监测点含湿量的变化趋势与小尺度搅拌槽中的相同，且随着搅拌槽尺度的变大，混合时间是增加的，本试验由于试验条件的限制，只是进行了探索，并未在此尺度的搅拌槽中做深入的研究，但其数据可作为验证计算流体力学模型的参考。

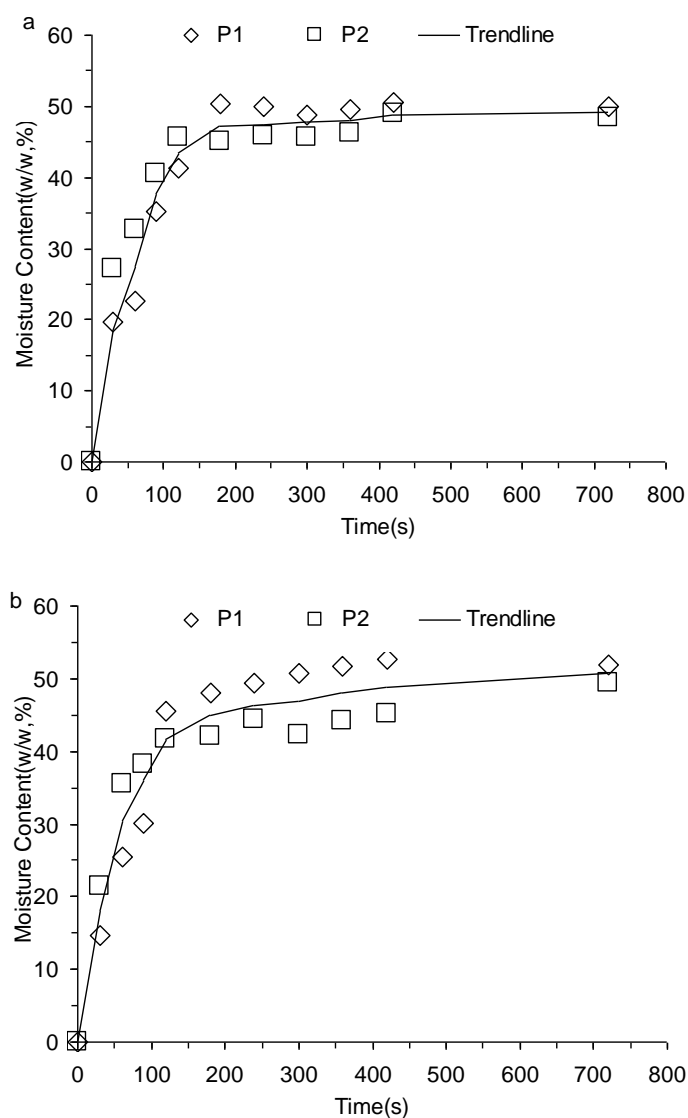


图 2.13 搅拌槽 Vessel III 中不同转速下监测点含湿量的变化 (a: 50 rev/min; b: 70 rev/min; 试验条件: 终了含湿量为 50%, 装料量为 15 kg DM)

Fig. 2.13 Effects of rotation speed on the mixture of CS and water in Vessel III (a; 50 rev/min; b: 70 rev/min; Condition; 50% final moisture content, 15 kg DM loading)

## 2.4 小结

极限高固含量“干法”稀酸玉米秸秆预处理工艺中存在的缺陷: 由于蒸汽的冷凝和秸秆的吸水结团, 导致反应器内温度分布不均, 造成同一批次的玉米秸秆物料预处理的温度不

相同,从而导致预处理结果不相同,严重影响后续的糖化和发酵试验。本章针对这些问题,在反应器中加入了螺带搅拌桨。由于预处理工艺结束后,固体含量为 50.1%,并没有游离水的存在。本章以预处理前的玉米秸秆为原料,在不同尺度的搅拌槽中探寻了影响玉米秸秆与水分混合过程的因素,主要有以下结论:

(1) 对烘干的预处理前的玉米秸秆和预处理后的玉米秸秆进行了颗粒的筛分试验,发现在颗粒粒径范围为<60 目、60~40 目和 40~20 目的玉米秸秆质量分率有所增加,也就是说预处理降低了玉米秸秆的颗粒大小。

(2) 在较小尺度的搅拌槽 Vessel I 中使用不同直径比例的螺带搅拌桨进行预混合试验,确定适合本研究所使用的玉米秸秆颗粒粒径分布的最佳螺带搅拌桨与搅拌槽直径比例为  $d/D=0.90$ 。

(3) 搅拌槽 Vessel I 中最合适的干物料的装料量为 200 g,也就是说要取得好的混合效果,需要确定螺带搅拌桨的作用范围。

(4) 在最终均匀的含湿量较小时,也就是初始时混合加入的水分较少时,混合所需要的时间变长,这是由于秸秆具有强吸水性的性质,当含湿量较小时,颗粒之间的含湿量梯度变小,从而减慢了颗粒间水分的传递速度。

(5) 随着搅拌转速的增加,玉米秸秆颗粒与水分的混合过程先加快后变慢,这是由于转速增加时,在螺带搅拌桨的作用下,玉米秸秆颗粒之间的相互碰撞频率和摩擦力加大,促进了颗粒之间水分的传递;当转速增加到 120 rev/min 时,由于玉米秸秆颗粒的惯性作用,在搅拌槽内形成了较大的漩涡造成物料旋转运动,减弱了传质过程。

(6) 螺带搅拌桨与搅拌槽内壁之间的空隙与所处理的玉米秸秆颗粒粒径分布息息相关。在  $d/D=0.90$  时,混合过程最快的颗粒粒径分布是 40~20 目,也就是螺带搅拌桨与搅拌槽直径之比应随着玉米秸秆颗粒粒径分布的减小而变大。

(7) 在大尺度冷模搅拌槽中也能实现玉米秸秆与水分的混合,且与较小尺度的搅拌槽 Vessel I 中具有相似的混合规律,随着转速的增加,混合过程加快。同时,所测得的扭矩数据可以作为第 4 章中验证计算流体力学模型正确性的重要参考。

## 第 3 章 流变学性质的表征

### 3.1 引言

第 2 章中, 本研究在三种不同尺度(搅拌槽直径不同)的冷模搅拌槽中, 研究了玉米秸秆与水分的混合情况, 并分析了不同颗粒粒径、不同含湿量等不同玉米秸秆状态下的混合过程。但是我们得到的仅仅是直观的混合时间和所消耗的扭矩, 在进行搅拌桨的优化设计和反应器的放大试验过程, 数据远远不够; 随着搅拌槽尺度的增加, 冷模试验也大大的受到了人力和物力的限制。

当这种高固体含量的玉米秸秆在搅拌槽中进行剪切混合的过程时, 我们可以把其当作流体介质, 赋予其表观粘度, 来代表其在不同含湿量和不同的粒径状态下的物理性质, 同时, 所求出的流体力学参数也可以用到计算流体力学中, 进行计算以获得搅拌桨优化、改进以及放大所需要的数据。

这里需要注意的是, 粘度是指的分子间的粘滞力<sup>[67]</sup>, 严格意义上来讲, 我们所处理的玉米秸秆物料是不存在粘度的, 因为颗粒之间已经不存在游离的水分。这种简化, 实质上是将颗粒间的摩擦力简化为了流体中的分子间的粘滞力。

本章首先使用牛顿流体对搅拌槽 Vessel I 中的搅拌桨参数进行了测定, 然后使用数学方法和前面所获得的数据, 对不同含湿量下的玉米秸秆物料的流体力学参数进行了测定, 并使用幂律模型对其进行了表征, 最后研究了含湿量以及粒径对流体力学幂律模型参数(表观粘度、流变指数、稠度系数)的影响。

### 3.2 材料与方法

#### 3.2.1 材料

在本章中, 我们首先要使用已测得粘度的牛顿流体和非牛顿流体去测定搅拌桨的一些固有参数, 其中所使用的试剂如下, 对这些流体这里称之为校正用流体 (Calibration Liquids)。

玉米糖浆 (Corn Syrup) 购自上海好成食品发展有限公司; 甘油 (Glycerol) 购自上海凌锋化学试剂有限公司。

#### 3.2.2 试验方法

##### 3.2.2.1 校正用流体介质粘度的测定

由于玉米糖浆和甘油的粘度受温度的影响很大, 这里我们使用控制温度的方法, 以获得更多不同粘度下的螺带搅拌桨的参数。

各校准用流体的流变学性质如表 3.1 所示, 其粘度均是由 ARES 旋转流变仪 (TA Instruments, Inc., New Castle, DE) 在相应的温度下测得; 各流体具体流变学性质如表 3.1 所示。

表 3.1 校正用流体介质的流变学性质

Table 3.1 Rheological properties of the calibration liquids

Liquid	Properties	Index number $n$	$K_{pl} (Pa \cdot S^n)$	Density ( $kg/m^3$ )
Corn Syrup I	Newtonian	1	6.687	1350
Corn syrup II	Newtonian	1	3.168	1350
Glycerol I	Newtonian	1	1.200	1261
Glycerol II	Newtonian	1	0.844	1261

注: Corn Syrup I 和 II 分别表示在 25.0°C 和 31.0°C 的参数; Glycerol I 和 II 分别表示在 23.0°C 和 27.0°C 的参数;

### 3.2.3 数值方法

对于牛顿型流体, 我们将剪切应力与速度梯度之比称之为粘度, 如式 (3-1), 其值并不随搅拌剪切速率的变化而变化, 在同一搅拌槽内各个位置的粘度也是一样的。

$$\tau = \mu\gamma \quad (3-1)$$

式中:  $\tau$ —剪切应力,  $kg/m^3$ ;

$\mu$ —牛顿流体粘度,  $Pa \cdot S$ ;

$\gamma$ —剪切速率,  $s^{-1}$ ;

而本研究所处理的高不溶固体含量木质纤维素浆液为典型的非牛顿流体, 非牛顿流体的粘度是随着剪切速率和速度梯度的变化而变化的, 并不存在像牛顿流体那样的恒定的粘度。在搅拌浆所引起的复杂流型中, 由于搅拌桨在搅拌槽各位点产生的剪切速率不同, 因此流体的实际粘度也不同。

我们知道, 粘度是液体粘滞力的一种量度, 是流体在流动时分子间产生的摩擦的性质。在我们所开发的极限高固含量玉米秸秆预处理过程中, 预处理结束时物料的不溶固体含量为 50% 左右, 而当玉米秸秆中不溶固体含量超过 40% 时, 颗粒间的游离水就已经消失了, 取而代之的是空气<sup>[37]</sup>。因此, 严格意义上, 这种物料并不是流体, 这里为了后续的处理方便, 我们把它假设为流体。

在中低剪切速率范围内, 我们可以用两参数的幂律模型来描述非牛顿流体的流变学性质<sup>[68]</sup>, 如式 (3-2)。

$$\tau = K_{pl}\gamma^n \quad (3-2)$$

式中:  $K_{pl}$ —稠度系数,  $Pa \cdot S^n$ ;

$n$ —流变指数, 无量纲;

稠度系数  $K_{pl}$  和流变指数  $n$  都是流变学常数, 稠度系数  $K_{pl}$  表示流体粘性的大小, 值越大, 流体的粘性越大。流变指数  $n$  表示流体的非牛顿型的程度, 也就是流体剪切稀化、

稠化的程度,  $n=1$  时, 为牛顿流体;  $0 < n < 1$  时, 表示剪切变稀的流体,  $n$  越小, 表示其剪切稀化程度越强;  $n > 1$ , 表示剪切稠化的流体<sup>[67]</sup>。

由于非牛顿流体没有恒定的粘度这一属性, 在进行搅拌器的设计以及搅拌能耗的计算时引起了诸多的不便。引入非牛顿流体“表观粘度”的概念可以很好的解决这一问题: 在搅拌系统的几何参数不改变的情况下, 流体介质分别为已知粘度牛顿流体和给定的非牛顿流体, 当两种流体消耗相同的搅拌功率时, 牛顿流体的粘度就是该非牛顿流体的表观粘度  $\eta_a$ <sup>[69-71]</sup>。

在装有特定型式的搅拌槽中, 剪切速率也不是一个恒定的值, 是沿着搅拌槽的半径方向改变的, 1956 年, Metzner 和 Otto 等<sup>[72]</sup>提出将不断改变的剪切速率  $\gamma$  用整个搅拌槽的有效剪切速率  $\gamma_{eff}$  来替代, 则  $d\tau/d\gamma_{eff}$  是表示其在一定剪切速率下的表观粘度, 可以得到非牛顿流体表观粘度的表达式 (3-3):

$$\eta_a = K_{pl} \cdot \gamma_{eff}^{n-1} \quad (3-3)$$

将式 (3-3) 两边取对数, 即:

$$\lg \eta_a = \lg K_{pl} + (n-1) \lg \gamma_{eff} \quad (3-4)$$

式 (3-4) 为线性方程, 也就是说, 当我们求得搅拌槽中的流体介质在不同有效剪切速率  $\gamma_{eff}$  下的表观粘度  $\eta_a$ , 便可拟合出流体的幂律方程参数  $K_{pl}$  和  $n$  的值。

### 3.3 有效表观粘度 $\eta_a$

#### 3.3.1 搅拌器功率准数的计算

搅拌器功率是指将属性一定的流体介质装到形状一定、几何参数一定的搅拌槽中, 并使用几何结构和参数同样一定的搅拌器使之发生连续的运动所需要的功率, 并不包括搅拌器在运行过程中的机械损耗。这里不同于我们通常所说的搅拌功率, 搅拌功率是一个笼统的概念, 可以指搅拌作业进行时所需要的所有动力。

由搅拌器功率的定义可以知道, 它与以下几个因素有关: 所处理流体介质的物性参数、搅拌槽的几何结构参数和与搅拌器的几何结构参数和运转参数。可以看出, 不论是什么样的搅拌过程或目的, 只要上述几个因素中的搅拌槽、搅拌桨的几何结构参数和操作参数以及流体介质的物理性质相同时, 所得到的搅拌器功率应该是一致的。也就是说, 只要能确定搅拌器功率与上述几何变量和参数的关系, 其计算便迎刃而解<sup>[68, 69, 73, 74]</sup>。

如何在如此众多的因素和变量中找出主要的影响因素并建立与搅拌功率的关系? 目前研究者均是采用的因次分析和相似论的方法, 即根据这些变量和参数对搅拌器功率影响的不同, 将它们划分范围并分类, 最终将大量的流体介质物性变量、搅拌系统的几何参数变量和操作参数变量缩减为少量的有意义的并可以进行关联计算的无因次数群。

流体介质搅拌运动中的局部压力和速度也应该遵循动量和质量守恒定律, 表示这种关系的是纳维-斯托克斯 (N-S) 方程。为得到无因次形式的 N-S 方程, 我们需要使用能表

示无因次变量的实际变量和特性变量之比带入其中。这里我们使用如下几个特性变量来求解无因次速度  $v^*$  和无因次压力  $p^*$ ：特性质量  $\rho d^3$ （流体介质密度  $\rho$  与搅拌桨直径立方  $d^3$  的乘积）、特性长度量（搅拌桨直径  $d$ ）、特性速度量  $Nd$ （搅拌转速  $N$  与搅拌桨直径  $d$  的乘积）和特性时间量  $1/N$ （搅拌转速  $N$  的倒数）。可以看出，无因次的 N-S 方程中的无因次速度  $v^*$  和无因次压力  $p^*$  是无因此数群搅拌雷诺准数  $Re_m$  和无因次数群弗鲁德准数  $Fr$  的函数，见式 (3-5) [68, 75, 76]。

$$p^*(v^*) = f(Re_m, Fr) \quad (3-5)$$

搅拌器功率  $P$  可用公式 (3-6) 计算求得，其中  $\omega$  表示搅拌器的运转角速度， $M$  表示所加到搅拌器上的扭矩。其中所加的扭矩  $M$  是与搅拌器桨叶运转时的压力分布有关，这样便建立了无因次压力  $p^*$  和无因次功率的函数关系，见式 (3-7)，[77]

$$P = \omega M = 2\pi N M \quad (3-6)$$

$$p^* = f(P / \rho N^3 d^5) \quad (3-7)$$

我们将搅拌器功率准数  $N_p$  由式 (3-8) 表示，则由式 (3-5)、(3-7) 可以得到搅拌功率准数也是无因此数群搅拌雷诺准数  $Re_m$  和无因次数群弗鲁德准数  $Fr$  的函数，见式 (3-9)。

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 d^5} \quad (3-8)$$

$$N_p = f(Re_m, Fr) \quad (3-9)$$

搅拌雷诺准数  $Re_m$  表示惯性力与粘性力的比值，可由式 (3-10) 求得；弗鲁德准数  $Fr$  表示惯性力与重力的比值，可以由式 (3-11) 求得。[67, 68, 75, 77]

$$Re_m = \frac{\rho N d^2}{\mu} \quad (3-10)$$

$$Fr = \frac{N^2 d}{g} \quad (3-11)$$

对于固定型式的搅拌器，我们还需要将搅拌器的几何结构和尺寸参数变量数群  $C$  包括在内，则搅拌器功率准数可以表示为式 (3-12)：

$$N_p = C \cdot f(Re_m, Fr) \quad (3-12)$$

在无挡板条件下，当搅拌雷诺数  $Re_m < 300$  时，搅拌处于层流和过渡流区，液面中心没有较大的漩涡，这时不必考虑  $Fr$  数的影响，此时搅拌功率准数  $N_p$  可以表示为搅拌雷诺数的因次函数，见式 (3-13) [67, 68, 75, 77, 78]。

$$N_p = C \cdot Re_m^x \quad (3-13)$$

由式 (3-13) 可以看出，只要我们求出几何参数变量数群  $C$ ，便可以建立搅拌器扭矩  $M$  与表观粘度  $\eta_a$  的关系。

### 3.3.2 搅拌桨几何参数数群 $C$ 的计算

由上述分析可知，参数  $C$  代表的是搅拌桨和搅拌槽的几何参数变量，与搅拌系统有关，而与参与搅拌的流体介质的属性无关。因此，我们可以在选定的搅拌装置中，用已知流体属性牛顿流体测绘搅拌器的功率曲线，然后可以计算出桨叶几何参数  $C$  的值。<sup>[21]</sup>

图 3.1 表示的是在双对数坐标系中，用玉米糖浆（Corn syrup）和甘油（Glycerol）的四种不同粘度下所绘制的搅拌槽 Vessel I 的功率曲线，可以求得  $x=-1.037$ ， $C=150.48$ 。在进行试验所使用的最高转速为 2.17 rev/s，即 110 rev/min，在这个转速范围内，27.0℃时的甘油达到了最大的搅拌雷诺准数，约为 64.07，这个值远小于 300，说明弗鲁德准数  $Fr$  可以不计；从图 3.1 中还可以看出，在这个搅拌雷诺准数范围内，搅拌雷诺准数  $Re_m$  与搅拌器功率准数  $N_p$  仍呈线性关系，说明此时搅拌槽内的流动状态仍为层流，2000 年，Delaplace 等<sup>[74]</sup>也使用螺带桨研究了参数  $C$  的值，其所报道的螺带桨中层流像过渡流转变的搅拌雷诺准数的值为 60；事实上，1993 年，Cheng 和 Carreau 等<sup>[78]</sup>所报道螺带桨搅拌系统中层流结束时的搅拌雷诺准数  $Re_m$  在 50-100 之间，这均与我们的研究结果相符合。

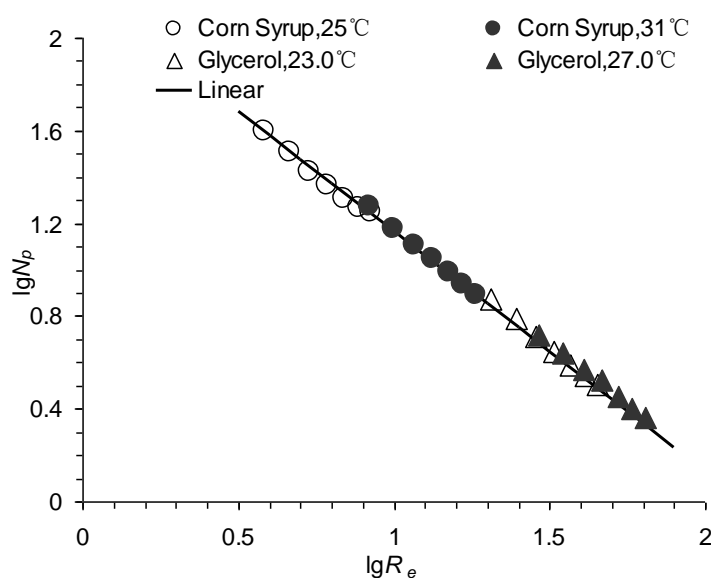


图 3.1 搅拌槽 Vessel I 的  $Re_m-N_p$  功率曲线

Fig. 3.1  $Re_m-N_p$  power curve of Vessel I

实际上，我们通过图 3.1 求出  $Re_m-N_p$  在双对数坐标系中是成线性关系，也就是说式 (3-13) 中的因次  $x=-1$ ，通过变换式 (3-13)，并与公式 (3-8) 联立，可以得到参数  $C$  的计算式 (3-14)，

$$C = \frac{N_p}{Re_m} = \frac{2\pi M}{\mu N d^3} \quad (3-14)$$

因此，我们还可以直接通过式(3-14)来计算参数  $C$  的值。图 3.2 表示的是根据式(3-14)

直接求桨叶参数  $C$  值, 不同粘度流体和不同转速下, 所求得  $C$  值的偏差均在 5% 以内, 这里取平均值  $C=147.12$ .

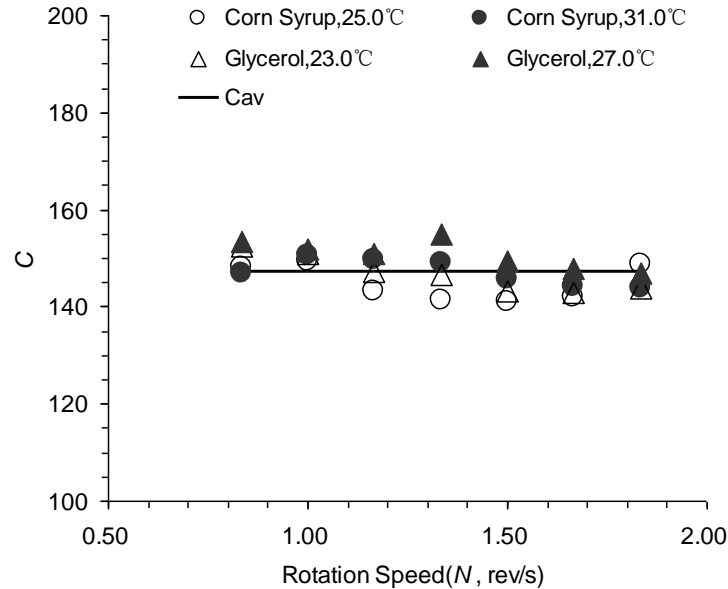


图 3.2 由公式 (3-14) 直接计算 Vessel I 螺带搅拌桨桨叶参数  $C$  值

Fig. 3.2 Calculation of parameter  $C$  from equation (3-14)

在求螺带桨搅拌系统参数  $C$  的值方面, 研究者已经做了大量的试验和理论工作, 众多的试验表明单螺带搅拌桨的参数  $C$  值要较双螺带搅拌桨小一半左右, 2000 年, Delaplace 等<sup>[74]</sup>利用试验所测得的双螺带桨搅拌系统的  $C$  值为 315, 减半后为 157.5, 这与本研究中所使用的单螺带搅拌桨的  $C$  值相吻合。也有研究者开发出了直接利用搅拌系统的几何结构来计算参数  $C$  的公式, 在有的研究中也有的研究者将参数  $C$  写作  $K_p$ , 例如 2006 年, Delaplace 和 Leuliet 等<sup>[63]</sup>所开发出来的经验式 (3-15), 他们并将用关联式所计算出来的  $C$  值与多达 145 个先前文献中所报道的桨叶的  $C$  值进行了比较, 发现误差均在 10% 以内。针对本研究中所使用的搅拌槽 Vessel I 系统, 利用式 (3-15) 所计算出的  $C$  值为 165.43, 误差为 10%.

$$C = 91(N_r)^{0.79} \left( \frac{D}{d} - 1 \right)^{0.31} \left( \frac{s}{d} \right)^{-0.37} \left( \frac{w}{d} \right)^{0.16} \left( \frac{l}{d} \right) \quad (3-15)$$

由于搅拌桨在加工过程中桨叶尺寸的误差, 使用玉米糖浆以及甘油所测得的搅拌系统的  $C$  值更为精确, 在以下的计算中, 取  $C=150.48$ .

在与本研究中所处理的流体的性质相近一些研究中, 也为我们计算 50% 含湿量玉米秸秆的流变学性质提供了借鉴。1986 年, Kembrowski 等<sup>[44]</sup>使用硅油 (牛顿流体) 测定了其所使用搅拌系统的桨叶几何参数  $C$ , 并应用到测定高粘度含固体颗粒的发酵液 (非牛顿流体) 的流变学性质研究中; 2003 年, Pimenova 和 Hanley 等<sup>[45, 46]</sup>使用硅油和甘油 (均为

牛顿流体)测定其所使用螺带搅拌桨的桨叶参数  $C$  值为 135, 并应用到 5%, 10%, 20% 和 30% 固含量的玉米秸秆(非牛顿流体)的流变学性质的研究中, 并将 5% 和 10% 两个固含量的流变学性质结果与传统流变仪进行了对比, 结果相吻合; 2004 年, Houchin 等<sup>[48]</sup> 使用螺带型搅拌粘度仪测定了酒糟浆液(DGS)的流变学性质, 其固体颗粒含量分别为 21%, 23%, 25%, 使用硅油和甘油测定了搅拌桨桨叶的几何参数  $C$  值为 151。

### 3.3.3 物料表观粘度的计算

对于非牛顿流体, 以表观粘度  $\eta_a$  代替雷诺数中的粘度项  $\mu$ , 就可以得到非牛顿流体的搅拌雷诺准数的计算式(3-16)<sup>[71, 79]</sup>,

$$Re_m = \frac{\rho N d^2}{\eta_a} \tag{3-16}$$

联立式(3-14)(3-16)可得表观粘度的计算式(3-17),

$$\eta_a = \frac{2\pi M}{C N d^3} \tag{3-17}$$

表 3.2 列出的是 50% 含湿量下玉米秸秆在不同转速下的所消耗的扭矩值以及根据式(3-17)所求得的在不同搅拌转速下的表观粘度值。可以看出, 随着搅拌转速的增加, 搅拌所需要的扭矩逐渐增加, 而玉米秸秆的表观粘度  $\eta_a$  呈减小的趋势, 这表示 50% 含湿量玉米秸秆物料在螺带搅拌桨的作用下表现出了剪切变稀的性质。

表 3.2 50%含湿量玉米秸秆不同转速下表观粘度的计算

Table 3.2 Calculation of the apparent viscosity of Corn Stover with 50% moisture content

Rotation Speed (rev/s)	$M$ (N m)		$\eta_a$ (Pa S)	
	Value	S.D	Value	S.D
0.83	0.329	0.0105	4.705	0.1530
1.00	0.370	0.0084	4.410	0.1053
1.17	0.406	0.0073	4.148	0.0789
1.33	0.438	0.0070	3.915	0.0656
1.50	0.470	0.0063	3.734	0.0537
1.67	0.503	0.0055	3.597	0.0417
1.83	0.530	0.0044	3.445	0.0305

S.D—表示标准偏差, 是由于扭矩在测量的过程中的误差所引起的。

## 3.4 全槽有效表观剪切速率的计算

### 3.4.1 有效表观剪切速率的提出

在高粘度非牛顿流体的搅拌混合操作时, 搅拌槽内各处的流体介质的粘度是随着剪切速率的不同而变化的, 这个特点给研究特定的搅拌系统的搅拌特性提出了一个很大的难

题, 因为搅拌槽中的剪切速率分布以及流场分布是计算功率的先决因素。

Metzner 和 Otto 在 1957 年<sup>[72]</sup>提出了有效表观剪切速率的概念很好的解决了这一难题, 可以将其与试验测量方法结合起来用于计算搅拌过程中的非牛顿流体的表观粘度。这一概念是基于以下原理: 在一特定几何结构的搅拌系统中, 将非牛顿流体介质转换为表观粘度所测得的搅拌器功率曲线是与使用同粘度下的牛顿流体所测得的搅拌器功率曲线相吻合。

### 3.4.2 Metzner 常数 $K_s$

基于以上事实, 1956 年, Metzner 和 Otto 证明了搅拌槽的有效表观剪切速率  $\gamma_{eff}$  与搅拌器的搅拌转速呈线性关系, 见式 (3-18)<sup>[72]</sup>。

$$\gamma_{eff} = K_s N \quad (3-18)$$

其中  $K_s$  称之为 Metzner 常数, 取决于搅拌系统的结构形式<sup>[21]</sup>, 对于特定的搅拌系统, 其值需要通过试验测得。尽管式 (3-18) 存在很明显的简化处理, 这种方法在提出后还是在后续的研究中得到了广泛的应用, 并取得了很好的效果, 因为它确实对间歇式非牛顿流体介质的搅拌过程能耗的计算提供了一种非常简便和相对准确的方法。

起初, Metzner 常数  $K_s$  被认为是取决于给定的搅拌系统的几何参数, 而与参与搅拌的流体介质的性质无关, 但是, 后续的研究证明常数  $K_s$  是幂律流体流变指数  $n$  的函数, 进而说明有效表观剪切速率  $\gamma_{eff}$  也与所处理的流体介质的流变学性质有关。

但是, 无论对于有螺杆的还是没有螺杆的螺带桨搅拌系统而言, 在 Metzner 常数  $K_s$  的值是否与流体介质的性质有关这一问题上出现了很大分歧。1970 年, Hall 和 Godfrey,<sup>[80]</sup> 1971 年, Nagata 等<sup>[81]</sup>, 1973 年, Rieger 和 Novak 等<sup>[82]</sup>, 1984 年, Takahashi 等<sup>[83]</sup>, 1985 年, ShamLou 和 Edwards 等<sup>[84]</sup>的研究表明其值仅仅与搅拌系统的几何结构有关, 与流体介质的性质无关; 另一方面, 由 1979 年, Yap 等<sup>[79]</sup>, 1991 年, Brito-dela Fuente 等<sup>[85-87]</sup>, 1993 年, Carreau 等<sup>[78]</sup>, Netusil 和 Rieger<sup>[88]</sup>, 1994 年, Cheng 和 Carreau<sup>[89]</sup>、Cheng 等<sup>[90]</sup>进行的研究证明对于假塑性流体  $K_s$  的值是随着流变指数  $n$  的增加而显著增加的。由以上可以看出, 最近的研究中大多数的研究者人为  $K_s$  的值是与流体的性质有关的。

过去的研究中, 许多针对螺带搅拌桨搅拌系统的 Metzner 常数  $K_s$  计算的关联式被开发出来, 这些关联式可以分为是基于三种方法所开发出来的。第一种方法是完全基于搅拌系统的几何结构参数与试验数据的, 这种方法的缺点是并没有提供其所得到的试验数据以外的  $K_s$  值; 第二种方法<sup>[63]</sup>是将螺带搅拌桨以同等的圆柱体相替代, 并将流体介质进行库艾特流类比; 第三种方法与库艾特流类比方法相似, 不同的是加入了拖曳力。但是, 基于这三种方法所推导出的关联式并不能很好的表示文献中所报道的 Metzner 常数  $K_s$  与搅拌系统几何参数和流体介质的流变参数的关系。

2006 年, Delaplace 等<sup>[63]</sup>研究发现, 在较窄的流变指数范围内( $0.45 < n < 0.75$ )随流变指数的变化也就是流体性质的变化很小, 在实际的应用计算中可以忽略不计; 而在这个范围以外, 流变指数  $n$  对常数  $K_s$  的影响不可忽略, 并推导出了螺带型搅拌桨中剪切变稀流体的计算关系式, 并将计算结果与以往文献中所报道的不同结构的  $K_s$  的值进行了对比, 结

果相吻合，其中几何参数的条件为： $N_r=1$  或  $2$ ， $0.025<d<0.263$ ， $0.084<w/d<0.223$ ， $0.35<s/d<2.15$ ，即式 (3-19)。

$$K_s = \frac{2}{N_r} \frac{S^{2/n}}{S^2} \frac{S_e^2 - 1}{S_e^{2/n} - 1} \frac{C}{\pi^2(l/d)} \cdot \left[ \frac{n}{2-n} \frac{S^{(2/n)-1}}{S-1} \right]^{1/(n-1)} \quad (3-19)$$

其中式中的  $S_e$  可通过式 (3-20) 求得，

$$S_e = \frac{D}{d_e} = \frac{D/d}{(D/d) - \frac{2w/d}{\ln\left(\frac{(D/d) - (1-2w/d)}{D/d - 1}\right)}} \quad (3-20)$$

我们还可以利用一种可以测得流变学性质的非牛顿流体来测定本研究中所使用的搅拌槽 Vessel I 的 Metzner 常数  $K_s$ ，方法如下<sup>[69]</sup>。(1) 测定所使用搅拌系统 Vessel I 的功率曲线，见图 3.1。(2) 在同一装置中搅拌给定的非牛顿流体，测定其在不同搅拌转速下所消耗的扭矩值。(3) 在步骤 (1) 所测得的功率曲线上查找与步骤 (2) 计算所得到的搅拌器功率准数相同的搅拌雷诺数。

### 3.5 幂律模型参数的拟合

#### 3.5.1 流变指数的 $n$ 的拟合

通过前面的计算可以知道，对于特定搅拌系统里的特定流体，Metzner 常数  $K_s$  是一个定值，则将式 (3-18) 代入取对数后的幂律模型，即式 (3-4)，经过变换可得式 (3-21)，由于我们所求解的幂律模型在对数坐标系中是线性关系，则可得到 (3-22)。

$$\lg \eta_a = \lg K_{pl} + (n-1) \cdot \lg K_s N \quad (3-21)$$

$$n-1 = \frac{\lg \eta_{a1} - \lg \eta_{a2}}{\lg K_s N_1 - \lg K_s N_2} = \frac{\lg \eta_{a1} - \lg \eta_{a2}}{\lg N_1 - \lg N_2} \quad (3-22)$$

式 (3-22) 表示可以通过  $\lg \eta_a \sim \lg N$  的函数关系求得搅拌物料的流变指数  $n$ ；进而通过式 (3-19) 求得 Metzner 常数  $K_s$ 。

图 3.3 表示的是玉米秸秆 (CS) 和预处理后玉米秸秆 (PCS) 50% 含湿量下  $\lg \eta_a \sim \lg N$  的关系。从图中可以看出，R 平方值均在 0.99 左右，说明数值拟合线性较好，趋势线的斜率值即为  $n-1$ 。这样我们就可以通过式 (3-19) 计算出的 50% 含湿量玉米秸秆 (CS) 和预处理后玉米秸秆 (PCS) 的 Metzner 常数  $K_s$  值，列于表 3.2。从表 3.2 中可以看出，50% 含湿量下的玉米秸秆的流变指数要高于预处理后玉米秸秆的流变指数，这说明预处理后玉米秸秆的剪切变稀的性质更强。这可能是因为预处理后玉米秸秆的粒径较未预处理的玉米秸秆小；另一方面，由于预处理过程破坏了玉米秸秆颗粒的物理性质，使其所能吸收的最大水分的量减少，也就是说同等含湿量下，预处理后的玉米秸秆中有较多的游离水分，致使在相同的剪切速率下，其颗粒之间的相互碰撞频率和摩擦力较小。

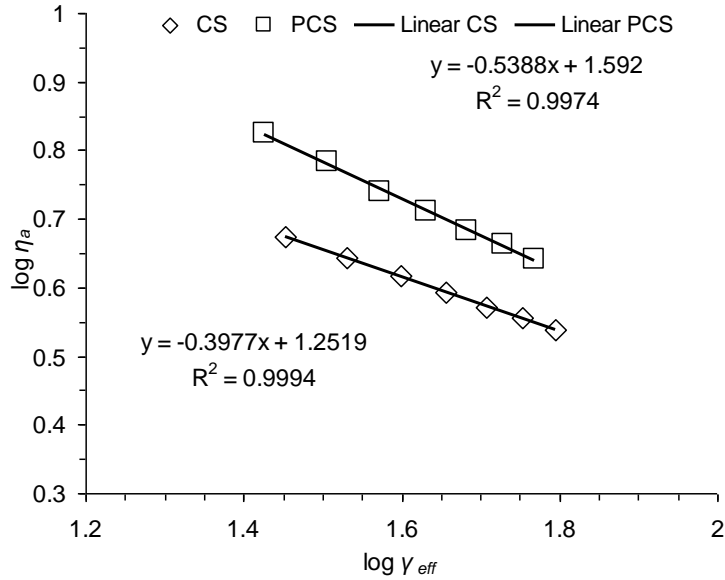


图 3.3 50%含湿量下玉米秸秆和预处理玉米秸秆流变指数的拟合

Fig. 3.3 Power law index number calculation of 50% moisture content CS/PCS

表 3.2 50%含湿量下 CS 和 PCS 的流变指数与 Metzner 常数

Table 3.2 Power number and Metzner constant of CS/PCS with 50% moisture content

Material	$n$	$K_s$	$R^2$
CS	0.602	34.208	0.9994
PCS	0.461	32.046	0.9974

求出搅拌系统的 Metzner 常数后，即可根据式 (3-18) 求出不同转速下表观剪切速率  $\gamma_{eff}$  的值。

### 3.5.2 稠度系数 $K_{pl}$ 的拟合

通过前述已经求得的每一转速下的表观粘度  $\eta_a$  和表观有效剪切速率  $\gamma_{eff}$ ，根据式 (3-21) 即可拟合出稠度系数  $K_{pl}$  的值。

图 3.4 表示的是 50%含湿量下玉米秸秆 (CS) 和预处理后玉米秸秆 (PCS) 在双对数坐标系中不同剪切速率下的表观粘度值。通过趋势线的截距就可以求出稠度系数  $K_{pl}$  的值。

表 3.3 列出了玉米秸秆和预处理后玉米秸秆在 50%含湿量下的流变指数和稠度系数的值。可以看出，预处理后玉米秸秆的稠度系数是未预处理玉米秸秆稠度系数的两倍之多。这说明预处理后 50%含湿量玉米秸秆的粘性较大，这可能是因为预处理过程中有可溶性的糖生成。

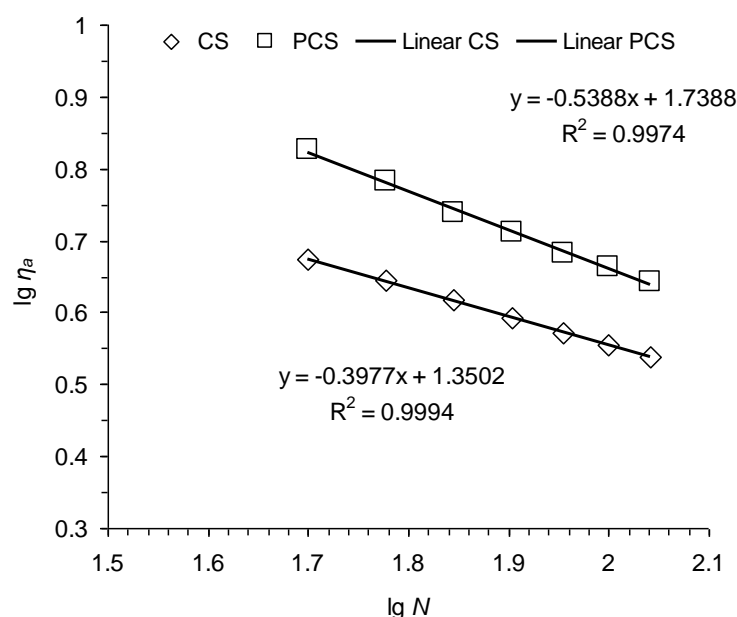


图 3.4 50%含湿量下稠度系数  $K_{pl}$  的拟合曲线

Fig. 3.4 Consistency number calculation of 50% moisture content

表 3.3 50%含湿量玉米秸秆和预处理玉米秸秆的流变指数和稠度系数值

Table 3.3 Consistency and power law index number of 50% moisture content

Material	$n$	$K_{pl}$ (Pa S <sup>n</sup> )	$R^2$
CS	0.602	18.068	0.9994
PCS	0.461	39.546	0.9974

### 3.6 含湿量对幂律参数的影响

在小节 3.5 中我们详细的论述了如何通过间接的方法测定 50%含湿量下的玉米秸秆和预处理后玉米秸秆的幂律模型流变学参数。为了更好的了解不同含湿量下玉米秸秆和预处理玉米秸秆物料的性质,本小节使用相同的方法测定了不同含湿量下的玉米秸秆和预处理后玉米秸秆的幂律模型参数。

#### 3.6.1 含湿量对搅拌扭矩的影响

图 3.5 显示了玉米秸秆 (CS) 和预处理后玉米秸秆 (PCS) 分别在 0%、10%、20%、30%、40%、50%含湿量下搅拌所消耗的扭矩随转速的变化。可以看出,玉米秸秆和预处理后玉米秸秆在不同的含湿量下,所消耗的扭矩都是在 110 rev/min 的范围内随着转速的增加而增加的,这里的原因在第 2 章中我们分析过,是因为随着转速增加颗粒相互之间的碰撞频率和摩擦力增加;可以发现,无论玉米秸秆还是预处理后玉米秸秆,随着含湿量的增加,所消耗的扭矩都是增加的,且含湿量越高,其扭矩增加的越快,这可能是因为含湿量增加后,玉米秸秆颗粒吸水膨胀造成摩擦力增加而造成的。

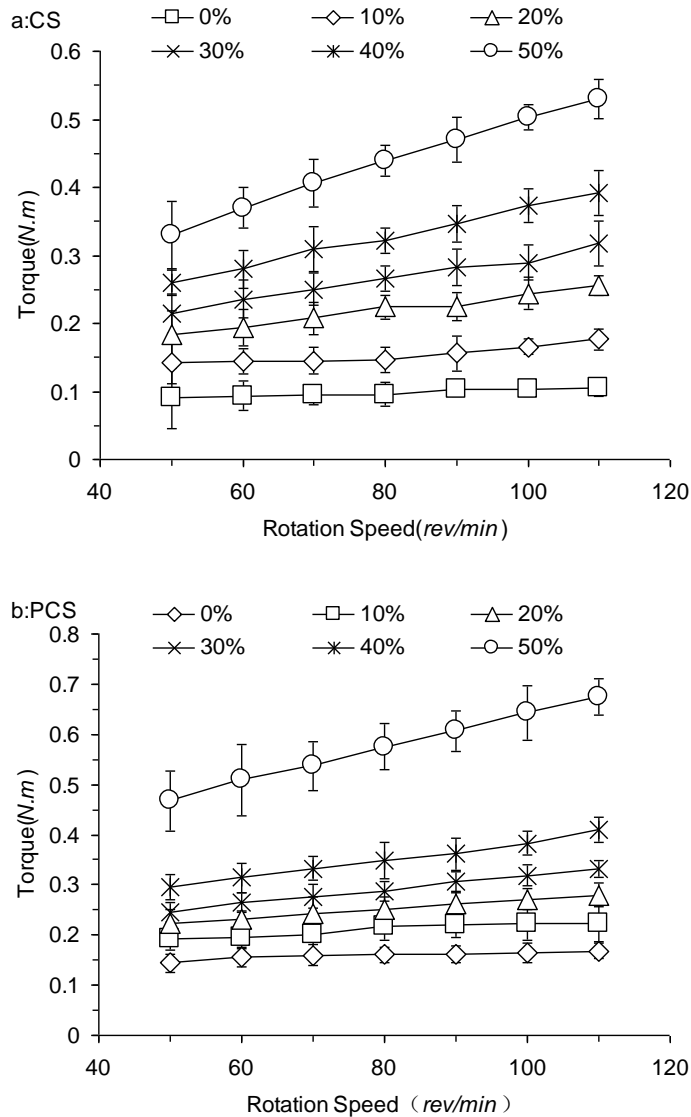


图 3.5 不同含湿量下的玉米秸秆扭矩随转速的变化

Fig. 3.5 Effect of rotation speed on the torque of CS(PCS) in different moisture content

### 3.6.2 含湿量对幂律模型参数的影响

图 3.6 显示的是含湿量分别为 0%，10%，20%，30%，40%，50% 下的玉米秸秆和预处理玉米秸秆的表观粘度随剪切速率的变化。可以看出，无论是玉米秸秆还是预处理后玉米秸秆，从 0% 至 50% 含湿量的物料在螺带型搅拌桨的剪切下表观粘度逐渐变小，均呈现出剪切变稀的属性；这与 Pimenova and Hanley 等<sup>[46]</sup>使用螺带型搅拌粘度仪所测定固含量在 10%~40% 时的玉米秸秆悬浮液的幂律模型的流变参数变化相符合；Viamajala 等<sup>[37]</sup>提出在玉米秸秆物料中没有游离水存在时，物料搅拌所表现出的表观粘度是由颗粒之间的碰撞频率摩擦力所决定的，由于转速的增加也就是有效表观剪切速率的增加，物料颗粒的运动加快，同时在试验中也观察到随着搅拌转速的增加，冷模搅拌槽中物料的高度增加，这就说明玉米秸秆颗粒的堆积密度变小，也就是说玉米秸秆颗粒之间的空隙变大，造成颗粒之

间相互碰撞的频率和摩擦力减小，定量的表现为表观粘度的减小。

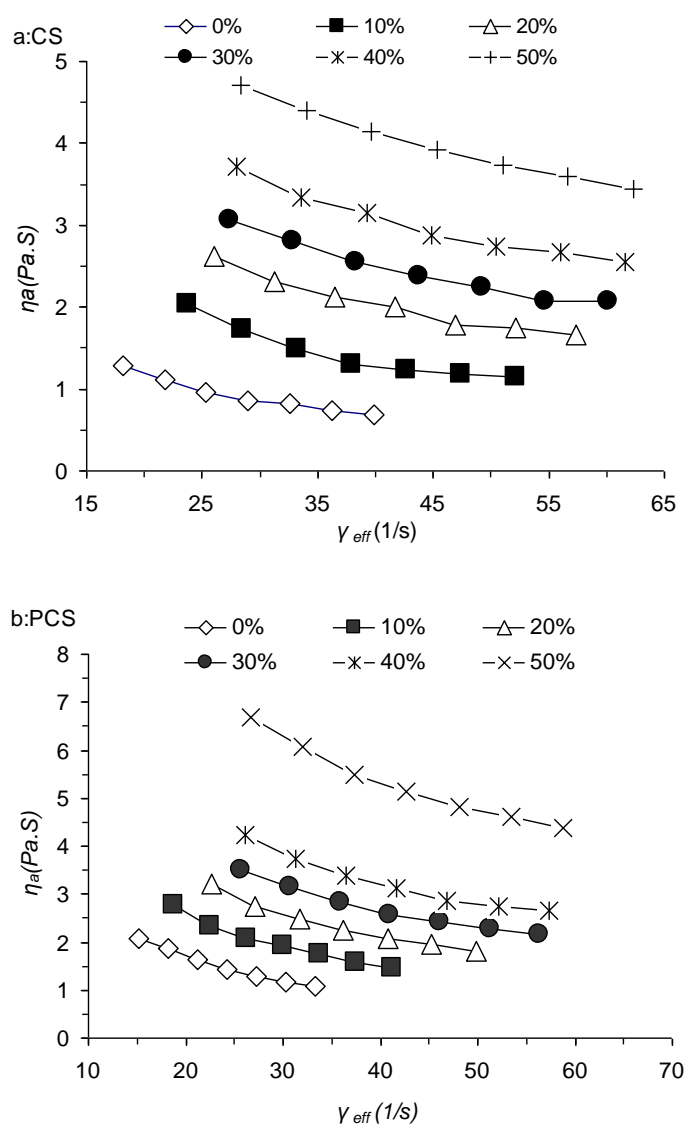


图 3.6 不同含湿量下表观粘度随剪切速率的变化

Fig. 3.6 Apparent viscosity changes with effective shear rate of CS/PCS

表 3.4 表示的是玉米秸秆和预处理后玉米秸秆物料的幂律模型参数随含湿量的变化和具体数值。可以看出，无论是玉米秸秆还是未处理玉米秸秆，随着含湿量的增加，流变指数  $n$  呈增加的趋势，也就是物料的剪切变稀性变弱；这是因为在含湿量增加时，虽然都没有游离水，但是颗粒吸水使物料的颗粒的粒度变大，且整个物料体系的粘弹性增加，使玉米秸秆颗粒间的摩擦力增加。但是 Viamajala 等<sup>[37]</sup>的研究表明，在没有游离水存在时，物料的粘度并不随含湿量的变化而变化，与本研究的结果有差异，这是因为 Viamajala 等的研究在测量粘度时使用的传统流变仪器直接测量粘度的方法，而本研究中是在螺带型搅拌槽中进行的流变学性质测定。

从表 3.4 中还可以看出无论是玉米秸秆还是预处理后稠度系数  $K_{pl}$  均随着含湿量的增加而增加,这说明随着玉米秸秆含湿量的增加,其粘性变大了,这也可能是由于玉米秸秆颗粒吸水膨胀的缘故。

比较不同含湿量下玉米秸秆和预处理玉米秸秆的流变指数和稠度系数的值可以看出,流变指数较未处理玉米秸秆有所减小,说明预处理后的玉米秸秆物料剪切变稀性更强,是因为高温稀酸预处理打破了木质素对纤维素的保护和纤维素致密的微晶结构,造成了颗粒的粒度变小,使其在螺带型搅拌槽中颗粒间的摩擦力减小;另外,就像我们前面所分析的,预处理后的玉米秸秆的吸水能力变小,在同一含湿量下,预处理后的玉米秸秆有更多的游离水分。另外,预处理后玉米秸秆的稠度系数  $K_{pl}$  明显大于未预处理玉米秸秆的,这说明预处理后玉米秸秆物料的粘性较大,这是因为玉米秸秆在高温稀酸预处理过程中生成的可溶性的糖所致。

表 3.4 不同含湿量下的玉米秸秆和预处理玉米秸秆的幂律参数值

Table 3.4 Parameters of power law model in different moisture content of CS/PCS

Moisture Content(w/w)	CS			PCS		
	$n$	$K_{pl}$	$R^2$	$n$	$K_{pl}$	$R^2$
0%	0.203	12.856	0.9952	0.167	20.389	0.9949
10%	0.322	16.049	0.9972	0.212	27.568	0.9836
20%	0.422	17.575	0.9904	0.291	28.874	0.9977
30%	0.507	17.653	0.9891	0.324	29.076	0.9953
40%	0.523	17.727	0.9889	0.421	29.730	0.9869
50%	0.602	18.068	0.9994	0.461	39.084	0.9974

### 3.7 小结

为了能够方便和定量的描述在第 1 章中螺带型搅拌系统中这种高固含量玉米秸秆物料混合所表现出来的性质,本章参考非牛顿流体的研究中表观粘度的概念,将这种搅拌过程中的物料虚拟为一种流体,并赋予其一个“表观粘度”。同时借鉴以前研究者的方法,以螺带型搅拌槽中测得的扭矩为依据,并结合经验公式,使用幂律模型对其进行了参数的表征。

(1) 使用两种牛顿流体(玉米糖浆和甘油)对本研究中所使用的螺带型搅拌系统搅拌槽 Vessel I 的几何结构参数  $C$  使用不同方法进行了测定,其值为 147.12,并与之前的研究者在相似比例的系统中所得到的数据进行了对比。

(2) 使用间接的测量方法对含湿量分别为 0%、10%、20%、30%、40%和 50%下的玉米秸秆和预处理玉米秸秆的幂律参数(流变指数和稠度系数)的值,研究发现,无论是玉米秸秆和预处理玉米秸秆,其值均随着含湿量的增加而增加,也就是说随着含湿量的增

加，物料的剪切变稀性变弱、粘性增加；预处理玉米秸秆的流变指数较未预处理玉米秸秆的小，说明其剪切变稀性较强，稠度系数较未处理玉米秸秆的高，说明其粘性较高。

## 第 4 章 搅拌预处理反应器的 CFD 研究

### 4.1 引言

在第 2 章中,本研究讨论了在装备有螺带搅拌桨的搅拌槽中处理这种极限高固体含量的玉米秸秆物料时各参数对混合过程的影响,初步确定了较为合适的搅拌桨的几何尺寸比例。但是对于进行预处理机械搅拌反应器的设计和螺带搅拌桨的优化,仅用这些有限的冷模试验数据远远不够。

为了能够将我们所处理的这种具有高固体含量物料的流变学性质进行简化和表征,第 3 章中我们根据非牛顿流体力学的概念,赋予其“表观粘度”,并用幂律模型对其进行了表征,数据拟合良好。这就为建立更加准确的计算流体力学模型提供了条件。

计算流体力学(CFD)因其相对于传统的试验方法可以节省大量的研究经费,获得试验所不能得到的大量的试验数据,周期较短,能够节省大量的研究时间等优势,近年来,随着计算机硬件技术的发展,更是能解决更多复杂的问题,为越来越多的研究者重视和使用。

对于高粘度流体的搅拌和混合主要是在层流区和过渡流区进行。针对这种流体,以往的研究者使用了较大搅拌桨直径的如锚式桨,另外一种就是“紧间隙”的螺带搅拌桨。

这种包含了高固体含量的粘性流体的搅拌和混合是在涂料、特种化学品和医药的生产中常用的单元操作,通常使用的是间歇或者半连续的操作模式。已经有很多文献和研究表明,这种螺带搅拌桨和螺带螺杆搅拌桨对于这种高粘度的牛顿或者非牛顿的流体的混合是非常适用的<sup>[91-93]</sup>。但是这种搅拌桨的功率消耗一般都高于普通的 Rushton 和推进式搅拌桨。

近年来在搅拌反应器中进行数值模拟的研究引起了越来越多的研究者的关注。<sup>[94]</sup>特别是计算机硬件和软件的发展更使得其已经成为了研究搅拌反应器中混合状况的有力工具。然而,在有搅拌桨存在的形式下搅拌槽中的流型非常复杂,这对其研究也构成了很大的挑战。虽然研究者在过去做了很大的努力,但是这仍然是一个很大的有待解决的问题。

本章旨在建立合适的搅拌槽的几何结构模型,然后与第 3 章所建立的流体力学模型结合,验证 CFD 模型的正确性和适用性,希望籍此应用于预处理搅拌反应器的开发中。本章模型验证所使用的基准为第 2 章中所测得的不同尺度冷模搅拌槽中不同转速下的功率消耗和监测点含湿量的变化曲线。

### 4.2 计算流体力学模拟流程

对搅拌反应器进行计算流体力学求解可以分为四个步骤:(1)建立搅拌反应器的几何结构,这一阶段是使用设计软件(Auto CAD, SolidWorks 等)根据冷模试验中所使用的搅拌槽的尺寸进行建模;(2)对几何结构模型进行网格划分,(3)前处理和计算。(4)计

算结果的后处理和分析。图 4.1 表示的是搅拌反应器计算流体力学模拟详细流程。

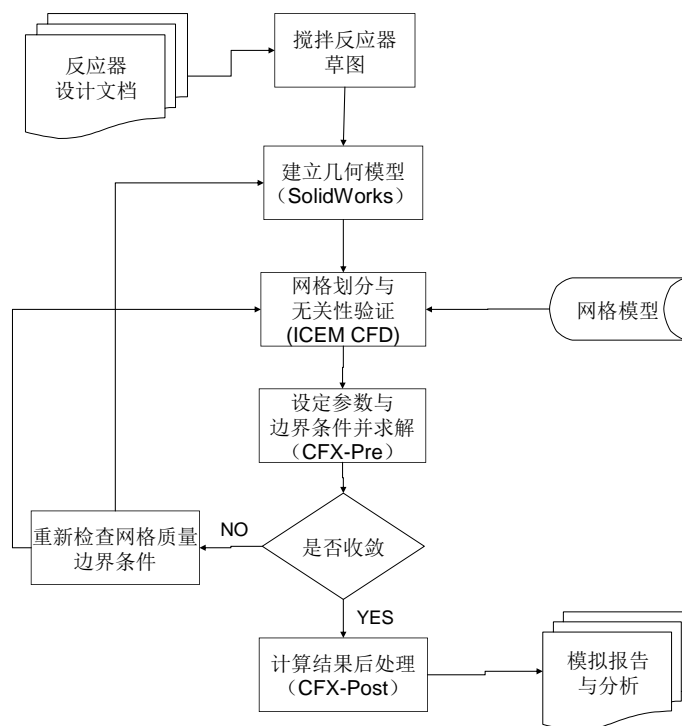


图 4.1 搅拌反应器计算流体力学求解流程图

Fig. 4.1 CFD solving flow of stirred vessel

#### 4.2.1 搅拌反应器的几何结构

本研究中使用的是 SolidWorks 2010 (Dassault Systemes S.A) 软件建立的几何结构模型，具体结构如图 4.2 所示。

三种不同尺度的冷模搅拌槽与搅拌桨的详细几何尺寸如见表 4.1。模型中的尺寸与实际冷模试验所使用的搅拌槽尺寸保持完全一致。

表 4.1 冷模用搅拌槽具体尺寸

Table 4.1 Geometry parameters of mock-up experiments vessels

	$D/mm$	$d/mm$	$w/mm$	$s/mm$	$laps$	$Nr$
Vessel I	170	153	15	76.5	1.5	1
Vessel II	384	346	35	173	2	1
Vessel III	786	705	70	354	2	1

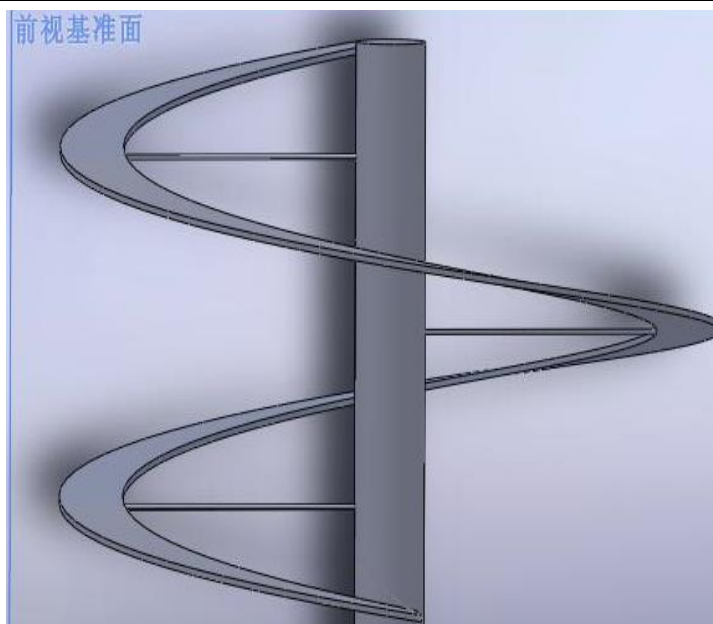


图 4.2 划分网格用螺带搅拌桨几何结构示意图

Fig. 4.2 Schematic of helical impeller for meshing

#### 4.2.2 网格划分与无关性验证

CFD 模拟计算中几何模型的网格划分是影响 CFD 计算结果及成本的关键因素，因为在任何的 CFD 模拟计算中，网格的好坏直接影响到计算的结果。关于搅拌反应器中网格的报道中，与本研究的搅拌反应槽 Vessel I 尺寸相当的搅拌槽网格数大概在  $10^4$  到  $10^6$  之间。例如 1998 年，Brucato 等<sup>[95]</sup>在搅拌槽直径为 190 mm 的搅拌槽中使用的网格数大约 44,000 个控制单元，而 2002 年，Bartels 等<sup>[96]</sup>则在一个直径为 150 mm 的搅拌槽中使用了大约 200 万个控制单元。

为了能够得到一个在物理上和数值上都非常精确的计算结果，在进行 CFD 数值模拟的过程中，必须划分不同数量的网格。然后根据重要的计算变量，直到没有很大的误差出现，这也就是所说的网格无关性验证<sup>[97]</sup>。1998 年，Ng 等<sup>[98]</sup>使用连续的不同数量的网格进行了网格的灵敏度分析，其数量从约 100,000 到 240,000 之间。研究结果显示，这些不同网格划分所计算出来的平均速率分布图几乎相等，且都与试验所使用的 LDV 数据相吻合。2001 年，Montante 等<sup>[99]</sup>也报道了相似的研究结果，其网格数量范围为 23,000 到 145,000。但是这里需要注意的是，这里所提到的文献和其他的一些研究中所使用的网格细分的数量太小或许不能表示计算结果的网格依赖性。

本研究中采用 Ansys ICEM CFD 软件对搅拌槽进行网格划分，动区为非结构化四面体网格，静区为结构化的六面体网格。图 4.3 表示的是本研究中冷模螺带桨搅拌反应器的网格划分示意图。里面的包含螺带搅拌桨的即为动区(Rotor Zone)，外面的部分的即为静区(Tank Zone)。

本研究使用第 2 章中校正搅拌桨参数的牛顿流体玉米糖浆 ( $25^{\circ}\text{C}$ ，粘度为  $6.687 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、密度为  $1350 \text{ kg/m}^3$ ) 来对所划分的网格进行无关性验证，在搅拌转速为  $50 \text{ rev/min}$  的条件

下，以功率准数  $N_p$  为参考对象，其中功率准数的计算见式 (3-8)，在上述条件下其功率准数的试验值为 39.56。

表 4.2 表示的是使用 5 种不同的网格数对功率准数的影响，可以看出 Case 5 的模拟功率准数与试验功率准数只偏差最小，为了增加计算的准确性，本研究选择 Case 5 的网格数进行计算。

表 4.2 CFD 模型中网格数对功率准数  $N_p$  的影响(Vessel I)

Table 4.2 Effect of element on the power number(Vessel I)

Case	Elements	$N_{p-sim}$	$(N_{p-sim} - N_{p-exp}) / N_{p-exp}$
1	23618	42.87	8.37%
2	47865	41.98	6.12%
3	89387	41.47	4.83%
4	151645	41.36	4.55%
5	326738	41.25	4.17%

注： $N_{p-sim}$ —Power number of CFD simulation;  $N_{p-exp}$ —Power number of experiment in Vessel I

Element-grid number of rotor zone and tank zone

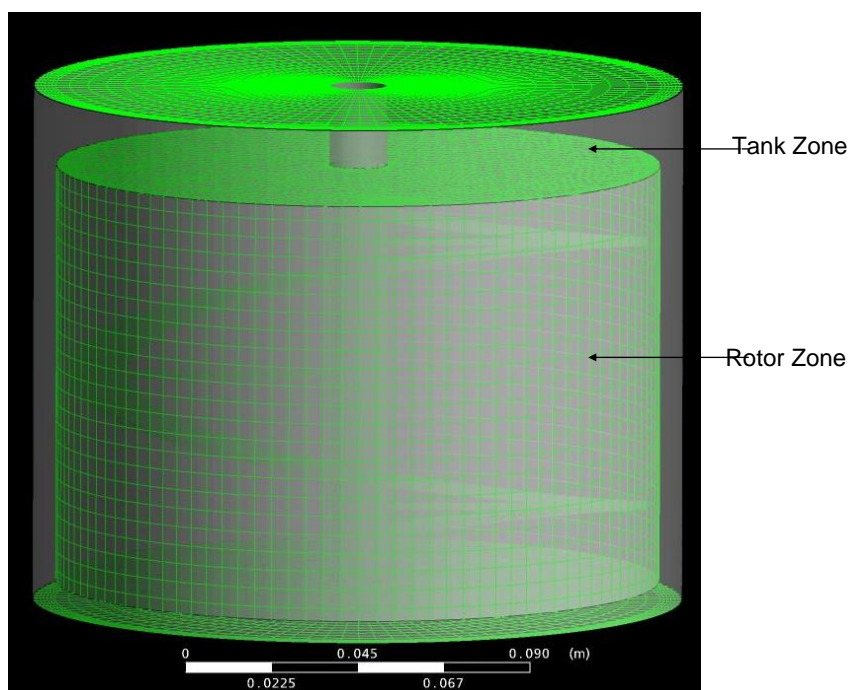


图 4.3 搅拌槽网格划分动区和静区示意图

Fig. 4.3 Rotor zone and tank zone of the grid resolution of stirred vessel

#### 4.2.3 搅拌桨旋转的模拟方法

由于转动的搅拌桨会引起求解区域的循环运动,对于搅拌桨旋转的建模包括由试验条件所决定的搅拌桨的边界条件、指定搅拌桨叶片的动量源或者或者将旋转和静止的参考坐标系相结合。两种常用的方法是重参考坐标系法 (Multiple Reference Frames, MRF) 和滑动坐标法 (Sliding Mesh, SM)。在这些模型中,其方法是将计算区域划分为一个内部区域包括旋转的搅拌桨,和一个包含搅拌槽附件(如挡板等)的外部静止区域。MRF 模型方法就是在内部搅拌桨区域使用旋转的参考坐标系,在外部区域使用静止的参考坐标系,这种方法中搅拌桨旋转的影响是由参考坐标决定的,所以就允许可以直接根据搅拌桨的几何结构进行建立模型。对于瞬态的 SM 模拟方法,搅拌桨的区域允许与外部区域进行相对的滑动,由于具有时间的依赖性,瞬态的 SM 方法能更为准确的描述搅拌桨旋转的实际过程。但是,滑动坐标法对于计算上有更高的要求。<sup>[97]</sup>

本研究求解条件假设为:不考虑温度变化;不可压缩流体的层流流动。所使用的软件为 CFX11.0,其是采用的基于有限元的有限体积法对方程进行离散;采用多重参考坐标系法 (MRF) 来处理旋转的动区与静区之间的相互作用。

#### 4.2.4 混合时间的模拟方法

在第 1 章高固体含量玉米秸秆的冷模试验中,我们是采用的监测点的含湿量的变化来表示搅拌槽中玉米秸秆与水分混合的均匀度。混合时间经常与功率在一起来评价搅拌反应器的混合效率,但是以往的研究表明混合时间与测量其所使用的方法和技术有很大的关系。在 CFD 模拟中混合时间的模拟可以采用相似的方法,在给定的搅拌槽中的位置注入不与试验物料发生化学反应的、易于上浮的虚拟示踪剂。其中示踪剂的浓度或者更准确地说质量分率是由式 (4-1) 所表示的标量运输方程表示的。

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \phi - \Gamma_{\phi} \nabla \phi) = S_{\phi} \quad (4-1)$$

其中  $\phi$  表示的是示踪剂的质量分率,  $\Gamma_{\phi}$  表示的是示踪剂在所处理流体中的扩散系数,  $S_{\phi}$  表示的是源项或者汇项,在本研究中由于没有化学反应发生,此值为 0。式 (4-1) 在 CFX 中是一个附加的标量运输方程,是以诺埃曼 (Neumann) 边界条件求解,则混合时间是由示踪剂浓度瞬间的变化来推测的<sup>[100]</sup>。

图 4.4 表示的是本研究的 CFD 模型中所加入虚拟示踪剂位置和量,其中深色的部分是表示的加入的虚拟的示踪剂,其在搅拌槽 Vessel I 中高度为 15 mm,这个量与实际冷模试验中的加入水的量和位置相同;图中上部所标出的点为虚拟示踪剂浓度的监测位点,示踪剂监测点的位置也与实际冷模试验中的取样点位置相同,这里是为了方便将计算流体力学模型中所得到的监测点虚拟示踪剂的浓度变化与实际冷模试验中监测点玉米秸秆含湿量的变化相比较。

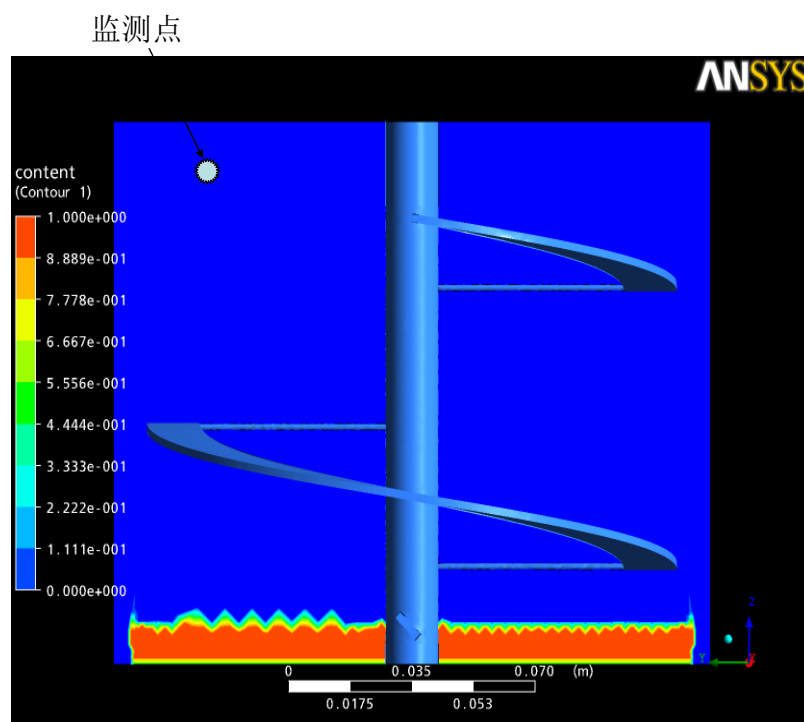


图 4.4 CFD 模型中示踪剂加入位点

Fig. 4.4 Tracer location in CFD simulation

### 4.3 结果与讨论

#### 4.3.1 试验功率与计算模拟功率的对比

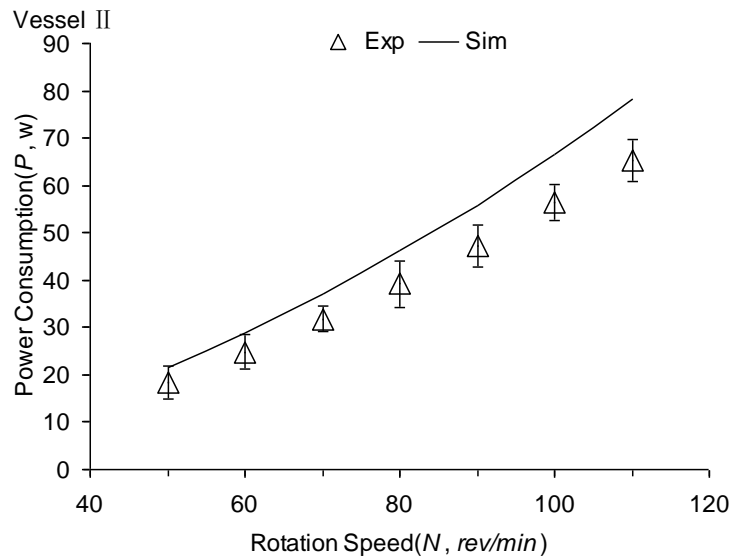
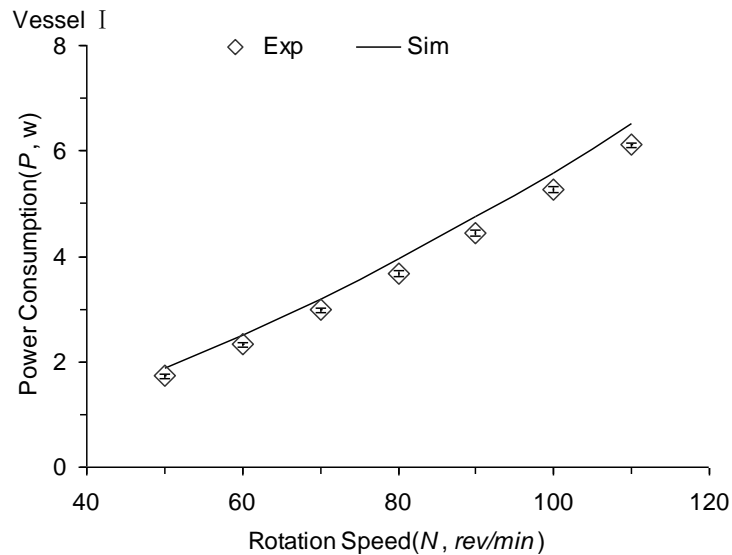
为了研究第 3 章所建立的不同含湿量下玉米秸秆的幂律模型的准确性,本研究将所得到的幂律模型所表示的流体加入到建立好的 CFD 几何结构模型中,进行模拟计算。

图 4.5 表示的是 50% 含湿量玉米秸秆物料在 3 个不同尺度的冷模试验搅拌槽中实际消耗功率与计算流体力学 (CFD) 模拟功率在不同搅拌转速下的对比,其中功率 (Power Consumption) 是由式 (3-6) 计算求得,其中搅拌槽 Vessel I 和 Vessel II 的转速分别为 50 rev/min、60 rev/min、70 rev/min、80 rev/min、90 rev/min、100 rev/min 和 110 rev/min;由于搅拌槽 Vessel III 的试验条件的限制,只测定了搅拌转速分别为 50 rev/min、60 rev/min、70 rev/min、80 rev/min、90 rev/min 时的搅拌功率。

可以看出,在 3 个不同搅拌直径的冷模搅拌槽中,实际搅拌功率均随着搅拌转速的增加而增加,这与 CFD 模拟功率的变化有相同的规律;CFD 模拟功率的值能与实际冷模试验所得到的功率值较好的吻合。其中 Vessel I 和 Vessel II 两个搅拌槽中模拟功率较试验功率最大偏差在 10%;冷模搅拌槽 Vessel III 的冷模试验功率与计算模拟功率最大偏差在 15%。这说明,第 3 章中所测量出的玉米秸秆的幂律模型能够很好的用来预测螺带桨式搅拌反应器中高固体含量下的玉米秸秆物料所消耗的功率值以及功率值随着搅拌转速变化的趋势。

这里需要指出的是,计算流体力学的计算是理想状态下的简化计算并不能完全代表实际的玉米秸秆与水分的混合过程,也就是说计算流体力学在本研究的对象中有其适用的范围。

第 2 章中通过冷模试验研究了终了含湿量为 50% 的不同搅拌转速下的玉米秸秆与水分的混合过程,其中搅拌扭矩的值是随着转速的增加先增加后减小的,在搅拌转速为 120 rev/min 时出现了拐点。通过分析,这是因为随着搅拌转速的增加,与玉米秸秆颗粒逐渐出现了旋转运动,而在计算流体力学模型的计算中,搅拌功率值是一直随着搅拌转速的增加而增加的,其并不能体现出实际冷模试验中所出现的物料的旋转运动这一特性。因此,在使用此模型进行搅拌反应器的流体力学计算时需要注意其适用的搅拌转速范围。



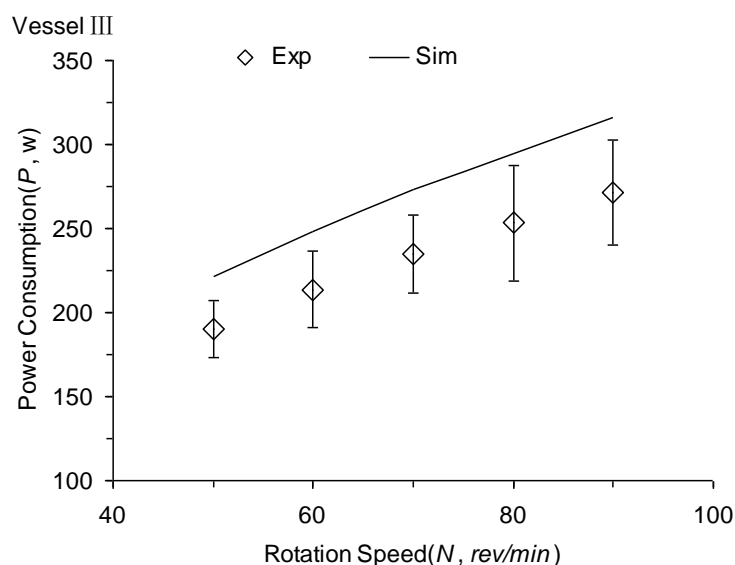


图 4.5 不同尺度搅拌槽中试验功率与计算模拟功率的对比

(Exp: 冷模试验功率, Sim: CFD 模拟功率; 试验条件: 50% 终了含湿量)

Fig. 4.5 Power consumption comparison between CFD simulation and experiments (Exp—Power of the experiments; Sim—Power of the CFD simulation; Condition: 50% final moisture content)

#### 4.3.2 CFD 模型中示踪剂响应曲线与冷模试验监测点含湿量变化曲线的对比

在搅拌反应器的研究中, 搅拌功率是评价搅拌操作好坏的重要指标和因素, 在上一小节中, 本文将相同条件下的 CFD 模拟计算搅拌功率与实际冷模试验功率进行了比较, 结果吻合良好。另外一个评价搅拌效果好坏重要因素便是混合时间, 一个能用于搅拌反应器中搅拌桨优化和放大的计算流体力学模型还需要能反映出实际混合过程中的流体质点的运动情况, 也就是同一监测点的搅拌混合时间与实际试验相对应。

本小节即分别选取了三个不同尺度搅拌槽的不同转速下的监测点含湿量变化响应曲线与计算流体力学模型中的监测点示踪剂含量变化曲线进行了对比。

图 4.6、图 4.7 和图 4.8 分别表示三个不同尺度的冷模搅拌槽 Vessel I、Vessel II 和 Vessel III 中监测点玉米秸秆的含湿量变化曲线计算流体力学模型中所计算出的监测点示踪剂变化曲线的比较。由于 CFD 模拟和实际冷模试验表征单位不同 (试验为含湿量, CFD 模拟为示踪剂含量), 为便于比较, 数据均经过归一化处理 (即均除以搅拌槽内示踪剂或者水分分散均匀时监测点理论上可以达到的最大浓度)。可以看出, 在相同的监测点位置, 三个不同尺度的搅拌槽 CFD 模型中所计算出的虚拟示踪剂的含量变化曲线与实际冷模试验中含湿量的变化曲线能很好的吻合, 变化趋势均相同, 其中由于 Vessel III 中实验数据较少, 其两个转速下的响应曲线差别较另外两个搅拌槽大, 这也就是说本章建立的 CFD 模型能用来预测研究中玉米秸秆物料与水分的混合趋势, 这为搅拌反应器的优化放大提供了依据。

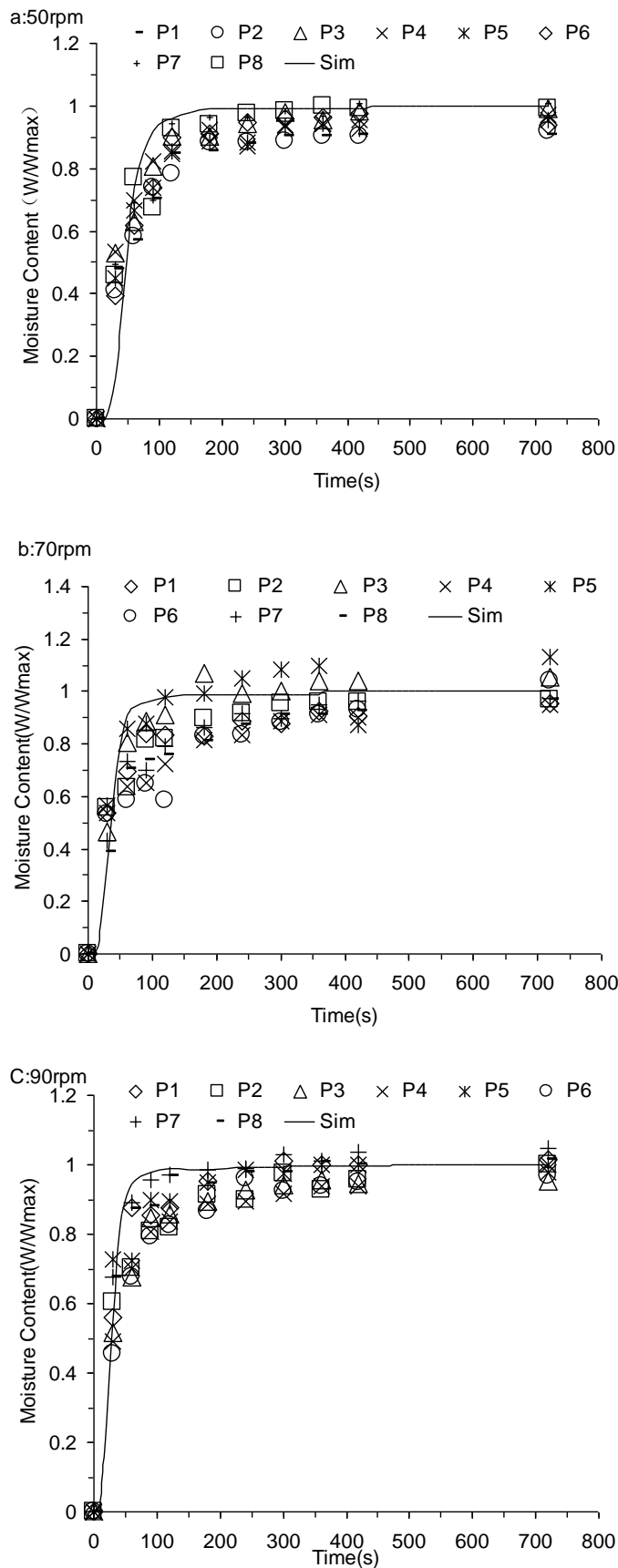


图 4.6 50%含湿量玉米秸秆模拟示踪剂响应曲线与监测点含湿量变化曲线对比 (Vessel I)

Fig. 4.6 Moisture content response curve comparison between CFD simulation and experiments

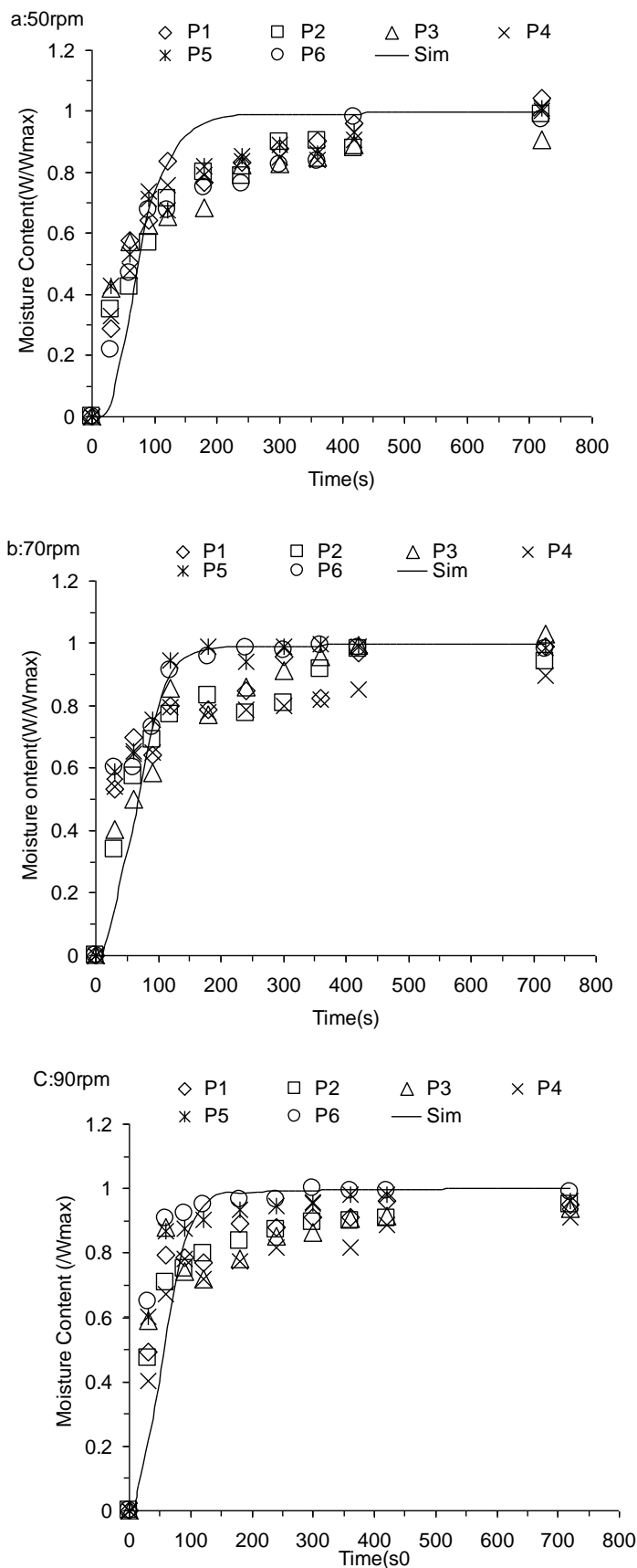


图 4.7 50%含湿量玉米秸秆模拟示踪剂响应曲线与监测点含湿量变化曲线对比 (Vessel II)

Fig. 4.7 Moisture content response curve comparison between CFD simulation and experiments

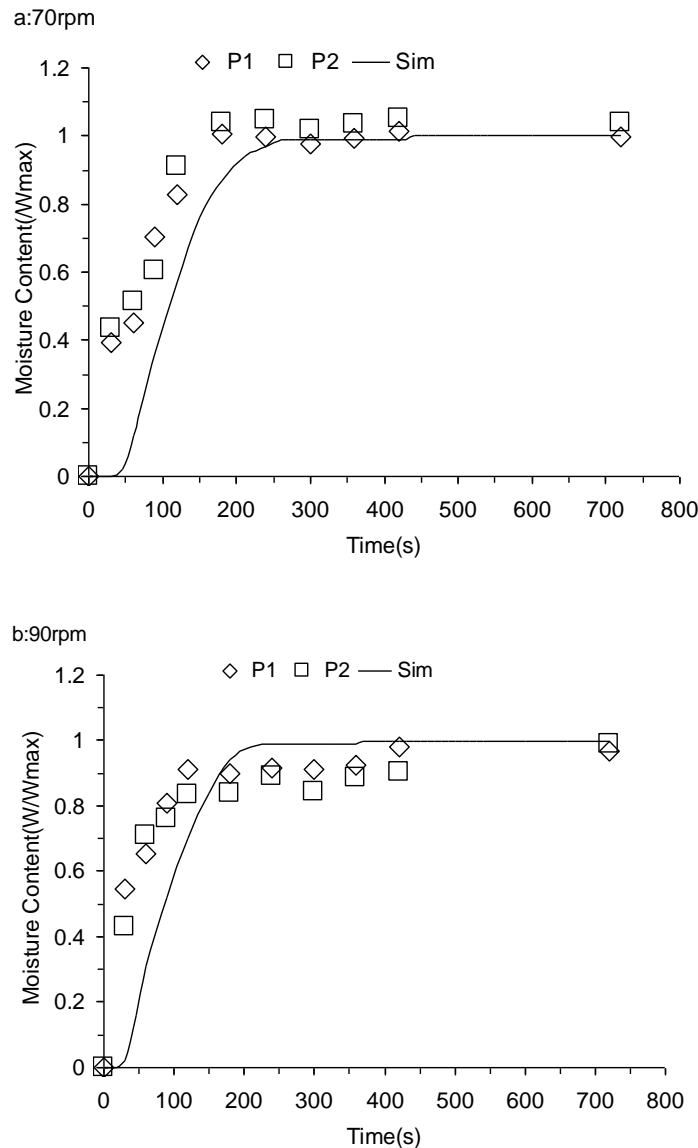


图 4.8 50%含湿量玉米秸秆模拟示踪剂响应曲线与监测点含湿量变化曲线对比 (Vessel III)

Fig. 4.8 Moisture content response curve comparison between CFD simulation and experiments

表 4.3 表示的是三个不同的搅拌槽尺度下在搅拌转速分别为 50 rev/min、70 rev/min 和 90 rev/min 时冷模试验玉米秸秆与水分的混合时间和计算流体力学模拟中示踪剂与流体的混合时间的比较，试验终了含湿量均为 50%。其中混合时间的计算方法为：当监测点含湿量达到均匀含湿量的 0.95 或者 1.05 倍时，此时的时间点记为混合时间。从表中可以看出，在搅拌槽 Vessel I 和搅拌槽 Vessel II 中，CFD 模拟混合时间均小于冷模试验混合时间，而搅拌槽 Vessel III 中的结果相反。另外，在三个搅拌槽中，随着转速的增加，混合时间都是减小的；随着搅拌槽尺度的变大，混合时间呈增加的趋势。

表 4.3 不同搅拌槽尺度、不同转速下试验与模拟混合时间比较(单位: s)

Table 4.3 Comparison of mixing time between simulation and experiment in different scale vessels and different rotation speed

Rotation Speed(rev/min)	Vessel I		Vessel II		Vessel III	
	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim
50	113	101	257	220	200	240
70	100	87	170	152	160	210
90	81	75	98	103	--	--

#### 4.4 小结

(1) 本章首先根据实际冷模搅拌槽的尺寸建立了三个搅拌槽的几何模型, 并对其进行了网格划分, 研究中使用多重参考系法(MRF)来模拟搅拌桨的旋转运动;

(2) 将第 3 章中所测量出的不同含湿量下的玉米秸秆的幂律模型加入到 CFD 几何模型中进行求解计算, 记录了其功率消耗和监测点示踪剂含量的变化趋势;

(3) 将计算流体力学模型中所得到的功率和监测点示踪剂响应曲线与相同的条件下实际冷模试验中所得到的功率和监测点含湿量变化趋势进行了比较, 结果吻合良好, 说明计算流体力学模型能够预测本研究条件下的玉米秸秆与水分的混合过程。

## 第 5 章 结论与展望

### 5.1 结论

(1) 对烘干的预处理前的玉米秸秆和预处理后的玉米秸秆进行了颗粒的筛分试验,发现在颗粒粒径范围为<60 目、60~40 目和 40~20 目的玉米秸秆质量分率有所增加。也就是说预处理降低了玉米秸秆的颗粒大小。

(2) 在较小尺度的搅拌槽 Vessel I 中使用不同直径比例的螺带搅拌桨进行预混合试验,确定适合本研究所使用的玉米秸秆颗粒粒径分布的最佳螺带搅拌桨与搅拌槽直径比例为  $d/D=0.90$ 。搅拌槽 Vessel I 中最合适的干物料的装料量为 200 g,也就是说要去的好的混合效果,需要确定螺带搅拌桨的作用范围。

(3) 在最终均匀的含湿量较小时,也就是初始时混合加入的水分较小时,混合所需要的时间变长,这是由于秸秆具有强吸水性的性质,当含湿量较小时,颗粒之间的水分梯度变小,从而减弱了其传递速度。

(4) 随着搅拌转速的增加,玉米秸秆颗粒与水分的混合过程先加快后变慢,这是由于转速增加时,在螺带搅拌桨的作用下,玉米秸秆颗粒之间的相互碰撞频率和摩擦力加大,促进了颗粒之间水分的传递;当转速增加到 120 rev/min 时,由于玉米秸秆颗粒的惯性作用,在搅拌槽内形成了较大的漩涡造成物料旋转运动,减弱了传质过程。

(5) 螺带搅拌桨与搅拌槽内壁之间的空隙与所处理的玉米秸秆颗粒粒径分布息息相关。在  $d/D=0.90$  时,混合过程最快的颗粒粒径分布是 40~20 目。也就是螺带搅拌桨与搅拌槽直径之比应随着玉米秸秆颗粒粒径分布的减小而变大。

(6) 在大尺度冷模搅拌槽中也能实现玉米秸秆与水分的混合,且与较小尺度的搅拌槽 Vessel I 中具有相似的混合规律,随着转速的增加,混合过程加快,同时,所测得的扭矩数据可以作为第 3 章中验证模型正确性的重要参考。

(7) 使用两种牛顿流体(玉米糖浆和甘油)对本研究中所使用的螺带型搅拌系统搅拌槽 Vessel I 的几何结构参数  $C$  使用不同方法进行了测定,其值为 147.12,并与之前的研究者在相似比例的系统中的数据进行了对比。

(8) 使用间接的测量方法对含湿量分别为 0%、10%、20%、30%、40%和 50%下的玉米秸秆和预处理玉米秸秆的幂律参数(流变指数和稠度系数)的值,研究发现,无论是玉米秸秆和预处理玉米秸秆,其值均随着含湿量的增加而增加,也就是说随着含湿量的增加,物料的剪切变稀性变弱、粘性增加;预处理玉米秸秆的流变指数较未预处理玉米秸秆的小,说明其剪切变稀性较强,稠度系数较未处理玉米秸秆的高,说明其粘性较高。

(9) 使用 CFD 模拟的方法,对不同含湿量下的玉米秸秆的流变学模型进行了验证,通过功率和示踪剂响应曲线的对比,说明模型能很好的吻合。

## 5.2 展望

本文在螺带型搅拌系统中研究了极限高固体含量下的玉米秸秆与水分的混合过程,并使用幂律模型对物料的流变学性质进行了表征。为搅拌预处理反应器的开发和设计提供了依据,同时也为高固体含量下物料的流变学性质的研究提供了一种可借鉴的方法,最后建立的 CFD 模型在进行搅拌桨的优化设计和混合过程更加深入的研究提供了有力工具。在后续的研究中,可以使用本研究中所建立的 CFD 模型进行搅拌预处理反应的优化和放大研究。

## 参考文献

- [1] Sandor D, Wallace R, Peterson S. 2008. Understanding the Growth of the Cellulosic Ethanol Industry.
- [2] 孙君社, 苏东海, 刘莉. 秸秆生产乙醇预处理关键技术. 化学进展. 2007, 19 (7): 1122-1128
- [3] Lynd L R. Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass: technology, economics, the environment, and policy. Annual review of energy and the environment. 1996, 21 (1): 403-465
- [4] Wyman C. Handbook on bioethanol: production and utilization. CRC, 1996
- [5] Yang B, Wyman C E. Pretreatment: the key to unlocking low - cost cellulosic ethanol. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2008, 2 (1): 26-40
- [6] Galbe M, Gorwa-Grauslund M F, Zacchi G. Bio-ethanol-the fuel of tomorrow from the residues of today. Trends in Biotechnology. 2006, 24 (12): 549-556
- [7] Hendriks A, Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology. 2009, 100 (1): 10-18
- [8] Brownell H H, Yu E K C, Saddler J N. Steam - explosion pretreatment of wood: Effect of chip size, acid, moisture content and pressure drop. Biotechnology and Bioengineering. 1986, 28 (6): 792-801
- [9] Saddler J N, Ramos L P, Breuil C. Steam pretreatment of lignocellulosic residues. Biotechnology in Agriculture. 1993, 73-73
- [10] Saha B C, Iten L B, Cotta M A, *et al.* Dilute acid pretreatment, enzymatic saccharification and fermentation of wheat straw to ethanol. Process Biochemistry. 2005, 40 (12): 3693-3700
- [11] Brunecky R, Vinzant T B, Porter S E, *et al.* Redistribution of xylan in maize cell walls during dilute acid pretreatment. Biotechnology and Bioengineering. 2009, 102 (6): 1537-1543
- [12] Kim J S, Lee Y Y, Torget R W. Cellulose hydrolysis under extremely low sulfuric acid and high-temperature conditions. Applied Biochemistry and Biotechnology. 2001, 91 (1): 331-340
- [13] Galbe M, Zacchi G. Pretreatment of lignocellulosic materials for efficient bioethanol production. Biofuels. 2007, 41-65
- [14] Mohagheghi A, Tucker M, Grohmann K, *et al.* High solids simultaneous saccharification and fermentation of pretreated wheat straw to ethanol. Applied Biochemistry and Biotechnology. 1992, 33 (2): 67-81
- [15] Kristensen J B, Felby C, Jørgensen H. Determining yields in high solids enzymatic hydrolysis of biomass. Applied Biochemistry and Biotechnology. 2009, 156 (1): 127-132
- [16] Wingren A, Galbe M, Zacchi G. Techno - Economic Evaluation of Producing Ethanol from

Softwood: Comparison of SSF and SHF and Identification of Bottlenecks. *Biotechnology Progress*. 2003, 19 (4): 1109-1117

[17] Zhang J, Chu D, Huang J, *et al.* Simultaneous saccharification and ethanol fermentation at high corn stover solids loading in a helical stirring bioreactor. *Biotechnology and Bioengineering*. 2010, 105 (4): 718-728

[18] Esteghlalian A, Hashimoto A G, Fenske J J, *et al.* Modeling and optimization of the dilute-sulfuric-acid pretreatment of corn stover, poplar and switchgrass. *Bioresource Technology*. 1997, 59 (2): 129-136

[19] Garrote G, Domínguez H, Parajó J C. Autohydrolysis of corncob: study of non-isothermal operation for xylooligosaccharide production. *Journal of Food Engineering*. 2002, 52 (3): 211-218

[20] Sun Y, Cheng J J. Dilute acid pretreatment of rye straw and bermudagrass for ethanol production. *Bioresource Technology*. 2005, 96 (14): 1599-1606

[21] Zhang J, Wang X, Chu D, *et al.* Dry pretreatment of lignocellulose with extremely low steam and water usage for bioethanol production. *Bioresource Technology*. 2011

[22] 张建. 木质纤维素原料生物转化生产纤维素乙醇过程的关键技术研究. 华东理工大学, 2011

[23] Torget R, Walter P, Himmel M, *et al.* Dilute-acid pretreatment of corn residues and short-rotation woody crops. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1991, 28 (1): 75-86

[24] Tucker M P, Kim K H, Newman M M, *et al.* Effects of temperature and moisture on dilute-acid steam explosion pretreatment of corn stover and cellulase enzyme digestibility. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2003, 105 (1): 165-177

[25] Schell D J, Farmer J, Newman M, *et al.* Dilute-sulfuric acid pretreatment of corn stover in pilot-scale reactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2003, 105 (1): 69-85

[26] Zhu Y, Lee Y Y, Elander R T. Dilute-acid pretreatment of corn stover using a high-solids percolation reactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2004, 117 (2): 103-114

[27] Yan L, Zhang H, Chen J, *et al.* Dilute sulfuric acid cycle spray flow-through pretreatment of corn stover for enhancement of sugar recovery. *Bioresource Technology*. 2009, 100 (5): 1803-1808

[28] Wooley R. 1999. Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis current and futuristic scenarios. DTIC Document.

[29] Tolan J S. Iogen's process for producing ethanol from cellulosic biomass. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2002, 3 (4): 339-345

[30] De Bari I, Viola E, Barisano D, *et al.* Ethanol production at flask and pilot scale from concentrated slurries of steam-exploded aspen. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.

2002, 41 (7): 1745-1753

[31] Tao L, Aden A. The economics of current and future biofuels. In *Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*. 2009, 45 (3): 199-217

[32] Nguyen Q D, Boger D V. Measuring the flow properties of yield stress fluids. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1992, 24 (1): 47-88

[33] Fan Z, South C, Lyford K, *et al.* Conversion of paper sludge to ethanol in a semicontinuous solids-fed reactor. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2003, 26 (2): 93-101

[34] Laera G, Giordano C, Pollice A, *et al.* Membrane bioreactor sludge rheology at different solid retention times. *Water research*. 2007, 41 (18): 4197-4203

[35] Wyman C E. What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol. *Trends in Biotechnology*. 2007, 25 (4): 153-157

[36] Himmel M E, Ding S Y, Johnson D K, *et al.* Biomass recalcitrance: engineering plants and enzymes for biofuels production. *Science*. 2007, 315 (5813): 804

[37] Viamajala S, McMillan J D, Schell D J, *et al.* Rheology of corn stover slurries at high solids concentrations-Effects of saccharification and particle size. *Bioresource Technology*. 2009, 100 (2): 925-934

[38] Dunaway K W, Dasari R K, Bennett N G, *et al.* Characterization of changes in viscosity and insoluble solids content during enzymatic saccharification of pretreated corn stover slurries. *Bioresource Technology*. 2010, 101 (10): 3575-3582

[39] Dasari R K, Eric Berson R. The effect of particle size on hydrolysis reaction rates and rheological properties in cellulosic slurries. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2007, 137 (1): 289-299

[40] Rosgaard L, Andric P, Dam-Johansen K, *et al.* Effects of substrate loading on enzymatic hydrolysis and viscosity of pretreated barley straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2007, 143 (1): 27-40

[41] Ehrhardt M R, Monz T O, Root T W, *et al.* Rheology of dilute acid hydrolyzed corn stover at high solids concentration. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2010, 160 (4): 1102-1115

[42] Samaniuk J R, Wang J, Root T W, *et al.* Rheology of concentrated biomass. *Korea-Australia Rheology Journal*. 2011, 23 (4): 237-245

[43] Knutsen J S, Liberatore M W. Rheology of high-solids biomass slurries for biorefinery applications. *Journal of Rheology*. 2009, 53 877

[44] Kemblowski Z, Kristiansen B. Rheometry of fermentation liquids. *Biotechnology and Bioengineering*. 1986, 28 (10): 1474-1483

[45] Pimenova N V, Hanley T R. Measurement of rheological properties of corn stover suspensions. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2003, 106 (1): 383-392

- [46] Pimenova N V, Hanley T R. Effect of corn stover concentration on rheological characteristics. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2004, 114 (1): 347-360
- [47] Bennington C P J. Mixing in the pulp and paper industry. *Handbook of Industrial Mixing*. 2004, 1187-1246
- [48] Houchin T L, Hanley T R. Measurement of rheology of distiller's grain slurries using a helical impeller viscometer. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2004, 114 (1): 723-732
- [49] Stickel J J, Knutsen J S, Liberatore M W, *et al.* Rheology measurements of a biomass slurry: an inter-laboratory study. *Rheologica Acta*. 2009, 48 (9): 1005-1015
- [50] Wiman M, Palmqvist B, Tornberg E, *et al.* Rheological characterization of dilute acid pretreated softwood. *Biotechnology and Bioengineering*. 2011
- [51] Tatterson G B. Various ways to calculate power consumption for viscous creeping flow mixing of shear thinning fluids in stirred vessel. *AIChE*. 1986, vol. 1, pp.47
- [52] CFD. [http://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics)
- [53] 李万平 著. 计算流体力学. 华中科技大学出版社, 2004
- [54] Iranshahi A, Devals C, Heniche M, *et al.* Hydrodynamics characterization of the Maxblend impeller. *Chemical Engineering Science*. 2007, 62 (14): 3641-3653
- [55] BP2030 世界能源展望. <http://www.china5e.com/show.php?contentid=207231>
- [56] Devals C, Heniche M, Takenaka K, *et al.* CFD analysis of several design parameters affecting the performance of the Maxblend impeller. *Computers & Chemical Engineering*. 2008, 32 (8): 1831-1841
- [57] Yao W, Mishima M, Takahashi K. Numerical investigation on dispersive mixing characteristics of MAXBLEND and double helical ribbons. *Chemical Engineering Journal*. 2001, 84 (3): 565-571
- [58] Aubin J, Xuereb C. Design of multiple impeller stirred tanks for the mixing of highly viscous fluids using CFD. *Chemical Engineering Science*. 2006, 61 (9): 2913-2920
- [59] Bertrand F, Tanguy P A, Brito de la Fuente E, *et al.* Numerical modeling of the mixing flow of second-order fluids with helical ribbon impellers. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 1999, 180 (3): 267-280
- [60] Alliet-Gaubert M, Sardeing R, Xuereb C, *et al.* CFD analysis of industrial multi-staged stirred vessels. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2006, 45 (5): 415-427
- [61] Barailler F, Heniche M, Tanguy P A. CFD analysis of a rotor-stator mixer with viscous fluids. *Chemical Engineering Science*. 2006, 61 (9): 2888-2894
- [62] Pedrosa S, Nunhez J R. The behavior of stirred vessels with anchor type impellers. *Computers & Chemical Engineering*. 2000, 24 (2-7): 1745-1751
- [63] Delaplace G, Guerin R, Leuliet J C, *et al.* An analytical model for the prediction of power

consumption for shear-thinning fluids with helical ribbon and helical screw ribbon impellers. *Chemical Engineering Science*. 2006, 61 (10): 3250-3259

[64] Buwa V V, Ranade V V. Dynamics of gas-liquid flow in a rectangular bubble column: experiments and single/multi-group CFD simulations. *Chemical Engineering Science*. 2002, 57 (22-23): 4715-4736

[65] CFX Help. Ansys Inc.

[66] 王修胜. 木质纤维素生物质预处理与水解过程的关键技术研究. 华东理工大学, 2010

[67] 江体乾 著. 化工流变学. 上海: 华东理工大学出版社, 2004

[68] 丁绪淮, 周理 著. 液体搅拌. 化学工业出版社, 1983

[69] 陈志平, 章序文, 林兴华 著. 搅拌与混合设备设计选用手册. 化学工业出版社, 2004

[70] Calderbank P H, Moo-Young M B. The prediction of power consumption in the agitation of non-Newtonian fluids. *Chemical Engineering Research and Design*. 1959, 37 (a): 26-33

[71] Metzner A B, Feehs R H, Ramos H L, *et al.* Agitation of viscous Newtonian and non - Newtonian fluids. *Aiche Journal*. 1961, 7 (1): 3-9 % @ 1547-5905

[72] Metzner A B, Otto R E. Agitation of non - Newtonian fluids. *Aiche Journal*. 1957, 3 (1): 3-10

[73] 王凯, 虞军, 戴季煌 著. 化工设备设计全书. 北京: 化学工业出版社, 2003

[74] Delaplace G, Leuliet J C, Ronse G. Power Requirement when Mixing a Shear - Thickening Fluid with a Helical Ribbon Impeller Type. *Chemical Engineering & Technology*. 2000, 23 (4): 329-335

[75] 沈仲棠, 刘鹤年 著. 非牛顿流体力学及其应用. 高等教育出版社, 1989

[76] 章本照, 印建安, 张宏基 著. 流体力学数值方法. 机械工业出版社, 2003

[77] 陈敏恒, 丛德滋, 方图南 著. 化工原理. 北京: 化学工业出版社, 2006

[78] Carreau P J, Chhabra R P, Cheng J. Effect of rheological properties on power consumption with helical ribbon agitators. *Aiche Journal*. 1993, 39 (9): 1421-1430

[79] Yap C Y, Patterson W I, Carreau P J. Mixing with helical ribbon agitators: Part III. Non - Newtonian fluids. *AICHE Journal*. 1979, 25 (3): 516-521

[80] Hall K R, Godfrey J C. Power consumption by helical ribbon impellers. *Chemical Engineering Research and Design*. 1970, 48 (a): 201-208

[81] Nagata S, Nishikawa M, Tada H, *et al.* Power consumption of mixing impellers in pseudoplastic liquids. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1971, 4 (1): 72-76

[82] Rieger F, Novak V. Power consumption of agitators in highly viscous non-Newtonian liquids. *Chemical Engineering Research and Design*. 1973, 51 (a): 105-111

[83] Takahashi K, Yokota T, Konno H. Power consumption of helical ribbon agitators in highly viscous pseudoplastic liquids. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1984, 17 (6): 657-659

[84] Ayazi ShamLou P, Edwards M F. Power consumption of helical ribbon mixers in viscous

- Newtonian and non-Newtonian fluids. *Chemical Engineering Science*. 1985, 40 (9): 1773-1781
- [85] Brito-De La Fuente E, Leuliet J C, Choplin L, *et al.* On the role of elasticity on mixing with a helical ribbon impeller. *Chemical Engineering Research & Design*. 1991, 69 (A4): 324-331
- [86] Brito de la Fuente E, Leuliet J C, Choplin L, *et al.* On the effect of shear-thinning behavior on mixing with a helical ribbon impeller. 1992, vol. 88, pp.28-28
- [87] Brito-De La Fuente E, Choplin L, Tanguy P A. Mixing with helical ribbon impellers: Effect of highly shear thinning behaviour and impeller geometry. *Chemical Engineering Research and Design*. 1997, 75 (1): 45-52
- [88] Netusil J, Rieger F. Power consumption of screw and helical ribbon agitators in highly viscous pseudoplastic fluids. *The Chemical Engineering Journal*. 1993, 52 (1): 9-12
- [89] Cheng J, Carreau P J. Mixing in the transition flow regime with helical ribbon agitators. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1994, 72 (3): 418-430
- [90] Cheng J, Carreau P J, Chhabra R P. On the effect of wall and bottom clearance on mixing of viscoelastic fluids. 1995, vol. 91, pp.115-122
- [91] Fradette L, Tanguy P A, Bertrand F, *et al.* CFD phenomenological model of solid-liquid mixing in stirred vessels. *Computers & Chemical Engineering*. 2007, 31 (4): 334-345
- [92] Chhabra R P. Fluid Flow and Heat Transfer from Circular and Noncircular Cylinders Submerged in Non-Newtonian Liquids. *Advances in Heat Transfer*. 2011, 43 289
- [93] Chhabra R P, Richardson J F. 2008. *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*, A Butterworth-Heinemann Title.
- [94] Pérez-Terrazas J E, Ibarra-Junquera V, Rosu H C. Cellular automata modeling of continuous stirred tank reactors. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2008, 25 (3): 461-465
- [95] Brucato A, Ciofalo M, Grisafi F, *et al.* Numerical prediction of flow fields in baffled stirred vessels: A comparison of alternative modelling approaches. *Chemical Engineering Science*. 1998, 53 (21): 3653-3684
- [96] Bartels C, Breuer M, Wechsler K, *et al.* Computational fluid dynamics applications on parallel-vector computers: computations of stirred vessel flows. *Computers & fluids*. 2002, 31 (1): 69-97
- [97] Deglon D A, Meyer C J. CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations. *Minerals engineering*. 2006, 19 (10): 1059-1068
- [98] Ng K, Fentiman N J, Lee K C, *et al.* Assessment of sliding mesh CFD predictions and LDA measurements of the flow in a tank stirred by a Rushton impeller. *Chemical Engineering Research and Design*. 1998, 76 (6): 737-747
- [99] Montante G, Lee K C, Brucato A, *et al.* Numerical simulations of the dependency of flow

pattern on impeller clearance in stirred vessels. *Chemical Engineering Science*. 2001, 56 (12): 3751-3770

[100] Murthy Shekhar S, Jayanti S. CFD study of power and mixing time for paddle mixing in unbaffled vessels. *Chemical Engineering Research and Design*. 2002, 80 (5): 482-498

## 致谢

古人云：贤师良友在其侧，诗书礼乐陈于前，弃而为不善者，鲜矣。

感谢我的导师鲍杰教授，古之学者必有师，他严谨细致、一丝不苟的作风一直是我工作、学习中的榜样；他循循善诱的教导和不拘一格的思路给予我无尽的启迪。

感谢生物能源实验室张建老师，你宽容的态度，帮助我能够很快的融入试验室，并给予了试验思路和方法的灵感。

感谢实验室邢恒维、包艳文、张龙平、安瑞鑫在实验上给予帮助，以及实验室其他成员王玉梅、刘威等提供的帮助。

感谢我的好兄弟恒维、鸿胜和陈瑞，从遥远的家来到这个陌生的城市里，是你们和我共同维系着彼此之间兄弟般的感情，维系着寝室那份家的融洽。

感谢我的父母和家人，是你们的支持，才使我得以完成学业，焉得谖草，言树之背，养育之恩，无以回报，你们永远健康快乐是我最大的心愿。

在论文即将完成之际，我的心情无法平静，从开始进入课题到论文的顺利完成，有多少可敬的师长、同学、朋友给了我无言的帮助，在这里请接受我诚挚的谢意。