

基于响应面法的脱硫搅拌参数优化研究

王逸¹, 杨瑞¹, 向家伟¹, 吴亮², 谢明辉^{2*}, 周国忠², 刘宝庆³

(1.温州大学机电工程学院, 浙江温州 325035; 2.浙江长城搅拌设备股份有限公司, 浙江温州 325019; 3.浙江大学化工机械研究所, 浙江杭州 310027)

摘要:针对脱硫搅拌设备含固率分布和搅拌功率优化问题, 在无挡板方形搅拌槽内, 采用单层双弧叶桨式搅拌器开展搅拌实验。以槽内近壁面不同高度测点的脱硫石膏体积分数与完全均匀悬浮下的体积分数的离散程度作为研究对象, 以泰尔不等式系数(Theil's inequality coefficient, TIC)作为离散程度的指标, 探究了不同搅拌器转速、搅拌器离底高度、桨叶直径、桨叶角度的单因素影响规律, 并利用响应面进行搅拌功率优化。结果表明, 在单因素实验中, 当桨叶中心离底高度在液位高度的大约 3/10 时含固率最高, 达到所期望的 TIC ($TIC \leq 0.1516$) 所需最小搅拌功率为 20.42 W, 通过响应面参数优化后, 功率降低到了 17.94 W, 功率消耗降低了约 12%。

关键词: 搅拌设备; 含固率分布; 泰尔不等式系数; 功率消耗; 响应面; 参数优化

中图分类号: TH3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)S1-0314-08

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.057

Parameter optimization of desulfurization agitator based on response surface methodology

WANG Yi¹, YANG Rui¹, XIANG Jia-wei¹, WU Liang², XIE Ming-hui^{2*}, ZHOU Guo-zhong², LIU Bao-qing³

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 2.Zhejiang Greatwall Mixers Co., Ltd., Wenzhou 325019, China; 3.Institute of Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To address the solid content distribution and agitating power optimization issues of the desulfurization agitator, a single-layer double-arc impeller agitator is used in a baffle-free square mixing tank for experiment. The study focuses on the dispersion degree of desulfurized gypsum volume fraction at different heights near the wall surface of the tank and the dispersion degree of volume fraction under complete uniform suspension. Taking Theil's inequality coefficient (TIC) as the dispersion degree indicator, the single factor influence laws of different agitator speeds, agitator height from the bottom, blade diameter, and blade angle are explored, and the agitating power optimization is conducted by using response surface methodology. Results indicate that in the single factor experiment, the solid content is the highest and the minimum stirring power required for the desired TIC ($TIC \leq 0.1516$) is 20.42 W when the impeller off-bottom clearance is approximately 3/10 of liquid level height. After response surface optimization, the power reduces to 17.94 W, and power consumption decreases by around 12%.

Key words: agitator; solid content distribution; Theil's inequality coefficient; power consumption; response surface methodology; parameter optimization

搅拌设备广泛应用于工业生产中^[1], 也被运用在火电厂的烟气湿法脱硫工艺中。与其他脱硫方法相比, 石灰石-石膏法因操作简单、稳定性好、脱硫效率高、技术成熟等优点成为目前国内外燃煤电厂最主流的脱硫技术^[2]。我国约 92% 的燃煤电厂烟气脱硫机组采用石灰石-石膏法^[3]。随着国家对工业尾气排放指标要求越来越严格, 烟气脱硫技术也需不断进步^[4]。在烟气湿法脱硫工艺中, 脱硫塔是整个脱硫系统中的核心设备之一^[5], 与单一液相搅

拌方式相比, 颗粒和流体间存在动力学耦合作用使得固-液两相搅拌变得更为复杂, 因此研究搅拌槽内颗粒悬浮过程具有非常重要的意义^[6]。搅拌器转速和桨型参数深刻影响固体颗粒悬浮状况与搅拌功率大小, 参数优化可能是使含固率分布均匀、降低搅拌功率的重要途径^[7]。

国内外学者针对上述有关含固率分布和搅拌功率问题已做过一些研究。刘兴利等^[8-9]研究表明, 在无挡板平底圆柱脱硫搅拌槽中, 当脱硫灰及石膏

收稿日期: 2024-01-08; 修回日期: 2024-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(21978255)

作者简介: 王逸(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为搅拌设备的实验和模拟研究, 741311877@qq.com; 谢明辉(1984-), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为工业反应器的技术研发, 通讯联系人, xmh@aar.com.cn。

完全离底悬浮搅拌时,悬浮高度比越低,越有利于杂质分离;较低的搅拌器离底间距更容易实现石膏浆液的悬浮分层。杨潮等^[10]研究表明,对于推进式搅拌器而言,桨叶离底高度的变化对最优固含率的影响较小。Chen等^[11]和Yang等^[12]研究表明,在低于临界转速的较低转速条件下,增大转速可以明显改善固体分布的均匀性。Xiong等^[13]研究表明,提高转速可以略微改善固体的悬浮和分布。周延红等^[14]研究表明,固体颗粒物理属性会显著影响悬浮效果,随着颗粒的尺寸与密度的增加、增大,其悬浮均匀性出现显著降低,最大固相体积分数变大。Jiang等^[15]研究表明,增大桨叶直径,将导致流场临界悬浮速度减小,而流场所需搅拌功率将增大。

众多学者从不同角度研究了搅拌设备中含固率分布和搅拌功率的问题,但鲜有针对脱硫搅拌设备中上述两个问题进行研究并优化设计的。本文以无挡板方形搅拌槽、单层双弧叶桨式搅拌器为研究对象,把桨叶直径、桨叶角度、桨叶中心离底高度和搅拌器转速作为影响因素,以达到目标含固率分布和降低搅拌功率作为优化目标,开展搅拌实验,并进行单因素分析和响应面优化设计。本研究为脱硫搅拌设备的参数优化设计提供了一些解决思路和理论基础。

1 实验

1.1 实验设备

实验采用HJ两叶弧叶桨式搅拌器和搅拌槽的结构,搅拌设备结构简图如图1所示。

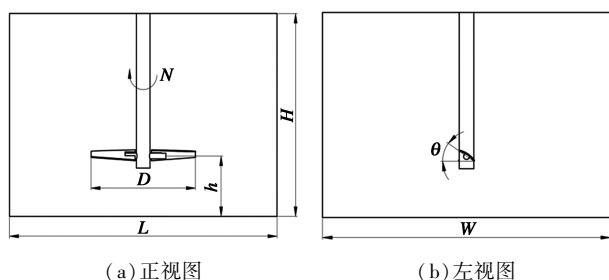


图1 搅拌设备结构简图

搅拌设备结构尺寸为:搅拌槽长度 $L=590$ mm, 宽度 $W=590$ mm, 液位高度 $H=420$ mm, 桨叶直径 $D=[190,270]$ mm, 桨叶角度 $\varphi=[15,55]^\circ$, 桨叶中心离底高度 $h=[60,220]$ mm, 搅拌器转速 $N=[180,420]$ r/min。

1.2 材料与试剂

实验中的固体颗粒采用脱硫石膏,利用激光粒度分析仪测得82.03%石膏颗粒直径在 $[0.1,0.3]$ mm,

体积平均径 $D[4,3]=0.172$ mm, 面积平均径 $D[3,2]=0.111$ mm。利用排水法测得石膏密度 $\rho_s=2650$ kg/m³。实验中的液体为常温常压下的水,密度 $\rho_l=998.2$ kg/m³, 黏度 $\mu_l=1.003\times 10^{-3}$ Pa·s。

2 实验方法

2.1 制备方法

制备含固率^[11](固体体积分数) $\varphi_s=0.0960$ 的混合液,需要准备0.014 m³的石膏和0.1322 m³的水,使液位达到420 mm。由于实验中固体体积分数测量困难,根据公式(1)把固体体积分数换算成固体质量分数 $\omega_s=0.22$,则需要准备37.21 kg的石膏和131.92 kg的水,倒入搅拌槽中混合后制备完成。

$$\omega_s = 1/[1 + (1/\varphi_s - 1) \times (\rho_l/\rho_s)] \quad (1)$$

2.2 分析检测方法

搅拌过程测量流场的常见测量技术有粒子图像测速技术^[16](particle image velocimetry, PIV)和激光多普勒测速技术^[17](laser Doppler velocimetry, LDV),但它们仅能测量速度,而不能测量含固率分布。此外还有光学探针法、导电探针法、电阻成像法可以测量固液混合液中含固率分布,但这些技术都处于发展阶段且设备比较昂贵;取样法所需实验条件简单,操作便捷,测量容易,故本实验采用取样法^[18-19]。对测点A进行取样,并利用水分分析仪对测点的固体质量分数 ω_s 进行测量,其中测点位置 $A_1(270,100,0)$ 、 $A_2(270,200,0)$ 、 $A_3(270,300,0)$ 、 $A_4(270,400,0)$,测点位置示意图如图2所示。

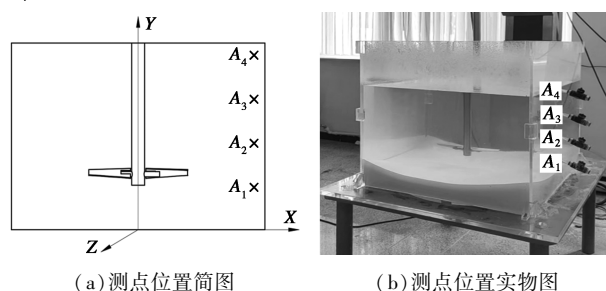


图2 测点位置示意图

2.3 数据处理方法

本研究除了对4个测点的含固率分别进行实验、测量和分析之外,还将利用泰尔不等式系数^[20](Theil's inequality coefficient, TIC)对其进行分析。首先根据公式(2)将实验测得的固体质量分数换算成固体体积分数,再利用公式(3)求得TIC。

$$\varphi_s = 1/[1 + (1/\omega_s - 1) \times (\rho_s/\rho_l)] \quad (2)$$

$$TIC = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 / (\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2})} \quad (3)$$

式中: x 为不同测点测得的固体体积分数; y 为完全均匀悬浮下的固体体积分数; n 为测点的总数, 即 $n=4$ 。

本研究将含固率分布达到 90% 以上 ($TIC \leq 0.1516$) 和降低搅拌功率作为优化目标。在测量、计算含固率的同时, 利用扭矩传感器和长城数据采集系统实时监测搅拌器扭矩 τ 与功率 P , 功率 P 计算如公式(4)所示, 单位为 W。

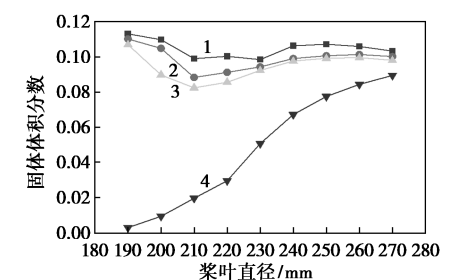
$$P = (N \cdot \tau) / 9.55 \quad (4)$$

3 单因素分析与响应面优化

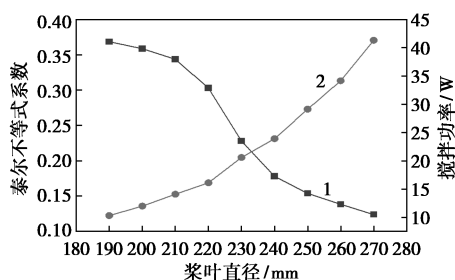
3.1 单因素分析

3.1.1 桨叶直径的影响

桨叶直径的单因素影响规律如图 3 所示。桨叶直径对不同高度测点体积分数的影响如图 3(a) 所示, 可见, 随着桨叶直径增大, 测点 $A_1 \sim A_3$ 一直保持着较高的固体体积分数, 并逐渐趋于均匀悬浮浓度; 测点 A_4 随着桨叶直径减小而逐渐趋于零, 此时搅拌槽内上层混合液为清液层, 存在少量固体颗粒被泵送到上方, 表明当桨叶直径较小时桨叶泵送能力不足, 流场难以在整个搅拌槽中形成循环。桨叶直径对 TIC 和功率的影响如图 3(b) 所示, 可知, 随着桨叶直径增大, TIC 不断变小, 说明搅拌槽内固体颗粒分布逐渐趋于均匀, 当桨叶直径大于 250 mm 之后, 变化变得平缓, 说明当桨叶直径增大到 250 mm 时,



1—测点 A_1 ; 2—测点 A_2 ; 3—测点 A_3 ; 4—测点 A_4
(a) 桨叶直径对不同高度测点体积分数的影响



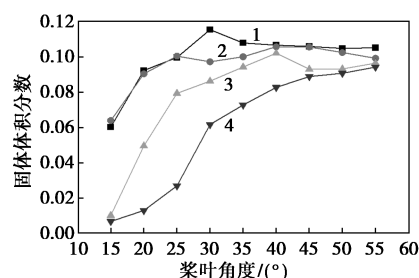
1—泰尔不等式系数; 2—搅拌功率
(b) 桨叶直径对 TIC 和功率的影响

图 3 桨叶直径的单因素影响规律

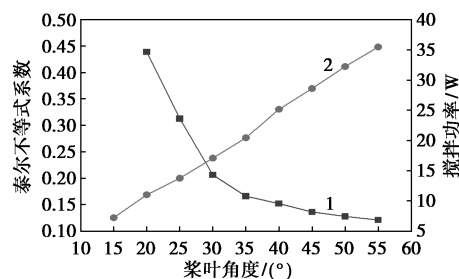
其对搅拌均匀的作用不再显著。搅拌功率随着桨叶直径的增大而快速增大, 说明搅拌功率易受到大直径桨叶的影响。

3.1.2 桨叶角度的影响

桨叶角度对不同高度测点体积分数的影响如图 4(a) 所示, 可见, 随着桨叶角度增大, 测点 $A_1 \sim A_4$ 固体体积分数逐渐增大, 逐渐趋于均匀悬浮浓度。当桨叶角度为 15° 时, 测点 A_3, A_4 趋于零, 此时搅拌槽内 300 mm 以上为清液层, 少量固体颗粒被泵送到上方, 大部分固体颗粒沉积在搅拌槽底部, 表明桨叶角度较小时泵送能力不足, 流场难以在整个搅拌槽中形成循环, 不宜采用小直径桨叶来进行固体颗粒均匀搅拌的操作。随着桨叶直径的不断增大, $A_3 \sim A_4$ 的固体体积分数也增大, 但 A_4 增加缓慢, 表明固体颗粒较难到达混合液上层。桨叶角度对 TIC 和功率的影响如图 4(b) 所示, 可见, 随着桨叶角度的增大, TIC 不断变小, 说明搅拌槽内固体颗粒逐渐搅拌均匀, 当桨叶角度大于 35° 之后, 变化变得平缓, 表明当桨叶角度增大到 35° 时, 其对搅拌均匀的作用不再显著。搅拌功率随着桨叶角度的增大而近似线性增大, 表明搅拌功率与桨叶角度有较好的正线性相关性。



1—测点 A_1 ; 2—测点 A_2 ; 3—测点 A_3 ; 4—测点 A_4
(a) 桨叶角度对不同高度测点体积分数的影响



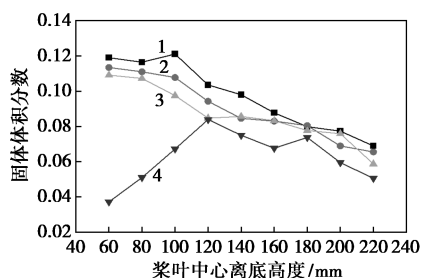
1—泰尔不等式系数; 2—搅拌功率
(b) 桨叶角度对 TIC 和功率的影响

图 4 桨叶角度的单因素影响规律

3.1.3 桨叶中心离底高度的影响

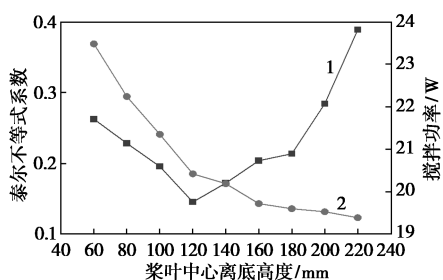
桨叶中心离底高度对不同高度测点体积分数的影响如图 5(a) 所示, 由此可见, 随着桨叶中心离底

高度增大,测点 $A_1 \sim A_3$ 固体体积分数逐渐减小,当桨叶中心离底高度为 120 mm 时即约在 3/10 液位高度时,测点 A_4 固体体积分数达到最大值,在此之前快速增大,在此之后缓慢减小。桨叶中心离底高度对 TIC 和功率的影响如图 5(b) 所示,由此可见,随着桨叶中心离底高度增大, TIC 也在桨叶中心离底高度为 120 mm 时达到最小值,说明此时搅拌槽内含固率分布最均匀。搅拌功率随着桨叶中心离底高度的减小而快速增大,表明搅拌功率易受到低桨叶中心离底高度的影响。



1—测点 A_1 ; 2—测点 A_2 ; 3—测点 A_3 ; 4—测点 A_4

(a) 桨叶中心离底高度对不同高度测点体积分数的影响



1—泰尔不等式系数; 2—搅拌功率

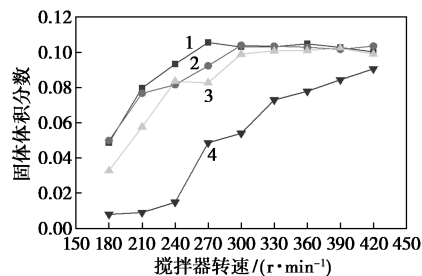
(b) 桨叶中心离底高度对 TIC 和功率的影响

图 5 桨叶中心离底高度的单因素影响规律

3.1.4 搅拌器转速的影响

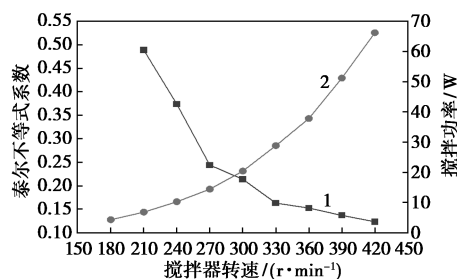
搅拌器转速对不同高度测点体积分数的影响如图 6(a) 所示,可见,随着搅拌器转速增大,测点 $A_1 \sim A_4$ 固体体积分数逐渐增大,逐渐趋于均匀悬浮浓度;当搅拌器转速小于 240 r/min 时,测点 A_4 固体体积分数趋于零,此刻搅拌槽内中上层混合液为清液层,少量固体颗粒被泵送到上方,表明搅拌器转速较小时泵送能力不足,不足以使流场在整个搅拌槽中形成循环,不宜采用较小的搅拌器转速来进行固体颗粒均匀搅拌操作。随着搅拌器转速的不断增大, A_4 固体体积分数缓慢增大,说明固体颗粒更难到达混合液上层。搅拌器转速对 TIC 和功率的影响如图 6(b) 所示,可见随着搅拌器转速增大 TIC 不断变小,说明搅拌槽内固体颗粒逐渐搅拌均匀,当搅拌器转速为 330 r/min 之后变化趋于平缓,说明当搅拌

器转速增大到 330 r/min 时,对搅拌均匀的作用不再显著。搅拌功率随着搅拌器转速的增大而快速增大,表明搅拌功率易受到高搅拌器转速的影响。



1—测点 A_1 ; 2—测点 A_2 ; 3—测点 A_3 ; 4—测点 A_4

(a) 搅拌器转速对不同高度测点体积分数的影响



1—泰尔不等式系数; 2—搅拌功率

(b) 搅拌器转速对 TIC 和功率的影响

图 6 搅拌器转速的单因素影响规律

通过分析上述数据不难发现,在单因素变化条件下,含固率达到目标即 $TIC \leq 0.1516$ 时,桨叶直径为 260 mm,此时 $TIC = 0.1384$, $P = 34.15$ W;桨叶角度 45° ,此时 $TIC = 0.1384$, $P = 34.15$ W;桨叶中心离底高度为 120 mm,此时 $TIC = 0.1455$, $P = 20.42$ W;搅拌器转速为 390 r/min,此时 $TIC = 0.1367$, $P = 51.19$ W。单因素最优解为改变桨叶中心离底高度,此时工艺参数为:桨叶直径为 230 mm,桨叶角度为 35° ,桨叶中心离底高度为 120 mm,搅拌器转速为 300 r/min, TIC 为 0.1455,功率最小为 20.42 W。

3.2 响应面优化

3.2.1 响应面水平与实验设计

根据单因素结果,将因素水平设置如表 1 所示,将 $TIC \leq 0.1516$ 作为首要目标,且搅拌功率小于单因素最优搅拌功率 20.42 W,选取桨叶直径 $D = [220, 260]$ mm,当直径 $D = 220$ mm 时,搅拌功率 $P = 16.11$ W < 20.42 W;当直径 $D = 260$ mm 时, $TIC = 0.1384 < 0.1516$,所选范围同时涵盖最优搅拌功率和目标 TIC 。以此类推,选取桨叶角度 $\varphi = [30, 45]^\circ$,当角度 $\varphi = 30^\circ$ 时,搅拌功率 $P = 17.08$ W < 20.42 W;当角度 $\varphi = 45^\circ$ 时, $TIC = 0.1361 < 0.1516$ 。选取搅拌器转速 $N = [270, 390]$ r/min,当转速 $N =$

270 r/min 时, 搅拌功率 $P=14.4 \text{ W} < 20.42 \text{ W}$; 转速 $N=390 \text{ r/min}$ 时, $TIC=0.1367 < 0.1516$ 。桨叶中心离底高度所选范围为最优水平的两侧水平。

表 1 响应面设计的因素和水平

水平	因素			
	A(桨叶直径)/mm	B(桨叶角度)/°	C(桨叶中心离底高度)/mm	D(搅拌器转速)/(r·min ⁻¹)
-1	220	30.0	100	270
0	240	37.5	120	330
1	260	45.0	140	390

使用 Design-Expert 12.0.3.0 软件设计响应面试验并分析。设计 4 因素 3 水平 2 目标共计 29 组的 BBD 试验, 方案及结果如表 2 所示。二阶多项式响应面回归模型分别为:

$$TIC = 0.1113 - 0.0257A - 0.0252B - 0.0050C - 0.0354D + 0.0104AB + 0.0136AC + 0.0231AD + 0.0243BC + 0.0094BD + 0.0037CD + 0.0225A^2 + 0.0017B^2 + 0.0116C^2 + 0.0098D^2 \quad (5)$$

$$P = 34.88 + 12.59A + 8.86B - 1.17C + 21.05D + 1.811AB + 0.0175AC + 6.34AD - 0.9125BC + 4.65BD - 0.66CD + 0.947A^2 - 0.7742B^2 - 0.113C^2 + 3.48D^2 \quad (6)$$

表 2 响应面设计方案及实验结果

序号	A(桨叶直径)/mm	B(桨叶角度)/°	C(桨叶中心离底高度)/mm	D(搅拌器转速)/(r·min ⁻¹)	TIC	搅拌器功率/W
1	0	0	1	-1	0.1550	17.04
2	0	0	0	0	0.1111	35.03
3	0	1	0	1	0.0819	72.41
4	-1	0	0	-1	0.2423	11.39
5	-1	1	0	0	0.1202	29.08
6	0	0	-1	-1	0.1643	17.95
7	-1	0	-1	0	0.1851	24.15
8	-1	-1	0	0	0.1968	15.92
9	0	-1	0	1	0.1028	44.12
10	0	0	0	0	0.0997	35.34
11	1	0	0	1	0.0970	79.74
12	0	1	1	0	0.1100	40.47
13	0	-1	-1	0	0.1937	25.60
14	0	0	0	0	0.1163	34.35
15	0	1	-1	0	0.0891	44.82

16	1	0	-1	0	0.1039	49.51
17	0	-1	1	0	0.1173	24.90
18	0	0	0	0	0.1229	34.93
19	1	1	0	0	0.0910	57.88
20	0	0	0	0	0.1065	34.73
21	-1	0	0	1	0.1008	42.16
22	-1	0	1	0	0.1576	21.88
23	1	-1	0	0	0.1260	37.47
24	0	0	-1	1	0.0991	60.84
25	0	1	0	-1	0.1223	21.74
26	0	-1	0	-1	0.1808	12.06
27	0	0	1	1	0.1044	57.29
28	1	0	1	0	0.1310	47.31
29	1	0	0	-1	0.1460	23.75

3.2.2 响应面方差分析

为检验响应面回归模型拟合结果可靠性, 采用方差分析法对设计因素与响应指标间的响应面模型分别进行显著性分析, 利用复相关系数 R^2 和校正决定系数 R_{adj}^2 评价响应面回归模型的拟合效果, 其值越接近于 1 表示拟合效果越好^[21]。响应面回归模型误差分析和方差分析分别如表 3、表 4 所示, 可得出 TIC 和搅拌功率响应面模型的复相关系数 R^2 分别为 0.9537 和 0.9993, 校正决定系数 R_{adj}^2 分别为 0.9074 和 0.9987, 表明拟合得到的响应面回归方程拟合程度高, 准确性强, 预测值与实际值间具有高度相关性, 可以用该模型对搅拌器相关指标进行分析及预测。 TIC 和搅拌功率的响应面模型 P 值均小于 0.0001, 表明响应面回归模型极显著^[22], 具有统计学意义。

表 3 回归模型误差分析

因素	平均值	变异系数/%	R^2	R_{adj}^2	精密度/%
TIC	0.1302	9.14	0.9537	0.9074	18.2420
功率	36.34	1.76	0.9993	0.9987	145.9509

表 4 TIC 响应面二次模型的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.0409	14	0.0029	20.61	<0.0001
A	0.0079	1	0.0079	55.78	<0.0001
B	0.0076	1	0.0076	53.98	<0.0001
C	0.0003	1	0.0003	2.11	0.1683
D	0.0150	1	0.0150	106.13	<0.0001

续表

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
AB	0.0004	1	0.0004	3.05	0.1024
AC	0.0007	1	0.0007	5.26	0.0378
AD	0.0021	1	0.0021	15.1	0.0016
BC	0.0024	1	0.0024	16.71	0.0011
BD	0.0004	1	0.0004	2.5	0.1365
CD	0.0001	1	0.0001	0.3763	0.5494
A ²	0.0033	1	0.0033	23.11	0.0003
B ²	0	1	0	0.1383	0.7156
C ²	0.0009	1	0.0009	6.12	0.0268
D ²	0.0006	1	0.0006	4.43	0.0538
残差	0.0020	14	0.0001		
失拟项	0.0017	10	0.0002	2.1	0.2472
纯误差	0.0003	4	0.0001		
总变异	0.0428	28			

注:P 小于 0.05 显著;P 小于 0.01 极显著;下同。

从表 4 可得搅拌参数对搅拌含固率分布影响程度为:搅拌器转速>桨叶直径>桨叶角度>桨叶中心离底高度;从表 5 可得搅拌参数对搅拌功率影响程度为:搅拌器转速>桨叶直径>桨叶角度>桨叶中心

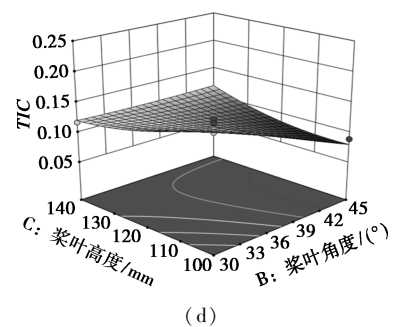
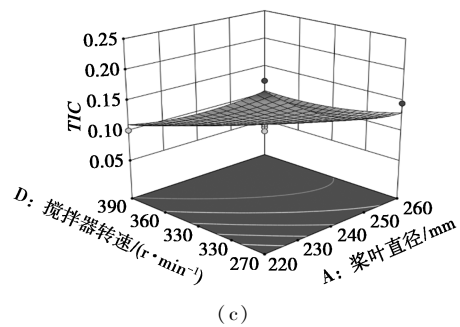
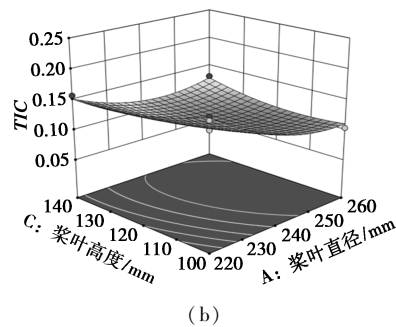
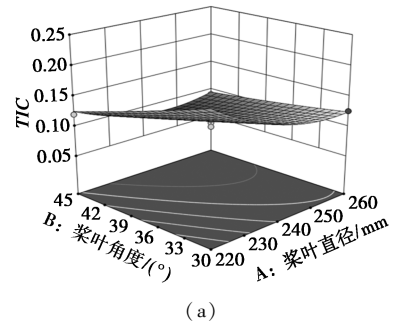
表 5 搅拌功率响应面二次模型的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	8539.63	14	609.97	1484.5	<0.0001
A	1902.1	1	1902.1	4629.17	<0.0001
B	942.17	1	942.17	2292.98	<0.0001
C	16.29	1	16.29	39.64	<0.0001
D	5318.49	1	5318.49	12943.7	<0.0001
AB	13.14	1	13.14	31.98	<0.0001
AC	0.0012	1	0.0012	0.003	0.9572
AD	159.01	1	159.01	386.99	<0.0001
BC	3.33	1	3.33	8.11	0.0129
BD	86.58	1	86.58	210.72	<0.0001
CD	1.74	1	1.74	4.24	0.0586
A ²	5.82	1	5.82	14.16	0.0021
B ²	3.89	1	3.89	9.46	0.0082
C ²	0.0828	1	0.0828	0.2016	0.6603
D ²	78.47	1	78.47	190.99	<0.0001
残差	5.75	14	0.4109		
失拟项	5.21	10	0.5213	3.86	0.1024
纯误差	0.5399	4	0.135		
总变异	8545.38	28			

离底高度。由此可见,搅拌器转速对搅拌含固率和搅拌功率都存在巨大影响;而桨叶中心离底高度对搅拌含固率和搅拌功率影响较小;桨叶直径和桨叶角度对搅拌含固率分布和搅拌功率都有一定的影响,桨叶直径影响程度大于搅拌角度,但差别不大。

3.2.3 响应面交互作用分析

由响应面二次模型的方差分析可知,TIC 响应面模型中 AD、BC 交互作用极显著,搅拌功率响应面模型中 AB、AD、BD 交互作用极显著,其中 AD 交互作用,即桨叶直径和搅拌器转速,对 TIC 和搅拌功率都有着显著的影响。交互作用对 TIC 的影响见图 7;交互作用对搅拌功率的影响见图 8。



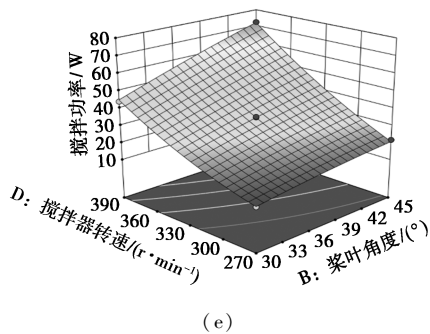
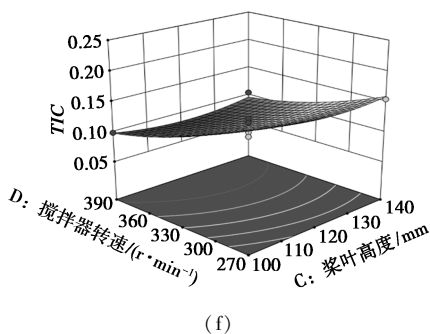
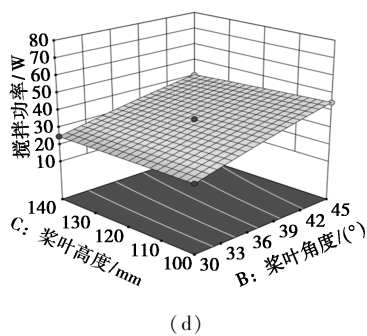
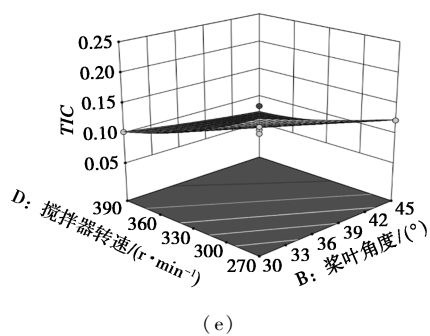


图 7 交互作用对 TIC 的影响

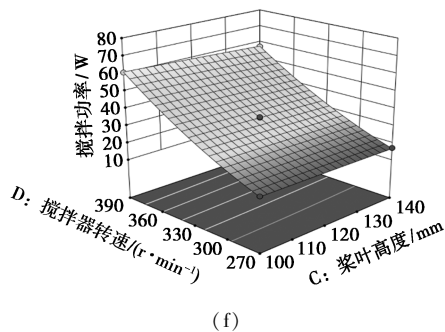
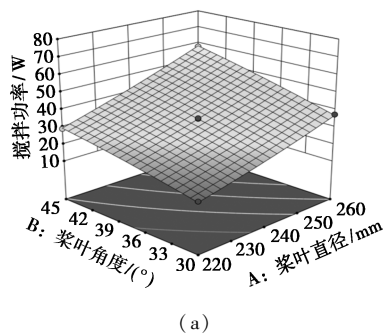
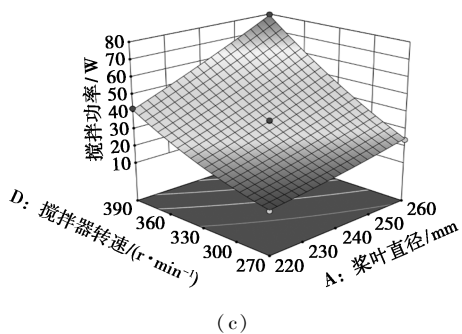
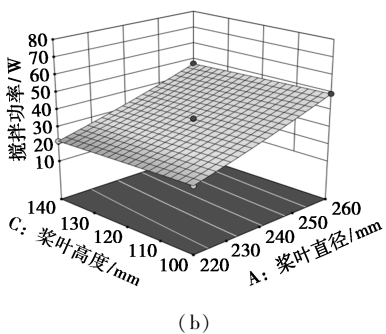


图 8 交互作用对搅拌功率的影响



如图 7(c) 所示,在设计因素水平取值范围内, TIC 随着桨叶直径和搅拌器转速的增大而减小,搅拌器转速对 TIC 的影响最大,因为随着搅拌器转速的增加,搅拌槽内流场的湍流动能增大,就越有利于各种组分之间的相互作用和传质,使得混合更加均匀。同样地,如图 8(c) 所示,在设计因素水平取值范围内,搅拌功率随着桨叶直径和搅拌器转速的增大而增大,搅拌器转速对搅拌功率的影响最大,因为随着搅拌器转速的增加,搅拌槽内流场的湍流动能增大,引起搅拌力矩的增加,因此导致搅拌功率增大。

由单因素分析可得,当含固率分布达到 90% 以上 ($TIC \leq 0.1516$) 时,单因素最优的搅拌设备搅拌参数为桨叶直径 $D=230$ mm,桨叶角度 $\varphi=35^\circ$,桨叶中心离底高度 $h=120$ mm,搅拌器转速 $N=300$ r/min,此时 $TIC=0.1455$ 、功率 $P=20.42$ W。

将响应面优化目标设置为 $TIC=0.1455$,搅拌功率最小化 (minimize),与单因素最优搅拌功率作

对比。

根据响应面分析结果得到最优搅拌设备搅拌参数组合为:桨叶直径 $D=231.042$ mm,桨叶角度 $\varphi=45^\circ$,桨叶中心离底高度 $h=120.455$ mm,搅拌器转速 $N=270.053$ r/min,理论 $TIC=0.1455$,理论搅拌功率 $P=17.28$ W。

根据优化后的搅拌参数设计搅拌设备并开展实验,得出 $TIC=0.1337$,与理论 TIC 误差约为 -8.1% ;搅拌功率 $P=17.94$ W,与理论搅拌功率误差约为 $+3.8\%$,与单因素最优搅拌功率相差约为 -12% 。

综上,利用优化后的搅拌参数,当含固率达到要求时,搅拌功率相较于单因素最优搅拌功率降低了约 12% 。

4 结论

本研究以单层双弧叶桨式搅拌器、无挡板方形搅拌槽为研究对象,将桨叶直径、桨叶角度、桨叶中心离底高度和搅拌器转速作为设计变量,把搅拌槽内壁面不同高度固体颗粒体积分数 TIC 和搅拌功率作为响应指标,基于搅拌实验和 design expert 软件,得出了设计变量和响应指标之间的单因素影响规律、二次多项式预测模型,分析了各因素及其交互作用对各响应指标的影响。

研究结果表明:

(1)在单因素实验中,改变桨叶中心离底高度,可在搅拌功率较小变化时有效地改变搅拌槽内含固率分布,使 TIC 变小,即搅拌得更加均匀。当 $TIC \leq 0.1516$ 时,单因素最优搅拌参数为桨叶直径 $D=230$ mm,桨叶角度 $\varphi=35^\circ$,桨叶中心离底高度 $h=120$ mm,搅拌器转速 $N=300$ r/min,此时搅拌功率最小 $P=20.42$ W。

(2)在响应面实验中,搅拌器转速、桨叶直径与搅拌器转速的交互作用对 TIC 和搅拌功率的影响是最显著的。由响应面得出的最优搅拌参数为桨叶直径 $D=231.042$ mm,桨叶角度 $\varphi=45^\circ$,桨叶中心离底高度 $h=120.455$ mm,搅拌器转速 $N=270.053$ r/min,理论 $TIC=0.1455$,理论搅拌功率 $P=17.28$ W,并开展实验验证,得 $TIC=0.1337$,与理论 TIC 误差约为 -8.1% ;搅拌功率 $P=17.94$ W,与理论搅拌功率误差约为 $+3.8\%$,与单因素最优搅拌功率相差约为 -12% 。

本研究为脱硫搅拌设备的参数优化设计提供了一些解决思路和理论基础。

参考文献

- [1] 全国化工设备设计技术中心站搅拌工程技术委员会.搅拌设备[M].北京:化学工业出版社,2019:1.
- [2] 夏赛,卫新来,金杰,等.燃煤电厂脱硫废水处理技术研究进展[J].现代化工,2020,40(1):46-49.
- [3] 王靖宇,陈成,高志刚,等.燃煤电厂脱硫废水处理技术路线选择分析[J].现代化工,2023,43(7):44-49.
- [4] 万治平,江流,鲍青林.200 kt/a 硫酸装置尾气吸收系统技术改造与运行实践[J].硫酸工业,2014,(1):36-37.
- [5] 徐才仁.湿法烟气脱硫工艺中脱硫塔搅拌方式探讨[J].有色冶金设计与研究,2017,38(5):27-30.
- [6] 李庚鸿,李志鹏,高正明,等.过渡流搅拌槽内固-液悬浮的直接数值模拟[J].科学通报,2018,63(34):3642-3649.
- [7] 马玲岩,黎义斌,周欢,等.弧叶搅拌器不同桨叶直径下混合性能受转速和高度的影响程度分析[J].化工进展,2024,1-17. DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1207.
- [8] 刘兴利,莫建松,程常杰,等.脱硫灰-石灰石湿法脱硫石膏中杂质悬浮分离实验[J].环境工程学报,2013,7(11):4497-4501.
- [9] 刘兴利,莫建松,翟春丰,等.无挡板搅拌槽内脱硫石膏悬浮特性的研究[J].广东化工,2013,40(2):31-33.
- [10] 杨潮,王博,张自强,等.面向最优固含率的推进式搅拌器固相悬浮性能研究[J].高校化学工程学报,2021,35(3):415-422.
- [11] Chen Z W, Wu Y J, Wang J, et al. Study on the solid-liquid suspension behavior in a tank stirred by the long-short blades impeller[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022, 47: 79-88.
- [12] Yang F L, Zhang C X, Sun H Y, et al. Solid-liquid suspension in a stirred tank driven by an eccentric-shaft: Electrical resistance tomography measurement[J]. Powder Technology, 2022, 411: 117943-117968.
- [13] Xiong X, Liu Z H, Tao C Y, et al. Numerical simulation of dense solid-liquid mixing in stirred vessel with improved dual axial impeller[J]. Separations, 2022, 9(5): 122.
- [14] 周延红,刘胜军,龚浩,等.高固含率搅拌槽内临界转速的 CFD 模拟[J].化工设备与管道,2023,60(1):48-54.
- [15] Jiang H W, Yuan S, Liu H, et al. Numerical analysis and optimization of key parts in the stirred tank based on solid-liquid flow field[J]. Science Progress, 2022, 105(1): 1-26.
- [16] 周勇军,袁名岳,孙存旭.改进型框式组合桨搅拌釜内流场特性[J].化工进展,2019,38(12):5306-5313.
- [17] 吴珺,焦晶晶,杨彪,等.基于激光的多相流测试技术应用研究进展[J].激光与红外,2016,46(2):132-138.
- [18] 杨锋苓,周慎杰.搅拌固液悬浮研究进展[J].化工学报,2017,68(6):2233-2248.
- [19] 赵露露,周高峰.固液搅拌槽测量技术研究进展[J].化工管理,2023,(7):81-83.
- [20] Leuthold R M. On the use of theil's inequality coefficients[J]. American Journal of Agricultural Economics, 1975, 57(2): 344-346.
- [21] 吴壮壮,牛智有,刘梅英,等.基于响应面法的仔猪配奶罐搅拌器数值模拟与优化[J].华中农业大学学报,2023,42(1):248-257.
- [22] 徐杰,刘向荣,甄学乐,等.响应面法优化东红球菌对 DBT 的脱硫条件[J].现代化工,2020,40(6):72-77. ■