

引文格式:徐子强,许家宝,卢贤俊,等. 双层旋变三叶桨釜内传热性能研究[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(4): 165–176.

Xu Ziqiang, Xu Jiabao, Lu Xianjun, et al. Heat transfer performance in a stirred tank with double-layer rotary variable-pitch three-bladed impeller[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(4): 165–176.

双层旋变三叶桨釜内传热性能研究

徐子强, 许家宝, 卢贤俊, 周勇军

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

[摘 要] 针对新研发的旋变三叶桨的工程应用与优化, 本研究采用 CFD 模拟与传热实验相结合的方法, 以质量分数为 0.75% 的 CMC 水溶液为介质, 对双层旋变三叶桨在带螺旋盘管加热的搅拌釜内传热性能进行研究。研究表明: 釜内实验温度分布从高到低为: 下部温度 > 中部温度 > 上部温度, 整体温差保持在 3.5 K 以内; 旋变三叶桨的强轴流作用可有效改善釜内顶部和底部的温度分布, 最大温差保持在 2.5 K 以内; 转速提升可以增强流场动能与传热效率, 当转速 $N=180$ r/min 时, 釜内底部小涡旋消失, 流场中形成对称的循环涡旋, 增强了轴向流动与整体混合; 合理设置桨间距对维持釜内高效轴向循环至关重要, 当桨间距 $C_2=175$ mm 时, 努塞尔数 Nu 达到峰值, 传热效果最佳; 螺旋盘管外侧 XY 平面上的平均温度边界层厚度为 2.44 mm, 较同类研究更薄; 螺旋盘管外侧努塞尔数 Nu 的实验值和模拟值的最小误差为 2.62%, 最大误差为 5.78%, 有效验证了数值模拟的准确性。研究结果可为旋变三叶桨的工程应用提供技术参考。

[关键词] 旋变三叶桨; 非牛顿流体; 传热性能; 温度边界层; 努塞尔数; 转速; 桨间距

[中图分类号] TF803.2; TP391.99 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)04-0165-12

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.04.017

0 引言

搅拌釜广泛应用于冶金、化工、炼化等行业, 具有接触面积大、混合效果好、传质传热效率高等优点, 同时也可以用于完成酯化、硝化、烃化、聚合等工艺过程^[1]。釜内的物料混合存在有限空间内的非定常湍流问题, 且常伴随强烈的传质、传热及各种化学反应^[2]。物料间的热量传递依赖于流体在釜内的流动循环, 物料混合不充分或温度分布不均匀都会造成生产效率低下, 因此对搅拌釜内传热性能进行研究具有重要价值^[3-6]。

搅拌槽内桨叶的结构尺寸和操作参数直接影

响到搅拌釜内温度及流场的分布, 对不同搅拌桨进行优化或开发新型桨叶并研究其釜内传热性能对于降低能源消耗、提高生产经济性具有很好的意义。赵辉等^[7]通过理论与 COMSOL 有限元结合, 模拟了真空外加热反应釜的温度场, 重点研究了对流传热效应及法兰接口在不同加热工况下的温度分布。雷鸣等^[8]对搅拌釜内传热过程进行模拟, 结果表明增大桨叶倾角可提升盘管外侧对流传热系数, 45° 倾角时最佳, 90° 倾角时导致釜底混合恶化且能耗最高。Zhou 等^[9]对双层改进型 Intermig 桨搅拌釜的传热过程进行了研究, 实验与模拟的温度误差小于 2 K, 测得盘管外侧温度边界层平均厚度为 3.66 mm, 表明该桨型在提升传热效率方面优势显著。Xie 等^[10]基于多重参考系 (MRF) 方法建立了聚合搅拌釜的多尺度混合 CFD 模型, 并探讨了桨型、转速及进出料位置对温度场、浓度场、分子量及其分布的影响。Zhao 等^[11]发现搅拌参数通过影响流场与传热路径改变原油储罐温度场, 并在 350 r/min、0° 偏转角及 500 mm 直

[收稿日期] 2026-02-11 [修订日期] 2026-03-12

[录用日期] 2026-03-12 [出版日期] 2026-08-01

[第一作者] 徐子强 (2001—), 男, 硕士研究生, 安徽安庆人, 主要研究方向为搅拌技术及装备的开发应用。

[通信作者] 周勇军 (1969—), 男, 博士, 教授, 江苏盐城人, 主要研究方向为搅拌技术及装备的开发应用。

[基金项目] 国家自然科学基金 (52175171)。

径条件下,系统不可逆损失最小,传热效率最高。Dostal等^[12]对带螺旋盘管的六斜叶桨釜内传热特性进行研究,采用基于测量釜内温度随时间变化来求解非稳态焓平衡的瞬态方法确定搅拌液体与螺旋盘管之间的传热系数。车圆圆等^[13]通过实验与模拟对比研究了标准CBY桨与CBY-H桨的传热性能,发现CBY-H桨能使釜内混合更均匀、传热效果更佳,其对流传热系数较CBY桨提升约2%。沈洋等^[14]对反应器的换热过程进行了研究,结果表明模拟与实验各点温度误差低于1.83 K,内外侧对流传热系数误差分别为9.10%和4.53%,验证了基于RNG $k-\varepsilon$ 模型与非平衡壁面函数的壁面函数法模拟连续流稳态换热过程的可靠性。占晓强等^[15]采用CFD数值模拟方法研究了搅拌反应釜内的流动传热过程,随盘管直径增大,其内外侧对流传热系数均因壁面附近湍动减弱而下降,且内侧系数的降幅远大于外侧。

上述研究表明,三叶桨和宽叶桨可大幅提升反应釜内溶液的流动性能、混合性能以及传热效果,具有循环力强、混合效率高等特点,但文献对新型桨叶的研究多集中在牛顿流体,对搅拌釜内假塑性

非牛顿流体传热性能的研究未见报道。由于非牛顿流体在搅拌过程中表现出复杂的流变特性,为此本文提出一种旋变三叶桨,其是将传统三叶桨和宽叶桨进行组合优化得到的一种新型轴流桨叶。以质量分数为0.75%的CMC水溶液(假塑性非牛顿流体)为介质,以传热实验和CFD模拟结合的方法对旋变三叶桨在螺旋盘管加热的搅拌釜内的温度场、温度边界层及努塞尔数 Nu 进行研究,以期为该桨叶的工程应用与优化提供参考。

1 实验介绍

1.1 实验装置

实验所用的双层旋变三叶桨与搅拌釜的结构如图1所示。搅拌釜为不锈钢材质,底部采用标准椭圆形封头,内径为 $T=500$ mm,总高度 $H=750$ mm, $H_1=625$ mm,螺旋盘管为 $\varphi 20$ 的不锈钢管,中心直径为330 mm, $H_2=250$ mm,安装高度 $H_3=250$ mm, C_1 为桨叶的离底距, C_2 为桨间距。双层旋变三叶桨在圆周方向平均分布,其中桨叶直径 $D=250$ mm,轮毂内外径分别为 $D_1=25$ mm、 $D_2=40$ mm,桨叶厚度为 $t=2$ mm,桨叶的主要尺寸见表1。

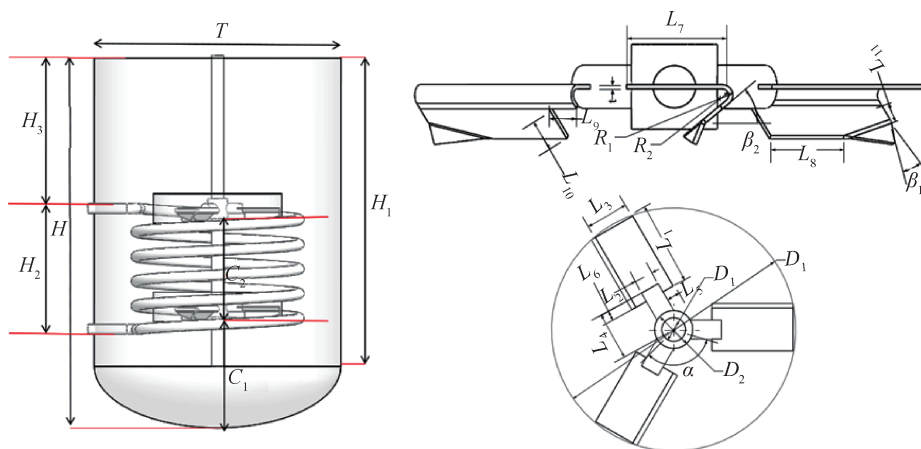


图1 搅拌釜及搅拌桨

Fig. 1 Stirred tank and stirred paddle

表1 桨叶尺寸参数

Table 1 Paddle dimensions

参数	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}	L_{11}	R_1	R_2	β_1	β_2
尺寸/mm	85	20	34	50	7	10	34	40	15	22	10	5	3	30°	40°

实验开始时,由蒸汽发生器产生的高温蒸汽从螺旋盘管上端口进入,螺旋盘管下端口与排水管相

连接,蒸汽一直处于流动状态,同时通过控制柜和液压升降系统来调节桨叶的转速和安装高度,传热

实验总平台如图2所示。为准确测量搅拌釜内温度分布及盘管壁面温度,实验装置共设置15个热电偶测点,如图3所示。其中,盘管外壁面布置6个测点($T_1 \sim T_6$),分别监测蒸汽入口、中间段及出口温度;搅拌釜内部沿轴向分上、中、下三层布置9个铠装热电偶($T_7 \sim T_{15}$),用于监测介质整体温度分布。

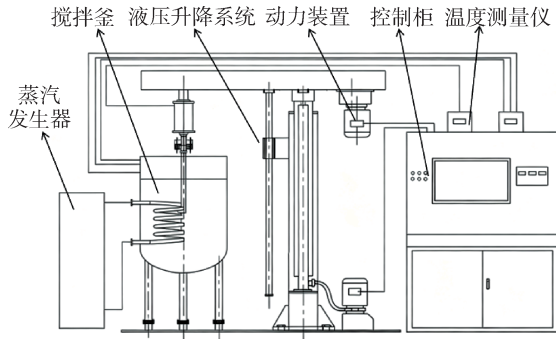


图2 传热实验总平台

Fig. 2 Overall heat transfer experiment platform

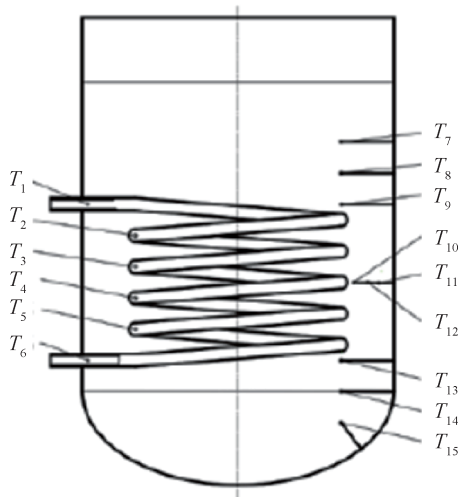


图3 测温点分布图

Fig. 3 Temperature measurement point distribution map

在传热实验中,对于釜内温度的瞬时监测会造成误差。为减小实验误差,每次传热实验结束后,向螺旋盘管通入冷水进行冷却,待各测温点温度恢复至热平衡状态后再进行实验;同时两次实验在各测温点所获得的数据之间差异较小,采用两次实验数据的平均值进行分析研究;实验中采用的是由上海钰莱仪器仪表有限公司生产的XMTD-3002型智能温度显示器,该设备配备自动冷端补偿系统,可实现 $-99 \sim 399^\circ\text{C}$ 范围内的精确测温,其最大允许误

差为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。

1.2 实验原理

基于非稳态焓平衡原理,并在视搅拌釜为绝热系统的假设下,通过监测液体温度变化来测量传热系数,其热流率表达式见式(1)~(3)^[16]。

$$Q = mc_p \frac{T_a - T_b}{\Delta t} \quad (1)$$

$$Q = KS\Delta T \quad (2)$$

$$\Delta T = (T_b - T_a) / \left[\ln \left(\frac{T_w - T_a}{T_w - T_b} \right) \right] \quad (3)$$

盘管内传热系数 h_i 可根据湍流蒸汽的努塞尔数式(4)计算,进而求得管外壁与介质的对流传热系数。基于努塞尔数 Nu_i ,通过式(5)和(6)可依次求得传热系数 h_i 、总传热系数 K ,并最终得到管外努塞尔数 Nu_o 。

$$h_i = \frac{Nu_i k_i}{d_i} \quad (4)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{d_o}{d_i} \frac{1}{h_i} + \frac{d_o}{2\lambda_w} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o} \quad (5)$$

$$Nu_o = \frac{h_o d_o}{k_o} \quad (6)$$

式中: Q 为热流量, J ; m 为介质质量, kg ; c_p 为比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T_a 、 T_b 分别为介质初始与最终温度, K ; Δt 为计算时间, s ; K 为总传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; S 为换热面积, m^2 ; ΔT 为对数平均温差, K ; T_w 为热源温度, K ; h_i 为管内对流传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; Nu_o 为管内努塞尔数,无量纲数; d_o 为盘管外径, mm ; d_i 为盘管内径, mm ; λ_i 为盘管内热流体的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; λ_w 为盘管热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h_o 为管外对流传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

2 数值模拟

2.1 网格划分

整个计算域采用非结构网格进行划分,对桨叶区域进行网格加密,同时为保证计算结果的精度要求,对螺旋盘管外壁面设置10层边界层网格,如图4所示。

计算模型的网格采用Poly-Hexcore类型,提取了釜内轴向温度分布如图5所示。网格无关性验证结果表明,当网格数量由201万增加到224万,温度分布曲线基本相同,继续增加网格数量基本对釜内温度没有影响,考虑计算成本和精度要求,故选取201万网格进行模拟计算。



图4 网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of grid partitioning

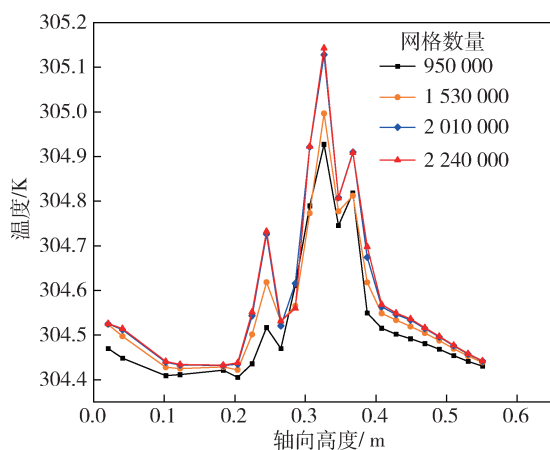


图5 釜内温度随网格数量的变化

Fig. 5 Variation of furnace temperature with number of grids

2.2 边界条件

模拟采用质量分数0.75%的CMC溶液,其物性参数为:导热系数 $0.64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,比热容 $4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

溶液黏度采用 Non-Newtonian-Power-Law 模型描述,同时考虑剪切速率与温度的影响,其函数方程见式(7)–(9),具体参数见表2。设置螺旋盘管壁面温度恒为 373 K ,流体初始温度 303 K ,釜壁与大气自然对流系数为 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,螺旋盘管入口设置进口压力为 0.3 MPa ,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法,动量方程和湍流动能方程均采用二阶迎风格式。

$$\mu = K\gamma^{n-1}H(T) \quad (7)$$

$$H(T) = \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\alpha}\right)\right] \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{E_a}{R} \quad (9)$$

式中: μ 为黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $H(T)$ 为温度修正因子,无量纲数; γ 为剪切速率, s^{-1} ; α 为活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; T_α 为参考温度, J/mol ; E_a 为黏性流动活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; R 为摩尔气体常数, $R=8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

表2 CMC溶液物性参数

Table 2 Properties of CMC solution

稠度系数 $K/\text{Pa} \cdot \text{s}^n$	流变指数 n	$\mu_{\min}/\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\mu_{\max}/\text{Pa} \cdot \text{s}$	活化能 $\alpha/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	参考温度 T_α/K
0.531	0.762	0	0.6	2733	295.3

3 结果与分析

3.1 实验结果与模拟验证

当转速 $N=120 \text{ r/min}$ 、桨叶离底距 $C_1=225 \text{ mm}$ 、桨间距 $C_2=175 \text{ mm}$ 时,通过实验测得釜内介质温度如图6所示,温度分布从高到低依次为釜内下部、中部、上部,整体温差保持在 3.5 K 以内。

将釜内中部温度($T_{10} \sim T_{12}$ 三点均值)的瞬态模拟

结果与实验值进行对比,如图7所示。结果表明,二者变化趋势一致,模拟值略高于实验值且偏差在 1.5 K 以内,验证了数值模拟结果的准确性。

3.2 流场分布

模拟采用质量分数0.75%的CMC溶液,当离底距 $C_1=225 \text{ mm}$ 、桨间距 $C_2=175 \text{ mm}$ 时,四种转速下搅拌槽内流场流型如图8所示。当转速 $N=120 \text{ r/min}$ 时,釜内高速区主要集中于桨叶附近且范围有

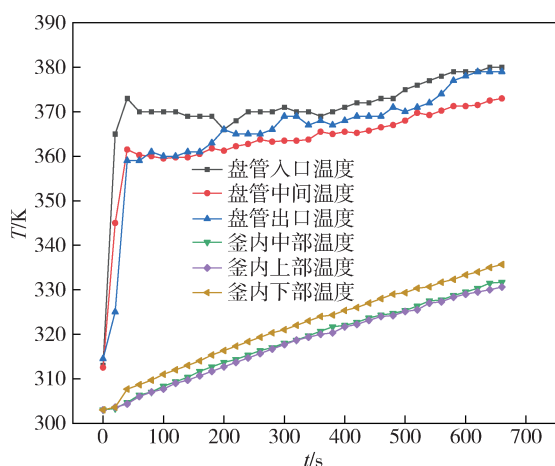


图6 釜内温度变化曲线

Fig. 6 Temperature change curve inside the stirred tank

限。随着转速提高,高速区逐渐扩大并向上、下方向延伸。同时流场中形成了清晰的循环涡旋,尤其在桨叶上下区域出现对称的涡旋,这些涡旋是轴向流和径向流协同作用的结果。当转速提升至 $N=180$ r/min 时,高速区已覆盖大部分流场区域,釜内底部小涡旋消失,流体动能显著增强。在双层旋变三叶桨作用下,流体在桨叶区产生强烈的轴向速度分量,形成自上而下的整体循环,这可以促进釜

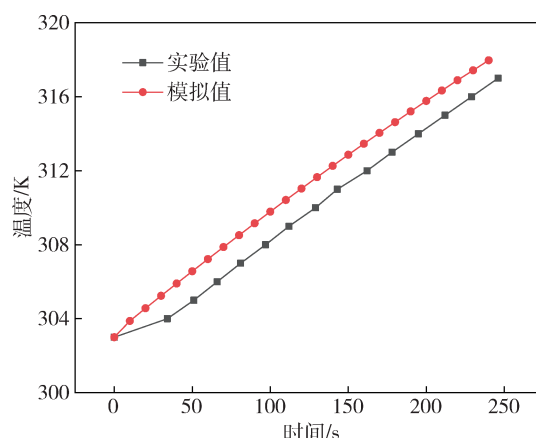


图7 釜内温度实验值与模拟值对比

Fig. 7 Experimental and simulated values of temperature inside the stirred tank

内底部流体与上部流体的整体循环混合,从而减小釜内上下部温差。当转速从 $N=180$ r/min 升至 $N=210$ r/min 时,釜内流体速度进一步增大,整体流型变化较小。桨叶转速的提升有效增加了桨叶对流体的剪切作用,可使流体黏度变小,釜内的混合效果更优。

综上所述,提高转速可有效扩大釜内高速区范围、提升流场均匀性并强化流体轴向循环,从而提高搅拌釜内混合效率与传热性能。

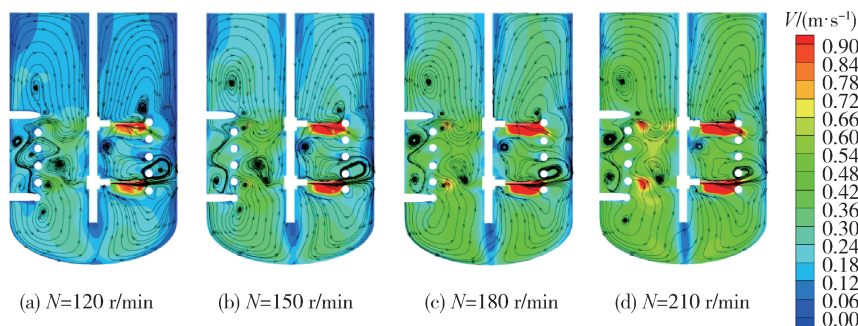


图8 不同转速下釜内流型图

Fig. 8 Flow patterns inside the stirred tank at different rotational speeds

3.3 瞬态温度场模拟结果

模拟采用质量分数 0.75% 的 CMC 溶液,当离底距 $C_1=225$ mm、桨间距 $C_2=175$ mm、转速 $N=180$ r/min 时,图 9 展示了不同时刻釜内竖直截面的温度分布,在搅拌初始阶段($t=5$ s),热量在盘管附近积累并产生回流,高温流体积聚在盘管内侧,这一现象的产生主要由于流体绕螺旋盘管时,在螺旋盘管背流面因边界层分离会形成低压区,与迎流

面的高压区产生压差,从而驱动了搅拌釜内高温流体的反向流动形成回流。随着搅拌进行($t=10\sim 15$ s),釜内流体在旋变三叶桨的径向流与轴向流的共同作用下,釜内流体的动能增强,高温流体随釜内循环向釜顶和釜底扩散,回流区的范围逐渐缩小。当 $t=20$ s,釜内温度整体升高,盘管两侧高温区扩大,受盘管上直段扰流影响,釜内上部区域高速流体密度降低,致使釜体上侧出现局部低温区。

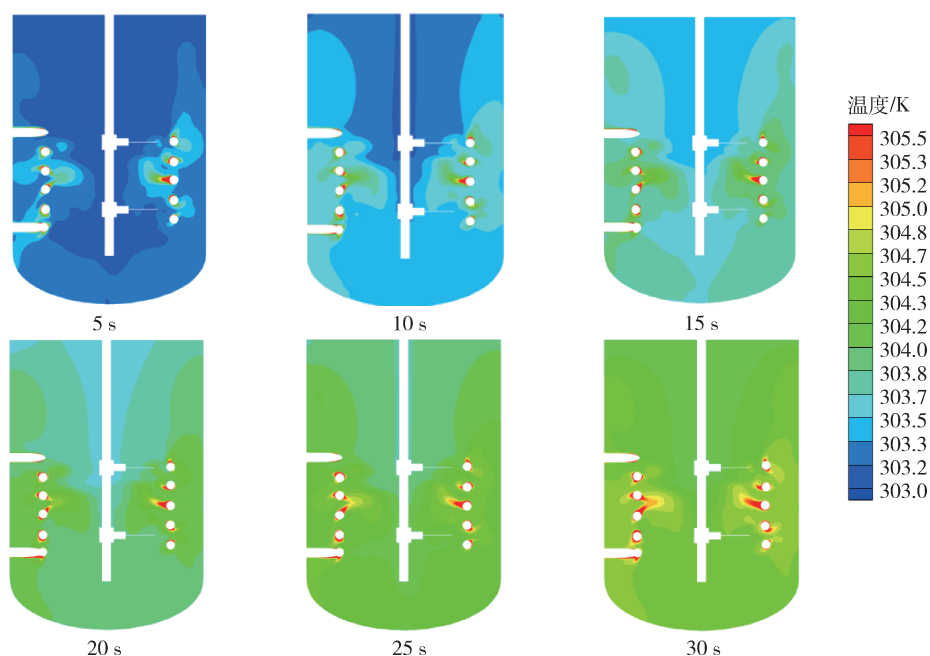


图9 釜内竖直截面瞬态温度场

Fig. 9 Transient temperature field in vertical cross-section of the stirred tank

$t=20$ s以后釜内流体受双层旋变三叶桨的剪切作用而产生的对流循环基本稳定,高温流体区域扩散至整个搅拌釜内,回流现象进一步减弱,釜内温度均匀性得到有效改善。 $t=25$ s后,高温区域聚集在螺旋盘管附近,釜内温度分布均匀,最大温差保持在2.5 K以内。

图10为搅拌釜内 $Y=0.313$ m处 xz 截面在 $t=30$ s内的温度分布, $t=5\sim 10$ s时釜内高温区域在螺旋盘

管附近,搅拌轴区域流体温度偏低。 $t=10\sim 15$ s,搅拌轴附近的低温区域明显缩小,盘管两侧的高温区在旋变三叶桨的强轴流作用下开始向四周扩散,靠近釜内侧壁面处温度明显上升。 $t=20\sim 30$ s,高温区域进一步扩大,可见旋变三叶桨的搅拌作用能使釜内温度从初始的不均匀状态改善到了最终的均匀稳定状态,最终稳定在304.4 K。

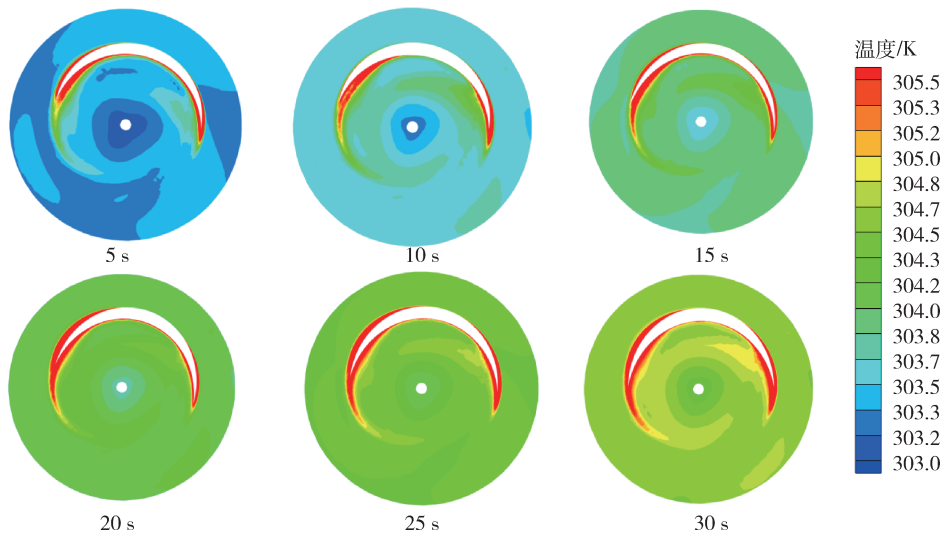


图10 釜内水平截面瞬态温度场

Fig. 10 Transient temperature field in the horizontal cross-section of the stirred tank

3.4 温度边界层模拟

温度边界层厚度是螺旋盘管加热搅拌釜内的传热性能的关键指标,层厚越薄,传热效率越高。本研究选取盘管螺旋段外侧壁面 10 个位置进行厚度标定,路径见图 11,温度变化曲线如图 12 所示。曲线呈现 5 个峰值和 10 个突变区,以首个峰值为例,温度由 305.26 K 跃升至 373 K,对应轴向高度变化范围为 0.210 02~0.214 83 m,此区间高度即为温度边界层厚度。由表 3 可知螺旋盘管外侧 xy 平面的平均温度边界层厚度为 2.44 mm,对比史亦航等^[17]模拟的边界层厚度为 3.54 mm,这一较薄的边界层主要归因于旋变三叶桨独特的叶型设计,其产生的强烈轴向流能够高效冲刷盘管壁面,通过增大釜内速度梯度和湍流流动,导致螺旋盘管温度边界层减薄,从而削弱热阻,从而显著提升传热效率。

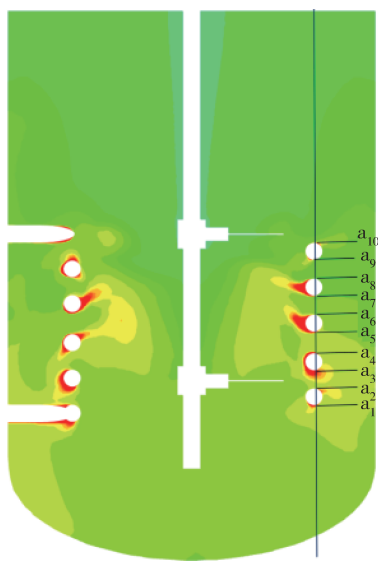


图 11 温度边界层标定

Fig. 11 Calibration of the temperature boundary layer

3.5 努塞尔数

通过传热实验和数值模拟,研究不同转速 N 、桨间距 C_2 对努塞尔数的影响,结果如图 13 所示。

图 13 分别研究了搅拌转速 N 与桨间距 C_2 对盘管外侧传热性能(努塞尔数 Nu)的影响,并对实验值与模拟值进行了对比分析,努塞尔数 Nu 的实验值和模拟值的最小误差为 2.62%,最大误差为 5.78%。由于努塞尔数 Nu 与 d_0/δ_r 成正比关系,其中 δ_r 为温度边界层厚度, d_0 为螺旋盘管直径。该关系表明努塞

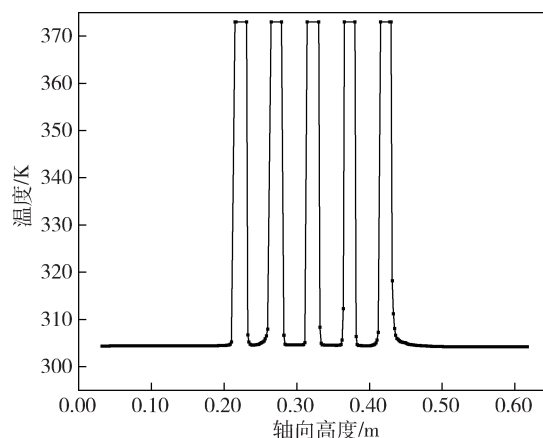


图 12 温度边界层曲线

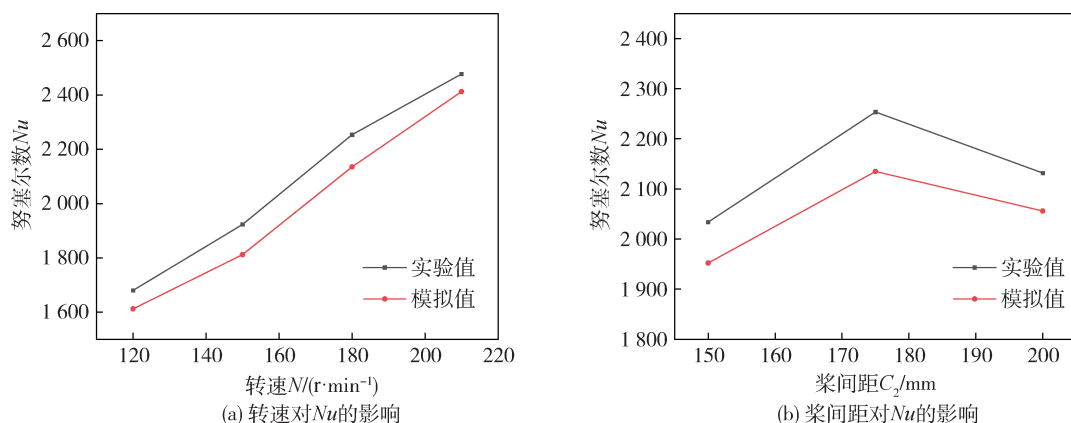
Fig. 12 Temperature boundary layer curve diagram

表 3 温度边界层厚度

Table 3 Temperature boundary layer thickness

螺旋盘管标记点	xy 竖直截面温度边界层厚度/mm
a_1	4.81
a_2	1.58
a_3	1.60
a_4	3.20
a_5	1.60
a_6	3.21
a_7	1.30
a_8	2.51
a_9	1.32
a_{10}	3.24
平均边界层厚度	2.44

尔数 Nu 与温度边界层厚度 δ_r 成反比,即减薄温度边界层厚度 δ_r 可直接提升努塞尔数值 Nu 。从图 13(a) 可以看出,随着转速从 120 r/min 增加至 210 r/min,实验与模拟的 Nu 数均呈现显著的上升趋势。这表明提高搅拌转速能有效提高盘管外侧的传热效率,主要由于转速的提升增强了釜内流体湍动,减薄了温度边界层。图 13(b) 揭示了桨间距与 Nu 数之间存在非线性关系,当桨间距从 150 mm 增大至 175 mm 时,实验与模拟的 Nu 数均升至峰值,说明适当增大桨间距可减弱双桨间流体的相互作用消耗,从而增强轴向流与环向流的协同作用,强化上部流场扰动与整体传热效果。而当桨间距继续增大至 200 mm 时, Nu 数反而出现下降,主要由于过大的桨间距会削弱釜内轴向流动强度并扩大低速区,阻碍

图13 转速与桨间距对盘管外侧 Nu 的影响Fig. 13 Effect of rotational speed and blade pitch on Nu at the outer surface of the coil

上层流体传递至釜底,导致传热性能下降,当双层旋变三叶桨的桨间距为 175 mm 时,传热效果最好。

4 结论

本文采用实验与模拟相结合的方法,以非牛顿流体 CMC 溶液为介质,探究了双层旋变三叶桨在搅拌釜内的传热特性,主要得出以下结论。

1) 双层旋变三叶桨可使釜内温度分布与均匀性得到改善。通过传热实验可知,釜内介质温度呈现下部>中部>上部的分布特征,整体温差控制在 3.5 K 以内。对于双层旋变三叶桨釜内瞬态温度场进行模拟分析,旋变三叶桨的强轴向流动显著增强了流体在竖直方向的循环混合能力,使搅拌釜顶部与釜内底部温差进一步缩小至 2.5 K 以内,且在 $t=20\sim30$ s 时温度场趋于稳定,温度均匀性良好。

2) 转速提升可以增强流场动能与传热效率。当转速 $N=120$ r/min 时,釜内高速区主要集中于桨叶附近且范围有限;随着转速从 $N=120$ r/min 提高至 $N=180$ r/min,釜内底部小涡旋消失,流场中形成对称的循环涡旋,增强了轴向流动与整体混合;当转速进一步提升至 $N=210$ r/min 时,流体流速进一步增大,流型变化较小。转速的提升有效增加了桨叶对流体的剪切作用,从而有效提升釜内传热性能和混合效率。

3) 桨间距过大或过小会直接影响釜内传热性能。当桨间距 $C_2=175$ mm 时,努塞尔数 Nu 达到峰值,传热效果最佳。过大桨间距如 $C_2=200$ mm,会削弱轴向流动强度,扩大釜内低速区,阻碍上下部流体交换,导致传热性能下降,表明合理设置桨间

距对维持釜内高效轴向循环至关重要。螺旋盘管外侧 xy 平面的平均温度边界层厚度为 2.44 mm,较同类研究更薄。旋变三叶桨产生的强轴流能有效减薄边界层,削弱热阻,增强传热。努塞尔数 Nu 随转速升高而增大,表明传热效率随流体湍动增强而提升。

4) 螺旋盘管外侧努塞尔数 Nu 的实验值和模拟值的最小误差为 2.62%,最大误差为 5.78%,有效验证了数值模拟的准确性。

[参考文献]

- [1] 施乃进,周勇军,鲍苏洋等. 涡轮桨搅拌槽内湍流特性的 V3V 实验及大涡模拟[J]. 化工学报, 2017, 68(11): 4069-4078.
Shi Naijin, Zhou Yongjun, Bao Suyang, et al. V3V study and large eddy simulation of turbulence characteristics in a stirred vessel with Rushton turbine impeller[J]. CIESC Journal, 2017, 68(11): 4069-4078.
- [2] 吴国良,倪红卫,方庆等. 搅拌方式对多级钒页岩浸出槽内多相流行为的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(3): 102-110.
Wu Guoliang, Ni Hongwei, Fang Qing, et al. Effect of stirring mode on multiphase flow behaviors in multistage vanadium shale leaching tank[J]. Nonferrous Metals, 2023(3): 102-110.
- [3] 李天赐,赵秋月,朱帅等. 新型管式搅拌反应器的气液传质特性[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(01): 105-111.
Li Tianci, Zhao Qiuyue, Zhu Shuai, et al. Gas-liquid mass transfer characteristic of a new tubular stirred reactor[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(01): 105-111.
- [4] 陈芳,张红,王中贤等. 旋转热管生物反应器搅拌结构的数值模拟[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2012, 34(2): 114-119.
Chen Fang, Zhang Hong, Wang Zhongxian, et al. CFD simulation of rotating heat pipe bioreactor with different mixing structures [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural

- Science Edition), 2012, 34(2): 114–119.
- [5] 李庚鸿, 李志鹏, 高正明等. 湍流搅拌槽内固液悬浮的数值模拟及实验验证[J]. 化工进展, 2025, 44(8): 4567–4570.
Li Genghong, Li Zhipeng, Gao Zhengming, et al. Solid-liquid suspension in a turbulent stirred tank: numerical simulations and experimental validation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44(8): 4567–4570.
- [6] Benthams E J, Heggs P J, Mahmud T. CFD modelling of conjugate heat transfer in a pilot-scale unbaffled stirred tank reactor with a plain jacket[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2018, 92(2): 573–585.
- [7] 赵辉, 肖无云, 张武寿等. 外加热真空反应釜温度分布的计算与模拟[J]. 化学工程, 2021, 49(1): 37–42.
Zhao Hui, Xiao Wuyun, Zhang Wushou, et al. Computation and simulation of the temperature distribution of the vacuum reactor during external heating [J]. Chemical Engineering (China), 2021, 49(1): 37–42.
- [8] 雷鸣, 田凤国, 刘树磊等. 桨叶倾角对搅拌釜流动传热性能影响的 CFD 分析[J]. 化学工程与装备, 2022(1): 1–3.
Lei Ming, Tian Fengguo, Liu Shulei, et al. CFD analysis of the influence of blade pitch angle on flow and heat transfer performance in a stirred tank [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2022(1): 1–3.
- [9] Zhou Y, Wang L, Jiang B. An investigation of the heat transfer performance of dual improved INTERMIG impellers in a stirred tank with an inner heating coil[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2019, 36(3): 1143–1154.
- [10] Xie L, Zhu L T, Luo Z H, et al. Multiscale modeling of mixing behavior in a 3D atom transfer radical copolymerization stirred-tank reactor[J]. Macromolecular Reaction Engineering, 2017, 1(1): 1–13.
- [11] Zhao J, Lei M, Liu S, et al. Energy and heat transfer analysis on the heating process of crude oil tank with mechanical stirring [J]. Petroleum Science, 2025, 22(3): 1307–1339.
- [12] Dostal M, Verisova M, Petera K. Analysis of heat transfer in a vessel with helical pipe coil and multistage impeller [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2014, 92(12): 2115–2121.
- [13] 车圆圆, 周俊超, 毕纪葛等. 改进 CBY 桨搅拌釜内单相流体流动与传热特性研究[J]. 高校化学工程学报, 2014, 28(3): 489–496.
Che Yuanyuan, Zhou Junchao, Bi Jige, et al. Study on single phase fluid flow and heat-transfer performance in a stirred tank with an improved CBY hydrofoil impeller [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2014, 28(3): 489–496.
- [14] 沈洋, 陈冰冰, 陈律名. 连续流搅拌强化管式反应器的换热性能实验与数值模拟[J]. 高校化学工程学报, 2025, 39(4): 599–610.
Shen Yang, Chen Bingbing, Chen Lyuming. Study on the heat transfer performance of tubular reactors under continuous flow steady-state conditions [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2025, 39(4): 599–610.
- [15] 占晓强, 雷鸣, 田凤国. 不同盘管结构下搅拌釜流动传热特性的数值分析[J]. 化学工程与装备, 2025(2): 87–90.
Zhan Xiaoqiang, Lei Ming, Tian Fengguo. Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in stirred tanks with different coil structures [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2025(2): 87–90.
- [16] Perarasu V T, Arivazhagan M, Sivashanmugam P. Heat transfer of TiO_2 /water nanofluid in a coiled agitated vessel with propeller [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(6): 942–950.
- [17] 史亦航, 梁琳, 李文金. 内盘管加热的新型框式组合桨釜内传热性能[J]. 化学工程, 2022, 50(4): 41–45, 57.
Shi Yihang, Liang Lin, Li Wenjin, et al. Heat transfer performance of new frame-type combined impeller in stirred tank with inner-heat coil [J]. Chemical Engineering (China), 2022, 50(4): 41–45, 57.

Heat transfer performance in a stirred tank with double-layer rotary variable-pitch three-bladed impeller

Xu Ziqiang, Xu Jiabao, Lu Xianjun, Zhou Yongjun

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: A combined approach of CFD simulation and heat transfer experiments was employed to investigate the heat transfer performance of a double-layer rotary variable-pitch three-bladed impeller within a stirred tank equipped with a spiral coil heater, using a 0.75% mass fraction CMC solution (a pseudoplastic non-newtonian fluid) as the medium. The findings indicate that the temperature distribution within the reactor follows a descending order: lower section>middle section>upper section, with the overall temperature difference maintained within 3.5 K. The strong axial flow generated by the rotary variable-speed three-bladed impeller effectively mitigates temperature variations at the reactor's top and bottom, keeping the maximum temperature difference below 2.5 K. Increasing the rotational speed enhances the kinetic energy of the flow field and heat transfer

efficiency. When the rotational speed $N=180$ r/min, the small vortices at the bottom of the reactor disappear, and symmetrical circulating vortices form in the flow field, enhancing axial flow and overall mixing; Properly setting the paddle spacing is crucial for maintaining efficient axial circulation within the reactor. When the paddle spacing $C_2=175$ mm, the Nu reaches its peak, resulting in optimal heat transfer performance; The average temperature boundary layer thickness on the XY plane outside the spiral coil was 2.44 mm. The minimum discrepancy between experimental and simulated Nu values for the Nusselt number Nu on the coil's exterior was 2.62%, with a maximum error of 5.78%, validating the numerical simulation's accuracy. These findings provide reference for practical engineering applications of the rotary variable three-bladed impeller.

Key words: twisted three-blade impeller; non-newtonian fluid; heat transfer performance; thermal boundary layer; nusselt number; stirring speed; paddle spacing

芬兰当升签署5.14亿欧元绿色融资协议 欧洲正极项目获得关键推进

近日,当升科技(芬兰)新材料有限公司(以下简称“芬兰当升”)与国际银团在芬兰签署总额5.144亿欧元的绿色项目融资协议,用于支持其位于南部科特卡市的正极材料项目建设。此次融资标志着项目进入加速实施阶段,也彰显了融资方对当升科技在欧洲打造高端正极材料本地化供应体系战略的高度认可与信心。

作为欧洲电池产业链的重要一环,该项目一期规划年产能6万吨正极材料,将采用先进工艺并执行高环保标准,未来产品将供应LG新能源、远景动力、SK On等全球主流电池企业,以满足区域市场对本地化供应的迫切需求。项目建成后,将增强当升科技在欧洲的供应能力与产业链韧性。

本次融资由法国兴业银行任独家财务顾问,并与法国外贸银行联合牵头,挪威DNB银行、中国工商银行、荷兰安智银行及渣打银行等共同参贷,芬兰出口信贷机构Finnvera、中国出口信用保险公司提供支持,体现了金融市场对该项目前景的信心。

芬兰当升CEO官云龙表示,融资落地是欧洲项目实施的关键突破,工厂将为欧洲客户提供高质量正极材料,助力构建稳定可持续的电池产业体系。该项目也为当升科技在欧洲打造先进制造平台奠定基础,推动区域协同发展。

芬兰当升作为当升科技控股子公司,始终以“生产锂电正极材料,满足欧美新能源汽车、储能等市场的材料需求”为定位。该项目建成后,将成为欧洲极具竞争力的电池正极材料绿色产业基地,为全球正极材料产业树立新的标杆。作为全球领先的正极材料生产企业之一,当升科技将通过该项目实现欧洲本地化产能布局,深度融入全球锂电产业链体系,显著提升产品供应和客户服务能力、增强供应链稳定性,为未来持续巩固当升科技市场竞争优势,扩大全球市场占有率提供强力支撑。

(资料来源:中国有色金属报)