

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.002

多层桨搅拌槽内的液相流场研究*

张翠勋

(山东省科学院天力干燥股份有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:针对多层桨搅拌槽的结构配制问题,对多层 Rushton 桨搅拌槽内的液相湍流流场采用计算流体动力学方法进行了数值模拟研究。首先分析了一个高径比为 $H/T=1.4$ 的双层 Rushton 桨搅拌槽内的流型,通过与实验结果的对比,验证了模拟方法的可靠性;随后分析了底层搅拌桨的离底高度、桨间距、桨径比、以及搅拌桨数目对一个高径比为 1.6 的 Rushton 桨椭圆底搅拌槽内流型、湍动能和搅拌功耗的影响。研究结果表明,对于所研究的搅拌槽,采用桨径比 $D/T=0.48$ 、底层桨离底高度 $C_1=0.4T$ 的双层 Rushton 桨配置为最佳选择,相同雷诺数的条件下,具有湍动均匀度高、搅拌功耗低的优势。

关键词:搅拌槽;优化;湍流;流场;计算流体动力学

中图分类号:TH122;TQ027

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0823-05

Research of the liquid-phase flow field in a multi-impeller stirred tank

ZHANG Cui-xun

(Tianli Drying Equipment Incorporated Company, Shandong Province Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

Abstract: Aiming at optimizing the configuration of a multi-impeller stirred tank, the turbulent liquid-phase flow fields in a stirred tank agitated by multiple Rushton impellers were simulated using the computational fluid dynamics (CFD) technique. Firstly, the flow field in a liquid height to tank diameter ratio $H/T=1.4$ stirred tank agitated by dual-Rushton impellers was studied and compared with the experimental result available in the literature. Reasonable agreement between the experimental and numerical results indicates the validity of the CFD model. Subsequently, effects of off-bottom clearance of the lower impeller, adjacent impeller spacing, impeller to tank diameter ratio, and impeller number on the flow field, turbulent kinetic energy and power consumption in an $H/T=1.6$ elliptical-bottom multiple-Rushton impeller stirred tank were comprehensively investigated. The results indicate that, for the stirred tank studied here, dual-impeller with the impeller to tank diameter ratio $D/T=0.48$ and off-bottom clearance of the lower impeller $C_1=0.4T$ is the best configuration. Under the condition of the same Reynolds number, it has the merit of generating a more homogeneous turbulence field and consuming lower power.

Key words: stirred tank; optimization; turbulence; flow field; computational fluid dynamics (CFD)

0 引 言

搅拌槽广泛应用于流体的混合、传热、传质和化学反应等单元操作,其中搅拌桨的安装位置是影响槽内流型的关键因素之一,决定了搅拌操作效率和最终产品性能。当高径比(液位高度 H 与搅拌槽内径 T 的比值)小于 1 时,可以采用单层桨;而 $H/T > 1$ 时,为了保

证混合效果,则需要安装多层桨。事实上,工业用搅拌槽的高径比往往大于 1.5^[1],对于该类搅拌槽,需要多层桨搅拌。单层桨搅拌时,搅拌桨的离底高度是需要考虑的一个重要参数;多层桨搅拌时,还要考虑桨间距的影响。迄今为止,国内外围绕这一主题做了大量工作,其中研究最多的是径流型 Rushton 桨,该桨因具有较强的气体分散性能而广泛应用于搅拌槽内的气-液

收稿日期:2014-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21306105)

作者简介:张翠勋(1984-),女,山东茌平人,工程师,主要从事过程设备设计及流体搅拌混合方面的研究。E-mail:zhangcx1208@163.com.

混合操作^[2-3]。

Nienow^[4]首次研究了单层 Rushton 浆搅拌槽内拌浆的离底高度 C 对流型以及固体颗粒悬浮的影响,发现当 $C \geq T/5$ 时,为典型的双循环流动结构;当 $C \leq T/6$ 时,转变为单循环流动结构。Ibrahim 和 Nienow^[5]的研究同样证实,离底高度降为 $T/6$ 以后,Rushton 浆产生的流型由径向流过渡为轴向流。Montante 和 Galletti 等^[6-9]随后对离底高度和流型之间的关系展开了实验和数值研究,得出了相同的结论,他们还指出,当 $0.15 < C/T < 0.2$ 时,搅拌槽内的流型是随机的,存在流动不稳定性。

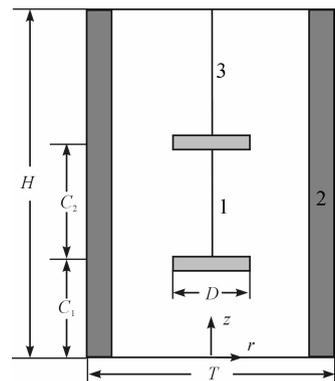
对于双层 Rushton 浆搅拌槽,流型更加复杂,除了底层浆的离底高度以外,还存在浆间距的影响,Rutherford 等^[10]对此展开了系统的研究。他们指出,随着浆间距的不同,高径比 $H/T = 1$ 的双层 Rushton 浆搅拌槽内存在 3 种流型:当底层浆的离底高度 $C_1 = T/4$ 、浆间距 $C_2 = T/2$ 时,为平行流,两层浆独立作用;当 $C_1 = 0.15T$ 、 $C_2 = T/2$ 时,为分散流,此时两层浆仍独立作用,顶层浆产生径流型流动结构,而底层浆则形成轴流型流动结构;而当 $C_1 = C_2 = T/3$ 时,为合并流,两层浆相互作用,有利于流体的混合,而且搅拌功耗在 3 种流型中最低。北京化工大学高正明指导的潘春妹和刘心洪^[11-12]的 PIV 实验研究也观测到了同样的流型。Shao 等^[13]研究了高径比 $H/T = 2$ 、底层浆离底高度 $C_1 = T/3$ 、搅拌浆直径 $D = T/3$ 的双层 Rushton 浆搅拌槽内的流型,结果发现,要保证均匀的混合效果和足够的湍动强度,浆间距最好在 $T/2 \sim 2T/3$ 范围内。Markopoulos 等^[14-15]对 $H = 1.4T$ 、 $D = 0.52T$ 、 $C_1 = 0.26T$ 的双层 Rushton 浆搅拌槽内的流型进行的研究发现,双层浆独立作用的临界浆间距为 $C_2 = 0.86T$,并且该临界值与介质的粘度有关,当由水改为甘油(25℃,体积分数:80%)时,临界浆间距降为 $C_2 = 0.62T$,这表明多层浆搅拌时两个搅拌浆独立作用的临界浆间距同时受介质特性和浆径比的影响。

对于多层浆搅拌系统,现有研究均未分析浆间距对搅拌槽顶部区域内流型的影响。现有研究表明,即便是处于湍流状态下的轴流型搅拌浆,搅拌槽顶部约 $1/3$ 区域内的流体仍处于过渡流或层流状态^[16-17],混合不充分。对于径流型 Rushton 浆,尤其是当高径比 $H/T \approx 2$ 时,使用两层浆很难保证搅拌槽顶部区域内的混合效果。

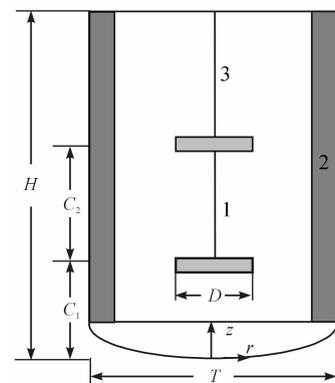
鉴于此,本研究的研究目的在于,对于高径比接近 2 的搅拌槽,综合分析底层浆的离底高度、浆间距和浆径比以及搅拌浆数目对搅拌槽内流型的影响,预期研究结果可为优化 Rushton 浆搅拌槽的结构配置提供参考。

1 搅拌槽结构

笔者对如图 1 所示的两个搅拌槽进行研究。槽内均匀布置 4 块标准挡板,介质均为水,密度 $\rho = 1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,粘度 $\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,搅拌浆均为标准 Rushton 浆。直径 $T = 0.476 \text{ m}$ 的平底圆柱形搅拌槽如图 1(a)所示,挡板宽度 $B = T/10$,液位高度 $H = 1.4T$,搅拌浆直径 $D = 0.4T$,底层浆离底高度 $C_1 = D$,浆间距 $C_2 = 0.48T$,搅拌浆转速 $N = 1.1 \text{ s}^{-1}$,对应雷诺数 $Re = 4 \times 10^4$ 。该结构与文献[12]一致,目的在于验证本研究所建模拟方法的可靠性。某企业做细菌培养用的搅拌槽如图 1(b)所示,直径 $T = 0.211 \text{ m}$,底部为椭圆形,高度 51 mm ,挡板宽度 $B = T/10$,液位高度 $H = 1.6T$,搅拌浆直径 D 取 $T/3$ 、 $0.4T$ 和 $0.48T$ 这 3 个值,底层浆离底高度和浆间距随搅拌浆直径的不同而有所变化,以便根据流场结构及搅拌功耗做出最佳配置。搅拌功耗采用 AKC-215 型扭矩传感器进行测量,其结果可通过 TS-5F 智能数字显示仪来读取,为提高测量精度,每种工况均进行 5 次测量,并取平均值作为最终的功率消耗测量值。实验过程中搅拌浆转速可调,雷诺数保持 $Re = 4 \times 10^4$ 不变。本研究暂不考虑介质粘度以及通气的影响,有关工作将在后续研究中展开。



(a) 平底搅拌槽



(b) 椭圆形底搅拌槽

图 1 搅拌槽结构示意图

1—搅拌浆;2—挡板;3—搅拌轴

2 数值模拟

模拟工作使用软件 FLUENT® 13.0 在 Dell T7500 工作站上进行,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型研究搅拌槽内的流场。本研究采用多重参考系法模拟搅拌桨与挡板间的相对运动,整个求解域分为两部分,即包含搅拌桨的转子和包含槽内其他静止区域的静子,利用 Gambit 软件进行网格划分。对平底搅拌槽,本研究分别采用四面体和六面体单元对转子和静子划分网格,划分了约 1 860 000 个单元;对碟形底搅拌槽,转子和静子均采用四面体单元进行划分,不同结构参数时的网格单元数也不同,对于初始结构,划分了约 1 430 000 个单元。本研究划分网格时,为了保证模拟精度,特对转子的网格进行了加密,利用 Gambit 软件的大小函数 (Size Function) 功能实现转子与静子之间网格密度的渐变过渡。经验证,所划分的网格均满足解的独立性要求。模型的控制方程采用二阶迎风格式进行离散,压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法求解,所有变量的收敛残差均设为 1×10^{-4} ,欠松弛因子采用默认值。

假设初始时搅拌槽内的水处于静止状态,赋予搅拌桨以相应的旋转速度 N ,并以搅拌桨所在区域对整个计算域进行初始化。边界条件设置如下:

(1) 搅拌桨外表面、搅拌槽壁面均定义为无滑移壁面边界条件,近壁区采用标准壁面函数,其中搅拌桨做旋转运动,搅拌槽的壁面保持静止;

(2) 搅拌轴定义为运动壁面边界条件,转速与搅拌桨相同;

(3) 转子与搅拌桨一起旋转,静子保持绝对静止,两个区域的交界面定义为界面边界条件;

(4) 搅拌槽顶部液面定义为对称边界条件,即所有变量的法向梯度均为零,只有在面内的分量。

3 结果与讨论

3.1 模拟方法验证

对于如图 1(a) 所示的搅拌槽,刘心洪进行了 PIV 实验测试研究,观测到了平行流流型,本研究以对该结构配置时搅拌槽内流型的数值研究为对比依据,来验证模拟方法的可靠性,在此基础上,再研究如图 1(b) 所示的椭圆底搅拌槽内的流型。需要指出的是,本研究只关心不同桨间距、桨径比和搅拌桨数目时搅拌槽内的流型及流体的湍动程度,不进行定量分析。标准 $k-\varepsilon$ 模型对时均流型的模拟精度可以接受,尽管对湍动能的预测值偏低,但不同结构参数时的模拟结果之

间仍具有可比性^[18],是解决工程问题时最为常用的湍流模型。采用标准 $k-\varepsilon$ 模型得到的流型图如图 2 所示,每个 Rushton 桨的上下方各自产生两个涡,两个搅拌桨独立作用,均形成双循环流动结构,与文献[12]的实验结果一致,说明该模拟方法是可靠的。

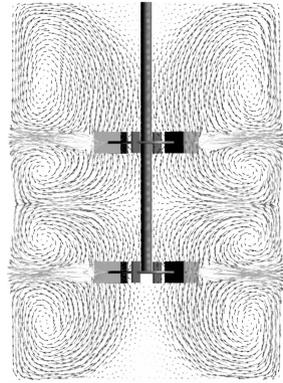


图 2 平底搅拌槽两挡板中间平面内的流场矢量图

3.2 流型优化研究

本节研究目的在于,以保证搅拌槽内的流体具有足够的湍动程度为前提,同时考虑搅拌功耗,通过调整底层浆离底高度、桨间距、桨径比和搅拌桨数目,达到最佳结构配置。

3.2.1 优化前的流型

对于如图 1(b) 所示的某企业细菌培养用椭圆底搅拌槽,原始配置时的搅拌桨直径 $D = 0.4T$,底层浆离底高度 $C_1 = T/3$,桨间距 $C_2 = 0.8T$ 。该配置时的流型及湍动能分布情况如图 3 所示。可以看出,搅拌槽内两层浆独立作用,顶层浆形成典型的双循环流动结构,底层浆的排出流直接射流搅拌槽底部,形成单循环流动结构。该结果表明,此时的桨间距过大,而且底层浆离底高度过低,当用于气液混合时,将不利于气体分散。就湍动能分布而言,整个搅拌槽内的均匀程度低,最大湍动能出现在搅拌桨及临近区域,其他区域内湍动程度明显小很多。

此外,为了表征搅拌效率,此处对搅拌功耗进行了计算,其结果用功率准数 N_p 来表示,即:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (1)$$

式中: P —搅拌功耗。

P 可由搅拌转速和作用在搅拌轴及搅拌桨的扭矩 M 来计算:

$$P = 2\pi N \cdot M \quad (2)$$

根据实验测得的扭矩值,算出该结构配置时的功率准数为 10.1。

3.2.2 优化后的流型

基于原始结构配置时的模拟结果,本研究对搅拌

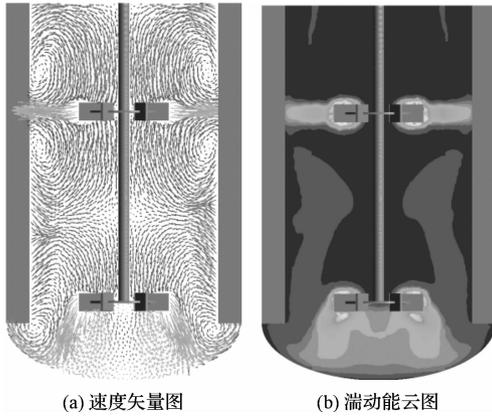


图 3 原始配置时的速度矢量图和湍动能云图

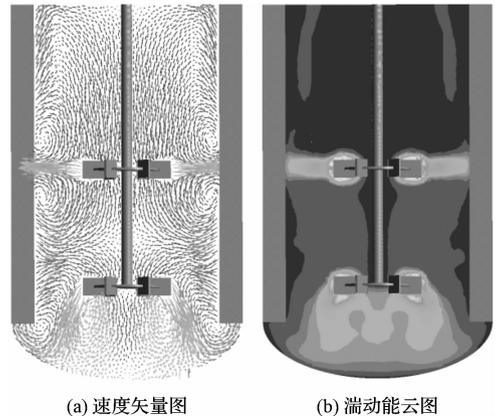


图 4 优化配置 I 时的速度矢量图和湍动能云图

桨的直径和安装位置以及搅拌桨数目进行了优化调整,对以下几种组合时的搅拌流场与湍动能以及搅拌功耗进行了模拟研究:①两层桨, $C_1 = D = 0.4T, C_2 = T/2$;②两层桨, $C_1 = 0.4T, D = 0.48T, C_2 = 0.6T$;③三层桨, $C_1 = C_2 = 0.4T, D = T/3$ 。

3 种优化结构配置时搅拌槽内的速度和湍动能情况如图(4~6)所示。

不同配置时的功率准数如表 1 所示。

表 1 不同结构配置时的功率准数

工况	功率数	与原始配置时的偏差/%
原始方案	10.1	0
优化配置 I	9.4	-6.9
优化配置 II	9.1	-10
优化配置 III	14.3	41.6

由图 4 可知,配置 I 时顶层桨形成双循环流动结构,底层桨排出的流体直接射向搅拌槽底部,形成单循环流动结构,这一点与平底搅拌槽不同,由图 2 可知,对于平底搅拌槽而言,当搅拌桨直径和底层桨离底高度均为 $0.4T$ 时,底层桨形成的是双循环流动结构,说明搅拌槽底部的形状对相同直径和安装高度时的同一搅拌桨产生的流型有明显影响。此外,配置 I 时搅拌槽内的湍动能分布仍不均匀,只是搅拌槽底部和搅拌桨中间区域内的湍动能分布均匀程度较原始结构配置略有改善,搅拌槽顶部区域内流体的湍动程度仍然很低,而且功率准数仅比原始配置时低约 6.9%,没有明显的优势。

当底层桨离底高度保持 $0.4T$ 不变,搅拌桨直径增大为 $0.48T$ (配置 II) 时,上、下两层桨均形成双循环流动结构,搅拌槽内形成的是平行流流型,而且整个搅拌槽内湍动能分布的均匀程度大幅度提高(如图 5 所示),功率准数约为原始配置时的 90%,在所有配置中为最低。以搅拌桨直径为基准,此时的结构配置情况为:底层桨离底高度为 $0.83D$,桨间距和顶层桨距离液

面的高度均为 $1.25D$ 。

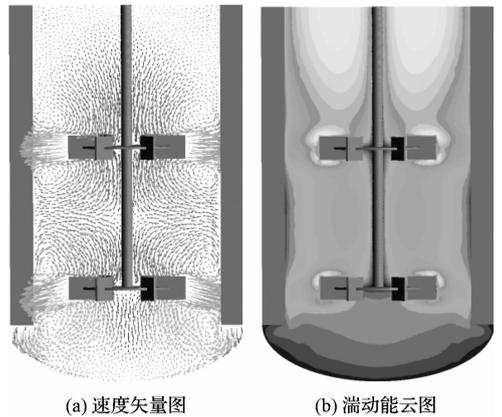


图 5 优化配置 II 时的速度矢量图和湍动能云图

配置 III 采用了三层桨,结果如图 6 所示。可以看出,该配置时上面两层桨形成典型的双循环流动结构,底层桨为单循环流动结构;对比可知,此时的湍动能分布均匀程度与原始配置时相当,只是搅拌槽顶部区域内的湍动程度有提高,但功率准数也比原始配置时增大了约 41.6%。该研究结果表明,采用减小搅拌桨直径、增加搅拌桨数目的方法无益于改善搅拌性能,增加搅拌桨直径的方法更有效。

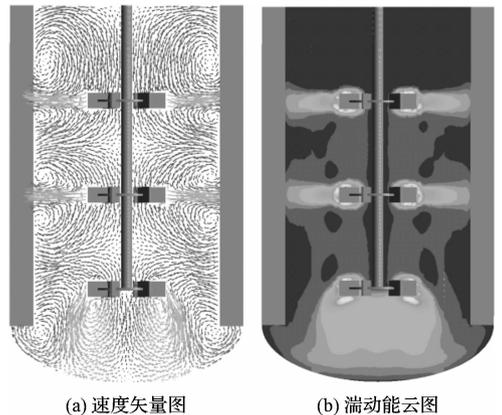


图 6 优化配置 III 时的速度矢量图和湍动能云图

4 结束语

以保持雷诺数不变为准则,笔者研究了不同结构配置时一高径比 $H/T = 1.6$ 的多层 Rushton 浆搅拌槽器内的流型、湍动能与搅拌功耗,得到以下结论:

(1) 搅拌槽底部的形状对相同配置时的搅拌浆产生的流型有重要影响,现有的关于平底搅拌槽内浆间距和离底高度对搅拌槽内流型的影响规律不再适用于椭圆底搅拌槽。

(2) 对于笔者研究的搅拌槽,采用两层浆比三层浆具有明显的优越性,建议结构配置为:搅拌浆直径约为 $0.48T$,最好在 $0.4T \sim 0.5T$ 范围内;底层浆离底高度约为 $0.83D$,浆间距约为 $1.25D$,顶层浆距离液面的高度约为 $1.25D$ 。

(3) 与原始结构配置相比,建议最佳结构配置时搅拌槽内不仅流体的湍动均匀度高,而且搅拌功耗低,具有明显的优势。

参考文献 (References):

- [1] 郝志刚,包雨云,高正明. 多层组合浆搅拌槽内气-液分散特性的研究[J]. 高校化学工程学报,2004,18(5):547-552.
- [2] TATTERSON G B. Fluid mixing and gas dispersion in agitated tanks[M]. New York: McGraw-Hill,1991.
- [3] NIENOW A W. Hydrodynamics of stirred bioreactors[J]. *Applied Mechanics Reviews*,1998,51(1):3-32.
- [4] NIENOW A W. Suspension of solid particles in turbine agitated baffled vessels[J]. *Chemical Engineering Science*, 1968,23(12):1453-1459.
- [5] IBRAHIM S, NIENOW A W. Power curves and flow patterns for a range of impellers in Newtonian fluid; $40 < Re < 5 \times 10^5$ [J]. *Chemical Engineering Research and design*, 1995,73(5):485-491.
- [6] MONTANTE G, LEE K C, BRUCATO A, et al. An experimental study of double-to-single-loop transition in stirred vessels[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1999,77(4):649-659.
- [7] MONTANTE G, LEE K C, BRUCATO A, et al. Experiments and predictions of the transition of the flow pattern with impeller clearance in stirred tanks [J]. *Computers and Chemical Engineering*,2001,25(4-6):729-735.

- [8] MONTANTE G, LEE K C, BRUCATO A, et al. Numerical simulations of the dependency of flow pattern on impeller clearance in stirred vessels[J]. *Chemical Engineering Science*,2001,56(12):3751-3770.
- [9] GALLETTI C, BRUNAZZI E, YIANNESKIS M, et al. Spectral and wavelet analysis of the flow pattern transition with impeller clearance variations in a stirred vessel [J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58 (17): 3859-3875.
- [10] RUTHERFORD K, LEE K C, MAHMOUDI S M S, et al. Hydrodynamic characteristics of dual Rushton impeller stirred vessels [J]. *AIChE Journal*, 1996, 42 (2): 332-346.
- [11] 潘春妹. 双层浆搅拌槽内流动场的 PIV 研究[D]. 北京:北京化工大学化学工程学院,2008.
- [12] 刘心洪. 搅拌槽内湍流特性的实验研究[D]. 北京:北京化工大学化学工程学院,2010.
- [13] SHAO X M, LIU X L, LI Y L. Experimental study of influence of the impeller spacing on flow behaviour of double-impeller stirred tank [J]. *Canadian Journal Chemical Engineering*,2003,81(6):1239-1245.
- [14] MARKOPOULOS J, BABALONA E, TSILIOPOULOU E. Power consumption in agitated vessels with dual Rushton turbines baffle length and impeller spacing effects [J]. *Chemical Engineering Technology*,2004,27(11):1212-1215.
- [15] BABALONA E, BAHOUA D, TAGIA S, et al. Power consumption in dual impeller gas-liquid contactors: impeller spacing, gas flow rate and viscosity effects[J]. *Chemical Engineering Technology*,2005,28(7):802-807.
- [16] BITTORF K J, KRESTA S M. Active volume of mean circulation for stirred tanks agitated with axial impellers[J]. *Chemical Engineering Science*,2000,55(7):1325-1335.
- [17] MACHADO M B, BITTORF K J, ROUSSINOVA V T, et al. Transition from turbulent to transitional flow in the top half of a stirred tank[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013(98):218-230.
- [18] JENNE M, REUSS M. A critical assessment on the use of $k-\varepsilon$ turbulence models for simulation of the turbulent liquid flow induced by a Rushton-turbine in baffled stirred-tank reactors [J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54 (17):3921-3941.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

张翠勋. 多层浆搅拌槽内的液相流场研究[J]. 机电工程,2014,31(7):823-827.

ZHANG Cui-xun. Research of the liquid-phase flow field in a multi-impeller stirred tank[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(7):823-827.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>