

文章编号:2095-7386(2022)01-0096-06

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2022.01.016

卧式砂辊碾米机中碾白室内流场的仿真分析

李 瑜¹, 杨 柳¹, 范雨超¹, 李诗龙^{1,2}, 宋少云^{1,2}

(1. 武汉轻工大学 机械工程学院, 湖北 武汉 430023; 2. 湖北省粮油机械工程技术研究中心, 湖北 武汉 430023)

摘 要:为了研究卧式砂辊碾米机中砂辊转速、砂辊与米筛之间的距离以及砂辊表面螺旋槽 β 角对碾白室内流场速度和压力的影响。以NS·18型卧式砂辊碾米机为原型,采用Fluent软件对碾白室内的流场进行仿真模拟。结果表明,砂辊转速增加,会使流场内轴向推进和翻滚作用增强;砂辊与米筛之间的距离为10 mm时,便于米刀调节碾白室内的碾白压力;砂辊表面螺旋槽 β 角的增加,流场内的轴向推进作用减弱,但翻滚作用增强;与其他因素相比转速对碾白室内流场的影响更为显著。

关键词:碾米机;碾白室;砂辊;流场;Fluent

中图分类号:TS 212.3

文献标识码:A

Simulation analysis of flow field in whitening chamber of horizontal sand roller rice mill

LI Yu¹, YANG Liu¹, FAN Yu-chao¹, LI Shi-long^{1,2}, SONG Shao-yun^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China;

2. Hubei Grain and Oil Machinery Engineering Technology Research Center, Wuhan 430023, China)

Abstract: In order to study the effect of rotating speed of sand roller, distance between sand roller and rice sieve and spiral groove β Angle of sand roller surface on flow field velocity and pressure in horizontal sand roller rice milling machine. Based on NS·18 horizontal sand roller rice milling machine, Fluent software was used to simulate the flow field in whitening chamber. The results show that the axial propulsion and rolling effect will be enhanced with the increase of the rotating speed of sand roller. When the distance between the sand roller and the rice sieve is 10mm, it is convenient to adjust the whitening pressure whitening chamber with the rice knife. With the increase of spiral groove β Angle of sand roller surface, the axial propelling effect weakens, but the rolling effect strengthens. Compared with other factors, the effect of rotating speed on the flow field in whitening chamber is more significant.

Key words: rice mill; whitening chamber; sand roller; flow field; Fluent

收稿日期:2022-01-15.

作者简介:李瑜(1997-),男,硕士研究生,2013829724@qq.com.

通讯作者:杨柳(1989-),男,博士,硕士生导师,yangliuivicty@163.com.

基金项目:湖北省教育厅科研项目(Q20211609),武汉轻工大学博士启动科研(2019RZ08),武汉轻工大学校杰出青年科研项目(2020J06),江苏省食品先进制造重点实验室开放基金(FM-202103).

1 引言

碾米机是一种利用碾辊高速旋转对糙米进行去皮碾白的机械设备,主要工作部件有碾辊、螺旋推进器和米筛等,碾辊的结构以及转速是影响碾米工艺效果的重要因素^[1]。

随着计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术的发展,已成为流体机械进行流场分析的重要手段^[2-4]。Fluent 作为最常用 CFD 的软件之一,广泛应用于化工机械、生物技术、航空航天、汽车制造、造船技术、水利水电、核工业、矿物加工和环境保护等领域^[5-12]。王立宗等^[13]利用 Fluent 软件对其设计的一种上吸风式环形风道碾米机的流场进行分析,并通过样机试验证明了仿真结果;张双等^[14]基于 Fluent 中的滑移网格技术对 MNML30 型立式砂辊碾米机气流场进行了数值模拟,研究了碾辊转速对碾白室内流场的影响;李祖吉等^[15]通过 EDEM-Fluent 耦合对卧式碾米机进行气固两相流耦合仿真求解,获得了内部颗粒的运动状态以及碾米机内流场分布;李碧等^[16]通过 EDEM-Fluent 耦合对卧式铁辊喷风碾米机的碾白过程进行仿真,研究喷风速度对碾白压力的影响,得到最佳喷风速度;米国强等^[17]基于 Fluent 对双螺杆榨油机的压榨段流场进行了仿真分析,研究了压榨过程中压力场、浓度场和速度场的分布。Fluent 软件强大的计算、仿真以及后处理等功能为研究不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动提供了可能^[18]。

目前,利用 CFD 技术对碾米机中碾白室内的流场进行仿真研究的相关文献较少。本文从仿真试验角度出发,以 NS·18 型卧式砂辊碾米机为原型,利用 Fluent 软件对碾白室内流场进行仿真分析,考察砂辊的转速、砂辊与米筛之间的距离以及螺旋槽表面 β 角对碾白室内流场中速度和压力的影响。

2 模型的建立

2.1 控制方程

Fluent 软件包含了多种湍流仿真模型,气体流

动属于湍流,故采用标准 k- ε 湍流模型方程进行分析。描述方程如下:

湍动能方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (1)$$

耗散率方程为

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中: k 为湍动能; ε 为湍流耗散率; u_i 和 u_j 表示流场的速度; x_i 和 x_j 表示坐标系统的分量; ρ 表示空气的密度; μ 表示空气动力粘度; μ_i 表示湍流粘性参数, $\mu_i = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$; C_μ 表示湍流常数; G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能; G_b 表示由于浮力引起的湍动能; Y_M 表示可压湍流中脉动膨胀对总耗散率的影响; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; σ_k 表示与湍动能 k 对应的普朗特数; σ_ε 表示与耗散率对应的普朗特数。

2.2 砂辊模型的创建

仿真模型以 NS·18 型卧式砂辊碾米机为原型,以砂辊为主要研究对象,建立碾白室的简化模型如图 1-(a)。NS·18 型碾米机中与砂辊相关的技术参数如表 1 所示。

表 1 NS·18 型碾米机与砂辊相关技术参数

名称	参数值
砂辊长度 L/mm	560
砂辊直径 D/mm	180
螺旋槽的斜度 $\alpha/^\circ$	62
螺旋槽的前向面与碾辊半径之间的夹角 $\beta/^\circ$	45
螺旋槽深度 d/mm	14~0
转速 $n/(\text{rev} \cdot \text{min}^{-1})$	1 200
砂辊与米筛之间的距离 X_0/mm	10

砂辊具体尺寸如图 1-(b),砂辊前 40 mm 有一定的锥度,起始端的直径为 170 mm。砂辊表面的螺旋槽为三头左旋螺旋槽,螺旋槽由深至浅,由宽至窄。其他结构及尺寸文献^[19]中有详细介绍。

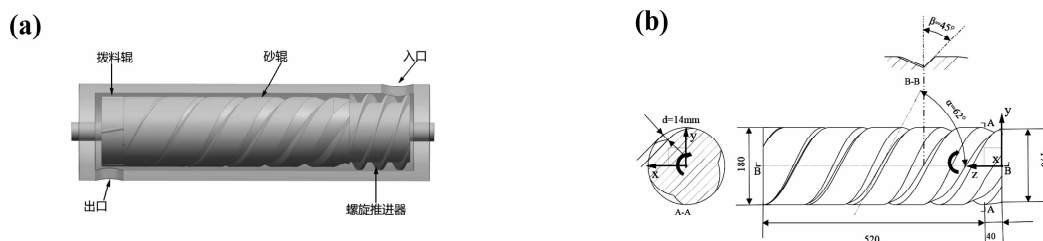


图 1 三维建模与砂辊参数

2.3 创建流体域并划分网格

将建好的砂辊模型导入到 Workbench 中,创建流体域。流体域创建完成之后,进行网格划分,划分后对网格质量进行检查,流体域网格划分如图 2 所示^[18]。

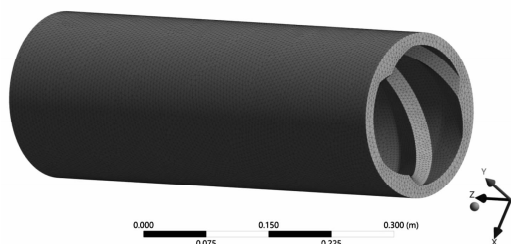


图2 流体域网格划分

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数设置

在 Fluent 仿真中采用基于压力法的求解器 (Pressure - Based), 在时间类型上设置为稳态, 速度

方程设置为绝对速度; 湍流模型选取标准 $k-\varepsilon$ 模型; 入口速度设置为 0.2 m/s , 经过前期仿真试验发现出口压力的大小对碾白室内流场的速度与压力差的影响甚微, 因此设置出口压力为 200 Pa ; 内壁面为旋转壁面。

3.2 砂辊转速对流场的影响

将旋转壁面的转速分别设置为 $1\ 080 \text{ r/min}$ 、 $1\ 200 \text{ r/min}$ 、 $1\ 320 \text{ r/min}$ 、 $1\ 440 \text{ r/min}$ 、 $1\ 560 \text{ r/min}$ 进行仿真, 待仿真收敛后, 探究砂辊转速对碾白室内流场速度及压力的影响。

3.2.1 流场轴向变化

为观察流场轴向变化, 仿真收敛后选取 $x = 0 \text{ mm}$ 截面, 得到该平面不同转速下的流场速度云图 (图 3-(a)) 和流场压力云图 (图 3-(b)); 取点 $P1(0, 95, 0)$ 为起点, 点 $P2(0, 95, 560)$ 为终点, 连接点 $P1$ 和点 $P2$ 定义为直线 1, 得到流场沿直线 1 上的速度变化曲线 (图 3-(c)) 与压力变化曲线 (图 3-(d))。

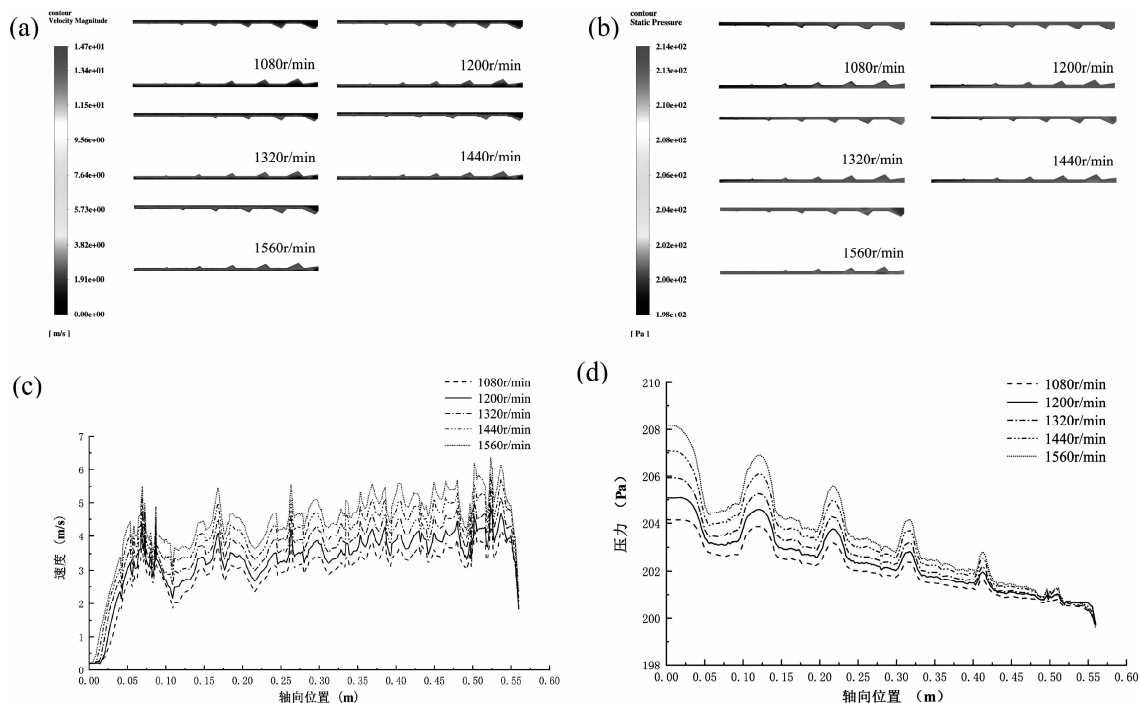


图3 转速-轴向速度、压力变化

通过图 3-(a) 与图 3-(b) 的云图可以看出, 流场的出口速度大于入口速度, 出口压力小于入口压力, 并且流场的速度与压力都会随着砂辊转速的增加而增加。图 3-(c) 与图 3-(d) 中曲线出现波动且从入口到出口其波动幅度逐渐减小, 这是由于从入口到出口, 砂辊表面的螺旋槽由宽至窄, 由深至浅造成的。由图 3-(c) 与图 3-(d) 的曲线变化趋势可以看

出, 随着砂辊转速的增加, 流场中沿轴向方向的速度逐渐增加, 压力的变化范围增加且波动幅度增大, 表明碾白室内流场随着转速的增加, 轴向推进和翻滚作用增强^[1]。

3.2.2 流场径向变化

为观察流场径向变化, 仿真收敛后选取 $z = 280 \text{ mm}$ 截面, 得到该平面不同转速下的流场速度云

图(图 4-(a))和流场压力云图(图 4-(b));取点 P3 (0, -90, 280) 为起点,点 P4(0, -120, 280) 为终点,连接点 P3 和 P4 定义为直线 2,得到流场沿直线 2

上的速度分布及其拟合曲线(图 4-(c))与压力分布及其拟合曲线(图 4-(d))。

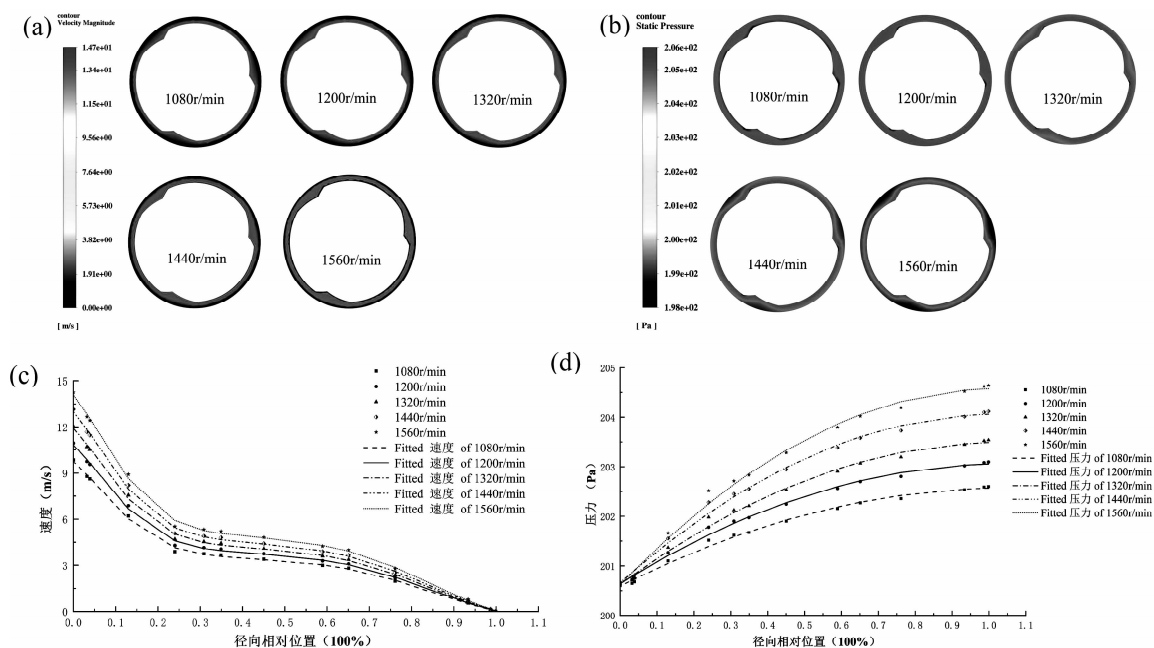


图 4 转速-径向速度、压力分布

通过观察图 4-(a)和图 4-(b)的云图可以看出,流场沿径向,速度逐渐减小,压力逐渐增大;由图 4-(c)和图 4-(d)中的曲线可以看出,随着转速的增加,流场边界速度和砂辊表面压力没有发生改变,但砂辊表面的速度和流场边界的压力皆随转速的增加而增加,表明随着转速的增加碾白室内流场沿径向方向的速度衰减趋势和压力增加趋势加快。

3.3 砂辊与米筛之间的距离对流场的影响

为研究砂辊与米筛之间的距离 X 对碾白室内流场的影响,以改变壁面与砂辊的距离来创建不同 X 的流体域,此仿真试验的 X 的值依次为 $X_{-3} = 4 \text{ mm}$ 、 $X_{-2} = 7 \text{ mm}$ 、 $X_{-1} = 9 \text{ mm}$ 、 $X_0 = 10 \text{ mm}$ 、 $X_1 = 11 \text{ mm}$ 、 $X_2 = 13 \text{ mm}$ 、 $X_3 = 16 \text{ mm}$ 。转速设置为 1200 r/min ,待仿真收敛后,观察砂辊与米筛之间

的距离对流场内压力和速度的影响。

图 5-(a)为流场总压差随不同距离的拟合变化曲线,图中的曲线显示,随着距离的增加流场内总压差呈递减趋势;当 X 的值趋于 10 mm 时,流场内压差在 13.5 Pa 上下波动,且波动幅度较小;表明当 $X = 10 \text{ mm}$ 时,调节米刀对流场整体压力的影响很小,方便米刀调节碾白室内的碾白压力。得到流场沿直线 2 上的速度分布及其拟合曲线(图 5-(b)),压力分布及其拟合曲线(图 5-(c))。通过观察图 5-(b)与图 5-(c)中的拟合曲线可以看出,改变砂辊与米筛之间的距离,砂辊表面的速度与流场边界的速度没有显著变化,而速度沿径向的衰减趋势发生了变化;砂辊表面与流场边界的压力皆随着距离的增加而减小,但其压力沿径向的变化趋势没有显著变化。

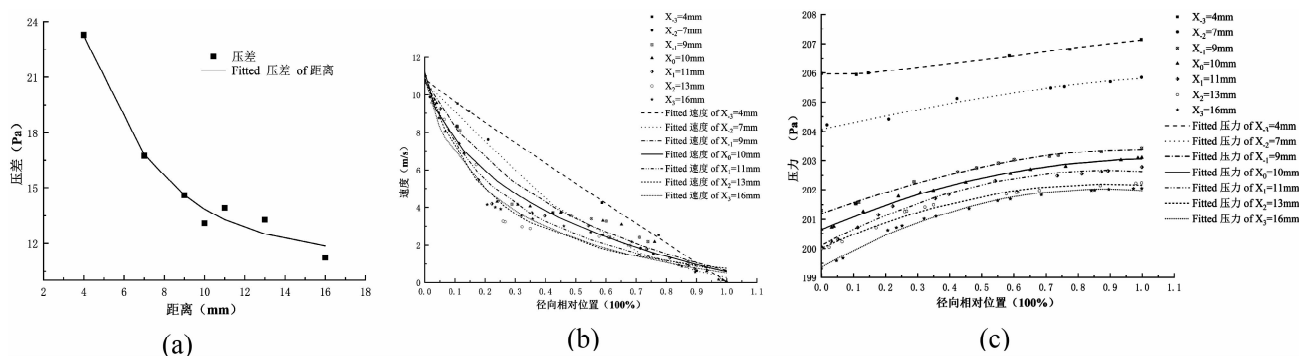


图 5 距离-流场速度、压力分布

3.4 β 角对流场的影响

相关研究中砂辊表面螺旋槽上 β 角一般取 $(0 \sim 70^\circ)^{[1]}$, 建立不同 β 角的砂辊模型并创建其流体域, 流体域网格划分完成之后, 导入 Fluent 中进行仿真模拟来研究不同 β 角对流场的影响, β 角分别取 60° 、 45° 、 30° 、 15° 和 0° 。

待仿真收敛后, 得到流场在直线 1 上的速度变化曲线(图 6-(a)) 和压力变化曲线(图 6-(b))。图 6-(a) 中曲线在 $0.075 \text{ m} \sim 0.15 \text{ m}$ 与 $0.2 \text{ m} \sim$

0.25 m 段, 随着 β 角的增大, 速度衰减明显增加, 表明 β 角越大流场沿轴向的速度在螺旋槽附近衰减越多, 即流场沿轴向的速度变化波动越大, 这表明在实际碾米时随着 β 角的增大, 轴向推进速度减小, 但是米粒的翻滚作用增强。图 6-(b) 曲线中在 $0.075 \text{ m} \sim 0.15 \text{ m}$ 、 $0.2 \text{ m} \sim 0.25 \text{ m}$ 、 $0.3 \text{ m} \sim 0.325 \text{ m}$ 和 $0.4 \text{ m} \sim 0.425 \text{ m}$ 段, β 角越大, 压力增加幅度越大, 表明随着 β 角的增大, 米粒的翻滚作用加强^[1]。

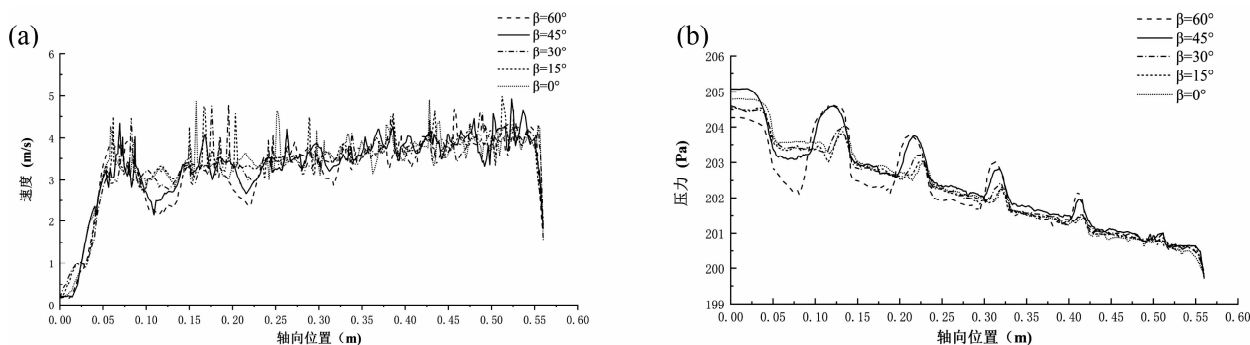


图 6 β 角 - 流场速度、压力分布

4 结论

观察流场内速度和压力沿轴向的变化趋势发现, 随着砂辊表面凹槽变浅变窄, 凹槽处流场速度衰减幅度减小, 压力增加幅度减小, 表明流场由入口到出口, 推进能力逐渐加强, 翻滚作用逐渐降低。随着转速的增加, 流场内速度和压力增加, 流场内轴向推进和翻滚作用增强; 砂辊与米筛之间的距离为 10 mm 左右时, 流场内整体压力变化较小, 流场整体压差趋于 13.5 Pa , 便于用米刀调节碾白室内的碾白压力; 随着砂辊表面螺旋槽 β 角的增加, 流场内的轴向推进能力减弱, 翻滚作用增强; 以上影响因素中转速对碾白室内流场的影响更为显著。

参考文献:

- [1] 朱永义. 谷物加工工艺与设备[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] M. M. Haddadi, S. H. Hosseini, D. Rashtchian, et al. CFD modeling of immiscible liquids turbulent dispersion in Kenics static mixers: Focusing on droplet behavior[J]. 中国化学工程学报(英文版), 2020(2): 348-361.
- [3] 席本强, 赵小宝. 基于 CFD 的旋管泵内部流场研究[J]. 机械设计, 2021, 38(5): 26-32.
- [4] 樊小波. 基于 Fluent 对绞吸泵的流场仿真与分析[J]. 集成电路应用, 2021, 38(5): 102-103.

- [5] Kusmayadi A, Suyono E A, Nagarajan D, et al. Application of computational fluid dynamics (CFD) on the raceway design for the cultivation of microalgae: a review[J]. Journal of industrial microbiology & biotechnology, 2020, 47(14): 373-382.
- [6] 张敏捷, 杨雷, 左光, 等. 航天器通气孔放气过程计算研究[J]. 载人航天, 2018, 24(6): 759-764.
- [7] 李正洲, 高昌, 肖天航, 等. 超高超声速飞行器动态稳定性导数极快速预测方法[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 83-92.
- [8] 曹占龙, 曾振宇, 何理, 等. 基于 CFD 的汽车水泵性能优化设计[J]. 机械设计与制造, 2020, (8): 228-231.
- [9] 杨卫国. 基于 CFD 技术的船舶机舱大空间气流组织分布预测方法[J]. 造船技术, 2018, (6): 24-28.
- [10] 刘琪, 常晓敏, 窦银科. 基于 FLUENT 的管道小型发电系统水轮机的研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 81-87.
- [11] 董龙翔, 余晔, 左洪超, 等. WRF-Fluent 耦合模式的构建及其对城市大气扩散的精细化模拟[J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2311-2319.
- [12] 宋涛, M. P. SCHWARZ, 周俊武, 等. 计算流体力学在矿物加工行业创新中的价值[J]. 矿冶,

- 2019,28(4):111-117.
- [13] 王立宗,范吉军,余南辉,等. 上吸风环形风道碾米机设计与试验[J]. 包装与食品机械, 2021,39(4):63-68.
- [14] 张双,阮竞兰,吴杰俊. 基于滑移网格技术的碾米机气流场数值模拟分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2017,38(6):91-97.
- [15] 李祖吉,宋少云,李志方,等. 碾米过程中的气固两相流耦合仿真初探[J]. 粮食与饲料工业, 2015,(11):1-4.
- [16] 李碧,宋少云,裴后昌,等. 卧式铁辊喷风碾米机的气固耦合仿真[J]. 武汉轻工大学学报, 2019,(5):63-68.
- [17] 米国强,黄志刚,胡淑珍,等. 基于 Fluent 的螺旋榨油机压榨段流场仿真[J]. 食品与机械, 2021,37(3):85-88.
- [18] 丁欣硕,刘斌. FLUENT17.0 流体仿真从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2018.
- [19] 费叔明. NS·18 型砂辊碾米机[J]. 粮食工业, 1981,(01):4-14.

(上接第 47 页)

- [7] 李孟婷,郑星群,李莉,等. 碱性介质中氢氧化和析氢反应机理研究现状[J]. 物理化学学报,2021,37(9),2007054.
- [8] Fan L, Wu K, Tongsh C, et al. Mechanism of Water Content on the Electrochemical Surface Area of the Catalyst Layer in the Proton Exchange Membrane Fuel Cell [J]. Journal of Physical Chemistry Letters,2019,10(20):6409-6413.

(上接第 89 页)

- [11] 王溥,陈宁睿. 公共卫生危机下的城市形象修复路径研究:兼论嵌套式形象修复理论的建构[J]. 学习与实践,2020,37(12):95.
- [12] 李小军. 突发舆情与城市形象研究:以“7·24 合肥高架匝道坍塌事件”为例[J]. 新闻世界,2012,24(04):161.
- [13] 张雪峰. 当前日本经济发展趋势及中日经贸关系展望[J]. 现代日本经济,2012,31(05):27.
- [14] 蔡尚伟,李燕. 汶川地震后四川及成都形象的重建策略[J]. 今传媒,2008,17(08):20.
- [15] 刘运来. 微博时代政府在危机公关中公信力建设研究:以三亚“天价海鲜事件”为例[J]. 今传媒,2012,20(05):17-18.
- [16] 王明东. 丽江地震灾害发生后文化恢复重建探析[J]. 云南民族大学学报:哲学社会科学版,2009,26(04):10.
- [17] 张婷婷. 游客断流,旅业停摆,疫后城市如何拯救自己的文旅品牌形象[EB/OL]. (2020-03-18). <https://travel.ifeng.com/c/7uw2k8wKdWa>.
- [18] 李悦昌,李悦铮. 新时代我国大众旅游:科学内涵、核心价值、主要矛盾和发展模式[J]. 理论观察,2020,36(08):14.
- [19] 张婷婷. 城市形象修复的舆论传播策略与机制建设[J]. 对外传播,2018,25(05):49.
- [20] 李波. 网络舆情中微博意见领袖的培养和引导[J]. 新闻大学,2015,35(01):145.
- [21] 徐文秀. 人民论坛:讲好中国抗疫故事[N]. 人民日报,2020-03-18(04).
- [22] 中国旅游研究院. 2019 年旅游市场基本情况[J]. 空运商务,2020,20(03):9.
- [23] 郭铁军,王春晓,高渤. 文化地标导视设计研究[J]. 包装工程,2021,43(02):181.
- [24] 田菲,王淑娟. 城镇化进程中的城市形象塑造[N]. 光明日报,2014-05-11(007).