

涂装烘干工艺车间风幕特性研究

童乐¹,岳晨¹,何伟峰¹,张世中¹,王福瑞²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016;

2. 江苏驃马智能装备股份有限公司,江苏 常州 213017)

摘要:针对涂装高温烘干室车辆连续进出操作的需求,在进口处设计一种隔断内外空气泄漏的顶吹式风幕。利用数值仿真的方法,研究某顶吹风幕热力参数对密封效果和节能特性的影响规律。研究表明:随着风幕入射角度的增大,实现密封效果所需要的最小风速有所降低;尽管提高风幕入射角度,所对应的最小密封风速较低,但是车间入口处的温度明显提高,热能浪费严重;此外,相比入射风速变化的影响,风幕入射角变化对密封效果的影响更为显著。在无车辆进出条件下,风幕入射速度为 12 m/s、入射角度为 45°时,可以同时达到较好的密封和节能效果。

关键词:车辆涂装;风幕;密封效果;节能特性

中图分类号:TK1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)05-0028-04

Aerodynamic Performance Investigation on Air Curtain of Vehicle Drying Chamber.

TONG Le¹, YUE Chen¹, HE Weifeng¹, ZHANG Shizhong¹, WANG Furui²

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Puma Intelligent Equipment Co., Ltd., Changzhou 213017, China)

Abstract: A top injection air curtain was designed to stop air leakage due to vehicle continuous movement in and out of painting drying chamber. A numerical simulation was performed to study the influences of the air curtain structure parameters on the sealing effect and energy saving performance of drying chamber. The results showed that the minimal air curtain velocity required for sealing effect decreased as the injection angle increased. Despite the optimal injection angle and injection velocity, the chamber entrance temperature increased remarkably causing serious thermal energy dissipation. In contrast to injection velocity, air curtain velocity had more significant impact on sealing effect. With no vehicle in & out movement, the better sealing effect and energy conservation performance could be accomplished when air curtain velocity was adjusted at 12 m/s and injection angle at 45°.

Keywords: vehicle coating; air curtain; sealing effect; entrainment characteristic

0 引言

在汽车车身涂装的烘干过程中,其能耗占比可达整个涂装工艺的 70%,烘干室有着巨大的节能潜力。车辆连续进出车间需要开式操作,室内外高达 120℃ 的温差易引起强烈的热质交换^[1]。传统往往采用人工经验对生产线进行设计优化,实际生产中再进行调度调试^[2]。合理设计适用烘干室这一特殊场合的风幕、保证其运作的节能高效是非常有必要的。

近年来,国内外研究者针对不同建筑中的风幕开展了大量研究。缪晨等^[3]对安装在冷库入口处的风幕进行了特性研究,对在不同射流速度下库外空气侵入破坏原流场的机理进行分析,得出了风幕送风速度的增大可以增加冷库密封性的结论。风幕在大型建筑物的防排烟系统中也

有很大的应用空间^[4-5],研究者利用小尺寸实验与数值模拟相结合的方法探究风幕的能量特性^[6],全尺寸的模拟结果更有说服力。YANG S W 等^[7]将风幕在不同操作下的状态分为 3 种,不同应用场所要求风幕的射流速度、角度和送风量不同^[8]。南晓红等^[9]给出了风幕运行效率与喷射宽度、角度以及流速等参数之间的关系。结果表明,确实存在一个最优的射流速度和喷射角度使风幕运行效率最高。有关风幕性能影响因素的研究很多,但是都没有明确影响变量的主要性和次要性^[10]。

鉴于风幕和车辆涂装烘干车间的特点,当前针对风幕设计对车辆涂装车间内流场及密封性能的研究尚未开展。本文设计了一种适用于车辆涂料烘干车间的顶吹热风幕,并对其进行了详细的数值仿真研究。揭示了风幕射流速度、射流角度两个关键操作参数对风幕气动特性的影响规律。

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20191276);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金立项资助项目(kfj20190203)

第一作者简介:童乐(1996—),女,山东枣庄人,硕士研究生,研究方向为节能技术、模拟仿真技术。

1 计算模型及数值方法

1.1 几何模型

图1为车辆涂装烘干车间的三维模型,模型包括3个连续的部分,分别为进口延长段、涂装烘干车间和出口延长段,出口延长段后接高温烘烤室。风幕装置的具体安装位置和出风角度设定如图2所示。

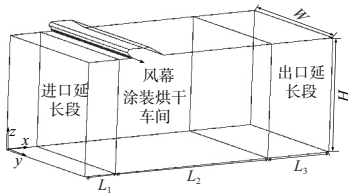


图1 车辆涂装烘干车间的三维模型结构示意图

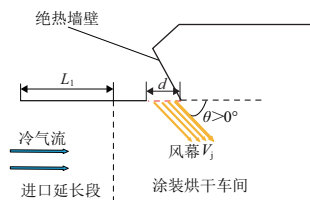


图2 风幕二维几何结构示意图

表1给出了车辆烘干车间具体的结构参数。 L_1 、 L_2 和 L_3 分别为3个区域的长度, H 和 W 分别为车间的高度和宽度。

表1 车辆涂装烘干车间的结构参数 单位:m

参数	H	W	d	L_1	L_2	L_3
数值	3.3	3.9	0.05	0.80	4.10	1.63

1.2 求解设置和边界条件

采用 ANSYS CFX 软件,基于涂装烘干车间内空气的质量、动量及能量守恒,建立了全尺寸物理模型,对风幕装置射流产生的三维湍流气流进行数值模拟。假设车间内流动为不可压缩稳态紊流,车间内的围护结构和外界无热质交换,假设射流速度稳定、恒定。风幕射流稳定流动时,各处的时均量均保持恒定,忽略黏性耗散和辐射量,采用 Boussinesq 假设,考虑浮升力的影响。数值仿真过程中的边界条件设置如表2所示。

表2 车辆涂装烘干车间 CFD 边界条件设置

边界名称	设置
风幕射流速度 $V_j/(m/s)$	8~20
风幕射流温度 T_j/K	433
风幕射流角度 $\theta/(^\circ)$	35~55
出口延长段壁面温度 T_{wall}/K	420
其他壁面	绝热无滑移
环境温度 T/K	298
左侧进口风速 $V_{in}/(m/s)$	0.012
右侧出口温度 T_{out}/K	453

1.3 网格无关性及模型验证

利用 ICEM 软件为计算域划分结构网格。图3给出了风幕射流速度为12 m/s、射流角度为45°时网格数分别为 1.0×10^6 、 1.5×10^6 、 2.0×10^6 、 2.5×10^6 和 3.0×10^6 对应的入口延长段的平均温度值。当网格数量增加至 2.0×10^6 时,左侧入口的温度不再变化,表明模型此时达到了网格无关性要求。

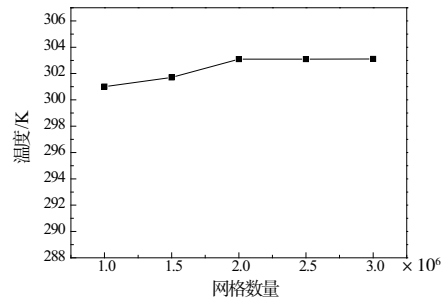


图3 不同网格数量下,12 m/s、45°时入口延长段温度

本文以迪特马尔·威兰等^[11]的带有用于吹入气态流体装置的加工腔作为对比参考文献。图4为车间流场分布和气流流动趋势对比图。对比图4(a)和图4(b)的结果,本文模拟结果与文献[11]结果的流动趋势和涡旋分布位置基本一致,且本文模拟结果所示的流场分布完全符合空气动力学原理,是顶部喷射的高速气流导致了气流的分离。因此利用本文所建物理模型开展后续研究是可行的。

初始建模时,风幕射流速度不变, V_j 为12 m/s,温度为433 K。

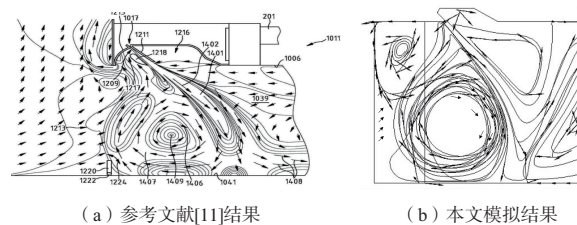


图4 车间流场分布和气流流动趋势

2 模拟结果与分析

2.1 数值模拟结果

风幕射流速度为16 m/s、射流角度为45°时整个车间内部气流的分布及走向如图5所示。在温差、压差和密度差等因素的综合影响下,流场中形成三个气流分布域,根据温度的差异分别定义为高温气流涡、冷热气流混合涡和低温气流涡,涡旋的中心速度接近0 m/s。高温、高速气流由风幕出口流至地面形成气流屏障。主射流到达地面后反射,产生能量损失,速度急剧下降。反射后的主射流分成的两部分,一部分流向左侧用于阻隔冷空气,另一部分高温气流入车间高温区。

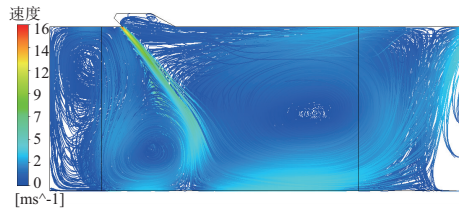


图5 车间流场迹线图

图6为车间内部的二维温度分布,三个流场分布域的存在造成明显的温度分区。低温气流涡聚集在车间顶部,与风幕出口高温气流热交换现象明显。图7为车间入口处截面的温度分布,截面温度由车间顶部到地面逐渐降低。

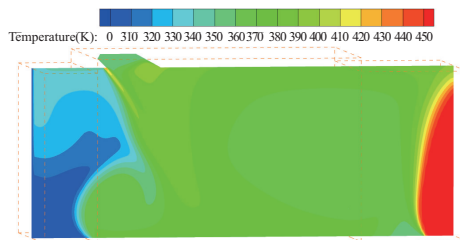


图6 车间内部温度云图

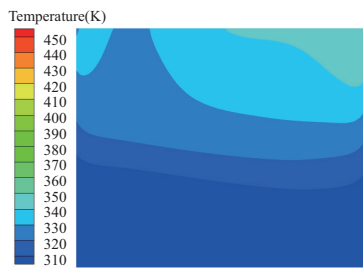


图7 车间入口截面温度云图

结合流场迹线图和温度云图,利用定性指标和定量指标来分析不同工况下风幕的卷吸特性和密封效果:风幕主射流是否能够流动至地面,形成完整的气流屏障,起到阻挡室外冷流的渗透和室内热流泄漏的作用作为定性指标;车间入口处温度和阻隔率作为定量指标。阻隔率用来估算幕卷吸空气的热力影响,定义阻隔 η 为

$$\eta = \frac{T_{\text{jet}} - T_{\text{mix}}}{T_{\text{jet}} - T_{\text{amb}}} \quad (1)$$

式中: T_{jet} 为风幕射流温度; T_{mix} 为射流卷吸左侧冷空气后的混合平均温度; T_{amb} 为环境温度; η 介于0~1之间。图8所示的位置1、位置2分别为车间入口和射流卷吸处的测温位置。

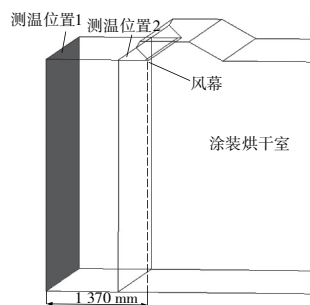


图8 车间入口测温位置示意图

2.2 射流速度对风幕特性的影响

图9为风幕射流角度为 45° 、速度为 $8\text{ m/s} \sim 20\text{ m/s}$ 时速度流线图((a)-(e))和温度云图((f)-(j))。图9(a)速度流线显示风幕无法阻隔入口的冷空气, 8 m/s 的射流速度下主射流不能流动至地面,无法形成完整的气流屏障。此时室内外存在的巨大温差和密度差产生了较大的气流驱动力,不仅不能阻隔冷空气,反而会增加进入车间的冷空气量。

由图9(a)-图9(e)可知,随着射流速度的增加,涡旋的大小和位置会随之发生变化。射流速度增加到 10 m/s 时,射流主流依然没有完全流动至地面,使得部分冷空气从车间底部渗入。主射流在地面上方分成左右两部分。射流速度 12 m/s 时主射流形成完整气流屏障,并从地面反射,反射的强度会随着速度的增大而增强,当射流速度 $>12\text{ m/s}$ 时,反射作用更加明显,冷热气流间的传热也更加强烈。

结合图9(f)-图9(j)的温度云图,射流速度为 12 m/s 时,风幕射流两侧高低温区间分隔最为明显,此时室内外热质交换的程度最弱,密封效果相较于其他射流速度更好。

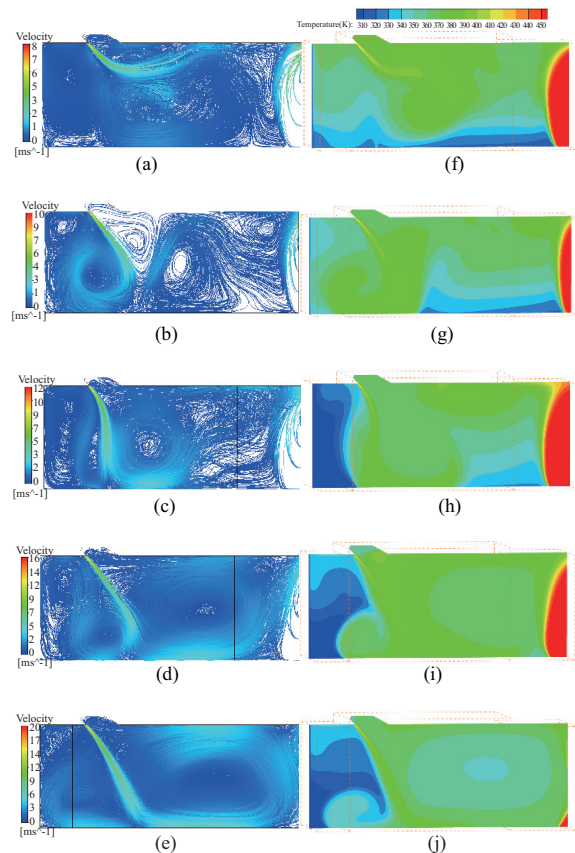
图9 射流速度为 $8 \sim 20\text{ m/s}$ 时车间流场和温度分布

图10为不同射流速度下入口的平均温度值和风幕阻隔率。综合图9和图10的结果,尽管射流速度低于 10 m/s 时,入口的平均温度较低,但是并未达到阻隔左侧冷空气的效果。由图10可知,当射流速度 $>12\text{ m/s}$ 时,入口平均温度逐渐增大,阻隔率逐渐降低,射流速度 12 m/s 时的阻隔率达到 0.83 ,密封和节能效果最佳。

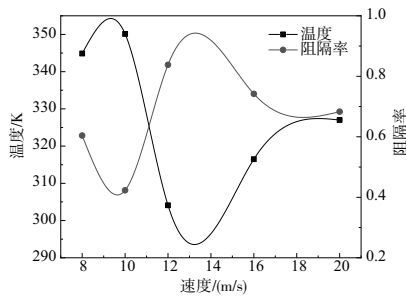


图 10 不同射流速度入口平均温度和阻隔率

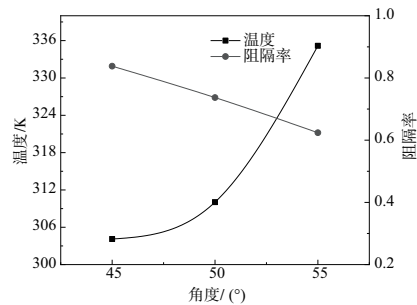


图 12 不同射流角度入口平均温度和阻隔率

2.3 射流角度对风幕特性的影响

图 11 是风幕在射流速度为 12 m/s、射流角度分别为 35°~55°时的速度流线图((a)-(e)) 和温度云图((f)-(j))。图 11(a)-图 11(b)的速度流线图显示在 35°和 40°的射流角度下,主射流在距离地面不同高度处向车间内弯曲,没有形成阻隔入口冷空气的分流,没有形成完整的射流屏障。此时强大的气流驱动力会造成进入工作车间冷空气量的增加。当射流角度增大至 45°时射流流动至地面,随着射流角度从 45°增大至 55°,冷热气流混合涡的体积不断增大,从主射流流至左侧的热气流增加,进而增强屏障两侧的传热传质。45°、50°和 55° 3 个射流角度下均起到了阻隔冷空气的效果。由图 12 所示的平均温度和阻隔率可以看到,随着射流角度的增大,左侧入口温度越来越高,阻隔率逐渐降低,相较于 45°的射流角度,50°和 55°存在明显的热量浪费。

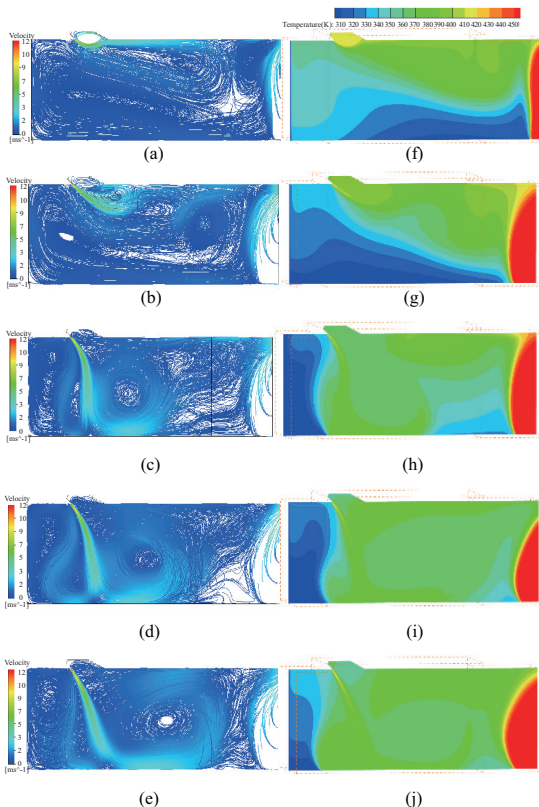


图 11 射流速度为 12 m/s 时车间流场和温度分布

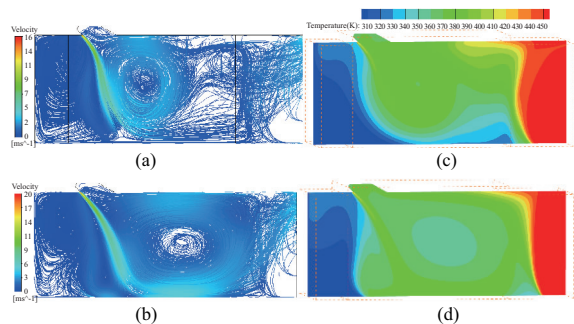


图 13 射流速度为 16 m/s 和 20 m/s 时车间流场和温度分布

在本文所研究的车间高度下,不考虑车辆进入车间的情况,风幕出口的射流速度和喷射角度分别为 12 m/s、45°时,密封效果和节能效果最佳,阻隔率为 0.83。

3 结语

- 1) 调整射流角度比调整射流速度对风幕特性的影响更显著。
- 2) 在本研究的车间高度及无车辆进出条件下,射流速度和喷射角度分别为 12 m/s、45°的工况有较好的密封和节能效果。在实际操作过程中,建议将风幕的射流速度和射流角度略大于最佳工况。
- 3) 增加风幕射流速度和射流角度可以提高顶吹风幕密封效果,但是车间入口的平均温度随之增大,会造成热能浪费。

参考文献:

[1] CAVALCANTE E S, VASCONCELOS L G S, DE FARIAS NETO G W, et al. Automotive painting process: minimizing energy consumption by using adjusted convective heat transfer coefficients[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 140: 105479.

(下转第 45 页)

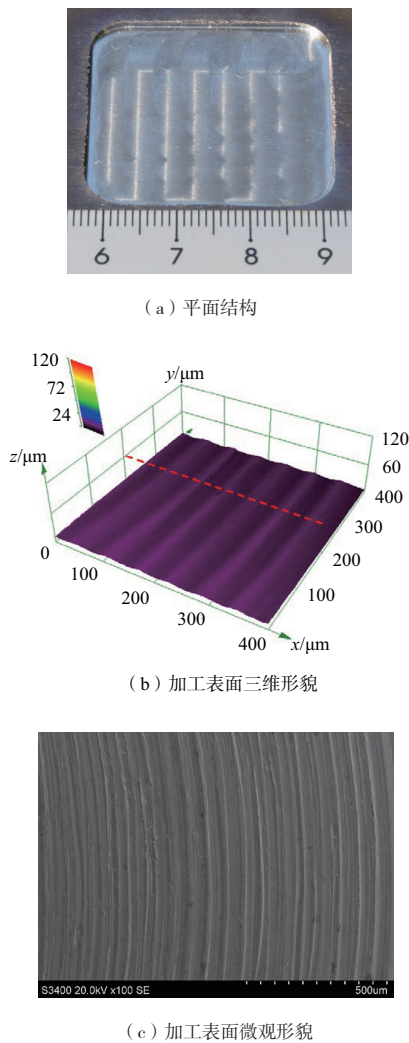


图6 (TiB+TiC)/TC4 复合材料电解
铣磨精加工

4 结语

1) 温度为 30℃ 时, TC4 及 (TiB+TiC)/TC4 复合材料

在 10%NaNO₃ 溶液中的溶解电压分别为 10.5 V 和 12 V; 两种材料的电流效率都呈现非线性变化趋势; 相同电流密度下, (TiB+TiC)/TC4 复合材料的电流效率略小于 TC4。

2) 使用扫描电子显微镜观察腐蚀试样的表面形貌, 两种材料在不同电流密度下分别具有不同的形貌特征。(TiB+TiC)/TC4 复合材料随着电流密度增加, 越来越多的晶须状增强相出现在加工表面。

3) 选择合理的加工参数对 (TiB+TiC)/TC4 复合材料进行电解铣磨试验, 粗加工阶段由于高电压、缓进给所造成材料去除不均匀、加工表面平整度差、表面粗糙度大的现象, 通过精加工修整后得到显著改善, 表面粗糙度由 5.262 μm 降至 0.702 μm。

参考文献:

- [1] 张可召. 高温钛合金表面 YSZ 热障涂层性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [2] 刘超杰. 钛基复合材料高速磨削加工磨削力仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(2): 89-93.
- [3] EZUGWU E O, WANG Z M. Titanium alloys and their machinability—a review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68(3): 262-274.
- [4] QU N S, ZHANG Q L, FANG X L, et al. Experimental investigation on electrochemical grinding of inconel 718 [J]. Procedia CIRP, 2015, 35: 16-19.
- [5] LI H S, NIU S, ZHANG Q L, et al. Investigation of material removal in inner-jet electrochemical grinding of GH4169 alloy [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 3482.
- [6] NIU S, QU N S, YUE X K, et al. Effect of tool-sidewall outlet hole design on machining performance in electrochemical mill-grinding of Inconel 718 [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 41: 10-22.
- [7] 张茂胜. TiC+TiB 增强高温钛合金基复合材料的组织和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [8] QIAN N, DING W F, ZHU Y J. Comparative investigation on grindability of K4125 and Inconel 718 nickel-based superalloys [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5/6/7/8): 1649-1661.

收稿日期: 2020-09-22

(上接第 31 页)

- [2] 孙智超, 高长水. 基于 Plant Simulation 的汽车生产线仿真技术研究[J]. 机械制造与自动化, 2014, 43(6): 161-165.
- [3] 缪晨, 谢晶. 冷库空气幕流场的非稳态数值模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 246-253, 299-300.
- [4] 陈静, 袁建平, 方正. 地铁车站防烟空气幕阻烟效果模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(11): 1431-1435.
- [5] 黄冬梅, 梅秀娟, 兰彬, 等. 出口风速对防烟空气幕防烟效果影响的数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(2): 31-34.
- [6] SHU C, WANG L Z, ZHANG C, et al. Air curtain effectiveness rating based on aerodynamics [J]. Building and Environment, 2020, 169: 106582.
- [7] YANG S W, ALRAWASHDEH H, ZHANG C, et al. Wind

effects on air curtain performance at building entrances [J]. Building and Environment, 2019, 151: 75-87.

- [8] 王俊. 冷库空气幕的实验研究及数值模拟[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [9] 南晓红, 何媛, 刘立军. 冷库门空气幕性能的影响因素[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 334-338.
- [10] 缪晨, 谢晶. 空气幕的研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 237-240, 262.
- [11] 迪特马尔·威兰, 奥利弗·伊格劳尔, 克里斯托夫·克尼赛尔, 等. 带有用于吹入气态流体的装置的加工腔: 中国, 103189702A [P]. 2013-07-03.

收稿日期: 2020-10-30