

车辆涂装工艺烘干室气幕性能分析及优化设计

张世中,岳晨,何伟峰,童乐

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘 要:对烘干室气幕密封特性进行数值模拟研究,讨论送风速度和角度对气幕密封性能的影响。结果表明,相比上送风式气幕,改进型气幕密封性能较优,其上部喷口送风角度取 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$,速度取 9 m/s ,侧部喷口送风速度取 3 m/s ,角度取 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 时气幕密封性能最佳,密封效率为 77.8% 。若送风速度过小,无法形成完整气幕,而送风速度过大则存在射流高温气体冲击烘干室底部现象;烘干工件处于气幕喷口时影响气幕墙的形成,进口延长段温度升高 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$,故烘干作业时待烘干工件应置于进口延长段前段。

关键词:涂装工艺;烘干室;空气幕;数值仿真;密封效果

中图分类号:TH136 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0044-05

Performance Analysis and Optimal Design of Air Curtain in Vehicle Coating Process Drying Room

ZHANG Shizhong, YUE Chen, HE Weifeng, TONG Le

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The numerical simulation study on the air curtain sealing characteristics of the drying chamber is conducted, and the influence of the air supply speed and angle on the air curtain sealing performance is discussed. The results show that the improved air curtain has better sealing performance than the upper air curtain. When the air supply angle of the improved air curtain upper nozzle is 35° to 40° with the speed at 9 m/s , and the air speed of the side nozzle reaches 3 m/s with the angle at 30° to 35° , the improved air curtain has the best sealing performance with the sealing efficiency as 77.8% . If the air supply speed is too small, a complete air curtain fails to be formed, while the air supply speed is too large, there will be a phenomenon of jet high temperature gas impacting the bottom of the drying chamber. When the drying workpiece is in the air curtain nozzle, the formation of the air curtain wall will be affected, and the temperature of the inlet extension section will increase by $36\text{ }^{\circ}\text{C}$. The workpiece to be dried, therefore, should be placed in the front section of the inlet extension section during the drying operation.

Keywords: coating process; drying room; air curtain; numerical simulation; sealing effect

0 引言

汽车工业能耗占工业能耗比重较大,而涂装烘干环节能耗占涂装生产环节能耗的 70% ^[1-2]。实现烘干环节节能减排,是降低汽车生产能耗的重要方向。烘干室出入口常处于敞开状态,室内外存在巨大温差,易引起热质交换,使得烘干室内部高温气体上浮外溢和外部冷流下沉侵入,出入口布置气幕是降低烘干室能耗的有效手段,但常用的上送风式气幕仍存在空气泄漏和卷吸问题^[3]。

国内外学者开展了大量研究。刘敬辉等^[4]对冷藏车气幕保温性能研究发现,冷藏车门处设置气幕可减少冷藏车开门卸货过程时造成的能量损失,车内平均温度的上升速率明显降低;何媛^[5]对冷库气幕性能数值研究结果表明,气幕送风速度使得气幕效率存在最佳值;CHEN Y G^[6]对循环制冷式气幕隔热能力数值研究发现,由于外部压力且趋于流向柜内,气幕射流初始动量必须足够大,

才能确保维持整个风幕的压差;FRANK D等^[7]对气幕反向浮力的影响研究发现,若气幕加热到临界温度以上,其有效性会降低,加热的空风幕可能会降低能源效率;贾进彪、邢鹏成等^[8-9]研究发现,喷嘴送风速度随气体压力的增大而增加,随空气幕喷口截面积增大,喷孔风速呈现增大的趋势,而风速无效区长度也呈现不同程度的增大;喷嘴呈收缩状时射流性较佳。XIAO D等人^[10]对小流量气幕数值模拟发现,增加送风口截面,可减小气幕发生器沿喷嘴长度方向静压差,提高气幕均匀性;刘晓菲等^[11]对冷藏室气幕运行效率、送风角度和流速等参数之间的关系研究发现,气幕射流速度和角度使风幕存在最佳值使其效率较佳;徐正本等^[12]对气幕性能数值仿真研究发现,送风速度是关键影响参数,风速过小不能形成完整的气流;风速过大增加能耗,卷吸量增大。

针对某企业采用上送式气幕时烘干室内部高温气体泄漏严重问题^[13-15],鉴于烘干作业时间为 $1.5\text{ h}\sim 2\text{ h}$,为减少因烘干室出入口敞开时内部高温区气体外溢量,降低

基金项目:研究生创新实验竞赛基金项目(4003-5645004)

第一作者简介:张世中(1993—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为传热传质。

能耗,本文主要研究气幕结构布局,提出适用于烘干室的大尺寸、大温差的“三侧式”改进型气幕方案,并数值模拟研究不同工况下改进型气幕密封性能,分析其对烘干内部上浮外溢高温气体和烘干室外部下沉侵入冷流的阻挡效果,得出改进型气幕最佳性能下的运行工况,用于指导现有烘干室气幕的改进和优化。

1 模型简介和数值计算方法

1.1 模型简介

图1为车辆涂装工艺烘干室空气幕三维模型,图2为其二维模型示意图,模型包括进口延长段、涂装烘干室和出口延长段。车辆涂装工艺烘干室气幕存在热气流外溢和冷气流侵入现象。鉴于烘干室常处于敞开状态,当烘干室入口无风幕时,因烘干室内外温度差作用,其内部高温气体外溢,造成进口延长段温度上升。为表征烘干室气幕密封和节能特性,自烘干室进口延长段沿其左侧进口方向,每间隔0.5 m,取与y轴垂直的测温截面,分别取测温截面-1至测温截面-8,通过对比涂装工艺烘干室内外温差(即测温截面-8与截面-2平均温度之差),分析不同工况下烘干室气幕密封节能特性。表1为车辆涂装工艺烘干室尺寸参数。

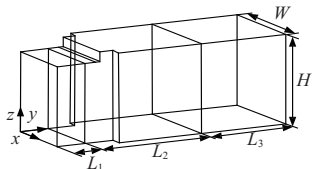


图1 烘干室三维模型结构示意图

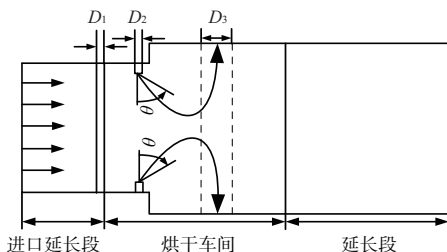


图2 涂装工艺烘干室二维模型结构

表1 车辆涂装工艺烘干室尺寸参数 单位:m

参数	数值
D_1	0.050
D_2	0.025
D_3	0.495
L_1	0.80
L_2	3.85
L_3	3.00
H	3.2
W	3.3

1.2 数值计算方法

鉴于雷诺时均模拟(RNS)具有计算量较小且计算结果可靠等特点,采用雷诺时均模拟法,假设烘干室内流动为不可压缩稳态湍流流动。数值求解中,基于全尺寸物理模型,由连续方程、动量方程,采用 Boussinesq 模型考虑浮升力的影响,对气幕装置射流产生的三维湍流流动特性进行数值模拟。

连续方程:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + V_x \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + V_y \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + V_z \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) - g \quad (4)$$

$k-\varepsilon$ 方程:

$$\rho_2 \varphi_2 - \rho_1 \varphi_1 + \text{div}(\rho U \varphi) = \text{div}(\Gamma_\varphi \text{grad} \varphi) + S_\varphi \quad (5)$$

式中: x, y, z 是几何方向; φ 是通用变量; S 是广义扩散系数。

通过分析不同工况下涂装工艺烘干室内部温度(温度监测点-8)和进口延长段温度(温度监测点-2)差值,分析气幕阻隔密封效果,对比不同工况下气幕密封性能,具体计算公式为

$$\Delta T = T_8 - T_2。$$

式中: T_2 为烘干室进口延长段温度值,K; T_8 为烘干室内部温度值,K。

1.3 边界条件及求解设置

采用 ANSYS CFX 工程软件,基于涂装工艺烘干室,建立全尺寸物理模型,涂装烘干室外壁为绝热壁面,内部温度为 180 ℃,外界环境温度为 25 ℃;为提升计算的准确度,湍流方程残差低于 10^{-4} 。数值仿真中模型边界条件具体设置如表2所示。

表2 涂装烘干室 CFD 边界设置条件

边界类型/单位	设置
空气幕射流	速度进口
其他壁面	绝热无滑移
风幕射流角度 $\theta/(^\circ)$	30~50
湍流强度/%	5
出口延长段壁面温度 T_{wall}/K	420
风幕射流温度 T_j/K	433
环境温度 T/K	298
右侧出口温度 T_{out}/K	453

1.4 网格无关性及模型验证

为节省计算机资源和提升计算准确性及效率,对网格无关性进行验证。气幕送风速度取 10 m/s ,射流角度取 35° ,网格数分别为 165×10^4 、 226×10^4 、 294×10^4 和 437×10^4 ,对比分析进口延长段测温截面-1 平均温度值。由图 3 可知,网格数为 294×10^4 和 437×10^4 时,入口段平均温度相差约 0.2% 。综合考虑计算效率和正确性两个因素,网格采用 294×10^4 计算量。

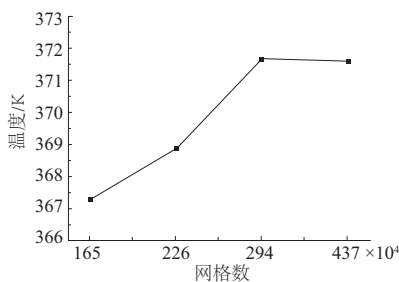


图3 网格无关性验证

2 结果分析

2.1 有车工况下上送风式/改进型气幕性能对比

为指导涂装工艺烘干室气幕实际应用,设计了一种改进型气幕。在有车工况下,采用数值仿真法,对比分析上送风式气幕和改进型气幕性能,当送风速度取 12 m/s 、送风角度取 45° 时,结果如图 4~图 5 所示。

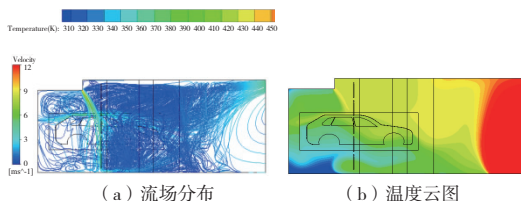


图4 上送风式气幕流场和温度云图

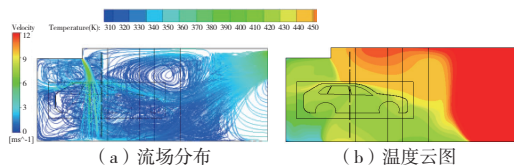


图5 改进型气幕流场和温度云图

由图 4 和图 5 可知,上送风式气幕喷射流体冲击车辆顶部,造成气体分流,部分分流气体流向进口延长段,致使温度环境恶化;上送风口射流无法到达烘干室底部,而车身底部与地面之间存在距离,无法实现对烘干室外部下沉侵入冷流和烘干室内部上浮外溢高温气体的阻挡,致使气幕密封效果较差,而改进型气幕可利用侧送风口射流阻挡烘干室外部下沉侵入冷流。

因此,车辆涂装工艺烘干室采用改进型气幕可较好地

实现对烘干室外部下沉侵入冷流和内部上浮外溢高温气体的阻挡,降低烘干室内温度衰减速率,减少烘干资源能量损失,故改进型气幕性能较佳。

2.2 改进型气幕性能分析

1) 改进型气幕上送风口送风角度及速度影响

采用数值仿真法,分析车辆涂装工艺烘干室改进型气幕特性,分析送风角度对改进型气幕特性的影响。预先给定上送风口和侧送风口送风角度均为 45° ,侧送风口速度为 5 m/s ,而上送风口速度分别取 6 m/s 和 16 m/s ,数值仿真结果如图 6 所示。

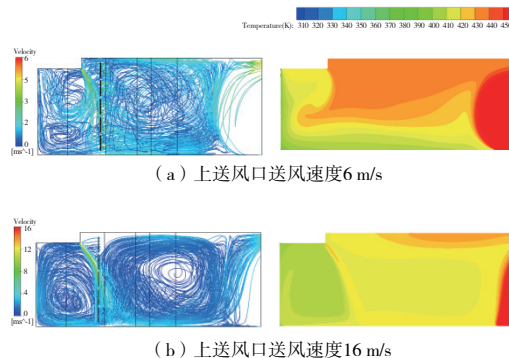


图6 改进型气幕上送风口送风速度 6 m/s 和 16 m/s 时流场和温度云图

由图 6 可知,当送风速度取 6 m/s 时,气幕射流未能形成完整气幕墙,即速度过小无法发挥密封作用;当送风速度 16 m/s 时,存在气幕射流冲击烘干室底部现象,射流气体分流,且部分分流气体流向烘干室进口延长段,即速度取 16 m/s ,则速度过大。

为分析改进型气幕上送风口送风角度的影响,上送风口送风速度先取中间值 11 m/s ,分析上送风口不同送风角度下气幕性能,角度取 $30^\circ \sim 50^\circ$ 。由图 7 和图 8 可知,在距离入口不同位置处室内外温差随送风角度的增加呈现先增加后降低的趋势,存在最佳送风角度,最佳角度为 35° ,相比烘干室内温度,进口延长段温度降低约 69°C ;当送风角度 $< 35^\circ$ 时,存在气幕射流冲击烘干室底部现象,若送风角度 $> 35^\circ$,特别是当送风角度 $> 45^\circ$ 时,存在空气幕射流被破坏现象,故改进型气幕上送风口送风角度取 $35^\circ \sim 40^\circ$ 较优。

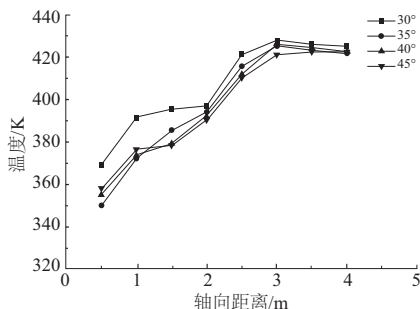


图7 改进型气幕上送风口不同送风角度下烘干室温度分布

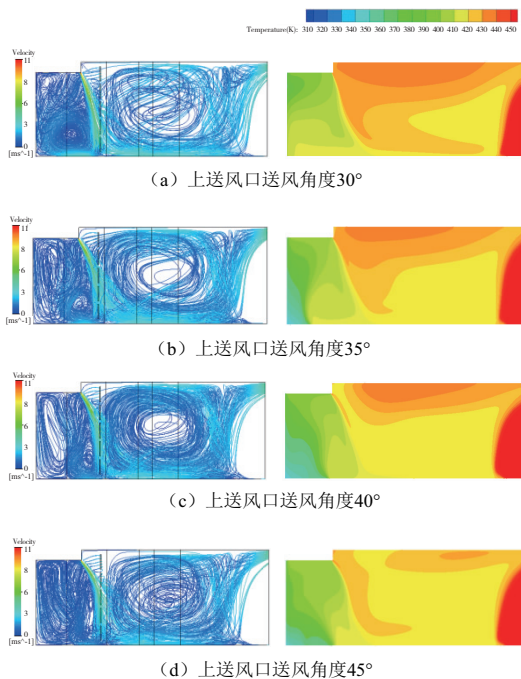


图8 改进型气幕上送风口不同送风角度下流场和温度云图

为分析改进型气幕上送风口送风速度的影响,基于上述分析送风角度取 35° 时,改变送风速度,送风速度取 $7\text{ m/s}\sim 11\text{ m/s}$ 。由图9和图10可知,在距离入口不同位置处,室内外温差随送风速度的增加呈现先增加后降低的趋势,存在最佳送风速度,最佳速度为 9 m/s ,此时相比烘干室内温度,进口延长段温度降低约 80°C ;当送风速度 $< 9\text{ m/s}$ 时,气幕射流速度过小,未能形成气幕墙,即泄漏严重,密封效果较差;若送风速度 $> 10\text{ m/s}$,存在气幕射流冲击烘干室底部现象,气幕资源分流,部分分流气体流向进口延长段,造成烘干室温度环境恶化,且气幕资源利用率低,能耗较大。因此,改进型气幕上送风口最佳送风角度为 35° ,送风速度为 9 m/s 。

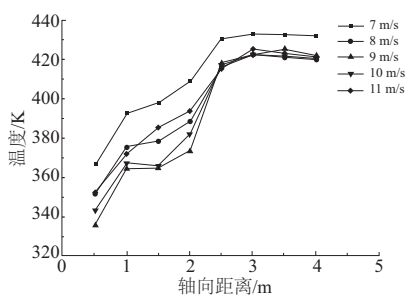
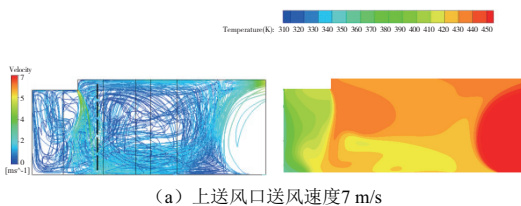


图9 改进型气幕上送风口不同送风速度下烘干室温度分布



(a) 上送风口送风速度 7 m/s

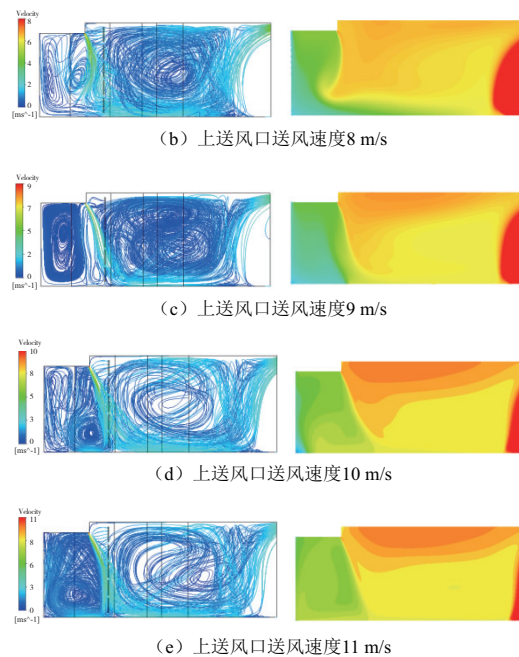


图10 改进型气幕上送风口不同送风速度下流场和温度云图

2) 改进型气幕侧送风口送风角度及速度影响

为分析改进型气幕侧送风口送风角度对改进型气幕特性影响,侧送风口送风速度取 4 m/s ,送风角度为 $25^\circ\sim 40^\circ$ 。由图11可知,在距离入口不同位置处室内外温差随着送风角度的增加呈现先增加后降低的趋势;侧送风口角度取 $30^\circ\sim 35^\circ$ 时,相比烘干室内温度,进口延长段温度降低约 84°C ,气幕性能优于其他送风角度工况。

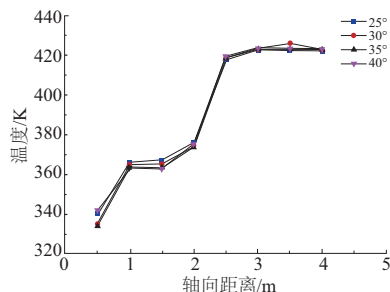


图11 改进型气幕侧送风口不同送风角度下烘干室温度分布

为分析改进型气幕侧送风口送风速度影响,基于上述分析送风角度取 35° 时,对比分析不同送风速度下烘干室温度分布,速度分别取 $2\text{ m/s}\sim 5\text{ m/s}$ 。由图12和图13可知,侧送风口最佳速度为 3 m/s ,气幕性能优于其他速度工况;在最佳工况下,相比烘干室内温度,改进型气幕进口延长段温度降低约 97°C ,此时涂装工艺烘干室改进型气幕性能最佳。

2.3 烘干工件对烘干室改进型气幕密封性能的影响

当烘干室改进型气幕处于最佳工况时,数值模拟分析有车工况和无车工况下改进型气幕性能。由图14可

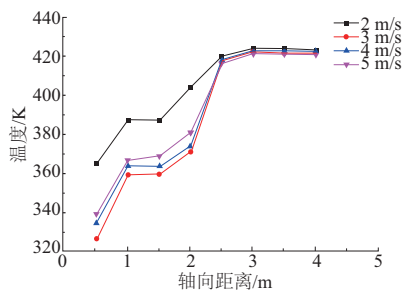


图 12 改进型气幕侧送风口不同送风速度下烘干室温度分布

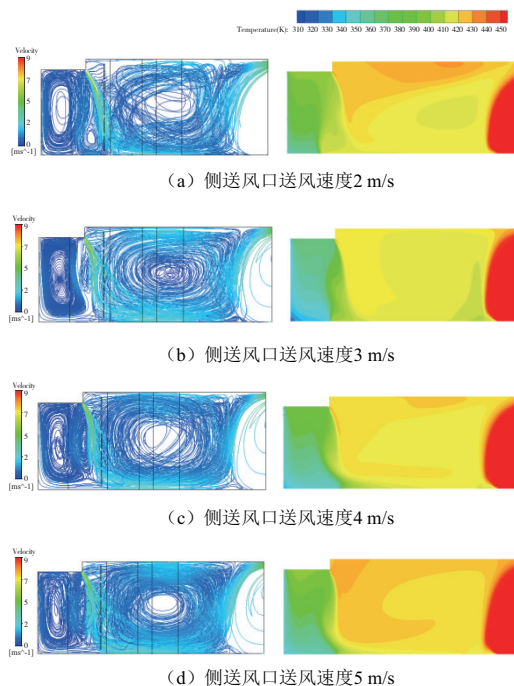
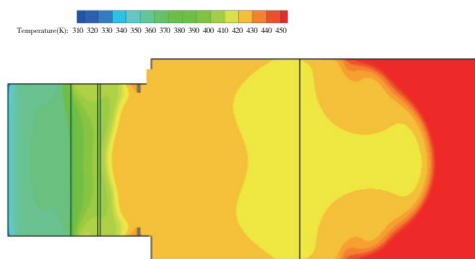
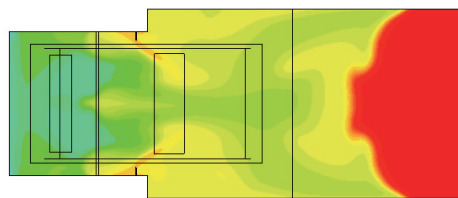


图 13 改进型气幕侧送风口不同送风速度下流场和温度云图

知,相比无车工况,有车工况下烘干工件处于气幕喷口时,气幕射流冲击烘干工件无法喷射至烘干室底部,烘干外部冷流下沉侵入,烘干室内温度衰减速率下降,且进口延长段温度升高 36℃。因此,在烘干工件的烘干过程中,烘干完成的工件由烘干出口送出,而待烘干工件停留阶段置于进口延长段前段,以减少烘干工件对气幕密封性的影响。



(a) 无烘干工件下改进型气幕横向温度云图



(b) 有烘干工件下改进型气幕横向温度云图

图 14 无/有烘干工件下烘干室横向截面温度云图

3 结语

1) 相比上送风式气幕,改进型气幕不仅可利用上送风口射流阻挡烘干室内上浮外溢的高温气体,还可利用侧送风口射流阻挡烘干室外部下沉侵入冷流,故改进型气幕密封性能较优;

2) 若送风速度过小无法形成完整气幕墙来实现密封;若送风速度较大存在气幕射流冲击烘干室底部现象,高温气体分流并流向进口延长段,造成温度环境恶化,使得气幕密封性差且能耗大;改进型气幕上送风口合理送风角度为 35°~40°,速度为 9 m/s,侧送风口合理送风速度为 3 m/s,角度为 30°~35°。此时相比烘干室内温度,进口延长段温度降低约 97℃,改进型气幕密封性能较佳,密封效率为 77.8%;

3) 当烘干工件处于气幕喷口时,气幕射流冲击烘干工件而无法形成完整气幕,影响气幕阻隔密封效果,相比无烘干工件时进口延长段温度,有烘干工件时进口延长段温度升高 36℃,烘干室能耗增加,故烘干作业过程中烘干完成的工件由烘干出口送出,而待烘干工件应置于进口延长段前段;

4) 建议烘干室在改进型气幕实际应用中缩短烘干工件出入时间,采用智能调节手段调节送风速度和角度,实现烘干室气幕密封性能的进一步改善。

参考文献:

- [1] GIAMPIERI A, LING-CHIN J, MA Z, et al. A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective[J]. Applied Energy, 2020, 261: 114074.
- [2] FENG L J, MEARS L, BEAUFORT C, et al. Energy, economy, and environment analysis and optimization on manufacturing plant energy supply system[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 117: 454-465.
- [3] 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.
- [4] 刘敬辉,陈江平,陈芝久,等. 风幕对冷藏车性能影响的仿真分析和试验研究[J]. 流体机械, 2006, 34(1): 52-55, 73.
- [5] 何媛. 冷藏库大门空气幕运行性能的数值研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [6] CHEN Y G. Parametric evaluation of refrigerated air curtains for thermal insulation[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(10): 1988-1996.

(下转第 70 页)

4.2 试验验证

通过试验得出适合镁合金材料的最佳电解液参数和电参数,成功将原 25 μm 厚度的膜层降低到 (10~15) μm 。在不影响膜层防腐性能的前提下,提高了膜层中致密层的占比,疏松层的厚度和表面粗糙度相应降低。如表 2 所示,微弧氧化后表面粗糙度平均上升 49%,较原来的 133% 大幅度降低。

表 2 工艺优化后表面粗糙度统计

项目	产品编号							
	9#	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#
微弧氧化前	0.82	0.91	0.76	0.77	0.85	0.92	0.88	0.79
微弧氧化后	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
表面粗糙度增幅/%	49	44	46	53	54	43	47	53
表面粗糙度平均增幅/%	49							

为更直观地观察疏松层的改善情况,取样进行电镜扫描。如图 6 所示,更改微弧氧化工艺后的膜层质量明显好于未更改前,孔洞结构和裂缝明显减少,这将大大提高静密封面的密封性能^[6]。

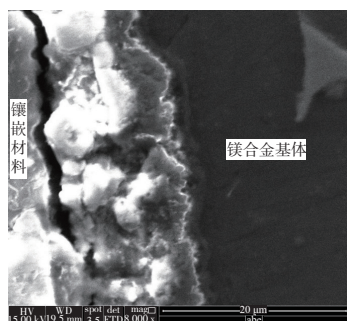


图 6 膜层质量改善后形貌

更改微弧氧化工艺后已试验成功 60 余台产品,在使用过程中并未发现有滑油渗出的情况,可以确认通过提升疏松层质量对产品的密封性能有明显效果。

5 结语

本文通过对某型航空发动机空气涡轮起动机在使用后出现的静密封面滑油渗出问题研究,对与胶圈装配的静密封表面开展渗漏机理和微观结构分析,发现微弧氧化膜层中疏松层对于密封性能的影响至关重要。表面粗糙度差的膜层孔洞和裂缝较多,会导致静密封面在长时间使用后失效。同时采用调整电解液参数和电流密度等方法,成功地在不影响膜层防腐性能的基础上提高了疏松层膜层质量,降低了表面粗糙度,改善了表面密封性能,为微弧氧化技术在密封面上的使用积累了经验,同时为解决静密封滑油渗漏问题提供了一套简单高效、切实可行的工程实际解决方法。

参考文献:

- [1] 潘明强. 微弧氧化膜层形成及其表面粗糙度的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [2] 李贵江,李亮,许长庆. 镁合金微弧氧化陶瓷膜层研究进展[J]. 热加工工艺,2008,37(18):94-97,101.
- [3] 王慧. 镁合金微弧氧化膜的微观组织结构和性能研究[D]. 济南:山东大学,2009.
- [4] 杨眉,雷正,王平,等. 镁合金微弧氧化技术研究进展[J]. 热加工工艺,2011,40(20):111-115.
- [5] 孙志华,国大鹏,刘明,等. 工艺参数对 2A12 铝合金微弧氧化陶瓷层生长的影响[J]. 航空材料学报,2009,29(6):59-65.
- [6] 杨眉,唐宁,陈劲,等. 电流密度对 TC11 钛合金微弧氧化性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2020,49(2):404-411.

收稿日期:2021-01-28

(上接第 48 页)

- [7] FRANK D, LINDEN P F. The effects of an opposing buoyancy force on the performance of an air curtain in the doorway of a building[J]. Energy and Buildings, 2015,96:20-29.
- [8] 贾进彪,谭允祯,程高峰,等. 高压气幕风速的试验研究[J]. 煤矿安全,2010,41(8):6-8.
- [9] 邢鹏成,丁武学,楼晓华,等. 蒸发器除霜喷嘴的高压射流特性分析与结构优化[J]. 机械制造与自动化,2020,49(3):15-18.
- [10] XIAO D, LI X C, YAN W D, et al. Experimental investigation and numerical simulation of small-volume transverse-flow air curtain performances [J]. Powder Technology, 2019, 352: 262-272.
- [11] 刘晓菲,南晓红. 装设均匀送风管道对冷藏库气流流场特性

的改善[J]. 农业工程学报,2016,32(1):91-96.

- [12] 徐正本,陈蕴光,孙宗鑫,等. 陈列柜风幕的数值研究及其影响因素分析[J]. 制冷,2003,22(3):52-55.
- [13] 缪晨,谢晶. 空气幕的研究进展[J]. 食品与机械,2012,28(4):237-240,262.
- [14] YE H, YU J H, WANG B B, et al. Study on the influence of air curtain barrier efficiency on infiltration air volume and temperature distribution in large space in winter[J]. Procedia Engineering, 2017,205:2509-2516.
- [15] 李艺哲,谢晶. 大型冷库内温度场的数值模拟与优化[J]. 食品与机械,2017,33(6):139-142,179.

收稿日期:2020-10-09