

基于 CFD 的喷粉室空气流场分析与结构优化

杨若愚, 樊孝涛, 闫伟, 唐力明, 董子瑜

(中国联合工程有限公司, 杭州 310000)

摘要: 粉末涂料因其环保性在涂装行业得到广泛应用, 但喷粉室中存在的粉末外逸问题制约了其效率与安全性。本文首先依据设计经验对喷粉室进行了设计和建模, 再按照国标要求进行风机选型, 接着采用 CFD 仿真方法, 分析喷粉室内部空气流场特征和不同开口面的风速差异, 然后对比条缝式排风口不同宽度时的风速, 发现排风口宽度越小, 室体内部和各开口面空气流速越均匀的规律, 最后现场实测室体各开口面的风速, 验证了模型的准确性, 为喷粉室风道优化及防逸粉设计提供了指导。

关键词: 粉末涂装; 粉末外逸; CFD 仿真; 结构优化

中图分类号: TQ639 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)10-0024-05

Flow Field Analysis and Structural Optimization of the Powder Spraying Booth Based on CFD

YANG Ruo-yu, FAN Xiao-tao, YAN Wei, TANG Li-ming, DONG Zi-yu

(China United Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Powder coatings are widely used in the painting industry due to their environmental benefits. However, powder leakage from spraying booths remains a critical challenge, compromising both efficiency and safety. In this study, a powder spraying booth was initially designed and modeled based on engineering experience. Subsequently, the fan type was selected in compliance with national standards. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were employed to analyze the airflow characteristics within the booth and the velocity differences across various openings. The impact of slotted exhaust vent widths on airflow distribution was further investigated. Results revealed that narrower exhaust vents significantly improved airflow uniformity inside the booth and across all openings. Finally, on-site measurements of opening velocities validated the accuracy of the simulation model. This study provides practical insights for optimizing air duct structures and anti-leakage designs in powder spraying booths, thereby enhancing operational safety and powder utilization efficiency.

Key words: powder coating; powder leakage; CFD simulation; structural optimization

0 引言

涂装工艺是用于材料防腐、表面装饰的一种常用技术, 也是机械制造行业的关键工艺之一, 通常包括前处理、涂布和干燥 3 个基本工序。与液体涂料相比, 粉末涂料具有工艺简单、回收利用率高、成本低、零 VOC

排放等优点, 被市场广泛认可为环境友好型涂料, 并在工程机械、专用车、新能源电池、储能设备、钢结构、集装箱等领域表现出较好的发展势头^[1-2]。

随着国家和地方政府在“生态文明建设”“蓝天、碧水、净土保卫战”和“碳达峰、碳中和”等一系列绿色战略上的持续推进, 以及环境保护相关法律法规的完善和落实, 绿色发展理念不断深入人心, “绿水青山就是金山银山”理念已然成为全社会的共识, 越来越多的企业开始将溶剂型涂料、水性涂料改为粉末涂料。高防腐

收稿日期: 2025-04-21

作者简介: 杨若愚(1994—), 男, 博士, 工程师, 主要从事粉末涂装与非标设计工作。E-mail: yangruoyu@chinauc.com。

粉末涂料能够应对沿海、矿山和远洋运输等恶劣环境,低温固化粉末涂料应用不局限在金属基材,高光高流平粉末涂料能够媲美液体涂料的表面装饰效果^[3]。粉末涂料技术的迭代伴随着涂装设备的数字化、智能化升级,使得整个粉末涂料行业正从粗放式扩张转向细分领域的精准化发展,以及深耕下游应用场景的专业化发展。

尽管粉末涂装工艺具有上述诸多优点,但在实际应用过程中,粉末外逸问题成为了制约其进一步发展的瓶颈。在喷粉过程中,受各种因素影响,如风机风量选型不当、排风管道设计不合理等,会导致粉末从喷粉室内逸出,从而引发一系列严重问题。一方面,逸出的粉末涂料会降低车间的清洁度,使车间内弥漫着粉末颗粒,损害人员的身体健康,还可能进入其他颜色的喷粉室造成杂色缺陷,降低成品率^[4-6]。另一方面,粉末的外逸还会造成生产成本的上升,大量积聚还会增加粉末爆炸的风险,严重威胁到人员生命安全和企业财产安全。

针对粉末外逸问题,国家标准对于喷粉室内的粉尘浓度以及室体开口风速都做了规定,设计人员可以据此对风机排风量进行选型,但是国标对于具体的室体结构和排风管布局及尺寸都留下了较大的优化空间。王戈等^[7]早在2008年就开始关注粉末涂装中的粉末外逸问题,从设备选型、设备设计和设备管理等方面提出了见解,并给出了发生粉末外逸后的补救措施,为粉末涂装产线的设计提供了有力指导。金海陆等^[8]基于Fluent软件对喷粉室内流场进行了参数化模拟,验证了模型的准确性,但是没有进一步实现喷粉室结构

的设计优化。后续少有其他学者及从业者继续深入分析或者分享相关案例。

为进一步解决喷粉室粉末外逸的问题,需摒弃“大力出奇迹”的粗放设计理念,转向精细化设计模式。因此,本文首先根据国标进行风机选型,然后采用CFD仿真方法,对喷粉室内部空气流场进行分析,对比了条缝式排风口不同宽度时的空气流速,完成了排风管道的优化设计。

1 喷粉室设计

喷粉室是粉末喷涂的主要设备之一,在涂装产线中处于水分烘干室之后,位于粉末固化室之前。在喷粉室内部,通常由往复机、机器人等运动机构携带自动喷枪进行自动喷涂,对于结构复杂的工件,还会增加人工喷涂工位,由操作人员穿戴防护用具,在室体内部手持喷枪进行喷粉作业。

为研究喷粉室内部的空气流动特征,只需要单独对室体进行建模,保留室体侧边的开孔位置和底部排风管道,忽略工件和枪杆运动的影响。基于公司某涂装项目的喷粉室初步设计,建立三维模型如图1所示,室体全长18.0 m,宽4.2 m,高5.6 m。该喷粉室是直线通过式结构,工件输送方式为顶部吊挂,室体前后端分别为喷粉室出口和入口,左右两侧布置一系列往复机,自动喷枪深入室体内部,自动喷枪开口槽宽度对应喷枪直径,开口槽长度对应往复机竖直方向运动距离,室体内部靠近入口处还布置有2台机器人及其围栏,室体底部为排风管道,通过负压排风的方式将内部的空气和粉末抽出至大旋风、后过滤,进行回收利用。室体底部右侧有3个主排风口,对应3台后过滤风机。

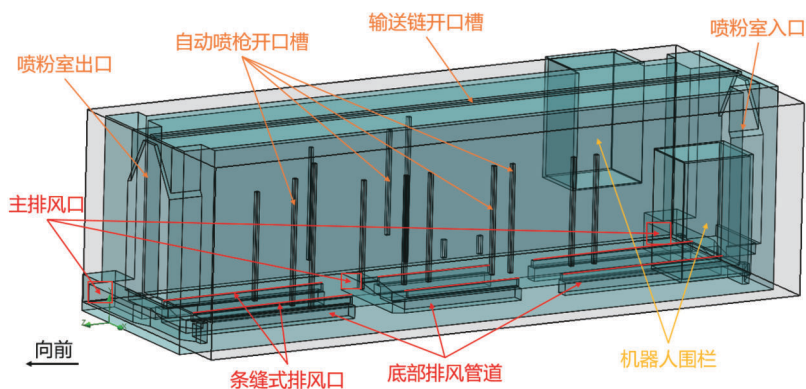


图1 喷粉室体三维模型

风机风量需要按照国标的相关要求进行选型。国家标准 GB 15577—2018《粉尘防爆安全规程》和 GB 15607—2023《涂装作业安全规程 粉末静电喷涂工艺安全》对喷粉室防爆要求做出了量化的指标:1)除喷枪

出口等局部区域外,喷粉室内悬浮粉末平均浓度(即喷粉室出口排风管内的浓度)小于其爆炸下限值的50%,未知其爆炸下限(LEL)时,其最高浓度不大于 10 g/m^3 ;2)喷粉室开口面保持负压,平均风速在 $0.3\sim 0.6$

m/s 之间。据此,风机排风量可以分别用粉尘浓度和防止粉尘外逸两种方法计算,并取最大值。

1)控制粉尘浓度的排风量: $Q_1=((G \times n(1-K) \times K_1 \times K_2)/0.5c) \times 60$,式中: Q_1 为按控制粉尘浓度要求计算的排风量, m^3/h ; G 为单支喷枪最大出粉量, g/min ,取 200; n 为同时喷涂的喷枪数,取 64; K 为粉末上粉率,一般为 0.4~0.8,取 0.4; K_1 为工件不连续进入时的积粉系数,一般为 1.2~1.6,取 1.6; K_2 为粉末在喷室内悬浮系数,一般为 0.5~0.7,取 0.7; c 为粉末爆炸下限浓度, g/m^3 ,取 20;计算得到 Q_1 为 51 609.6 m^3/h 。

2)防止粉尘外逸的排风量: $Q_2=3\ 600(A_1+A_2+A_3)v$,式中: Q_2 为按防止粉尘外逸要求计算的排风量, m^3/h ; A_1 为操作面开口面积, m^2 ,取 4.5; A_2 为工件进出口面积, m^2 ,取 17.6; A_3 为工艺及其他孔洞面积, m^2 ,取 3.6; v 为开口处断面风速,在 0.3~0.6 m/s,取 0.6;计算得到 Q_2 为 55 512 m^3/h 。

取最大值 Q_2 ,考虑到喷粉室内粉末分布以及室体开口风速的不均匀性,取风量放大系数 1.2,计算得到喷粉室需要总排风量 66 614.4 m^3/h ,向上取整 68 000 m^3/h ,前、中、后 3 个主排风口对应的风机风量分别为

24 000、20 000、24 000 m^3/h 。

2 仿真分析

2.1 参数设置

采用 CFD 方法进行流体仿真,流动介质选择空气,湍流模型选择 Realizable $k-\epsilon$ 模型,设置边界条件:3 个排风口选择出口体积流量,分别设置为 6.67、5.56、6.67 m^3/s ,其余开口均为进风口,都设置为环境压力,初始网格级别设为 3,打开高级通道细化选项,网格总数为 229 596。

2.2 仿真结果

喷粉室内空气流动迹线如图 2 所示,空气从室体四周开口处流入室体内部,经过底部排风管道,最后从 3 个主排风口流出。室体内部大部分区域的风速小于 1 m/s,且自上而下逐渐增加,与预期相符。需要注意的是,在室体前后方向,空气流场呈现出显著的不均匀性。大部分空气都从靠近主排风管的近端直接流出了,远端的排风量都很小,这就意味着在这些区域内的粉末很难被排走,容易滞留在室体内部,增加爆炸风险。

对风速分布进行量化分析,提取底部条缝式排风口中心的风速,风速分布曲线如图 3 所示。

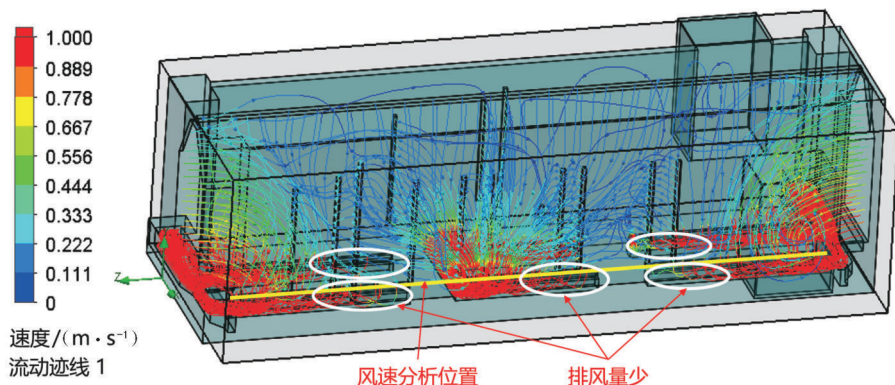


图 2 喷粉室空气流动迹线

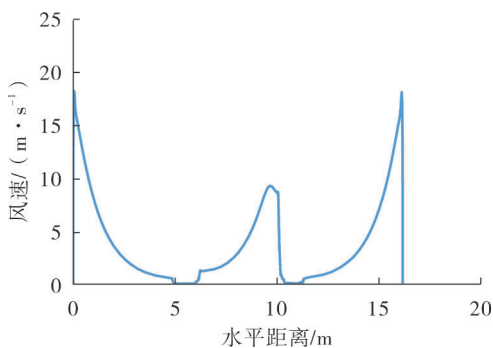


图 3 条缝式排风口中心的风速分布曲线

风速不均匀性十分显著,前后端排风口的风速分布基本呈镜像,都呈现出自外侧向内侧的单调递减趋

势,风速极大值约为 18.3 m/s,极小值约为 0.5 m/s,相差超过 35 倍。中间条缝的风速差值也不小,极大值约为 9.3 m/s,极小值约为 1.0 m/s。主要原因在于排风管近端已经排走了足量的空气,远端无法形成足够的负压,因而空气流速较小。

根据国标的要求,考察喷粉室各开口面的风速分布,如图 4 所示。喷粉室进出口的风速明显高于中间其他开口面的风速,进出口底部最大风速超过了 1 m/s,这是因为主排风管的位置就在出入口下方,进出口底部空气直接通过排风管近端排出。提取各开口面的平均风速,如图 5 所示。进出口平均风速为 0.56 m/s,自动喷枪和输送链开口槽的平均风速为 0.42 m/s,仅为

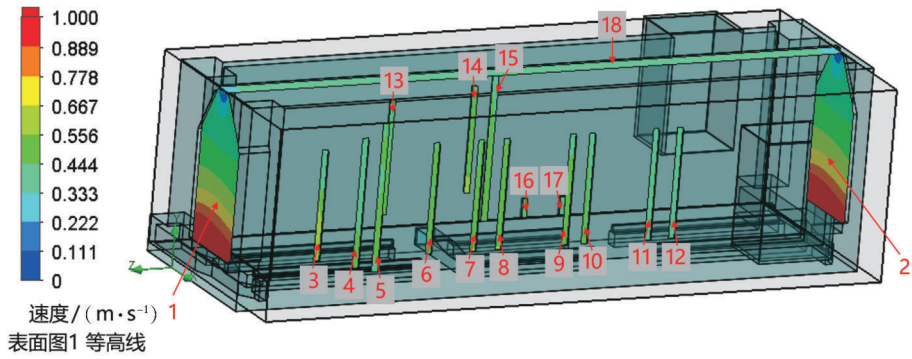


图4 喷粉室开口风速分布云图

进出口平均风速的75%。这意味着室体内部的粉末更有可能从左右两侧的自动喷枪开口槽逸出。将风速统计的标准差与平均风速之比定义为风速的不均匀程度,可以计算得到原设计的开口面风速均匀性为86.3%。

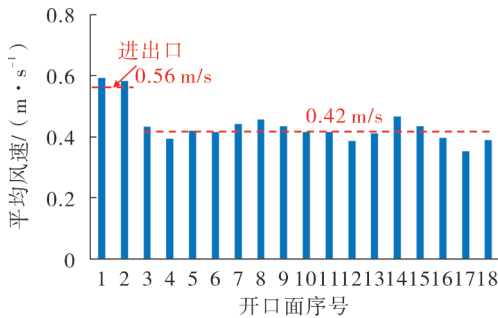


图5 开口面平均风速

2.3 结构优化

基于上述流场分布特征,进一步探究条缝式排风口宽度对风速均匀性的影响。将排风口宽度从100 mm(原设计)减小至50 mm和25 mm,对比排风口的风速分布情况,如图6所示。随着条缝宽度的减小,平均风速显著增加且变得均匀。当条缝宽度为50 mm时,风速极大值约为16.8 m/s,极小值约为2.8 m/s,相差6倍。当条缝宽度为25 mm时,风速极大值约为14.1 m/s,极小值约为9.0 m/s,相差不到2倍。像这种风速大且相对均匀的排风,意味着在喷粉室内部可以形成整体下沉气流,减少粉末悬浮带来的风险,同时也可以减少喷粉室地面的积粉。

理论上,进一步减小条缝宽度可以继续提高风速及其均匀性,但是考虑到设备安装和生产过程中可能发生的异物堵塞及清理便利性问题,将25 mm作为最终的排风口设计宽度。

对比喷粉室3种状态下的各开口面风速,如图7所示。随着条缝式排风口宽度的减小,所有开口面的平均风速变得更加均匀,进出口平均风速从0.59 m/s减小到0.54 m/s,自动喷枪开口槽平均风速从0.42 m/s

增加到0.47 m/s,风速均匀性提高至94.3%,有利于减少粉末从喷枪开口槽处外逸的可能性。

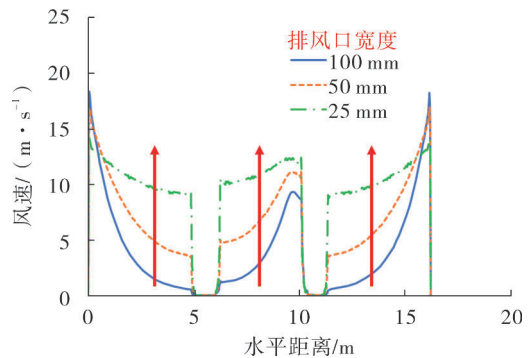


图6 不同条缝式排风口宽度时的风速分布曲线

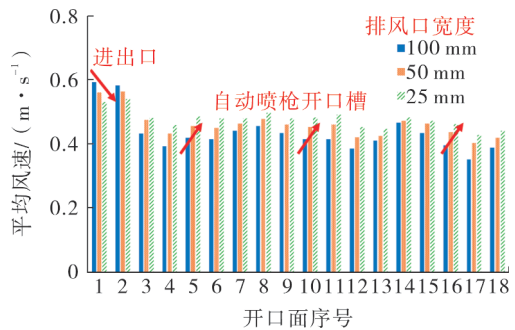


图7 不同条缝式排风口宽度时的开口面平均风速

仿真结果表明,减小喷粉室内部条缝式排风口的宽度是一种有效的结构优化手段,不仅可以提高喷粉室内部气流的均匀性,减少内部粉末滞留问题,还可以使得室体各开口面的风速更加均匀,减少粉末外逸可能性。

3 测试结果

根据优化后的喷粉室结构,在项目现场搭建了一套粉末喷涂设备,包含喷粉工艺所需的所有主体设备,包括喷粉室、往复机及喷枪、输送链、供粉装置、大旋风、后过滤和电气控制系统等。

打开所有后过滤风机,采用风速仪测量室体不同开口位置的风速。风速仪选用艾沃斯 H8 型风速仪进行数据采集,量程 0.4~30.0 m/s,分辨率 0.01 m/s,精度 $\pm 2\%$ 。对每个开口面(序号与图 4 对应)进行测量,每个位置测量 3 次取平均值来消除测量误差,结果如表 1 所列。可以看到,喷粉室所有开口面的平均风速较为均匀,在 0.39~0.65 m/s 之间,满足国标要求,风速均匀性为 88.4%,比室体结构优化前的风速均匀性更好。

表 1 室体开口风速测试结果 m/s

序号	测试点 1	测试点 2	测试点 3	平均风速
1	0.54	0.68	0.74	0.65
2	0.47	0.55	0.81	0.61
3	0.48	0.54	0.58	0.53
4	0.63	0.39	0.48	0.50
5	0.43	0.36	0.38	0.39
6	0.40	0.49	0.59	0.49
7	0.46	0.56	0.59	0.54
8	0.63	0.56	0.62	0.60
9	0.39	0.68	0.47	0.51
10	0.31	0.54	0.64	0.50
11	0.48	0.32	0.59	0.46
12	0.71	0.56	0.48	0.58
13	0.52	0.59	0.74	0.62
14	0.40	0.63	0.41	0.48
15	0.53	0.57	0.62	0.57
16	0.39	0.55	0.65	0.53
17	0.56	0.48	0.67	0.57
18	0.56	0.45	0.57	0.53

4 结语

本文建立了喷粉室的三维模型,基于 CFD 仿真方法,分析了室内空气流动特征,对比了不同参数条件下的风速均匀性,优化后的条缝式排风口宽度为 25

mm,并现场实测进行了验证。

1)原设计排风管道的条缝宽度过大,造成内部风速分布严重不均,致使排风口远端风速较小容易积粉,且自动喷枪开口槽的平均风速较小,有逸粉的风险。

2)减小条缝式排风口的宽度是一种有效的结构优化手段,通过将宽度从 100 mm 减小至 25 mm,提高了喷粉室内部排空气流场均匀性,室体各开口面的风速均匀性也从 86.3% 提高到 94.3%,减少了内部积粉和粉末外逸可能性。

3)现场实测结果与仿真结果较为吻合,验证了仿真模型的准确性,为喷粉室体的优化设计提供了参考。

本文的优化设计是基于特定项目的喷粉室结构开展,对于外形尺寸与本文有明显差异的室体,结论的普适性有待进一步验证。此外,文中未考虑喷枪及工件运动对喷粉室内流场的影响。

参考文献:

- [1] 中国涂料工业协会粉末涂料涂装分会.2023 年中国粉末涂料市场回顾及 2024 年发展展望[J].中国涂料,2024,39(4):14-17.
- [2] 吴士定,范德付,邹永丰.粉末喷涂在专用车行业的应用[J].涂料工业,2022,52(7):74-80.
- [3] 吴向平,宁波,李馨,等.我国粉末涂料与涂装行业运行分析[J].涂层与防护,2025,46(2):36-43.
- [4] 郑毅,崔昭霞.粉末静电喷涂技术及设备的发展与应用[J].现代涂料与涂装,2018,21(3):24-28.
- [5] 高晓娟,李月林.大型零件粉末涂装的应用现状与发展趋势[J].化工管理,2023(13):76-78.
- [6] 奉华,袁园,李钊.粉末喷涂在工程机械行业的应用分析[J].现代涂料与涂装,2022,25(8):54-56.
- [7] 王戈,郭鹏彬.粉末涂装逸粉问题的危害及解决[C].第十届中国科协年会科技创新与工业强市战略论坛论文,2008.
- [8] 金海陆,杨玉敏,王占永,等.用 Fluent 软件优化喷粉室结构、模拟流场状态[J].材料保护,2013,46(6):66-68. ◆



欢迎订阅

欢迎投稿

欢迎刊登广告