

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.06.002

油漆喷涂有害气体真空回收罩设计与试验分析

龚伟兵¹, 翁海龙¹, 韦志超², 陈正文², 于振华³

(1. 舟山中远海运重工有限公司, 浙江 舟山 316131; 2. 通用机械关键核心基础件创新中心(安徽)有限公司, 安徽 合肥 230031; 3. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对船体喷涂作业中产生污染气体挥发物毒性大、扩散性强、回收功能不完善等问题,文章研究设计了一种双层回收罩的真空回收装置。该装置包含一个关键的真空管道回收漆雾结构,利用负压在合适区域内不破坏喷射射流的形状下回收有毒漆雾粒子。对漆雾粒子的运动和受力进行理论计算,并对双层回收罩的结构进行初步设计,选择了合适的风机。利用计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)数值模拟中的可变形部件模型(deformable parts model,DPM)算法来模拟漆雾粒子在真空环境中的运动。通过数值模拟计算,确定双层回收罩轴向长度500 mm和真空管道到喷涂表面100 mm为最佳设计方案。结果表明:不同的控制变量(如漆雾粒子直径、漆雾粒子喷射角度、漆雾粒子喷射速度及真空管道抽气速度等)对漆雾粒子回收产生影响;增加喷射角度、喷射速度及真空管道抽气速度可以达到较好回收效果,喷射角度的最优值为65°左右;采用真空回收方法可将大部分0.01 mm以上的漆雾粒子抽除,漆雾粒子在碰撞后发生破碎。采用二次随机破碎模型来模拟漆雾粒子的破碎过程,发现漆雾粒子破碎后产生大量的薄雾,可适当增加风机风量来快速抽除。最后通过试验验证了仿真模拟计算的优化结果,模拟计算值和试验数据总体吻合度较好。该研究结果可为漆雾回收装置的后续优化设计提供依据和参考。

关键词:油漆喷涂;真空回收装置;设计;气体挥发物

中图分类号:TE991.1

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)06-0729-10

Design and experimental analysis of a vacuum recovery device for harmful gases in paint spraying

GONG Weibing¹, WENG Hailong¹, WEI Zhichao², CHEN Zhengwen², YU Zhenhua³

(1. COSCO Shipping Heavy Industry(Zhoushan) Co., Ltd., Zhoushan 316131, China; 2. General Machinery Key and Core Basic Components Innovation Center(Anhui) Co., Ltd., Hefei 230031, China; 3. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract:In response to the problems of high toxicity, strong diffusion, and incomplete recovery function of volatile pollutants generated during ship spraying operations, this paper studies a vacuum recovery device with a double-layer recovery hood. The device includes a key vacuum pipeline for recovering paint mist, which utilizes negative pressure to recover toxic paint mist particles in a suitable area without damaging the shape of the jet. Theoretical calculations were conducted on the motion and force of paint mist particles, and a preliminary design was carried out for the structure of the double-layer recovery hood, as well as the selection of a suitable fan. The deformable parts model(DPM) algorithm in computational fluid dynamics(CFD) numerical simulation was used to simulate the motion of paint mist particles in a vacuum environment. Through numerical simulation calculations, it is determined that the optimal design scheme is a double-layer recovery hood with an axial length of

收稿日期:2025-12-16;**修回日期:**2026-03-09

基金项目:中央引导地方科技发展资金资助项目(2023ZY1034);中远海运重工科研资助项目(KY24ZG09-01S)

作者简介:龚伟兵(1971—),男,江苏镇江人,舟山中远海运重工有限公司高级工程师,通信作者,E-mail:gong.weibing@coscoshipping.com.

500 mm and a vacuum pipeline to spray surface of 100 mm. The simulation results also indicate that different control variables, such as paint mist particle diameter, spray angle, spray velocity, and vacuum pipeline pumping speed, all have an impact on paint mist particle recovery. Increasing the spray angle, spray velocity, and vacuum pipeline pumping speed can achieve better recovery results. A spray angle of around 65° is the optimal value. The vacuum recovery method can remove the vast majority of paint mist particles larger than 0.01 mm. Paint mist particles shatter after collision. The quadratic random fragmentation model was used to simulate the fragmentation of paint mist particles, and it was found that a large amount of mist was generated after the fragmentation of paint mist particles. The fan airflow could be appropriately increased to quickly remove it. Finally, the optimization results of the simulation calculation were verified through experiments, and the simulated values agreed well with the experimental data. This study can serve as a reference for the subsequent optimization design of paint mist recovery devices.

Key words: paint spraying; vacuum recovery device; design; gas volatiles

船舶行业蓬勃发展,但船舶涂装作业中产生的有毒漆雾易挥发扩散到空气中,对工人的健康构成威胁,扩散到码头及海洋环境,导致生态污染。漆雾不能有效回收,不仅会对排放指标产生负面影响,还会吸附到漆膜上影响涂装质量^[1-2]。因此有必要研究满足排放要求的漆雾回收技术。传统的漆雾回收采用过滤、静电吸附等^[3-4]方法,但这些方法在面对高浓度漆雾时易出现堵塞、回收效率下降等问题。

真空回收技术是一种新兴的方法,通过在喷涂区域形成低压环境,提高漆雾的收集效率,同时减少污染物扩散。喷涂过程中,涂料从喷嘴雾化并高速射向目标表面,部分涂料颗粒在撞击表面后发生反弹和飞溅,以一定的初速度进入负压作用下的气流中。真空回收技术的原理是使这些颗粒被设计的真空力所俘获,引向真空排气口,从而实现漆雾回收的功能。目前,为改善回收质量,学者们从真空回收喷涂机理、优化真空回收装置结构和喷涂参数的角度对真空回收喷涂流场进行深入研究。文献[5]通过仿真揭示了压力与喷涂效果的量化关系;文献[6-7]在船舶漆雾处理中使用风机进行真空气体回收,探讨了工程原理和技术指标;文献[8]研究球形的回收罩结构,从回收罩的球形参数和喷射参数(颗粒大小和速度)等因素对漆雾回收流场的影响,得到了影响漆雾分布的主要结构和工作参数,并确定最优直径方案,相关分析如图 1 所示;文献[9]提出双层回收罩的结构,将喷涂和回收在同一个罩内进行,研究漆雾的气体分布和泄漏情况,设计了挡板、改善真空管倾斜角度、圆筒形回收罩等方法改善回收罩的真空环境以有利于漆雾回收,示意图如图 2 所示。以

上研究对喷漆作业在具体工况下的漆雾回收装置有指导意义。但是当前对真空回收装置的研究存在以下不足:① 需要对真空回收环境下的工作条件进行优化,如确定最佳的真空负压值、漆雾粒子的喷射最优角度等影响因子;② 缺乏对线型喷嘴喷射漆雾回收装置的研究^[10]。大多数是针对圆锥型喷嘴的喷射射流的仿真模拟研究,相应的回收装置设计也为回转体。而线型喷嘴喷射具有高效、均匀的喷涂效果,目前在涂装作业生产等众多领域得到了广泛应用。因此,设计一种能提升作业效率与安全性的线型喷涂漆雾回收装置,成为当前的迫切需求。

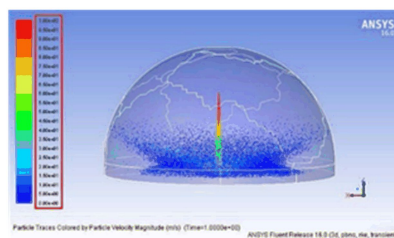


图 1 球形回收罩漆雾回收粒子分析图

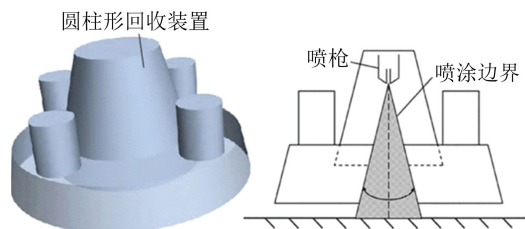


图 2 圆柱形回收罩漆雾回收示意图

本文针对线型喷嘴形成射流喷涂船体表面及对应漆雾的真空回收装置,提出将原有圆柱形或球形回收罩改为矩形回收罩,根据线型喷射射流

的形态设计漆雾回收罩结构,使喷射射流在回收罩内不被干扰,适合的漆雾粒子真空回收空间有助于提高回收能力,使回收罩内的流场满足漆雾回收作业要求。因此,为探索回收罩空间内真空环境下漆雾粒子的回收效果,揭示回收罩内部真空环境下漆雾粒子的分布可视形态,本文采用模拟仿真和试验验证2种方法,分析漆雾粒子在矩形回收装置内部气流场的运动,并通过漆雾回收试验,验证矩形回收罩的优化结构尺寸以及回收工作性能。本文以气体传输漆雾粒子量为基准,确定了初始回收罩空间以及风机选型,建立计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)模型,对回收罩内部流场进行数值模拟和研究,分析影响漆雾粒子被抽除回收效率的因素,包括漆雾粒子直径、漆雾粒子喷射速度、漆雾粒子喷射角度和真空管道抽气速度等变量,确定回收罩内部的最优工作条件和关键参数。

1 理论分析

目前,颗粒的流场分析主要采用欧拉法和拉格朗日法,从喷嘴喷出的漆雾射流大多采用后者,即追踪粒子轨迹的拉格朗日法。文献[7]采用拉格朗日法建立漆雾粒子冲击方程,研究漆雾粒子的射流特性;文献[11]采用拉格朗日多相流模型,求解颗粒的动量守恒方程来描述颗粒动量的变化情况,证明了拉格朗日法在该领域的成功应用。本文采用拉格朗日法来追踪漆雾粒子,首先确定每个漆雾粒子在不同时刻及位置的物理量,通过拉格朗日积分求解漆雾粒子的作用力,然后进一步求解漆雾粒子的轨迹。

漆雾粒子在真空环境中会受到重力、真空曳力和浮力的作用,因此漆雾粒子的作用力平衡方程在笛卡尔坐标系下的表达式^[12]为:

$$\frac{du_k}{dt} = \frac{\rho_f C_d |u - u_k| (u - u_k) A_k}{2m_k} + \left(\frac{\rho_k - \rho_f}{\rho_k} \right) g \quad (1)$$

其中: u_k 为漆雾粒子速度; ρ_f 为气流密度; u 为气体速度; C_d 为曳力系数; A_k 为漆雾粒子投影面积; m_k 为漆雾粒子质量; ρ_k 为漆雾粒子密度; g 为重力加速度。

漆雾粒子的 C_d 由漆雾粒子的雷诺数 Re 决定,漆雾粒子雷诺数可以反映漆雾粒子在流场中的运动状态。两者的计算公式如下:

$$Re = \frac{\rho d_k |u - u_k|}{\mu} \quad (2)$$

$$C_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re} \quad (3)$$

其中: d_k 为漆雾粒子直径; μ 为漆雾粒子动力黏度; a_1 、 a_2 、 a_3 均为常数^[13]。

漆雾粒子在真空环境的流场中所受的曳力与漆雾粒子的曳力系数密切相关,其表达式为:

$$F_d = \frac{\rho_f C_d |u - u_k| (u - u_k) A_k}{2} \quad (4)$$

根据拉格朗日法获得的积分方程(1)~(3),求解计算每时刻的粒子轨迹,得到漆雾粒子的轨迹方程,以 x 方向为例,其方程为:

$$x_{p,n+1} = x_{p,n} + \Delta t u_{k,n+1} \quad (5)$$

随气流喷射的漆雾粒子在真空环境中被真空管道抽吸,大多数运动轨迹应该在回收罩内不外溢并尽量靠近真空管道出口。因此,以获得漆雾颗粒轨迹为基础,设计一个真空回收装置将有助于提升漆雾粒子的回收性能,具体设计流程如图3所示。通过计算真空环境下 t 时刻的漆雾颗粒的位移坐标,界定漆雾粒子的逸出边界,使设计的真空回收罩能够最大程度捕获到漆雾粒子,并在真空环境下将其进行吸附回收。

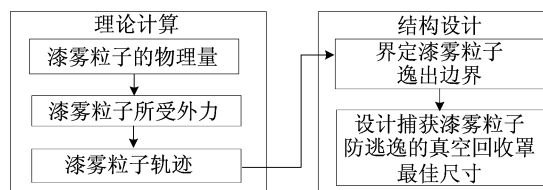


图3 漆雾颗粒真空回收装置设计流程

2 回收过程

2.1 基于真空回收技术的双层回收罩装置设计

基于上述理论,本文提出了利用管道连接风机和漆雾喷射区域,创造真空环境,将从无气高压喷嘴喷出的射流挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)在负压流场的影响下流向真空管^[14],装置框架如图4所示。由图4可知,漆雾回收装置的框架结构主要包括喷嘴、真空回收管道、漆雾双层回收罩、回收操控机构和离心风机。离心风机由电机驱动,带动电机轴,驱使蜗壳里的叶轮旋转,将漆雾粒子进行输送。漆雾回收装置作业时,从喷嘴喷出的油漆在空气中产生挥发性气体(漆雾),漆雾粒子经真空回收管道、离心风机排风管道输送至过滤装置中。回收罩壳边缘距离喷射表面一般为20~100 mm。变频器装置控制离心风机的转速,使转速逐渐升高。离心

风机启动后,在回收罩壳与喷涂表面之间的空间内外形成压差,随着离心风机转速和风量的增加,空间内部的气流速度超过漆雾粒子喷射速度时,漆雾粒子就被空气气流卷起,并向真空管道移动。最终,漆雾粒子到达真空管道的出口。漆雾粒子经过真空管道的排气口后,进入离心风机,在叶轮叶片旋转和气流的作用下,再通过过滤器与风机连接管道进入过滤装置。

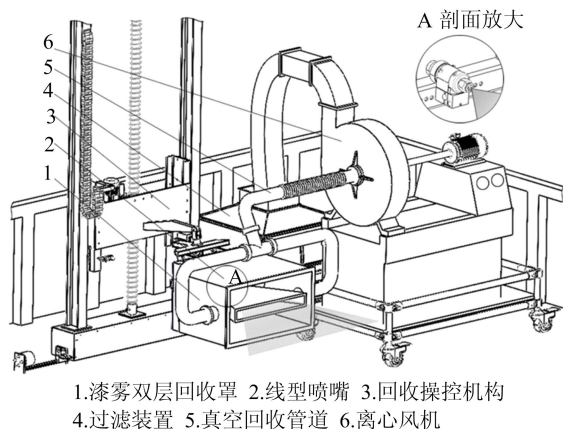


图4 漆雾粒子回收装置框架

2.2 回收装置关键参数

漆雾粒子回收过程示意图如图5所示。油漆射流在喷射过程中雾化形成漆雾粒子,漆雾粒子受到气流推力、自身重力和真空力的作用。漆雾粒子以速度 u_k 在流场中运动,气流的推力由喷嘴的喷射角度和气流速度决定,真空力则取决于离心风机的功率、真空管道的大小和位置。

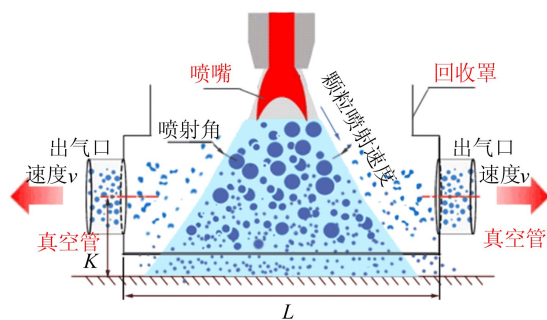


图5 回收过程示意图

漆雾回收罩被设计为双层,喷嘴射流在内层罩壳的保护下隔离真空环境。双层回收罩的喷涂空间需要保证回收罩内的空气始终流向内部,因此应合理设计回收罩空间尺寸。如果回收罩尺寸过大,就会增加能量损失,需要很大的风机功率进行抽吸;若回收罩尺寸过小,则会产生极高的真空

负压,气流对喷涂过程会产生影响。因此,需要通过初步确定回收罩装置参数后再进行优化。

综合现有船舶业喷嘴喷漆的技术参数来确定漆雾回收罩的模拟工况,见表1所列。采用扇形喷涂,确定的初始方案如图6所示。回收罩分为内层和外层结构,内层结构的作用是隔离喷嘴射流和真空抽吸漆雾空间,外层结构的作用是将漆雾粒子阻拦,防止粒子外溢。真空抽吸口设置在外层结构中,目的是回收从喷嘴射流雾化的漆雾粒子,此时内层结构已隔离了射流的主体部分,真空抽吸的作用力对喷射射流的影响可以忽略。本设计建立了轴长为300 mm、真空管道中心线距离涂敷板100 mm的矩形回收罩模型。外层结构的总长(初始方案轴长 $L=300$ mm)需要被验证是否满足漆雾粒子不外溢的要求。真空管道中心线距离涂敷板的高度(初始方案 $K=100$ mm)影响真空抽吸力对漆雾粒子的抽吸效率。

表1 漆雾回收罩模拟工况参数

参数	数值
回收罩轴向长度/mm	300~700
喷射出口椭圆形口径/mm	0.5
油漆密度/(kg/m^3)	1 650
黏度/[$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]	0.006 5
真空管道中心到涂敷板的距离/mm	80~120
喷射距离/mm	300
喷射速度/(m/s)	30~50

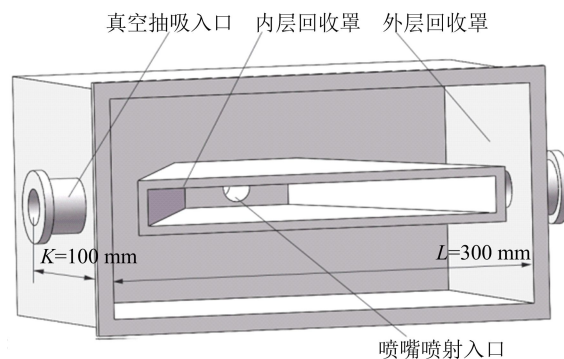


图6 回收罩三维模型以及初始方案主要优化尺寸

2.3 风机的选择

风机的选择应该具有将漆雾粒子完全抽走的风量,否则漆雾回收罩内不能形成必要的真空负压,漆雾粒子也不能到达真空抽吸管道被顺利回收。因此,本文中风机输送所需的空气量 $Q_a = W_a / \rho_f$,其中 W_a 为单位时间内输送所需空气量,由混合物浓度比 U_s 和单位时间内输送的材料质

量 W_s 决定, $U_s = W_s / W_a$ 。油漆喷嘴喷出的流量为 0.05 kg/s , 漆雾的流量可近似为油漆喷嘴喷出流量的 $1/2$ 及以下, 预计最大的 W_s 应为 0.025 kg/s 。考虑到实际输送漆雾粒子可近似为球形, 输送条件为低真空吸引, 参考其他相关示例选择混合比 U_s 为 1.6 。因此 W_a 为 0.016 kg/s 。

风机在输送过程中, 各种实际因素都可能导导致压力下降, 即压力损失 p 。这种压力损失主要包括风机吸入漆雾粒子过程中的局部损失 p_q 和排气管道的沿程损失 p_y 。

$$\Delta p_q = \xi \frac{u^2}{2g} \quad (6)$$

$$\Delta p_y = \lambda \frac{u^2}{2g} \frac{l}{d} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Q = \varphi Q_a, \\ P = \varphi \Delta p, \\ W = \frac{QP}{3600 \times 1000 \times \eta_1 \eta_2} \end{cases} \quad (8)$$

其中: ξ 为局部损失阻力系数, 范围是 $0 \sim 1$; λ 为沿程阻力系数, 范围是 $0 \sim 1$; l 为管道的当量长度; η_1 、 η_2 分别为风机效率和机械传动效率, 分别取 $0.75 \sim 0.85$ 和 1.00 ; Q 为理论需风量; φ 为设计裕度, 取 1.2 。

根据文献[11], 漆雾回收装置的每个真空管排气速度为 $8 \sim 12 \text{ m/s}$ 比较合适, 因此, 本研究对于风机的功率计算结果如下: p_q 为 245 Pa , p_y 为 184 Pa , 理论总压损失为 429 Pa 。考虑沿程其他损失, 并保证总压增加 40% 用于回收罩清理, 则修正后的总压为 600 Pa 。按照式(8)计算得到理论风量及功率。在设计漆雾回收装置时, 计算功率可帮助了解回收装置的运行状态, 保证在满载的情况下回收罩内的最大真空负压值。

2.4 漆雾粒子破碎模型

为评估回收装置性能, 采用 CFD 来研究回收装置的回收效果。本文采用离散相模型, 在流场中引入漆雾粒子。因为漆雾粒子受到的作用力中气体曳力是最大的, 所以需要引入曳力模型计算该力。同时, 漆雾粒子在回收装置中发生随机碰撞、合并和破裂等现象, 因此引入随机次级液滴 (stochastic secondary droplet, SSD) 模型, 设置韦伯数。对于 SSD 模型, 破碎的概率与母液滴大小无关, 次级液滴大小是从 Fokker-Planck 概率分布方程的统计解中提取的, 只要是大于临界半径的液滴就会破碎分解。其临界漆雾粒子半径方程^[15]为:

$$r_c = \frac{\sigma \frac{C_F}{C_k C_d} W_e}{\rho_g u_{r,j}^2} \quad (9)$$

其中: C_F 、 C_k 、 C_d 均为匹配试验的常数; W_e 为漆雾粒子韦伯数; σ 为表面张力系数; ρ_g 为漆雾粒子密度; $u_{r,j}$ 为气体与漆雾粒子之间的相对速度。

3 CFD 模型的构建

利用 CFD 模拟确定最优回收罩结构参数, 利用 SolidWorks 三维设计软件按 $1:1$ 比例建立回收罩模型。

回收罩底部入口处参数未知, 且气流流动模式复杂, 因此建立了一个延伸区域。延伸区域的高度对结果影响较小, 设置为 30 mm , 与回收罩与喷涂表面的间隙相同。轴向长度设置为回收罩轴向长度的 3 倍, 取整为 1000 mm 。网格划分采用 Workbench 2022 R2 提供的网格划分方法, 采用非结构化网格划分。使用偏斜度网格指标评估网格质量, 最大值设置为 0.85 , 本试验进行了网格无关性验证以得到良好的数据结果。划分网格的最大单位分别为 0.050 、 0.010 、 0.008 、 0.006 、 0.004 m , 获得对应的网格数分别为 21×10^4 、 75×10^4 、 98×10^4 、 110×10^4 、 150×10^4 。通过监测双层回收罩内的轴向中心截面气流的平均速度, 进行回收罩的网格无关性验证, 结果见表 2 所列。

表 2 漆雾回收罩的网格无关性验证

网格数/ 10^4	21	75	98	110	150
回收罩内平均速度/(m/s)	7.04	7.35	7.58	7.74	7.78
误差/%	10.5	5.0	2.5	0.5	

结果表明, 网格数大于 110×10^4 以后, 回收罩内的平均速度的变化不大, 因此, 可以认为超过 110×10^4 的网格质量良好, 可以满足计算和精度要求, 并且节约计算空间。划分网格选用 110×10^4 的网格进行数值模拟, 本试验的回收罩网格图如图 7 所示。

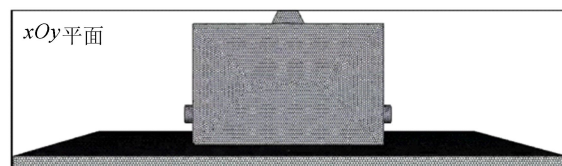


图 7 回收罩及延伸区域网格图

由于风机抽吸时回收罩内部存在压差, 产生

气流,将漆雾粒子吸入。根据文献[11],漆雾回收真空管道的排气速度设置为 1.0 m/s 比较合适,因此设定真空管道的排气速度为该值,延伸区域模拟回收装置内部是真空区域吸入外界空气的过程,延伸区域设置为压力出口。

回收罩模型的流场仿真的底部为涂装的面,其他边界条件被设置为壁面。在 Fluent 仿真过程中,本文采用三维湍流数值模拟方法,具体为雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)方法。RANS 方法的核心是求解时间平均雷诺方程,是目前应用最广泛的湍流数值模拟方法之一。本次模拟试验采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,该模型将应变率与湍流黏度计算联系起来,并能适应吸入室内不同的横截面积,因此非常适合本研究。流场的数值计算采用压力耦合方程组的半隐式方法(semi-implicit method for pressure linked equations, SIMPLE)。该方法基于求解给定压力场的动量方程的离散形式,通过迭代修正压力值来获得新的速度场,直至速度场收敛, SIMPLE 方法以其强大的稳定性、鲁棒性和广泛的适用性而著称。求解器方法简单、稳定性强、鲁棒性好、适用性广。控制方程基于格林高斯的方法,采用二阶迎风格式进行离散。仿真共进行 2 000 次迭代。

4 结果与分析

4.1 真空管道直径和风机的确定

根据 2.3 节中的参数,计算输送所需风量 Q_a 为 $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$,真空管道直径 d 为 61.8 mm。为了后续计算方便, d 取近似值为 60 mm。

根据 2.3 节中压力降计算, $Q=0.037 \text{ m}^3/\text{s}$, $P=720 \text{ Pa}$, $W=48 \text{ W}$ 。风机选型方面,试验选用 EHS-329-1 型高压风机,该风机具体参数如下:风量为 $0.040 \text{ m}^3/\text{s}$,电机功率为 0.85 kW,主轴转速为 2 840 r/min,通过变频器调速。该选型满足了回收漆雾粒子的性能要求,并能在试验过程中实现较大范围的风量调节。

4.2 油漆雾化回收

油漆喷涂液体雾化是一个在内外力作用下油漆涂料剪切破碎的过程。根据文献[16],大多数漆雾粒子的直径范围在 $0\sim 0.10 \text{ mm}$ 之间,经过设计回收方案,理想的回收效率应该达到 85% 以上,使回收后空气中的大多数粒子直径在 $15 \mu\text{m}$ 左右,达到保护空气质量和人体健康的目的。因此,本文在研究漆雾粒子破裂时,设定漆雾粒子直

径范围最大值为 0.13 mm,最小值为 0.05 mm。破碎后形成的漆雾新粒子如图 8 所示,图 8 中,红色为原有的漆雾粒子,可以发现新产生的漆雾粒子(蓝色)直径小于 0.05 mm。漆雾粒子的停留时间如图 9 所示。由图 9 可知:油漆射流未与喷涂表面碰撞前粒子直径较大,但大约 0.006 s 后漆雾粒子与喷涂表面壁面碰撞,碰撞后破碎程度加大,大量粒子直径小于 0.001 mm,而射流中外溢和碰撞反射的漆雾粒子进入到真空管道并不断地被排出,在空间中剩余的漆雾粒子直径变小。在流场中一开始引入 5 000 粒漆雾粒子,经过碰撞后粒子数量变成约 10^6 粒,其中直径小于 0.001 mm 的粒子超过 10^5 粒,表明油漆射流破碎雾化成大量的小雾滴。

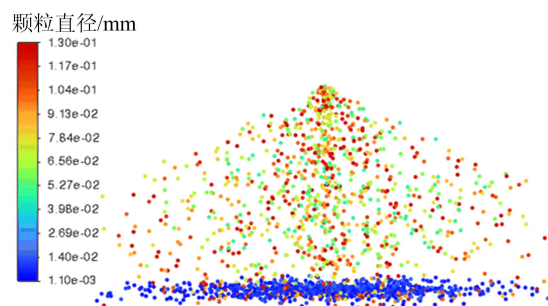


图 8 破碎漆雾粒子

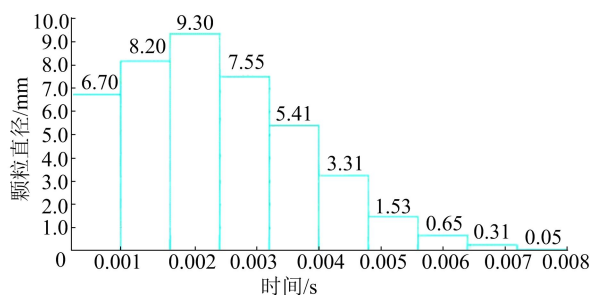


图 9 漆雾粒子停留时间

在本研究中,根据喷射出口油漆质量 m_c (粒子数乘以粒子质量)、喷射涂敷表面覆盖质量 m_t 和真空管道回收质量 m_h 得出漆雾的回收效率 η :

$$\eta = \frac{m_h}{m_c - m_t} \times 100\% \quad (10)$$

4.3 回收罩模型流场迹线

在 $z=0$ 时 xOy 截面的回收罩模型流场迹线图如图 10 所示。根据流场流速迹线的分布,将回收罩截面划分为 3 个区域,分别标记为 A、B、C,分别表示回收罩内部流场空间的上部、真空管道附近区域、喷涂表面区域。喷嘴喷出的漆雾射流沿着喷射方向速度逐渐降低,到喷涂表面时速度

接近于 0。

在回收罩 A 区域,空气气流被真空管道抽吸,形成流线,但由于内部罩子的隔离作用,喷射射流表面没有被真空管道的抽吸力影响,在靠近内部罩子区域没有流线,表明该区域没有气体流动。在 B 区域,由于靠近真空管道,流线密集,表明该处的流速较高,并且抽吸真空管道附近的漆雾粒子。在 C 区域,在喷涂表面附近,可看到该区域在喷射射流边缘产生了较小尺度的涡旋气流,气流运动较为复杂,也会向四周进行扩散飞行。总体来说,由于真空管道产生了较大的吸力,吸引了回收罩内部的漆雾粒子飞向真空管道,具有较好的流体运动特性。

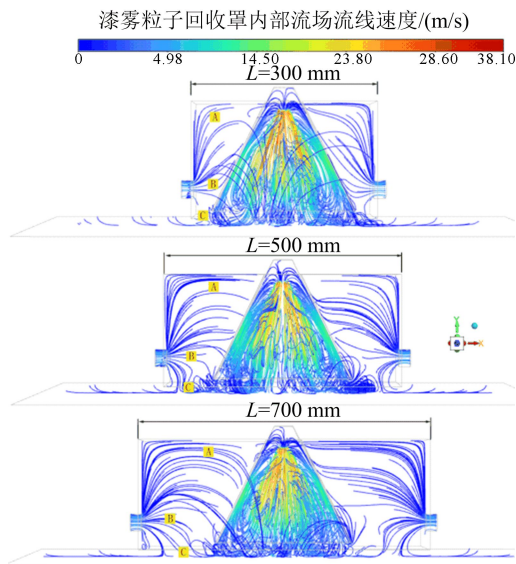


图 10 不同 L 值时回收罩 xOy 截面流线图

从图 10 可以看出,随着轴向长度的增加,实际上表示的是真空管道到喷射体距离越大,罩子越宽,代表真空负压空间越大。在轴向长度为 300 mm 时,真空管道距离喷射射流较近,由于流线不能转折,可以发现在 C 区域的气体没有及时流向真空管道入口,可能导致漆雾粒子的回收效率不高。轴向长度为 500 mm 时,真空管道到喷射体的距离合适,喷射射流主体区域外的气流流向真空管道,与 300 mm 回收罩相比,流线更密且连续性好。轴向长度为 700 mm 时,真空管道入口距离射流喷涂体较远,对气流的吸力没有 300 mm 和 500 mm 的罩子强,表现为流线稀疏,飞向真空管道入口的漆雾粒子较少。因此,可以推断在同样的真空吸力下 500 mm 轴向长度的真空管道抽吸效果是最好的。

真空管道中心到涂敷板的不同距离时回收罩 xOy 截面流线如图 11 所示。由图 11 可知,射流从内罩进入到外罩后,被真空管道的真空力捕获,漆雾粒子在此处的被吸入路径发生转折,在真空管道轴向距离不变的条件下,不同 K 值罩内流场表现变化不大。表明 K 值对罩内流场的影响不大。因此,考虑到真空管道加工及与风机连接管道安装等因素, K 为 100 mm 是较优选择。

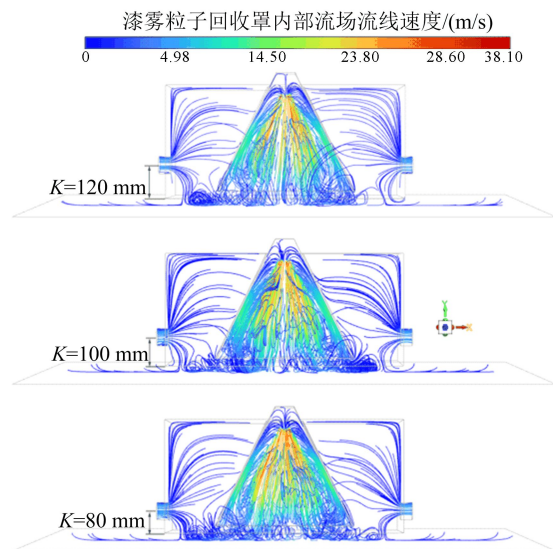


图 11 不同 K 值时回收罩 xOy 截面流线图

通过式(10)计算不同 L 值方案 and 不同 K 值的仿真模拟的漆雾回收效率,结果见表 3 所列。由表 3 可知,在相同条件下, $L=500$ mm、 $K=100$ mm 时,该漆雾回收罩的回收效率较好。

表 3 不同 L 值和 K 值的漆雾回收罩回收效率

L/mm	$\eta/\%$	K/mm	$\eta/\%$
300	63.1	120	79.5
500	83.5	100	83.5
700	76.4	80	82.7

4.4 各因素对回收效果的影响

优化回收罩结构还需了解漆雾如何产生及其在回收罩内的分布特性。喷射速度、漆雾粒子直径、喷射角度可能是影响漆雾粒子在回收罩内分布的影响因素。因此本节针对以上喷涂工艺参数,求解和模拟计算各因素对回收罩内漆雾回收效果的情况。

本文计算的工况为创建射流源后,以耦合连续相空气和离散相粒子的运动,获得漆雾粒子颗粒分布和真空管道的回收效率。保持真空环境不

变(出气口抽气速度为 10 m/s),设置 4 个喷射角度(30° 、 45° 、 65° 、 80°)和 2 个粒子喷射速度(30、50 m/s),分析 5 种不同直径(0.05、0.07、0.09、0.11、0.13 mm)颗粒回收效率如图 12 所示。

从图 12 可以看出:随着喷射角度的增加,漆雾粒子落到出气口的数量越多。但在一定角度时达到最佳回收效率,如 0.07 mm 粒径时在 65° 入射角时回收效率最大,而 0.09 mm 粒径时在 80° 被抽吸的数量最多;当真空环境即出气口的抽吸粒子的真空力保持不变、且入射角度相同时,发现并不是粒子直径越大,回收效率越高,而是在所有入射角度情况下 0.07 mm 粒径的回收效率最高,可认为一定的漆雾粒子直径对应最佳的真空管道抽吸力;对比不同的喷射速度(相同颜色线条的虚实线)可以发现,喷射速度越大,回收效率越高。但是粒子直径较大时,由于真空力对粒子的约束力相对减小,运动速度大的漆雾粒子飞往其他方向的机会增加,导致不及该直径粒子运动速度较小时的回收效率高。

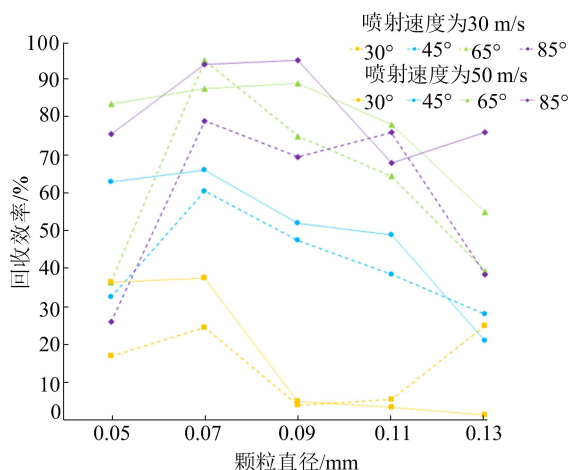


图 12 不同喷射角度对漆雾粒子回收效果的影响

保持喷射角度 45° 不变,设置 3 个不同出气口抽气速度(6、10、14 m/s)和 2 个不同颗粒喷射速度,分析 5 种不同直径颗粒的回收效率如图 13 所示。

从图 13 可以看出:随着出气口抽气速度的增加,漆雾粒子的回收效率越高,增加抽气风量对提高颗粒的回收非常有效;在所考察的粒子直径值中,粒子直径在 0.07 mm 时的回收效率最高,当漆雾粒子直径超过 0.07 mm、同样的抽气速度时,漆雾粒子落在真空回收管道的数量是下降的,说明获得直径大于 0.07 mm 颗粒的较好回收效果需要采取更多的措施;对比不同颗粒喷射速度

发现出口抽气速度较低时,所有直径的漆雾粒子喷射速度越快,回收效率越高,而随着出口抽气速度增加,不同直径漆雾粒子的回收情况变得复杂。漆雾粒子直径(超过 0.09 mm)越大,回收效率下降越快。

值得注意的是,喷射速度、漆雾粒子直径、喷射角度等参数变量由线型喷射喷嘴控制,出气口抽气速度由风机和回收装置的尺寸共同决定。因此,真空回收罩设计需要根据喷射工艺参数与回收效率的变化规律计算和设计合适的风机和真空管直径,从而实现在最优的工艺参数下提高漆雾粒子回收效率。

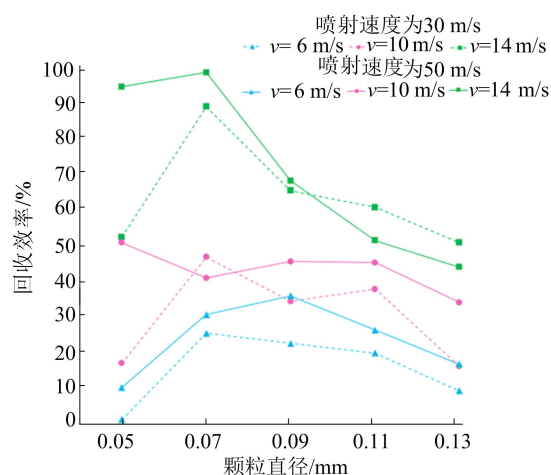


图 13 不同出气口抽气速度对粒子回收效果的影响

4.5 漆雾回收试验 VOCs 质量浓度测定与分析

为检验漆雾回收装置的可靠性和回收效果,本研究进行了验证试验。试验测试装置主要由支架、风机、变频器、喷嘴、真空管道和双层回收罩组成,如图 14 所示。使用 TZ-104K-VOC 型号的 VOC 检测仪(测量 0~0.002,精确度 $\pm 3\%$)检测漆雾中 VOCs 的质量浓度,测点位置如图 15 所示,共 9 个测量点。在仿真模拟中计算这 9 个测量点漆雾粒子中 VOCs 的质量浓度。将试验测量与仿真计算的回收罩内漆雾粒子中 VOCs 质量浓度进行比较,如图 16 所示。

测试结果显示,测试点 2 和测试点 8 在内层回收罩壁面附近,VOCs 的质量浓度显著增大,表明该测试点出现了漆雾挂壁的现象,内层回收罩附近的测试点 3 到测试点 7 的 VOCs 的质量浓度分布较为均匀。由图 16 可知,现场试验测量的 VOCs 质量浓度变化趋势和仿真模拟结果吻合度较好,总体能够满足工程的要求。由于 VOC 检测仪对漆雾流场的干扰、双层回收罩中内罩壁面

漆雾挂壁、仿真模拟流体边界条件设置形成理想化属性等因素,使得测试结果与仿真结果的偏差微小。不同测量点 VOCs 质量浓度的实测值和仿真模拟值对比分析可发现,本文利用 CFD 软件进行漆雾粒子回收罩流场数值分析是可行的,仿真结果是可用的。

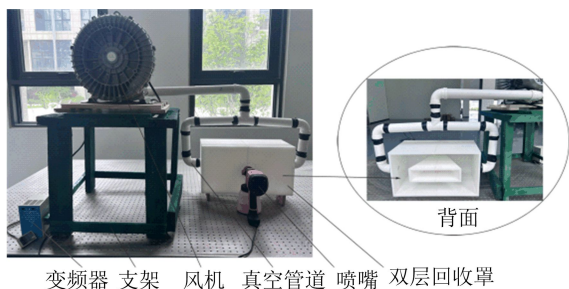


图 14 漆雾喷射回收装置试验台

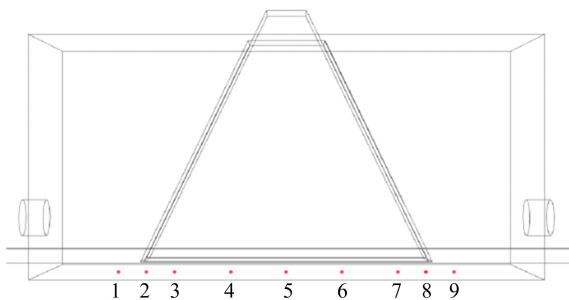


图 15 VOCs 质量浓度测试点分布

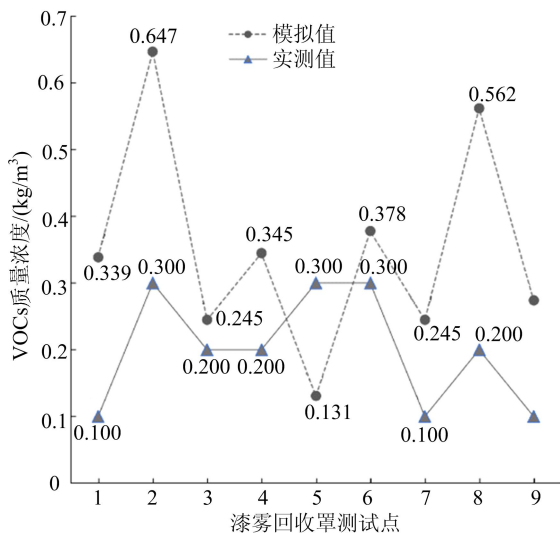


图 16 漆雾浓度模拟值与实测值对比

5 结 论

1) CFD 分析结果表明,仿真模拟计算值与试验测量值相近,说明本文采用 CFD 软件研究漆雾真空回收的方法基本正确可靠。

2) 以往针对船体外板喷涂作业的漆雾回收系统研究较少,实际作业过程一般不涉及回收处理,大量漆雾从喷嘴喷出直接逃逸到空气中,对环境造成污染。基于此,本研究设计了一种针对线型喷嘴喷射有毒漆雾的矩形回收装置,布置在喷枪喷嘴的前部,以解决船舶涂装作业中油漆喷涂漆雾污染问题,如图 17 所示。

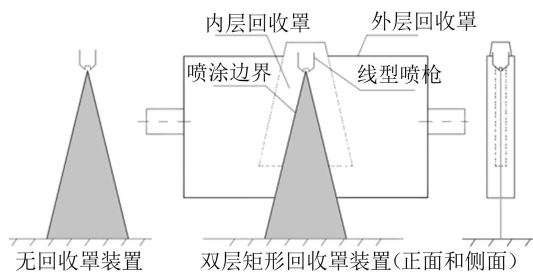


图 17 线型喷嘴喷涂有、无回收罩对比

该回收装置是一种双层回收罩的结构,设计的目的是实现线型喷嘴在内层回收罩内不受干扰的喷射油漆到船板,而喷涂过程产生的有毒漆雾通过外层回收罩中的真空管道进行回收,这种结构应用于线型喷嘴喷涂的漆雾回鲜有相关报道。双层矩形漆雾回收装置的回收效率较好,通过优化结构尺寸等措施可以达到 80% 以上,对比当前同类型但不同结构的圆柱形有毒颗粒尾气回收装备,文献[6]中的圆柱形回收装备的回收效率为 80%。对比发现,本研究的矩形回收装备的回收效率略有提高,经过计算,本研究设计的矩形回收装备最大回收效率提高了 1% 左右。这表明较高的回收效率可显著减少喷涂过程中逸出的漆雾对环境的影响,满足工程应用的需要。线型喷涂与圆嘴喷涂相比,减少了往复喷涂的次数,并减轻了爬壁机器人轨迹计算复杂程度,涂敷效果更均匀、效率更高。本研究针对线型喷嘴喷涂研究的漆雾回收装置在回收效率上达到了较高的水平。因此研究线型喷嘴喷涂的漆雾回收具有重要意义。此外,不同于圆柱形回收罩回转体结构,本研究设计的漆雾回收罩具有较大的长宽比(回收罩的轴向长度与宽度之比),这使得相同轴向长度下油漆喷涂和矩形回收集成装置结构尺寸更小,在船舶喷涂中可以节省空间,灵活作业,提高喷涂效率。

3) 本文研究了影响双层回收罩回收效果的轴向长度和真空管道到涂敷表面高度这 2 个关键尺寸,设计了不同双层回收罩的方案。首先,通过计算真空环境下各时刻漆雾粒子的位移坐标,界

定了漆雾粒子的逸出边界;其次,设定 3 种轴向尺寸方案和 3 种真空管道中心到涂敷板高度,对该结构尺寸双层回收罩模型进行喷射射流仿真分析。模拟过程发现,以最接近计算逸出边界的 300 mm 轴向长度为例,流速紊乱和较大漆雾动能使回收效果较低。进一步研究发现,将 300 mm 的漆雾回收罩长度延长至 500、700 mm 时,相同风量下的漆雾回收效率分别提高约 31%、20%。对于真空管道中心到涂敷板高度尺寸,80 mm 是最接近垂直方向逸出边界的尺寸,然后依次增加 20 mm 设定真空管道中心到涂敷板的高度尺寸,研究表明,该对漆雾动能和回收罩空间风速影响较小,因此 3 种尺寸模拟结果流场变化区别不大,回收效率基本保持一致。考虑到加工和结构强度等实际因素,100 mm 的高度尺寸较为合适。因此,500 mm 的轴向长度和 100 mm 的真空管道到涂敷表面的高度是最优方案。

4) 本文研究了线型喷嘴喷漆的双层回收罩回收过程中喷射颗粒直径、喷射角度、喷射速度以及真空管的抽气速度等因素对回收效率的影响。研究结果表明,为提升漆雾的回收效果,可以通过增加喷射角度、喷射速度以及真空管的抽气速度来达到目的。喷涂角度不宜太小,也不宜太大,65°左右是最优的选择,可获得尽可能大的喷涂范围,漆雾粒子落在抽吸管道的数量也足够多。本文中设置的真空管道出口抽气速度可以获得足够的真空力将 0.1 mm 范围内的漆雾粒子进行回收,进而减小其对环境 and 人体健康的危害。通过对线型喷嘴喷漆的双层回收罩中漆雾粒子回收的优化条件分析,获得各影响因素的最优值,这对该回收技术应用在船舶涂装作业提供了一定指导。此外,从节约能源的角度考虑,真空管的抽气速度在保证良好回收效果的同时不宜再增加,否则会破坏喷射射流的形态,影响喷涂效果。当漆雾粒子破碎为微米级别的漆雾粒子时,颗粒回收需要更大的真空负压环境。因此射流喷涂雾化程度越高其真空回收装置设计需要考虑更大功率风机,否则小雾滴的回收效果不会太理想。

参 考 文 献

[1] 熊元元,陈东,朱雨雷,等.带回收装置的全自动智能化环保型喷漆机器人[J].造船技术,2024,52(4):48-51.

- [2] 孟顺,宫好奇,杨文韬,等.基于反扩散燃烧的 CH_4 燃烧特性及 NO_x 排放的数值研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2024,47(10):1328-1334.
- [3] LI Y P, YI Z Y, LIN Y, et al. The basic functional design of wall climbing robot for hull plate spraying in dock[C]//2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). Shanghai: IEEE, 2017: 89-93.
- [4] 薛胜雄,任启乐,陈正文,等.磁隙式爬壁机器人的研制[J].机械工程学报,2011,47(21):37-42.
- [5] 衣正尧,林焰,隋江华,等.船舶外板拖涂爬壁机器人设计[J].机床与液压,2020,48(5):54-58.
- [6] YI Z, MI S, TONG T, et al. Simulation analysis on flow field of paint mist recovery with single nozzle for ship outer panel spraying robot[J]. Coatings, 2022, 12(4): 450.
- [7] 衣正尧,朱嘉晟,杨天慈,等.爬壁式船舶工业机器人研究进展分析[J].船舶工程,2025,47(9):181-190.
- [8] YE Q, DOMNICK J. Analysis of droplet impingement of different atomizers used in spray coating processes[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2017, 14(2): 467-476.
- [9] HUANG S, LIU W, WU X, et al. Optimization design of a recovery system for an automatic spray robot and the simulation of VOC recovery[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(4): 552.
- [10] 于永庆,曾勇.圆锥面圆截线路径的多变量喷涂轨迹优化[J].机械设计与制造,2022(10):295-298,304.
- [11] 刘鹤,杨云峰,黄硕,等.船舶涂装 VOCs 回收装置的流场仿真及优化[J].船舶工程,2024,6(8):117-125.
- [12] GOROKHOVSKI M, CHTAB-DESORTES A, VOLOSHINA I, et al. Stochastic simulation of the spray formation assisted by a high pressure[C]//AIP Conference Proceedings. [S. l. : s. n.], 2010: 66-73.
- [13] YOO Y L, HAN D H, HONG J S, et al. A large eddy simulation of the breakup and atomization of a liquid jet into a cross turbulent flow at various spray conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 112: 97-112.
- [14] 许伟,曾亿山,燕浩.新型粉罐车流化床气室和气道结构参数研究与结构优化[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(6):743-752.
- [15] APTE S V, GOROKHOVSKI M, MOIN P. LES of atomizing spray with stochastic modeling of secondary breakup[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29(9): 1503-1522.
- [16] ZHOU Y, HE X, LI W, et al. Separating paint mist from paint spraying waste gas: mechanism, model and application[J]. Environmental Engineering Research, 2021, 26(5): 200464.

(责任编辑 吴 亮)