

圆弧面空气喷涂的喷雾流场特性

陈雁, 陈文卓, 何少炜, 潘海伟, 黎波, 张伟明

(陆军勤务学院 油料系, 重庆 401331)

摘要: 针对喷涂成膜气液两相流动过程, 采用欧拉—欧拉法建立喷涂成膜模型, 模型包括喷雾流场模型和撞击粘附模型。采用非结构化网格划分控制域求解。对比分析表明, 圆弧面静态周向喷涂喷雾流场形状与平面喷涂喷雾流场形状基本相同, 轴向喷涂喷雾流场形状与平面喷涂喷雾流场形状有较大的区别。周向喷涂圆弧面时, 喷锥宽度和液相碰撞角度受形面影响较小。轴向喷涂圆弧面时, 外壁喷涂喷锥宽度大于平面喷涂喷锥宽度, 喷锥边缘区域液相与壁面碰撞角度很小; 内壁喷涂喷锥宽度略小于平面喷涂喷锥宽度, 整个喷锥内液相与壁面始终保持较大的碰撞角度。试验证实喷涂成膜模型用于研究喷雾流场特性是可行的。

关键词: 圆弧面; 喷雾流场; 两相流; 计算流体力学

中图分类号: TG174.442; O35

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)06-0122-10

Spray Flow Characteristics of Painting Cylindrical Surface with a Pneumatic Atomizer

CHEN Yan, CHEN Wen-Zhuo, HE Shao-wei, PAN Hai-wei, LI Bo, ZHANG Wei-ming

(Petroleum Department, Army Logistics University, Chongqing 401331)

Abstract: The Euler method was used to describe the two-phase spray flow by establishing a paint deposition model consisting of a spray field flow model and impinging and sticking model. Unstructured meshes were generated for the control domain to solve the model. By comparison, the static spray flow field of circumferentially painting the cylindrical surface is nearly the same with that of painting flat, while that of axially painting cylindrical surface is different from that of painting flat. When circumferentially painting the cylindrical surface, the shape aspect has slight influence on the spray cone width and liquid impinging angle. When axially painting the cylindrical surface, the spray cone width resulted from painting on the exterior is larger than painting the flat, and the impinging angle between the liquid and the surface in the edge of the spray cone is very small. The spray cone width resulted from painting on the interior is slightly smaller than painting the flat, and the impinging angle between the liquid and the surface in the spray cone is big. Experiments verified the feasibility of the model in this paper.

Keywords: arc surface; spray flow; two-phase flow; computational fluid dynamics

0 引言

目前机器人喷涂在机械、汽车、航空、石化、家电、家具等行业大量应用^[1-3]。其中圆弧面是空气喷涂中的一种常见形面。圆弧面对喷雾流场有较大影响, 从而影响涂层厚度均匀性、涂料利用

率和工艺环保性等。研究圆弧面喷雾流场特性对揭示其成膜机理及规律和改进喷涂工艺及设备具有重要意义及工程价值。

随着计算流体力学及大型软件的发展, 利用计算流体力学已能对复杂流场进行深入分

收稿日期: 2017-05-23; 修回日期: 2017-10-26

网络出版日期: 2017-11-10 13:09; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20171110.1309.002.html>

通讯作者: 陈雁(1972—), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 喷涂机器人及军事装备理论与技术; **E-mail:** yansohucom@sohu.com

基金项目: 国家自然科学基金(51475469); 中国博士后科学基金(2012M512093)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51475469) and China Postdoctoral Science Foundation (2012M512093)

引文格式: 陈雁, 陈文卓, 何少炜, 等. 圆弧面空气喷涂的喷雾流场特性[J]. 中国表面工程, 2017, 30(6): 122-131.

CHEN Y, CHEN W Z, HE S W, et al. Spray flow characteristics of painting cylindrical surface with a pneumatic atomizer[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(6): 122-131.

析。Hicks 等^[4]、Fogliati 等^[5]、刘国雄^[6]、Ye 等^[7-8]、Toljic 等^[9]和 Osman 等^[10]利用欧拉-拉格朗日法建立喷涂模型研究了平面喷涂的喷雾流场。该方法详细对单个液滴运动进行跟踪和计算,但对于描述喷雾流场中大批量的涂料液滴的流动非常困难。杨庆功等^[11]和陈雁等^[12]采用欧拉-欧拉法研究平面喷涂的喷雾流场,该方法可有效解决欧拉-拉格朗日法研究中存在的问题。目前未见文献对圆弧面空气喷涂的喷雾流场特性进行详细研究。

文中采用欧拉-欧拉法建立喷涂成膜模型,对比分析了圆弧面不同喷涂方式的静态喷涂喷雾流场的喷雾流场形状、喷锥宽度和液相碰撞角度特性,并得到了圆弧面上的涂层厚度。最后,通过试验证实了文中的喷涂成膜模型用于研究喷雾流场特性的可行性。

1 喷涂成膜模型

喷涂时,在空气冲击的作用下,涂料变成细小液滴,随后涂料液滴在高速空气的带动下运动到工件表面并撞击粘附于工件表面形成最终涂料膜。喷涂过程可视为空气和涂料液相的两相流运动过程,空气喷涂成膜模拟研究采用欧拉-欧拉法建模,在空气-涂料两相流的建模中把涂料液滴作为拟流体,认为液滴与气相是共同存在且相互渗透的连续介质,两相都在欧拉坐标系下处理计算。喷涂成膜模型包括喷雾流场模型和撞击粘附模型:喷雾流场模型描述气相和液相混合输运的过程,撞击粘附模型描述涂料液相撞击粘附于工件表面的过程。通过单位壁面面积液膜质量源和液膜质量源实现两种模型的交互。

1.1 喷雾流场模型

1.1.1 两相流基本控制方程

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \alpha_q \rho_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = 0 \quad (1)$$

式中,下标 q 为 g 和 d 时,分别表示气相和液相, α_q 为相体积率, ρ_q 为 q 相的密度 (kg/m^3), $\mathbf{v}_q$ 为 q 相的速度 (m/s)。

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{id},q} + \mathbf{F}_q \quad (2)$$

式中, p 为相共用的压力 (N/m^2), $\boldsymbol{\tau}_q$ 为 q 相的

粘性应力 (N/m^2), $\mathbf{g}$ 为重力 (m/s^2), $\mathbf{F}_{\text{id},q}$ 为 q 相的单位体积湍流分散力 (N/m^3), $\mathbf{F}_q$ 为单位体积相间作用力 (N/m^3)。

1.1.2 湍流模型

针对充分发展的湍流引入标准 k - ε 湍流模型封闭动量方程,其中湍动能 $k(\text{m}^2/\text{s}^2)$ 和湍动耗散率 $\varepsilon(\text{m}^2/\text{s}^3)$ 对应的输送方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon + \Pi_{k,m} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) + \Pi_{\varepsilon,m} \quad (4)$$

式中, ρ_m 为混合相密度 (kg/m^3), $\mathbf{v}_m$ 为混合相速度 (m/s), $\mu_{t,m}$ 为分子黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), $G_{k,m}$ 为湍动能产生项 ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^3$), $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为常量, $\Pi_{k,m}$ 和 $\Pi_{\varepsilon,m}$ 为两相之间的湍流作用附加项。

1.2 撞击粘附模型

喷雾流场中涂料液相接触壁面并沉积成膜过程中,液相的质量和动量从喷雾流场两相流中移出,作为源项加入到液膜的质量守恒方程和动量守恒方程中。通过液膜的质量守恒方程和动量守恒方程可计算出液膜的厚度。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla_s \cdot [h \cdot \mathbf{V}_l] = \frac{\dot{m}_s}{\rho_l} \quad (5)$$

$$\dot{m}_s = \alpha_d \rho_d V_{\text{dn}} A \quad (6)$$

式中,下标 l 代表涂膜, ρ_l 为涂膜密度, h 为涂膜高度 (m), $\mathbf{V}_l$ 为平均涂膜速度 (m/s), $\dot{m}_s$ 为单位壁面面积质量源 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), α_d 为液相体积分率, ρ_d 为液相密度 (kg/m^3), V_{dn} 为液相垂直于壁面的速度 (m/s), A 为壁面面积 (m^2)。

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial h \mathbf{V}_l}{\partial t} + \nabla_s \cdot (h \mathbf{V}_l \mathbf{V}_l) = -\frac{h \nabla_s P_L}{\rho_l} + \frac{3}{2 \rho_l} \boldsymbol{\tau}_{fs} - \frac{3 \nu_l}{h} \mathbf{V}_l + \frac{\dot{\mathbf{q}}_s}{\rho_l} \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_s = \dot{m}_s \mathbf{V}_d \quad (8)$$

公式 (7) 方程左侧分别为瞬态项和对流项;方程右侧第一项代表空气流动压力 $P_{\text{gas}}(\text{Pa})$ 和液膜表面张力 $\sigma(\text{N}/\text{m})$ 作用, $P_L = P_{\text{gas}} - \sigma \nabla_s \cdot (\nabla_s h)$;第二

项代表空气涂膜界面粘性剪切力 τ_{fs} (Pa)作用;第三项代表涂膜内粘滞力作用,其中 v_l 为液体运动粘度(m^2/s);第四项代表液膜的动量源 $q_s(N/m^3)$ 作用。公式(8)中, V_d 为液相速度矢量(m/s)。

2 静态喷涂模拟计算

2.1 控制域及网格划分

喷枪空气帽模型见图1,空气帽中心是涂料孔,孔径为1.1 mm;涂料孔外侧是环形的中心雾化孔,外径2 mm,内径为1.6 mm;中心雾化孔两侧分别排列两个辅助雾化孔,孔径为0.5 mm;空气帽两侧牛角形结构上分别布置两个扇面控制孔,孔径为0.8 mm。

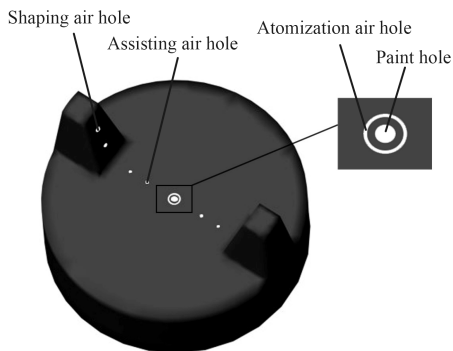


图1 喷枪空气帽模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of spray nozzle

根据喷枪空气帽的尺寸与喷雾流场模拟计算的需要,平面喷涂目标喷涂壁面为200 mm×300 mm平面,圆弧面喷涂目标壁面为半径180 mm高300 mm的半圆弧面。圆弧面喷涂针对4种喷涂方式(图2):外壁轴向喷涂,内壁轴向喷涂,外壁周向喷涂,内壁周向喷涂。

空气帽轴线垂直于目标喷涂壁面,其中心雾化孔与喷涂目标壁面距离(即喷涂距离)统一设为180 mm,坐标原点取中心雾化孔的圆心位置。

控制域采用非结构化网格划分,为保证计算精度和限制网格总数,划分为中心区域和外部区域两部分。中心区域内,喷枪喷嘴出口处、近目标壁面等区域几何结构相对较小,流动梯度变化比较大,且是需要重点关注的区域,因此网格划分密集。外部区域喷雾流场范围广,结构比较简单,为限制网格总数,网格划分相对稀疏。图3和图4分别为平面和圆弧面喷涂控制体网格。

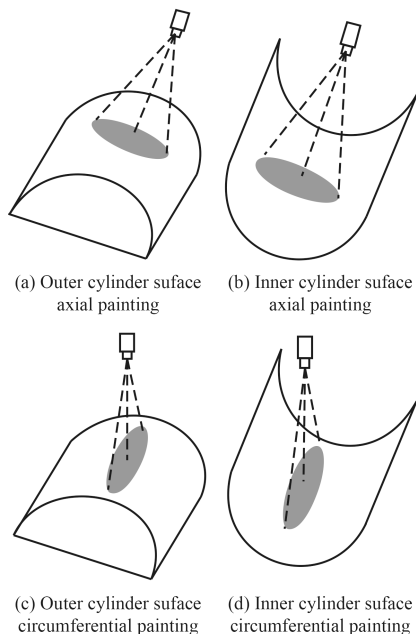


图2 圆弧面喷涂方式示意图

Fig.2 Schematic diagram of painting modes of cylinder surface

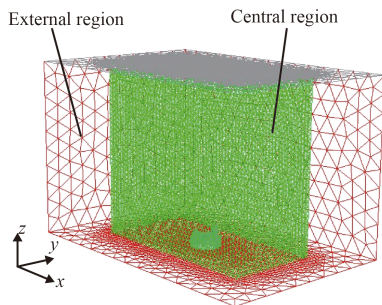


图3 平面喷涂控制体网格划分

Fig.3 Mesh of control domain for painting flat plate

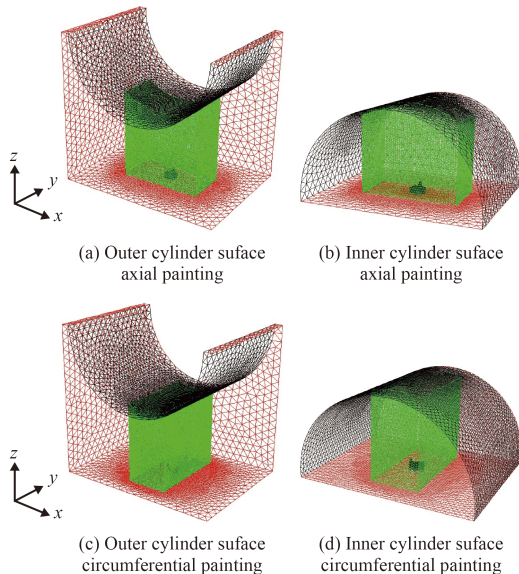


图4 圆弧面喷涂控制体网格划分

Fig.4 Mesh of control domain for painting cylinder walls

2.2 模拟条件和参数设定

对喷雾流场定义 2 个相, 其中第 1 相为气相, 表示喷雾流场中的空气, 第 2 相为液相, 表示流场中的涂料液滴。设置液相粒径 $20\text{ }\mu\text{m}$, 液相粘度 $0.09\text{ }686\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 密度 $1.2\times10^3\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

空气帽涂料入口孔设为质量入口, 液相的质量流量为 $1.32\times10^{-3}\text{ kg}/\text{s}$, 气相质量流量为 $5\times10^{-6}\text{ kg}/\text{s}$, 液相初始速度为 $5\text{ m}/\text{s}$, 液相在入口处体积率为 0.2 , 湍流参数设定为湍流强度 $I=15\%$, 水力直径为 $D=0.002\text{ m}$ 。其他入口设为压力入口, 喷枪雾化压力为 140 kPa , 扇面控制压力为 150 kPa , 重力为 $9.8\text{ m}/\text{s}^2$, 操作压力为一个大气压, 静态喷涂时间步长设为 $\Delta t=1\times10^{-4}\text{ s}$, 静态喷涂喷涂时间为 0.5 s 。计算收敛条件为, 在某一步的计算中, 当速度和压力残差小于 1×10^{-5} , k 和 ε 的残差小于 1×10^{-4} 时, 则认为该步的计算收敛。

文中使用 ANSYS Fluent 商业软件, 利用有限体积法求解动态喷涂成膜模型, 离散格式采用二阶迎风格式, PC-SIMPLE 算法 (多相耦合的 SIMPLE 算法) 计算离散后的代数方程。软件运行平台为 Windows 64 位操作系统的 10 核心 Xeon CPU 工作站, 运行内存为 64 G 。

3 结果与分析

3.1 喷雾流场形状

根据喷雾流场形状可以分析喷涂成膜特性。扇面控制孔气流对喷雾流场能够起到塑形作用。在扇面控制孔气流的冲击下, 喷雾流场被压扁, 喷锥的横截面为椭圆形, 如图 5 所示。建立坐标系 ΣO , 其原点 O 位于空气帽中心雾化孔的圆心处, Z 轴为喷锥的轴向坐标, X 轴为喷锥截面的长轴方向, Y 轴为截面的短轴方向。

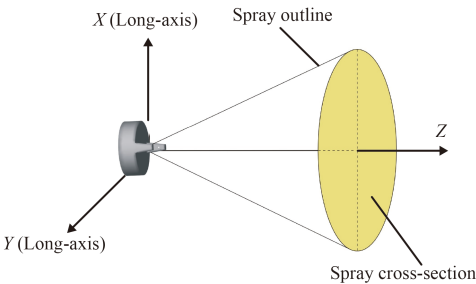


图 5 喷锥示意图

Fig.5 Schematic diagram of spray cone

平面喷涂喷锥纵截面涂料液相的速度分布如图 6 所示, 其中图 6(a) 为 YZ 平面液相速度分布, 图 6(b) 为 XZ 平面液相速度分布。在扇面控制孔气流的作用下, 液相在气流的带动下在 Y 方向上被压缩, 向 X 方向扩散。由图可知, XZ 面和 YZ 面喷锥形状有较大的差异。

为进一步分析喷锥内液相速度, 对距目标喷涂壁面 3 cm 处的液相横向速度分布研究, 如图 7,

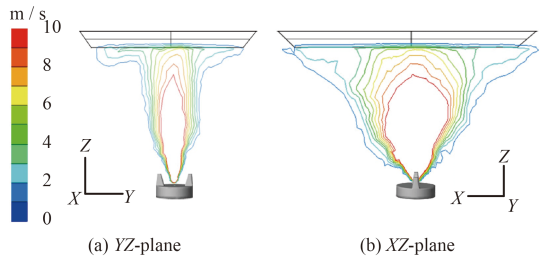
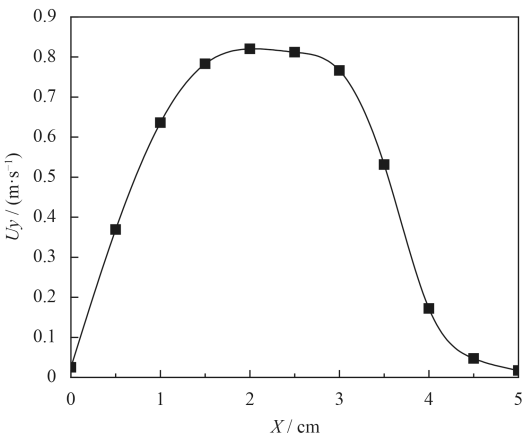
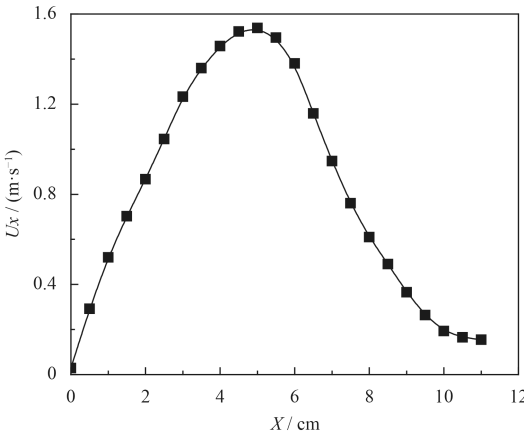


图 6 平面喷涂喷锥纵截面液相速度分布

Fig.6 Liquid phase velocities in sections of spray cone for painting flat plate



(a) Along the short axis



(b) Along the long axis

图 7 喷锥截面液相横向速度分布

Fig.7 Transverse velocity distribution of liquid phase in sections of spray cone

其中图 7(a) 为短轴方向横向速度分布, 图 7(b) 为长轴方向横向速度分布, U_y 和 U_x 分别为液相在 Y 方向和 X 方向的速度。喷锥中心处液相的速度垂直于壁面, 因此液相的横向速度几乎为 0。随着与中心处距离的增加, 液相横向速度增加, 喷锥中间区域, 液相的横向速度比较稳定, 喷锥的边缘处, 液相的横向速度迅速衰减。 Y 方向上, 距喷锥中心 4 cm 以外液相几乎没有横向速度。 X 方向上, 液相在整个喷锥截面都有一定的横向速度, 10 cm 以外, 横向速度保持在 0.2 m/s。

通过上述分析可知, 距目标喷涂壁面 3 cm 处, 喷锥短轴范围 (约 9 cm) 比长轴范围 (约 21 cm) 窄, 且短轴液相横向速度 (0.8 m/s 以下) 比长轴方向液相横向速度 (最大 1.6 m/s) 小。因此, 与喷锥短轴方向喷雾流场相比, 喷锥长轴方向喷雾流场受形面影响更为显著。

喷涂模拟表明, 当喷雾图形的长轴和短轴在圆弧面的同一方位上, 圆弧面对长轴和短轴方向上喷雾流场特性的影响具有相似性, 且长轴方向尺寸大, 更便于流场的观测与分析, 因此仅分析不同喷涂方式的喷锥长轴方向喷雾流场特性。

平面喷涂喷锥长轴方向 (XZ 平面) 液相速度云图 (图 8) 展示了平面喷涂喷雾流场喷锥形状。

圆弧面喷涂喷锥长轴方向 (XZ 平面) 液相速度云图 (图 9) 展示了圆弧面喷涂喷锥长轴方向喷雾

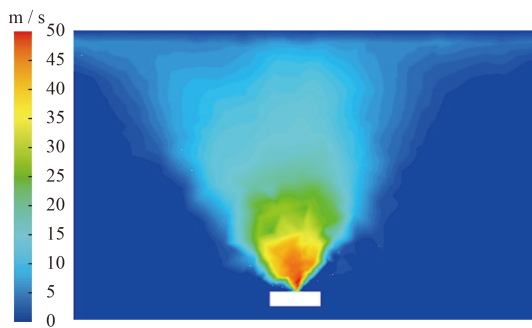


图 8 平面喷涂长轴方向液相速度云图

Fig.8 Liquid velocity contour of painting the flat wall

流场形状, 其中图 9(a) 为外壁轴向喷涂, 图 9(b) 为内壁轴向喷涂, 图 9(c) 为外壁周向喷涂, 图 9(d) 为内壁周向喷涂。由图可知, 周向喷涂圆弧面时, XZ 平面内的喷雾流场与平面喷涂喷雾流场相似。轴向喷涂圆弧面时, 由于圆弧面的形面特性, XZ 平面内的喷雾流场形状与平面喷涂喷雾流场有较大的区别。外壁喷涂时, 由于圆弧面外壁是凸面, 对喷雾的阻碍较小, 喷雾流场覆盖范围很大。内壁喷涂时, 由于圆弧面内壁是凹面, 对喷雾有较大的阻隔, 喷雾流场未完全展开。

圆弧面静态周向喷涂喷雾流场形状与平面喷涂喷雾流场形状基本相同, 轴向喷涂喷雾流场形状与平面喷涂喷雾流场形状有较大的区别。因此, 周向喷涂喷雾流场特性应与平面喷涂喷雾流

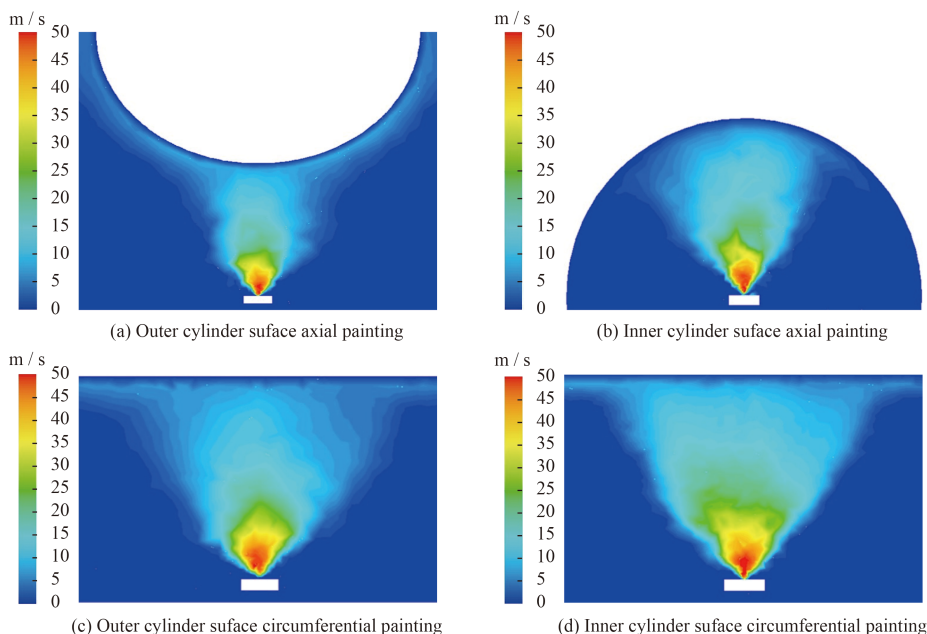


图 9 圆弧面喷涂长轴方向液相速度云图

Fig.9 Liquid velocity contour of painting the arc wall

场特性相似, 而轴向喷涂喷雾流场特性应与平面喷涂喷雾流场特性有较大的区别, 所以下面主要对圆弧面轴向喷涂喷雾流场特性进行深入分析。

3.2 喷锥宽度

圆弧面不同喷涂方式的喷雾流场形状有较大的区别, 因此使用喷锥宽度来统一描述喷雾范围。喷锥宽度是指壁面上喷锥的范围, 影响壁面上涂膜的宽度。

通过对喷锥内液相速度分析可得到喷锥轮廓线, 进而得到喷锥角。液相在喷锥长轴方向的扩展程度与 Z 坐标值关系见图 10。图中, $X(U_{50\%})$ 为轴向速度等于距空气帽 Z 处的最大轴向速度 $U_{\max}$ 一半时的 X 坐标。大量实验和模拟研究表明, 喷锥内部涂料液滴的轴向速度是均匀的, 喷锥边缘涂料液滴速度会突降^[13], 因此, $X(U_{50\%})$ 可以确定喷锥的轮廓。

目标壁面为平面时, 远离壁面处, $X(U_{50\%})$

与 Z 坐标为线性关系, 因此喷锥的轮廓线可认为是直线, 由此可确定喷锥角为 70° 。接近壁面处, 由于壁面的阻碍, $X(U_{50\%})$ 偏离喷锥轮廓线, 如图 10(a)。圆弧面喷涂时, $X(U_{50\%})$ 与 Z 坐标同样保持较好的线性关系, 得到圆弧面外壁轴向喷涂的喷锥角为 73.7° , 内壁轴向喷涂的喷锥角为 71.2° , 如图 10(b)、图 10(c)。对比不同喷涂方式的喷锥轮廓线可知, 形面因素对远离壁面处的液相速度几乎没有影响, 不同喷涂方式下喷锥角基本相同, 如图 10(d)。

接近壁面处, 受形面因素的影响, 圆弧面喷涂喷锥宽度与平面喷涂喷锥宽度有较大差别, 如图 11。由图可知, 圆弧面外壁轴向喷涂时, 由于圆弧面外壁是凸面, 相当于增大喷锥外侧的喷涂距离, 因此实际喷锥宽度要远大于平面喷涂喷锥宽度; 内壁轴向喷涂时, 由于圆弧面内壁是凹面, 相当于减小了喷锥外侧的喷涂距离, 因此实际喷锥宽度略小于平面喷涂喷锥宽度。

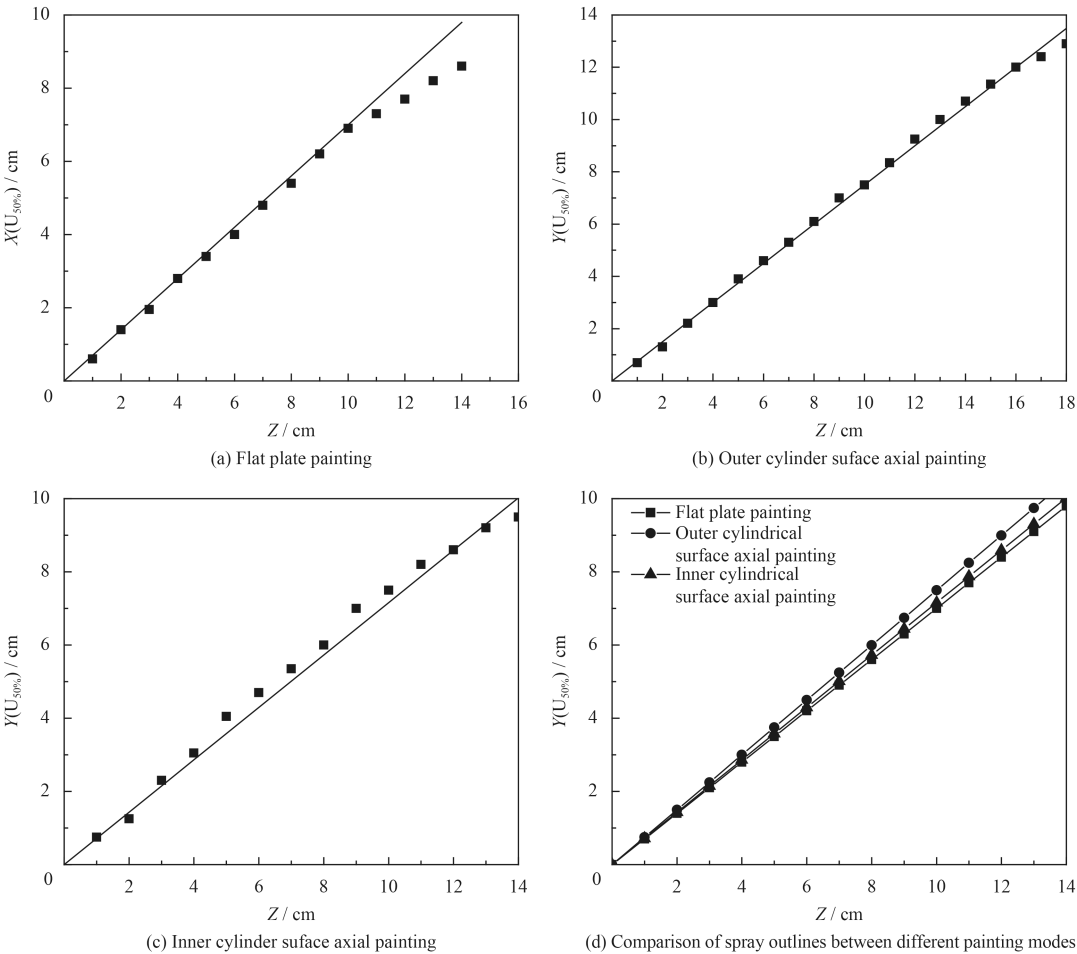


图 10 喷雾扩展程度与 Z 坐标值关系

Fig.10 Relationship between spray spread and Z coordinate values

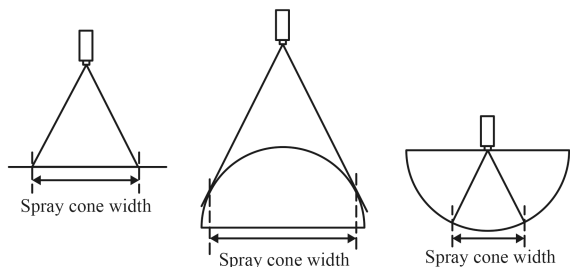


图 11 平面和圆弧面轴向喷涂喷锥宽度

Fig.11 Spray cone widths on flat and cylinder wall

3.3 液相碰撞角度

液相碰撞角度是指喷锥内液相速度与壁面的夹角，决定壁面上涂膜的厚度分布特性。液滴与壁面的碰撞角度越小，其横向分速度越大，而垂直于壁面的分速度就越小，就更容易克服液相的粘性和表面张力的作用而发生飞溅。

首先分析平面喷涂壁面附近喷雾流场的速度特性。喷锥内气相接近壁面时，由于壁面的阻隔，轴向速度迅速衰减为零或负的速度，但横向速度几乎不变，因此，气相在壁面附近向四周平行于壁面运动或发生反弹。高速的气流在壁面表面形成气垫，气垫会阻碍液相接触壁面。液相在高速气流的带动下输运至壁面，喷锥内部的液相由于速度较大不会受到横向气流的影响。喷锥边缘的液相会在气流的带动下偏离喷锥向外发散。

平面喷涂壁面附近液相速度矢量图见图 12。由图可知，喷锥中心区域的液相的速度比较均匀，且速度较大，液相速度垂直于壁面，几乎没有横向速度，碰撞角度为 90° ，能够粘附在壁面上形成涂膜。喷锥边缘处的液相速度较小，同时有一定的横向速度，碰撞角度约为 25° 。最外侧的液相几乎没有轴向速度，只有横向速度，碰撞角度为 0° 。由于喷锥边缘处和最外侧液相与壁面的碰撞角度较小，因此，只有小部分液相可以粘附在壁面上形成涂膜。大部分液相虽然接触到壁面，但因为液相的横向方向动量远大于垂直方向动量，液相发生反弹或飞溅。还有部分液相受壁面表面气垫的干扰，没有接触到壁面，而是随气流带走，散发在空气中。

平面喷涂喷锥内液相的流线可证明上述内容，见图 12。由图可知，喷锥内部区域的液相运动轨迹垂直壁面，运动轨迹终点在壁面上形成涂膜。喷锥边缘处液相运动轨迹在壁面附近发生倾

斜，但液相最终仍粘附在壁面上。喷锥最外侧液相运动轨迹近似平行于壁面，液相最终并未形成涂膜。

轴向喷涂圆弧面时，喷雾流场形状受圆弧面形面的影响很大。因此，圆弧面轴向喷涂液相碰撞角度与平面喷涂液相碰撞角度有较大的区别。圆弧面轴向喷涂壁面附近液相速度矢量见图 13，其中图 13(a) 为外壁喷涂，图 13(b) 为内壁喷涂。

轴向喷涂圆弧面外壁时，喷锥中心区域液相速度垂直于壁面，液相与壁面的碰撞角度为 90° 。由于圆弧面外壁是凸面，随着壁面上点与喷锥中心距离增大，液相与圆弧面的碰撞角度迅速减小。10 cm 以外液相与壁面碰撞角度几乎为零，液相平行于壁面运动，如图 13(a)。圆弧面两侧喷锥内大量的涂料颗粒无法与壁面发生撞击，被气流带走，散发在空气中。少量涂料颗粒虽然接触到了壁面，但是涂料液滴圆弧面切向方向动量远大于法向方向动量，不足以使涂料颗粒粘附在壁面上形成涂膜。因此，圆弧面外壁中间区域液相能

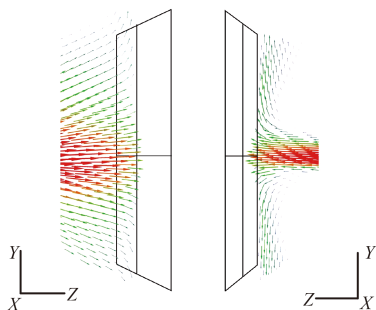


图 12 平面喷涂近壁面处涂料速度

Fig.12 Liquid velocity vector near a flat wall

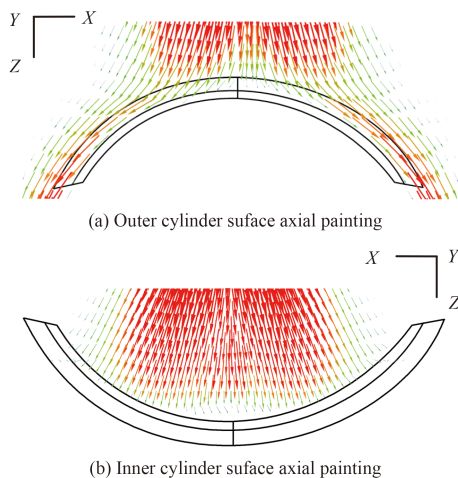


图 13 圆弧面轴向喷涂壁面附近液相速度

Fig.13 Liquid velocity vector near the wall in axis painting

够粘附在壁面上形成涂膜, 而圆弧面两侧区域只有少量液相能够粘附在壁面上形成涂膜。

轴向喷涂圆弧面内壁时, 喷锥中间区域液相速度垂直于壁面, 液相与壁面的碰撞角度为 90° 。由于圆弧面内壁是凹面, 对喷雾向外发散有明显的约束作用, 整个喷锥内液相与圆弧面始终保持较大的碰撞角度, 如图 13(b)。涂料液滴的圆弧面法向方向动量大于切向方向动量, 喷锥范围内大多数涂料液滴粘附在壁面上形成涂膜。因此, 整个圆弧面内壁区域有较多的液相能够粘附在壁面上形成涂膜。

周向喷涂圆弧面时, 由于圆弧面在圆周方向上变化较缓, 壁面附近喷雾流场与平面喷涂相似, 如图 14, 其中图 14(a) 为外壁喷涂, 其中图 14(b) 为内壁喷涂。因此, 液相与壁面碰撞角度与平面喷涂液相类似。

根据上述分析可知, 喷锥宽度和液相碰撞角度是喷雾流场决定喷涂成膜特性的主要影响因素, 喷锥宽度影响涂膜的宽度, 液相碰撞角度决定涂膜的厚度分布。

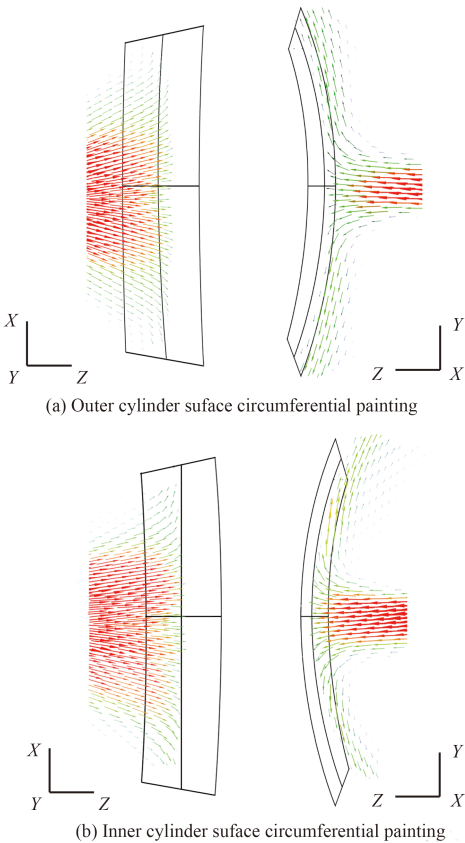


图 14 圆弧面周向喷涂壁面附近液相速度

Fig.14 Liquid velocity near wall in circumferential painting

4 喷涂成膜试验验证

为研究验证文中的仿真结果, 进行了平面和圆弧面喷涂试验。喷漆过程中喷枪始终垂直于平面和圆弧面工件, 距离工件 180 mm, 喷漆时间控制在 2 s 左右, 使用秒表测量。喷涂完成后 3 天内不压碰漆膜。待油漆完全固化后, 使用涂层测厚仪测量涂膜厚度, 记下该点的圆弧面展开坐标系坐标及涂膜厚度。测量涂膜厚度时, 每隔 10 mm 测量一个点的厚度, 每个点位测量 5 次, 取其平均值作为该点位的涂膜厚度。得到的漆膜厚度除以 $2t$ 得到喷涂时间为 0.5 s 的漆膜厚度。

分别将平面和圆弧面三维模型导入 ANSYS Fluent, 并在其中配置相关模型和计算参数, 计算完成后, 通过软件的后处理功能可得到壁面上的涂料液相湿膜厚度 h_1 。湿膜厚度需转化干膜厚度, 从而比较和分析模拟涂膜厚度和试验涂膜厚度, 转化公式如下^[14]:

$$h_2 = h_1 \times (1 - V_s) \tag{9}$$

式中, h_2 为模拟干膜厚度, h_1 为模拟湿膜厚度, V_s 为体积固体含量。

试验和仿真得到的平面喷涂的喷雾图形分别如图 15(a)(b) 所示, 其图形大小、形状基本一致。试验得到的圆弧面内壁和外壁喷涂的喷雾图形分别如图 16 和图 17 所示。仿真得到的圆弧面喷涂的喷雾图形与平面的相似, 也为近似椭圆形, 故未给出其图片。

图 18 和图 19 分别对比了平面和圆弧面喷涂在长轴方向上涂层厚度分布的试验和模拟结果, 其中坐标原点在喷雾图形的中心, X 轴为椭圆形喷雾图形的长轴。平面喷涂模拟、外壁轴向喷涂模拟、内壁轴向喷涂模拟、外壁周向喷涂模拟、内壁周向喷涂模拟与试验得到的涂层厚度分布的平

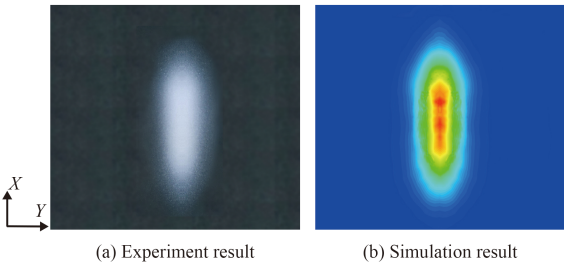


图 15 平面喷涂喷雾图形

Fig.15 Spray pattern obtained by painting flat plate

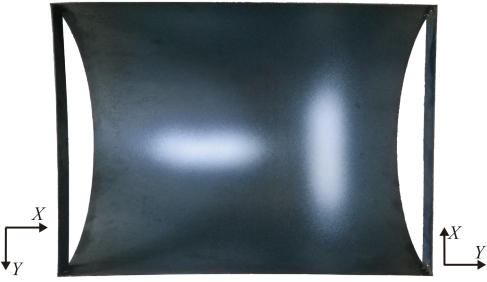


图 16 圆弧面内壁喷涂喷雾图形 (左: 周向; 右: 轴向)
Fig.16 Spray pattern obtained by painting inner surface of cylinder (Left: circumferential; Right: axial)

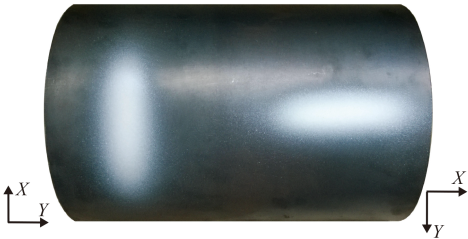


图 17 圆弧面外壁喷涂喷雾图形 (左: 轴向; 右: 周向)
Fig.17 Spray pattern obtained by painting outer surface of cylinder (Left: axial; Right: circumferential)

均偏差分别为 7.1%、6.1%、8.5%、6.8% 和 7.5%。可见, 试验和模拟得到的涂层厚度分布比较吻合。

综上所述, 试验和仿真得到的喷雾图形的大小基本一致, 形状相同; 试验和仿真得到的涂层厚度分布比较吻合。这证实了文中喷涂成膜模型用于研究喷雾流场特性是合理可行的。

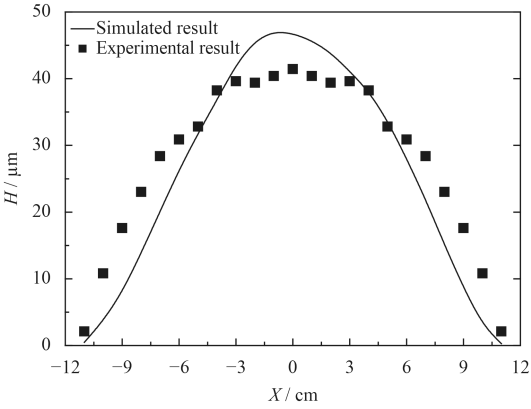
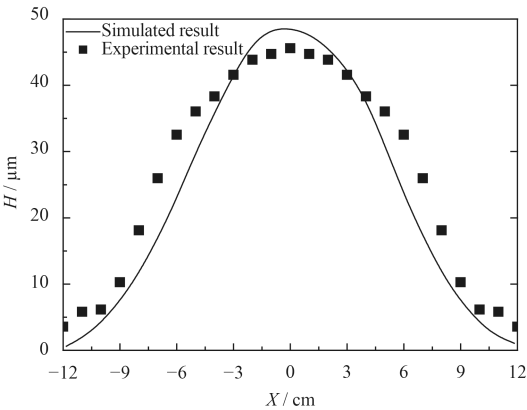
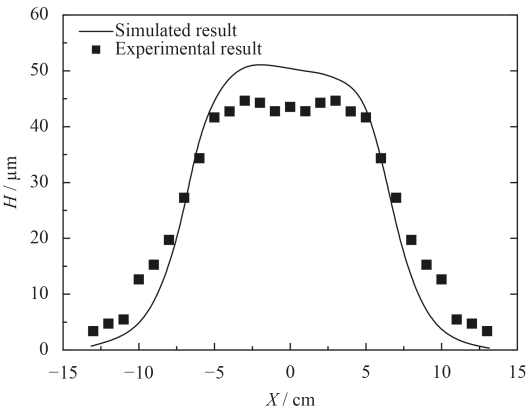


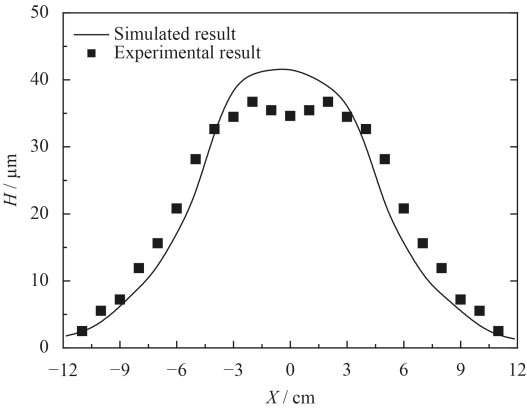
图 18 平面喷涂涂层厚度分布
Fig.18 Paint thickness distribution on the flat wall



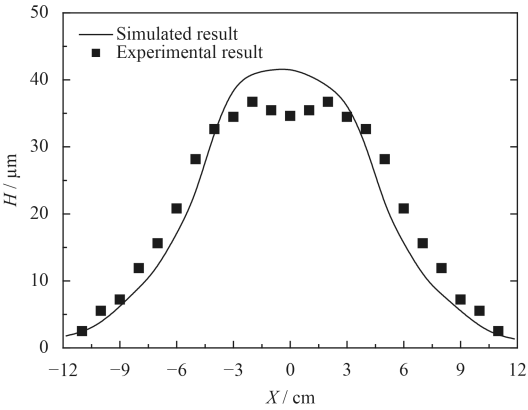
(a) Inner cylinder surface circumferential painting



(b) Inner cylinder surface axial painting



(c) Outer cylinder surface axial painting



(d) Outer cylinder surface circumferential painting

图 19 圆弧面涂层厚度分布
Fig.19 Paint thickness on cylinder wall

5 结 论

(1) 圆弧面静态周向喷涂喷雾流场形状与平面喷涂喷雾流场形状基本相同, 轴向喷涂喷雾流场形状与平面喷涂喷雾流场形状有较大的区别。

(2) 周向喷涂圆弧面时, 喷锥宽度受形面影响较小, 基本同于平面喷涂。轴向喷涂圆弧面时, 外壁喷涂喷锥宽度大于平面喷涂喷锥宽度; 内壁喷涂喷锥宽度略小于平面喷涂喷锥宽度。

(3) 周向喷涂圆弧面时, 液相碰撞角度受形面影响较小, 基本同于平面喷涂。轴向喷涂圆弧面时, 喷锥边缘区域液相与壁面碰撞角度很小; 内壁喷涂整个喷锥内液相与壁面始终保持较大的碰撞角度。

(4) 通过对比试验和仿真得到的喷雾图形和涂层厚度分布, 证实了文中建立的喷涂成膜模型用于研究圆弧面喷涂喷雾流场特性是可行的。

参考文献

- [1] CHEN W Z, CHEN Y, CHEN K, et al. Design of redundant robot painting system for long nonregular duct[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2016, 43(1): 58-64.
- [2] 李菊, 赵德安, 沈惠平, 等. 多喷枪协同式喷涂五轴混联机器人设计[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(4): 216-220.
LI J, ZHAO D A, SHEN H P, et al. Design of 5-axes hybrid robot with several spray guns for collaborative spraying[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(4): 216-220 (in Chinese).
- [3] 缪东晶, 吴聊, 徐静, 等. 飞机表面自动喷涂机器人系统与喷涂作业规划[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, 45(2): 547-553.
MIAO D J, WU L, XU J, et al. Automatic spraying robot system for aircraft surfaces and spraying operation planning[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(2): 547-553 (in Chinese).
- [4] HICKS P G, SENSER D W. Simulation of paint transfer in an air spray process[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1995, 117(4): 713-719.
- [5] FOGLIATI M, FONTANA D, GARBERO M, et al. CFD simulation of paint deposition in an air spray process[J]. *Journal of Coating Technology and Research*, 2006, 3(2):

117-125.

- [6] 刘国雄. 空气雾化涂料喷枪喷涂流场仿真及特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 31-49.
LIU G X. Simulation study on the spray flow field of air atomized paint spray gun[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 31-49 (in Chinese).
- [7] YE Q, SHEN B, TIEDJE O, et al. Numerical and experimental study of spray coating using air-assisted high pressure atomizers[J]. *Atomization & Sprays*, 2015, 25(8). doi: 10.1615/AtomizSpr.2015010791.
- [8] YE Q, PULLI K. Numerical and experimental investigation on the spray coating process using a pneumatic atomizer: Influences of operating conditions and target geometries[J]. *Coatings*, 2017, 7(1). doi: 10.3390/coatings7010013.
- [9] TOLJIC N, ADAMIAK K, CASTLE G S P, et al. A full 3D numerical model of the industrial electrostatic coating process for moving targets[J]. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71(3): 299-304.
- [10] OSMAN H, ADAMIAK K, CASTLE P G S, et al. Comparison between the numerical and experimental deposition patterns for an electrostatic rotary bell sprayer[C]// *Proceedings of the 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*. Houston, Texas, USA, 2015: 1-8.
- [11] 杨庆功, 李明盛. 双流体模型模拟喷涂飞行区内的速度分布[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2006, 29(9): 1120-1123.
YANG Q G, LI M S. Simulation of the velocity distribution in the spray cone based on the two-phase flow model[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 29(9): 1120-1123 (in Chinese).
- [12] 陈雁, 何少炜, 张钢, 等. 空气喷涂平面成膜的双流体模型模拟[J]. *后勤工程学院学报*, 2015, 31(6): 82-86.
CHEN Y, HE S W, ZHANG G, et al. Two-fluid model simulation of paint deposition on flat wall in an air spray process[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2015, 31(6): 82-86 (in Chinese).
- [13] MORIKITA H, TAYLOR A M. Application of shadow doppler velocimetry to paint spray: Potential and limitations in sizing optically in homogeneous droplets[J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(2): 221-230.
- [14] GOLDSCHMIDT A, STREITBERGER H J. BASF handbook on basics of coating technology[M]. Hannover, Germany: Vincentz Network, 2007.

(责任编辑: 王文宇)