

无气离心喷涂涂料液滴流场和分布特性的数值模拟

李响^{1,2*}, 徐增辉², 姜秀光³, 汪瞳², 李前正¹,
李金择¹, 夏谢天¹, 陈星²

(1. 中建中环新能源有限公司, 南京 210012; 2. 中建中环环保科技有限公司, 江苏 苏州 215124; 3. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100070)

摘要: **目的** 探究无气体输送的无气离心喷涂法过程中涂料液滴与管道内壁面之间的相互碰撞接触作用, 以在 高分子涂料离心喷涂法中获得致密高强度涂料内衬层。**方法** 将涂料液滴视为离散相, 利用离散元方法和涂料液滴附着力 JKR 接触模型, 模拟无气离心喷涂涂料液滴运动特性。通过堆积角虚拟试验确定涂料液滴与壁面表面能。基于离心场作用下涂料液滴运动方程, 导出旋转喷枪射流小孔出流速度计算模型。数值模拟无气离心喷涂过程涂料液滴流体动力特性, 揭示涂料液滴碰撞作用下动态喷涂成膜规律。**结果** 统计得到涂料液滴在水平壁面展平的表面能为 32.7 J/m^2 。对于一定的喷嘴射流小孔, 涂料液滴小孔出流系数接近于常数。随着计算时间的推进, 壁面黏附涂料液滴数不断增加。在无气旋转喷枪 II 旋转速度 $2\ 500 \text{ r/min}$ 下, 统计单元涂料液滴数最大, 并且有较大的液滴数方差和相对误差。随着喷枪旋转速度的提高, 涂料液滴数的方差和相对误差降低。**结论** 为实现沿管道壁面涂料液滴均匀分布, 旋转喷枪 II 旋转速度建议不应低于 $5\ 000 \text{ r/min}$ 。

关键词: 涂料液滴; 无气离心喷涂; 离散元方法; 出流速度; 液滴数分布

中图分类号: TG174.442 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)12-0158-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.12.013

Numerical Simulations of Paint Droplet Hydrodynamics and Distributions in an Airless Spray Coating Process

LI Xiang^{1,2*}, XU Zenghui², JIANG Xiuguang³, WANG Tong²,
LI Qianzheng¹, LI Jinze¹, XIA Xietian¹, CHEN Xing²

(1. China Construction Power and Environment Engineering Co., Ltd., Nanjing 210012, China;

2. China Construction Eco-environmental Protection Technology Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215124, China;

3. China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing 100070, China)

ABSTRACT: It is an advanced surface modification technology using paint droplet rotary spray coating in pipelines trenchless

收稿日期: 2023-07-11; 修订日期: 2023-11-18

Received: 2023-07-11; **Revised:** 2023-11-18

基金项目: 中建二局科技资助计划 (2021ZX180001); 南京市玄武区企业专家工作室资助项目

Fund: China Construction Second Engineering Bureau Science and Technology Support Program (2021ZX180001); Supported Project by Nanjing Xuanwu District Enterprise Expert Studio

引文格式: 李响, 徐增辉, 姜秀光, 等. 无气离心喷涂涂料液滴流场和分布特性的数值模拟[J]. 表面技术, 2024, 53(12): 158-166.

LI Xiang, XU Zenghui, JIANG Xiuguang, et al. Numerical Simulations of Paint Droplet Hydrodynamics and Distributions in an Airless Spray Coating Process[J]. Surface Technology, 2024, 53(12): 158-166.

*通信作者 (Corresponding author)

rehabilitation, which can improve surface anticorrosion properties. Due to the difference of collisional contact interactions of paint droplets and pipe walls, the interface strength of interior paint liner is changed as the paint droplets are deposited on the wall, which becomes the dominant source of the droplet adhesion during spray coating. This article aims to study the droplet distributions with changing rotation speed of rotary sprayer in an airless spray coating process.

The contact interactions of collisions between paint droplets and the pipe wall were studied in an airless spray coating process, realizing in a high-strength paint protective liner using centrifugal spraying technology. The methodology was based on the discrete element method (EDEM) with JKR contact model, assuming paints as discrete phase. The calibration method of surface energy used in JKR contact model was proposed using a virtual repose angle test. The virtual accumulation angle was obtained from the paint droplet pile. The surface energy was determined according to the variations of accumulation angles. The droplet discharge velocity equation of sprayer holes was derived based on the motion equation of droplets under the action of the centrifugal field. The expression represented a relationship between paint droplet discharge velocity and sprayer rotation speed.

Simulated results showed that the paint droplet accumulation angles changed from a moderating region, transitioning to an increasing region with increasing surface energies. The higher the surface energy, the larger the accumulation angle, resulting in a high height of the paint droplet pile. The threshold value was found from the intersection between the moderating region and increasing region. The value of surface energy was found to be 32.7 J/m^2 from the statistical analyses of the repose angle virtual test.

Simulations showed that the exit droplet velocity of sprayer holes increased with the increase of rotation speed and sprayer diameter. These droplet velocities were induced by centrifugal forces due to sprayer rotation. The larger the sprayer size, the higher the exit droplet velocity. The equation of exit droplet velocity was correlated with discharge coefficient. Results indicated that the paint droplet discharge coefficient of holes was nearly constant as a function of dimensionless Froude numbers.

The characteristics of paint droplets were simulated with changing rotation speed in an airless coating process. The paint droplet numbers increased with times. The change of droplet numbers can be roughly divided into three stages: an initial stage, a transition stage and stable stage with times. Results indicated that the number of paint droplets on the pipe inner wall decreased with the increase of sprayer rotation speed, suggesting that a reasonable rotation speed was helpful to increase the number of paint droplets on the pipe inner wall. The paint droplet number was the largest at the rotation speed of $2\,500 \text{ r/min}$ with the large standard deviation and relative error. The standard deviation and relative error of paint droplet numbers were reduced with the increase of rotation speeds. It can be inferred that the rotation speed of the rotary sprayer is suggested not less than $5\,000 \text{ r/min}$ in order to obtain a uniformity of paint droplets in an airless paint droplet spray coating process.

KEY WORDS: paint droplets; airless spray coating; discrete element method; discharge velocity; paint droplet number

应用喷涂方法将高分子涂料喷涂在管道内壁面, 涂料发生化学与物理反应, 迅速固化, 在管道内壁形成一定厚度的涂料内衬, 从而解决城市供水和排水等市政管道的腐蚀、渗漏、表面脱落等问题, 实现对旧管道的修复^[1-2]。涂料喷涂技术主要包括涂料喷射喷涂法和涂料离心喷涂法^[3-4]。喷射喷涂法是依靠高压气体携带高分子涂料液滴冲击管道内壁面, 将涂料液滴黏附固体壁面。当采用高压空气作为输送涂料液滴时难以避免涂料液滴的化学反应, 导致涂料性能降低, 因而通常需要采用惰性气体用于高分子涂料液滴的输送, 但也会导致喷射喷涂系统复杂。高分子涂料离心喷涂法是采用涂料泵将涂料压送进入高速旋转喷头, 在高速旋转离心力的作用下涂料液滴甩向管道内壁, 在内壁面形成连续致密的涂料内衬层^[5]。无气体输送的无气离心喷涂法不仅避免喷涂过程中涂料化学反应的出现, 同时通过若干次喷涂后能够达到设计要求的涂料内衬层厚度, 修复管道内壁。因此, 研

究无气离心喷涂过程中涂料液滴与管道内壁面之间的相互碰撞接触作用是获得致密高强度涂料内衬层的关键因素。

针对涂料喷涂形成内衬层的运动过程, 基于两相流体动力学理论的欧拉-拉格朗日法和欧拉-欧拉法被广泛应用于涂料喷涂成膜过程的数值模拟^[6-7]。前者能够详细地对单个涂料液滴运动进行跟踪和计算, 但对于描述涂料雾化流场中大批量涂料液滴的流动比较困难。后者可以有效地描述大批量涂料液滴与气体的相互作用, 可以获得液滴数量的空间分布信息。李树贤等^[8]通过 Fluent 的欧拉-拉格朗日法数值模拟喷射喷涂时, 喷盘转速对涂料液滴粒度分布的影响。陈文卓等^[9]采用 Fluent 的欧拉-欧拉法对轴向移动空气喷嘴喷射进行动态喷涂雾化数值模拟。数值模拟结果表明, 喷射喷雾流场中的大粒径液滴和中等粒径液滴是形成涂料液膜的主要来源, 且由于喷枪轴向移动导致喷雾流场向喷枪移动的后方倾斜。Ye 等^[10]采用

Fluent 的欧拉-拉格朗日法对气动喷枪和旋转雾化喷枪的喷射喷涂过程进行数值模拟,结果表明不同喷枪的喷涂特性存在较大差异,喷枪特性对成形漆膜的性能影响较大。

与涂料喷射喷涂过程相比,无气离心喷涂过程涉及喷枪的高速旋转和轴向运动。利用无气喷枪高速旋转产生的离心力,喷涂形成涂料内衬层的力学性能与高速旋转喷枪的涂料液滴之间的相互碰撞接触作用和气体-涂料液滴相互作用密切相关。然而,ANSYS Fluent 等商业软件尚无法用于兼顾高速旋转喷枪的气体-液滴相互作用和液滴之间相互碰撞作用的涂料液滴流体动力特性的数值模拟。在管道壁面附近区域气体速度相对较小,气体-涂料液滴相互作用减弱,涂料液滴流动主要受液滴之间相互碰撞作用的支配。因而,本文将采用离散元 EDEM 软件,将涂料液滴视为离散相,建立由涂料液滴流场模型和碰撞黏附模型构成的喷涂成膜模型,数值模拟无气离心喷涂过程中涂料液滴流体动力特性,揭示涂料液滴碰撞作用下动态喷涂成膜规律。

1 无气离心涂料喷涂的计算模型

无气离心涂料喷涂主要工作过程包括:置于管道轴心处的电机按指定的旋转速度驱动喷枪高速旋转,同时沿管中心轴向运动,如图 1 所示。无气离心喷涂的旋转喷枪内部空间形成涂料液滴流动区 I。喷枪与管道内壁面之间的空间构成涂料液滴流动区 II。旋转喷枪壁面设置一定数量的喷射小孔作为涂料液滴流

动通道。为了简化计算,忽略流动区 II 内电机空间对涂料液滴流动的影响。在流动区 I 采用 Hex/Wedge 混合网格,在流动区域 II 采用 Tet/Hybrid 非结构化网格。旋转喷枪 I 的小口端直径为 5.0 mm,大口端直径为 10.0 mm,长度为 10.0 mm。沿圆周方向均匀分布直径为 2.0 mm 的喷射小孔,共计 4 环分布,每环 4 个喷射小孔。喷涂管道内径为 40.5 mm,长度为 97.0 mm。旋转喷枪 II 参照实际无气离心喷涂喷枪结构,采用大圆孔、小圆孔和长条孔的复合开孔方式。喷枪 II 的小口端内径为 35.0 mm,大口端内径为 70.0 mm,高度为 75.0 mm。表面大圆孔内径为 5.0 mm,小圆孔内径为 3.0 mm。长条孔宽度和长度分别为 5.0 mm 和 30.0 mm。在喷枪大口端布置一圈大圆孔。喷涂管道内径为 200.0 mm,长度为 400.0 mm。

将涂料流体分解成由大量涂料液滴所组成的集合体,涂料液滴视为离散单元。涂料液滴被当作离散相,假设涂料液滴碰撞中保持球形。通过牛顿第二定律描述涂料液滴的流动^[11-12]:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_{p,i}}{dt} = \sum_{j=1, i \neq j}^N \mathbf{f}_{c,ij} + m_i \mathbf{g} \quad (1)$$

$$I_{p,i} \frac{d\boldsymbol{\omega}_{p,i}}{dt} = \sum_{j=1, i \neq j}^N \mathbf{T}_{p,ij} \quad (2)$$

式中: m_i 表示涂料液滴 i 的质量; $\mathbf{v}_{p,i}$ 和 $\boldsymbol{\omega}_{p,i}$ 分别表示涂料液滴 i 的线速度和角速度; $\mathbf{f}_{c,ij}$ 表示涂料液滴 i 受到来自离散涂料液滴 j 的接触力; $I_{p,i}$ 表示涂料液滴 i 的惯性矩; $\mathbf{T}_{p,ij}$ 表示由涂料液滴间接触力的切向分量所产生的扭矩。

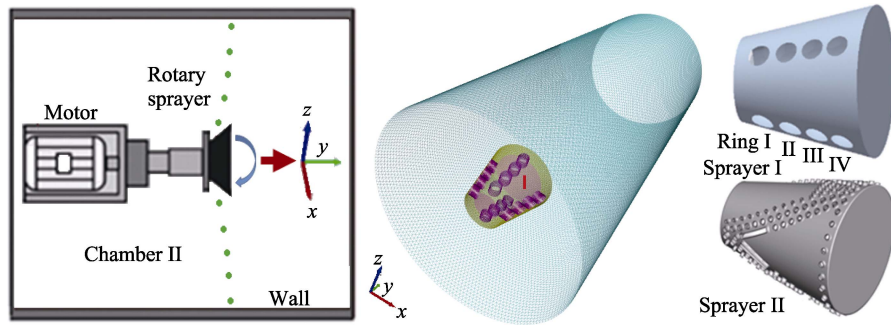


图 1 无气离心涂料喷涂工作过程和旋转喷枪结构及计算网格示意图
Fig.1 Schematic diagram of paint droplet coating and computing cells with sprayers

当考虑涂料液滴接触表面有黏连作用时,涂料液滴的法向接触力计算可使用 JKR 接触理论^[13-15]。应用能量方法,结合球形粒子表面能量产生的弹性粒子之间的接触作用力,以两粒子的单位接触面积形成的

接触表面能量 γ 模拟接触半径为 a 的两液滴粒子黏连。以两液滴之间法向相对速度 $v_{n,rel}$ 和切向相对速度 $v_{t,rel}$ 为变量的液滴碰撞法向力 f_n 和切向力 f_t 计算模型为^[13,16]:

$$f_{n,JKR} = \left[-4\sqrt{\pi\gamma E^*} a^{3/2} + \frac{4E^*}{3R^*} a^3 \right] - 2\sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \sqrt{2m^* E^* (R^* \delta_n)^{0.5}} v_{n,rel} \quad (3)$$

$$f_{t,JKR} = \min \left[\mu_s f_{n,JKR}, \left| -8E^* \sqrt{R^* \delta_n} \delta_t - 2\sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \sqrt{8E^* m^* (R^* \delta_n)^{0.5}} v_{t,rel} \right| \right] \quad (4)$$

$$\delta_n = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha}{E^*}} \quad (5)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{9\pi R^{*2}\gamma}{2E^*}} \quad (6)$$

式中: e 和 μ_s 分别是液滴碰撞恢复系数和静摩擦因数; v_n 和 v_t 是液滴法向和切向重叠量; R^* 是基于液滴半径 R 的等效液滴半径; m^* 是等效质量; E^* 是以杨氏模量 E 和泊松比 ν 为函数的液滴等效弹性模量。

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j} \right)^{-1} \quad (7)$$

$$R^* = \left[\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \right]^{-1} \quad (8)$$

$$m^* = \left[\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right]^{-1} \quad (9)$$

由碰撞法向力和切向力计算方程可见, 两涂料液滴碰撞接触产生的黏结力随着两液滴重叠量和接触表面能增加而增大, 两涂料液滴越容易黏结。涂料液滴在固体壁面形成涂膜的前提是涂料液滴之间相互黏结。当涂料液滴在固体表面发生流动时, 表明涂料未能在固体表面形成涂膜, 在固体表面出现涂料斑点。只有当固体表面的涂料液滴黏结在一起, 才能形成涂料涂膜。因此, JKR 接触模型能够反映涂料液滴在固体表面的黏结过程, 实现涂料液滴喷涂涂膜过程的重现。

2 模型参数的标定

JKR 接触模型参数涉及 3 类^[16]: I 类是本征参数, 包括涂料和固体材料泊松比、剪切模量和密度, 这些涂料和材料自身的特性参数较为固定, 可通过试验或者文献获得; II 类是涂料和固体材料接触参数, 包括碰撞恢复系数、静摩擦因数 μ_{sf} 和滑动摩擦因数 μ_{rf} , 涂料液滴和固体表面形状等对这类参数影响较大, 一般需要通过实际试验测定或虚拟试验进行标定; III 类是接触模型参数, 这些模型化参数很难与本征参数相互关联, 通常采用虚拟试验进行标定^[17]。因此, 利用仿真软件进行模型参数的虚拟试验 (如堆积角试验), 通过不断调整接触模型参数, 使模拟获得的流动性质与真实情况相一致, 则认为该模型参数是符合实际流动过程的。

堆积角也称为休止角, 是表征颗粒流动和摩擦等特性的宏观参数。颗粒被倾倒在水平面上堆积成为锥体, 堆积物的表面与水平面所成内角即为堆积角, 其值依赖于粒子本征参数。因此, 堆积角试验经常被用作离散单元参数标定^[18-20]。本文应用堆积角试验方法^[21]进行涂料堆积角的虚拟试验。

虚拟试验的方法如图 2 所示, 由位于上部的涂料

液滴漏斗和位于下部的固体底板所组成。漏斗和底板均为钢材料, 密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$, 泊松比为 0.3, 剪切模量为 $7 \times 10^{10}\text{ Pa}$ 。漏斗顶部直径为 5 mm, 底部直径为 3 mm, 底板直径为 30 mm。初始时给定数量的涂料液滴存储在漏斗内。涂料液滴直径为 $0.000\,2\text{ m}$, 涂料液滴密度为 $1\,060\text{ kg/m}^3$ 。一般有机溶剂涂料的表面张力范围为 $20 \sim 60\text{ mN/m}$ ^[22-23]。在虚拟试验中, 涂料液滴表面能为 0.04 J/m^2 。在虚拟试验开启后, 涂料液滴通过漏斗下落, 流向底板, 最终涂料液滴在底板壁面铺展。当涂料液滴与底板壁面的接触表面能 γ 为 100 J/m^2 时, 随着涂料液滴的不断下落, 在底板壁面逐渐形成涂料液滴堆积, 并且堆积高度不断增加。分别从锥面的正面方向和侧面方向测量涂料液滴堆积角, 每个虚拟模拟工况重复 5 次, 确定涂料液滴堆积角 θ 的平均值。

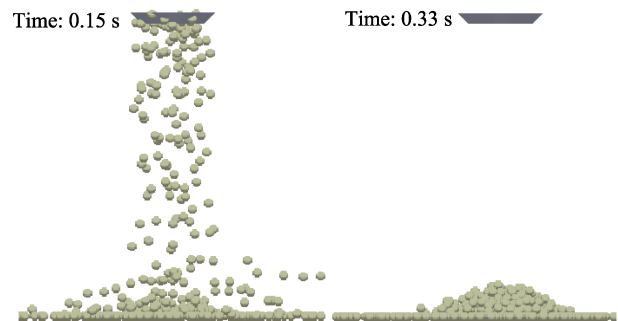


图 2 接触表面能为 100 J/m^2 时涂料液滴堆积的虚拟试验
Fig.2 Virtual test of accumulation repose of droplets at surface energy of 100 J/m^2

图 3 表示不同涂料液滴与底板壁面的接触表面能对涂料液滴堆积的影响。当涂料液滴与底板壁面的接触表面能为 50 J/m^2 时, 涂料液滴下落碰撞接触底板壁面后, 沿水平方向运动, 形成涂料液滴的横向扩散, 导致涂料液滴沿壁面不断水平扩展, 涂料液滴堆积高度降低。特别当涂料液滴与底板壁面的接触表面能降低为 10 J/m^2 时, 底板壁面的涂料液滴堆积几乎消失, 涂料液滴沿底板壁面水平铺展, 构成涂料液滴层, 在固体表面形成涂料涂膜。

图 4 表示涂料液滴堆积角随接触表面能的变化。

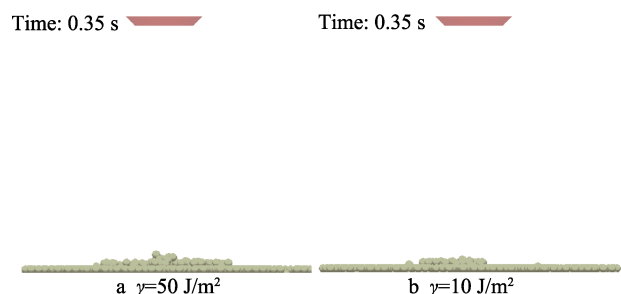


图 3 不同接触表面能的涂料液滴堆积虚拟试验
Fig.3 Virtual test of accumulation repose of droplets at different surface energies

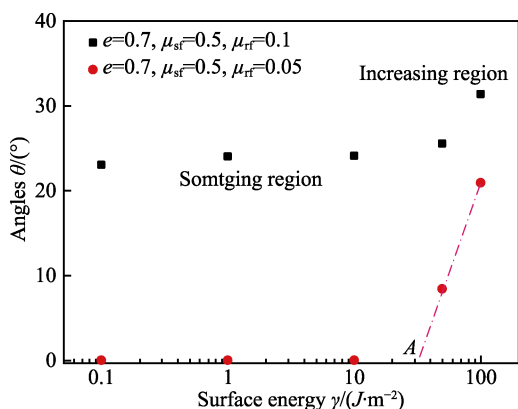


图 4 接触表面对涂料液滴堆积角的影响
Fig.4 Profiles of repose angles at different surface energies

在涂料液滴滑动摩擦因数为 0.1 时,随着涂料液滴与底板壁面的接触表面能增加,涂料液滴堆积角逐渐增大。堆积角变化趋势可以分为平缓区和增长区。在平缓区内,涂料液滴堆积角增大不明显,基本维持定值,表明涂料液滴堆积,并且具有一定的堆积高度。在增长区内,涂料液滴堆积角随接触表面能的增大而迅速增加。随着涂料液滴滑动摩擦因数减小为 0.05 时,在平缓区内涂料液滴堆积角接近于零,意味着底板壁面的涂料液滴堆积消失,涂料液滴水平铺展。在增长区内堆积角不断增大,表明涂料液滴在底板壁面形成堆积。堆积角随接触表面能的变化关系如下:

$$\theta = -62.18 + 17.83 \ln \gamma \quad (10)$$

平缓区和增长区的分界为 A 点,接触表面能为

γ_A 。当涂料液滴接触表面能小于 γ_A ,涂料液滴在固体壁面展平,形成涂料液滴层;相反,当涂料液滴接触表面能大于 γ_A ,涂料液滴出现堆积。由方程 (10) 可见,当堆积角 θ 趋于零时,虚拟试验确定的涂料接触表面能为 32.7 J/m^2 。

3 旋转喷枪小孔的液滴出流速度

实际应用中旋转喷枪的结构是由大小直径的圆台构成。涂料液滴由旋转喷枪内部的流动区 I、经过小孔通道后进入喷枪与管道壁面之间空间的流动区 II。为了准确观察涂料液滴在高速旋转喷枪作用下的运行轨迹,采用旋转喷枪 I,通过数值模拟和后处理追踪单一涂料液滴在不同时间的位置分布,如图 5 所示,可以明显观察到旋转喷枪 I 的涂料液滴从流动区 I、经过小孔喷射进入流动区 II,经高速旋转喷枪小孔与涂料液滴相互作用后,雾化涂料液滴最终抵达管道壁面。高速旋转的喷枪产生离心场,克服涂料液滴之间和涂料液滴与小孔壁面之间的相互碰撞作用,驱使液滴抛向管道壁面。由抽样涂料液滴的运动过程可见,对相同液滴直径 (0.000 2 m) 在相同时间内 (0.034 s) 涂料液滴序号 71 和 108 由流动区 I 流入流动区 II 具有相似的运动轨迹,同时涂料液滴序号 125 受小孔碰撞作用的控制,导致液滴流出小孔后改变涂料液滴的运动轨迹。相反,在相同时间内涂料液滴序号 151 停留在旋转喷枪流动区 I 内,沿壁面缓慢运动,涂料液滴呈现不同的流动状态。

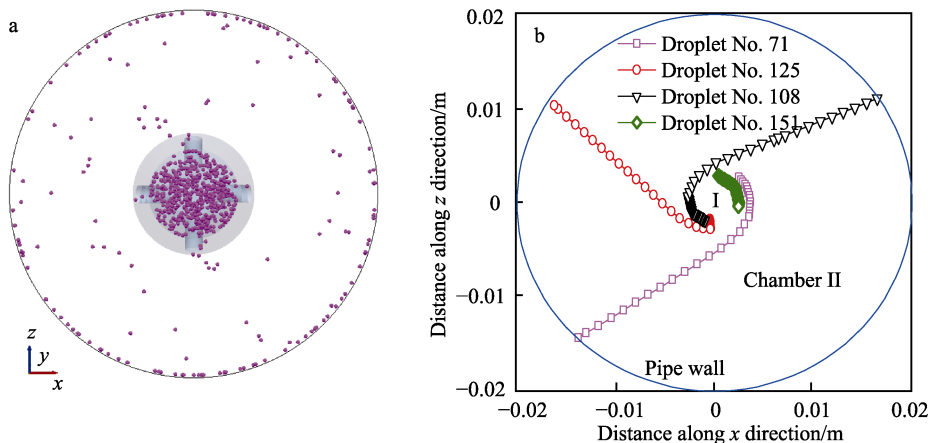


图 5 无气离心喷涂过程的涂料液滴空间分布和运动轨迹
Fig.5 Spatial distribution and trajectories of paint droplets in an airless spray coating process

以圆台结构构成的旋转喷枪小孔产生不同的离心作用力,导致涂料液滴流出小孔具有不同的出流速度。利用旋转喷枪 I 沿长度方向的 4 排 (环) 小孔,各环小孔具有不同旋转直径,产生不同的液滴出流速度。通过数值模拟和统计分析可以得到各环的小孔涂料液滴平均出流速度,见图 6。环 I 位于旋转喷枪 I 圆台的小直径端,射流小孔的旋转直径小;环 IV 位

于圆台大直径端,位于环上的射流小孔具有大的旋转直径。随着计算时间的增加,初期阶段中小孔涂料液滴平均出流速度为零,表明涂料液滴由进口到射流小孔流出需要一段时间,该段时间为 0.004~0.008 s。之后,出流速度突然增加,并且进入涂料液滴稳定流动阶段。在旋转喷枪 I 的流动区 I 内涂料液滴相互碰撞和涂料液滴与固体表面之间的相互作用,导致在稳定

流动阶段中小孔涂料液滴速度呈现脉动。环 I 的射流小孔出流速度最小, 环 IV 的射流小孔出流速度最大, 环 II 和 III 的小孔出流速度介于两者之间, 表明在相同旋转速度下射流小孔旋转直径的不同导致涂料液滴出流速度的差异。

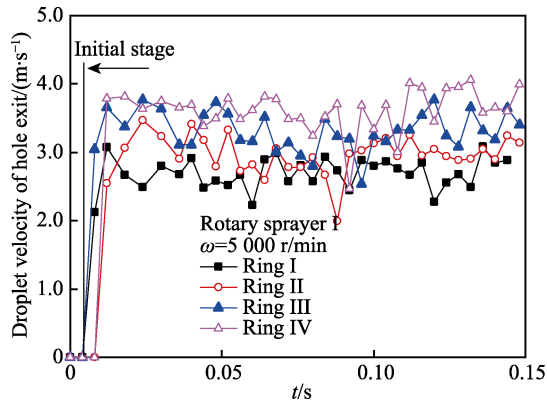


图 6 无气旋转喷枪 I 的出流速度随时间的变化
Fig.6 Exit velocities of airless rotary sprayer I over time

图 7 表示气旋转喷枪 I 瞬时小孔涂料液滴出流速度的变化。涂料液滴瞬时出流速度分量 v_y 和 v_z 均呈现由正值变为负值或者由负值变为正值的特征。涂料液滴轴向出流速度分量 v_y 的正负值揭示了涂料液滴由射流小孔流出后拥有向管道出口和入口方向流动的趋势, 导致涂料液滴向进口和出口方向流动。径向出流速度分量 v_z 的正负值反映了涂料液滴由小孔流出后具有一定的切向速度, 引发涂料液滴与管道壁面之间的摩擦作用。涂料液滴出流速度分量正负值的出现起因于涂料液滴与旋转小孔壁面之间的相互碰撞作用。

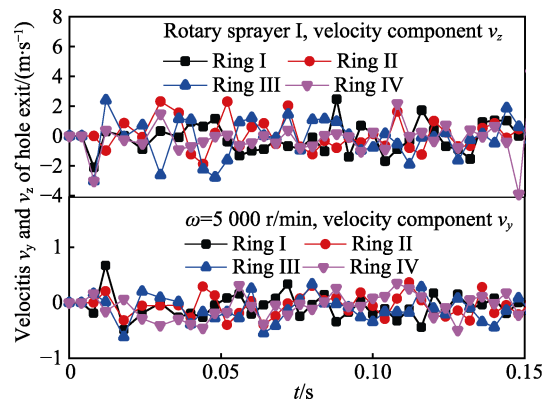


图 7 无气旋转喷枪 I 的瞬时出流速度分量 v_y 和 v_z 的变化
Fig.7 Instantaneous exit velocities components v_y and v_z of airless rotary sprayer I

图 8 表示不同旋转速度下无气旋转喷枪 I 不同环的喷射小孔涂料液滴出流速度的变化。沿旋转喷枪 I 的小直径端处的环 I 至大直径端处的环 IV, 小孔涂料液滴出流速度不断增加, 并且随着旋转喷枪 I 旋转速

度的提高, 涂料液滴出流速度增加。由此可见, 提高旋转喷枪的旋转速度, 有助于提高射流小孔的涂料液滴出流速度。

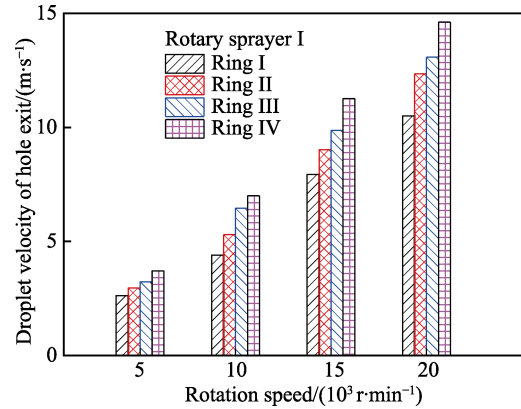


图 8 无气旋转喷枪 I 不同旋转速度的小孔涂料液滴出流速度
Fig.8 Paint droplet exit velocities of holes of airless rotary sprayer I at different rotating speed

旋转喷枪以等旋转速度 ω 绕其轴心高速旋转, 同时涂料液滴由喷枪进口流入。当涂料液滴沿旋转喷枪内壁面运动时, 忽略旋转喷枪小孔对涂料液滴流动的影响, 离心场作用下涂料液滴运动方程为^[24-25]:

$$v_r \frac{dv_r}{dr} = \omega^2 r \quad (11)$$

式中: r 为旋转半径; v_r 为液滴运动速度。当 $r=r_1$ 时, $v_r=0$; 当 $r=R$ 时, $v_r=v$ 。积分整理得到:

$$v = \omega \sqrt{R^2 - r_1^2} \quad (12)$$

当涂料液滴由喷枪进口进入流动区域 I 后, 在离心力作用下流向喷枪内壁面。保证喷枪壁面所有小孔均有涂料液滴流出的条件是: 喷枪内壁面拥有以涂料液滴直径 δ 的液滴层, 即 $r_1=R-\delta$, 代入方程得到:

$$v = \omega \sqrt{\delta(2R - \delta)} \quad (13)$$

在涂料液滴经过喷枪小孔时受液滴表面张力和涂料液滴与孔口表面碰撞作用力等因素, 使得涂料液滴通过孔口时发生能量损失, 喷枪小孔的涂料液滴流经小孔产生流动损失, 孔口出流速度发生变化, 引入涂料液滴射流小孔出流系数 α , 涂料液滴出流速度 v_d 为见式 (14)^[25-26]。

$$v_d = \alpha \omega \sqrt{\delta(2R - \delta)} \quad (14)$$

图 9 表示涂料出流系数与无量纲 Fr 数的变化。 Fr 表示在离心力场中粒子所受的离心力和它所受的重力之比, 即 $Fr=\omega^2 R/g$, 其中, R 是旋转半径。在不同喷枪旋转速度下, 随着 Fr 数的增加, 射流小孔出流系数在一定范围内变化, 最小值为 3.87, 最大值为 4.55, 表明对于一定的喷嘴射流小孔, 涂料液滴小孔出流系数接近于常数, 且 $\alpha=4.2$ 。射流小孔出流系数的最小相对误差和最大相对误差分别为 7.85% 和

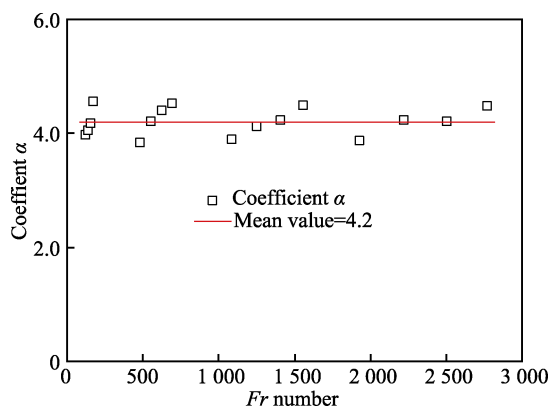


图9 旋转喷枪射流小孔涂料液滴出流系数的变化
Fig.9 Paint droplet discharge coefficient of holes of rotary sprayer

8.33%，由此可以确定旋转喷枪小孔的最大涂料液滴流量。

4 涂料液滴的黏附特性

采用无气旋转喷枪 II，数值模拟涂料液滴的管道内壁面的黏附特性。聚脲涂料液滴密度和表面张力分别为 $1\,060\text{ kg/m}^3$ 和 0.4 N/m 。无气旋转喷枪 II 沿水平管道轴心运动，水平运动速度为 75 mm/s ，涂料液滴质量流量为 0.15 kg/s 。图 10 表示管道壁面黏附涂料液滴数随时间的变化。随着计算时间的推进，壁面黏附涂料液滴数不断增加。液滴数量变化大致分为 3 个阶段：初期阶段、过渡阶段和稳定阶段。当涂料液滴在喷枪进口沿水平方向流入后，涂料液滴在喷枪流动区 I 内，在离心力作用下由轴向流动逐渐过渡为径向流动，并且朝向射流小孔方向流动，最终到达射流小孔，形成涂料液滴的初期阶段。喷枪 II 不同旋转速度下的初期阶段时间相差不大，旋转速度对初期阶段时间的影响不大。随着液滴不断由射流小孔流出，液滴

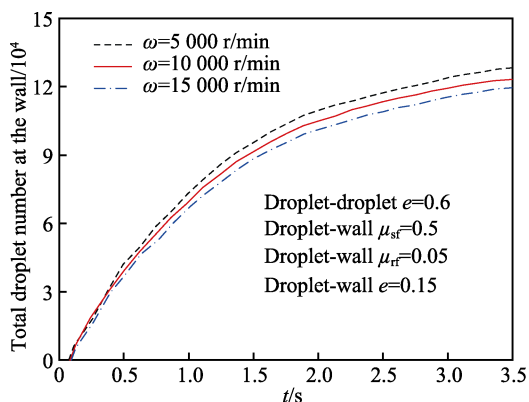


图 10 无气旋转喷枪 II 的管道壁面黏附液滴数随时间的变化
Fig.10 Profile of instantaneous paint droplet numbers using rotary sprayer II

被抛向管道壁面，黏附管道内壁面的涂料液滴数不断增加，进入过渡阶段。随着时间的不断推进，流动区域 II 内的涂料液滴数不断增加，逐渐得到稳定状态，同时，黏附管道内壁面的涂料液滴数也达到稳定，进入稳定阶段。计算结果表明，随着喷枪旋转速度的增加，黏附管道壁面的涂料液滴数下降，合理的喷枪旋转速度有助于增加壁面黏附的涂料液滴数量。

沿管道长度（轴向方向 y ）均匀划分 $N_y=20$ 等份，构成相同统计面积的 20 个统计圆环，统计得到不同圆环面积的涂料液滴数量。图 11 表示不同壁面圆环面积上涂料液滴数量的变化。 $N_y=1$ 和 20 分别位于管道进口和出口。计算结果表明，沿管道轴向方向不同统计圆环的涂料液滴数量基本相同，在 $N_y=1$ 和 20 处涂料液滴数量相对较少，在 $N_y=3$ 之后涂料液滴数相对较多，并且逐渐减少。原因是：在靠近进口和出口处，涂料液滴的轴向速度分量导致部分涂料液滴将通过管道进口和出口流出，进而导致黏附管道内壁面的涂料液滴数 N_{\min} 较低。在管道中部区域，涂料液滴富集，涂料液滴数 N_{\max} 较高。

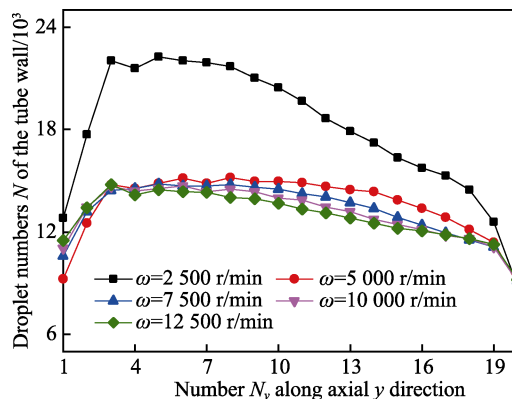


图 11 沿轴向的管道壁面黏附液滴数变化
Fig.11 Profile of paint droplet numbers along axial direction

同理，沿管道圆周方向均匀划分 $N_x=18$ 等份，构成相同统计面积的 18 个统计长条，统计得到不同长条面积的涂料液滴数量。图 12 表示不同壁面长条面积上涂料液滴数量的变化。统计长条 N_x 为 1~2 和 17~18 分别位于管道顶部区域， N_x 为 7~10 位于管道底部区域。在无气旋转喷枪 II 的旋转速度为 $2\,500\text{ r/min}$ 时，位于管道顶部涂料液滴数量最大 N_{\max} ，相反在管道底部的涂料液滴数量相对较低 N_{\min} 。涂料液滴受重力的作用，导致部分液滴流向管道底部。随着喷枪旋转速度的增加，液滴流动受离心力增强，涂料液滴重力作用减弱，使得管道底部和顶部的涂料液滴数量比较接近，沿管道圆周方向的涂料液滴数量分布比较均匀。旋转喷枪 II 的圆台平均直径为 52.5 mm ，旋转速度为 $2\,500\text{ r/min}$ 和 $5\,000\text{ r/min}$ 时的 Fr 数分别是 366.4 和 $1\,465.7$ ， Fr 数增加 3 倍。当喷枪旋转速度为 $10\,000\text{ r/min}$ 和 $12\,500\text{ r/min}$ 时， Fr 数分别为 $5\,862.8$ 和 $9\,160.7$ ，

与喷枪最低速度相比, Fr 数分别增加 15 和 24 倍。在旋转喷枪驱动下涂料液滴离心力大于涂料液滴重力, 产生足够大的黏性作用力, 才能保证涂料液滴黏附在管道壁面, 防止涂料液滴沿管道内壁面上部流向底部。

图 13 表示管道壁面所有统计单元 $N_i=N_yN_x$ 的涂料液滴数的变化, 其中管道总统计单元数为 360。无气旋转喷枪 II 的旋转速度为 2 500 r/min 时, 相对较低的喷枪旋转速度提供较低的离心力, 产生较低的液滴流动速度, 使得涂料液滴与壁面碰撞作用力降低, 导致统计单元内涂料液滴数量呈现较大的脉动。随着旋转速度的增加, 不同统计单元内液滴数量的变化趋势基本相似, 涂料液滴分布趋于均匀。

图 14 表示无气旋转喷枪 II 的统计单元涂料液滴数平均值和方差以及相对误差的分布, 其中相对误差是 $100(N_{\max}-N_{\min})/N_{\max}$ 。无气旋转喷枪 II 的旋转速度为 2 500 r/min 时, 统计单元涂料液滴数最大, 并且有较大的液滴数方差和相对误差。随着喷枪旋转速度的提高, 涂料液滴数的方差和相对误差降低, 涂料液滴分布的均匀性提高。由此可见, 为了保证涂料液滴喷涂的均匀性, 需要保证喷枪旋转速度不能小于

5 000 r/min。当喷枪旋转速度高于 10 000 r/min 时, 涂料液滴数的方差和相对误差略为减小, 降低不显著; 相反, 旋转喷枪的驱动电机耗能增加。

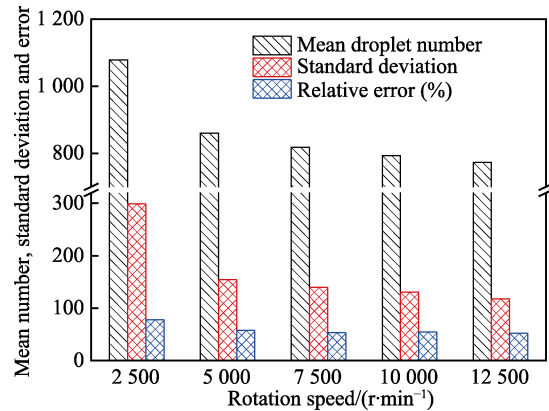


图 14 单元内涂料液滴数量的均值、方差以及相对误差

Fig.14 Paint droplet number mean values, standard deviations and relative errors

5 结论

1) 基于 EDEM 离散元软件仿真分析, 对涂料液滴的接触参数进行标定。从堆积角虚拟试验中得到涂料液滴-固体壁面 JKR 模型表面能。以涂料液滴堆积角为目标进行寻优模拟分析, 获得涂料液滴在水平板展平的表面能为 32.7 J/m^2 , 实现了应用离散元法标定获得的接触参数能在涂料液滴流动仿真中使用。

2) 数值模拟获得了圆台结构无气离心喷涂旋转喷枪 I 射流小孔的涂料液滴出流速度变化的规律, 随着喷枪旋转速度的增加, 射流小孔的涂料液滴出流速度增加; 理论分析给出涂料液滴射流小孔出流速度方程; 统计得到涂料液滴射流小孔出流系数为 4.2。

3) 数值模拟获得了无气离心喷涂旋转喷枪 II 涂料液滴在管道内壁面的分布规律。在低喷枪旋转速度下, 出现在管道上部区域的涂料液滴数低于管道底部区域的涂料原始数。随着喷枪旋转速度的提高, 沿管道内壁面黏附涂料液滴数趋于均匀分布。结果表明, 涂料液滴达到均匀分布的喷枪旋转速度不低于 5 000 r/min。

展望无气离心喷涂方法中涂料液滴在壁面附着特性与含腐蚀缺陷管道壁面损失程度密切相关。下阶段需对含腐蚀缺陷下无气离心喷涂过程中涂料液滴与壁面黏附特性的数值模拟与试验等进行研究, 为优化无气离心喷涂工艺提供理论依据。

参考文献:

- [1] 赵欣, 顾卫东, 蒋隽睿, 等. 聚氨酯材料内喷涂修复技术在供水管道非开挖修复中的应用[J]. 净水技术,

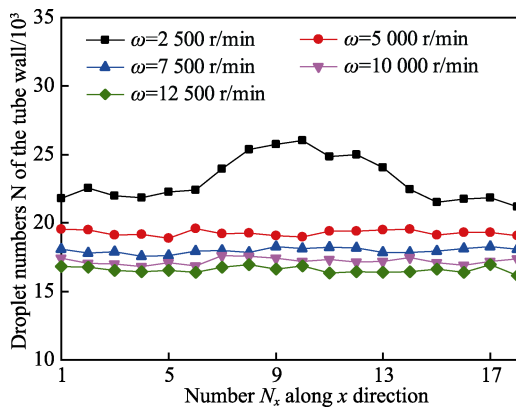


图 12 沿管道圆周方向的壁面黏附液滴数分布

Fig.12 Profile of paint droplet numbers along circumferential direction

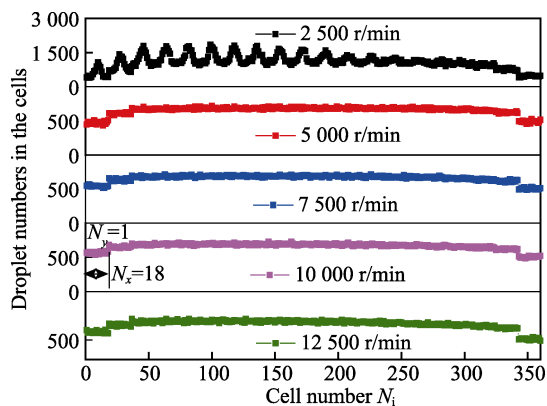


图 13 管道壁面统计单元的涂料液滴数量分布

Fig.13 Profile of paint droplet numbers of statistical units at pipe wall

- 2020, 39(S2): 117-120.
- ZHAO X, GU W D, JIANG J R, et al. Application of Polyurethane Internal Spraying Repair Technology in Trenchless Repair of Water Supply Pipeline[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(S2): 117-120.
- [2] 廖军, 刘辛悦, 韩冰, 等. 给水管非开挖内壁喷涂修复工艺在上海的工程应用[J]. 净水技术, 2018, 37(S1): 178-180, 189.
- LIAO J, LIU X Y, HAN B, et al. Engineering Application of Spray Repair Technology for Trenchless Inner Wall of Water Supply Pipeline in Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(S1): 178-180, 189.
- [3] CHA S C, ERDEMIR A. Coating Technology for Vehicle Applications[M]. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [4] 国海芝, 于复生, 时维康, 等. 油漆喷枪的研究现状[J]. 机电技术, 2016, 10(9): 150-154.
- GUO H Z, YU F S, SHI W K, et al. Current Status of the Research of Paint Sprayers[J]. Electromechanical Technology, 2016, 10(9): 150-154.
- [5] 姜伟, 李本爱, 吴显斌, 等. 常规管道内壁喷涂施工控制[J]. 涂层与防护, 2021(10): 8-10.
- JIANG W, LI B A, WU X B, et al. Research on Spraying Process for Conventional Pipeline Inner Wall[J]. Coating and Protection, 2021(10): 8-10.
- [6] 杨桂春, 陈雁, 陈诗明, 等. 无气喷涂成膜建模及特性研究综述[J]. 当代化工, 2021, 50(11): 2666-2671.
- YANG G C, CHEN Y, CHEN S M, et al. Review on Modeling and Characteristics of Airless Spraying Film[J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, 50(11): 2666-2671.
- [7] LEFEBVRE A H. Atomization and Sprays[M]. New York: Hemisphere Pub. Corp., 1989.
- [8] 李树贤, 牛文勇, 黄钰迪, 等. 镀锡板无铬钝化液喷射特性数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 509-516.
- LI S X, NIU W Y, HUANG Y D, et al. Numerical Simulation of Spray Characteristics of Chromium-Free Passivation Solution for Tin Plate[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(4): 509-516.
- [9] 陈文卓, 陈雁, 张伟明, 等. 圆弧面动态空气喷涂数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(12): 2406-2413.
- CHEN W Z, CHEN Y, ZHANG W M, et al. Numerical Simulation for Dynamic Air Spray Painting of Arc Surfaces[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(12): 2406-2413.
- [10] 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.
- [11] CUNDALL P A, STRACK O D L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [12] CROWE C T, SCHWARZKOPF J D, SOMMERFELD M, et al. Multiphase Flows with Droplets and Particles[M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [13] JOHNSON K, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface Energy and the Contact of Elastic Solids[J]. Proceedings of the Royal Society of London a Mathematical and Physical Sciences, 1971, 324: 301-313.
- [14] CIAVARELLA M. An Approximate JKR Solution for a General Contact, Including Rough Contacts[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2018, 114: 209-218.
- [15] HÆRVIG J, KLEINHANS U, WIELAND C, et al. On the Adhesive JKR Contact and Rolling Models for Reduced Particle Stiffness Discrete Element Simulations[J]. Powder Technology, 2017, 319: 472-482.
- [16] EDEM. Theory Reference Guide[M]. Edinburgh: DEM Solutions, 2014.
- [17] 武涛, 黄伟凤, 陈学深, 等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 93-98.
- WU T, HUANG W F, CHEN X S, et al. Calibration of Discrete Element Model Parameters for Cohesive Soil Considering the Cohesion between Particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93-98.
- [18] BARR J B, UCGUL M, DESBIOLLES J M A, et al. Simulating the Effect of Rake Angle on Narrow Opener Performance with the Discrete Element Method[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 1-15.
- [19] HOSHISHIMA C, OHSAKI S, NAKAMURA H, et al. Parameter Calibration of Discrete Element Method Modelling for Cohesive and Non-Spherical Particles of Powder[J]. Powder Technology, 2021, 386: 199-208.
- [20] UCGUL M, SAUNDERS C, LI P L, et al. Analyzing the Mixing Performance of a Rotary Spader Using Digital Image Processing and Discrete Element Modelling (DEM)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151: 1-10.
- [21] 日用化学工业科学研究所. 表面活性剂、粉体和颗粒休止角的测量: GB 11986—1989[S]. 北京: 国家技术监督局, 1989.
- Institute of Daily Chemical Industry. Surface Active Agents-Powders and Granules-Measurement of the Angle of Repose: GB 11986—1989[S]. Beijing: The State Bureau of Quality and Technical Supervision, 1989.
- [22] 陈诗明, 陈雁, 陈文卓, 等. V 形面喷涂成膜数值模拟[J]. 表面技术, 2023, 52(6): 285-295.
- CHEN S M, CHEN Y, CHEN W Z, et al. Numerical Simulation of Film Formation on V-Shaped Surface by Spraying[J]. Surface Technology, 2023, 52(6): 285-295.
- [23] 朱敬林, 姚飞, 王炳华, 等. 钢结构用水性醇酸防腐涂料涂装技术的研究分析[J]. 现代涂料与涂装, 2021, 24(11): 32-35.
- ZHU J L, YAO F, WANG B H, et al. Study on Coating Technology of Water-Based Alkyd Anticorrosive Coating for Steel Structure[J]. Modern Paint & Finishing, 2021, 24(11): 32-35.
- [24] LEUNG W W F. Industrial Centrifugation Technolog[M]. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [25] 索柯罗夫. 离心分离理论及设备[M]. 汪泰临, 译. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- B. И. COKOJOB. Centrifugal Separation Theory and Equipment[M]. WANG T L, Translated. Beijing: China Machine Press, 1986.
- [26] ASHGRIZ N. Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications[M]. New York: Springer, 2011.