

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20211207001

# 基于 CFD-DEM 耦合方法的喷砂冲蚀特性\*

周大鹏 马学东 陈燕

(辽宁科技大学机械工程与自动化学院 鞍山 114051)

**摘要:** 传统喷砂在实践中多以经验为主, 缺乏理论支撑。研究喷砂工艺的冲蚀磨损规律及其影响因素。在 CFD-DEM 耦合的基础上, 引入 Archard wear 模型求解喷砂气固两相流对平板的冲蚀过程, 预测颗粒冲击状态和冲蚀区域效果, 研究不同的喷射角度、砂粒粒径及供砂速率对平板冲蚀深度总量的影响规律及其变化原因。结果表明: 喷砂作用于平板形成的冲蚀区域形貌大致为盆地状, 但又因喷射角度的不同会造成类椭圆形或类圆形区域。在控制单因素变量条件下, 冲蚀深度总量随着喷射角度增大先缓慢增大至峰值, 随后基本上呈线性减小, 因此喷砂作业时应尽量保持倾斜, 以喷射角度  $50^\circ$  为宜, 另外, 从能量出发, 喷射角度  $50^\circ$  时法向-切向累积接触能量都相对较大; 同时砂粒粒径在  $0.25\text{ mm} < d < 0.55\text{ mm}$  范围内, 冲蚀深度总量下降最快; 冲蚀深度总量随供砂速率增大呈线性梯度增大。以数值模拟和试验验证相结合的形式给喷砂工艺提供了一种较为可行的研究方法。

**关键词:** 喷砂工艺; CFD-DEM; 气固两相流; 喷射角度; 砂粒粒径; 供砂速率; 冲蚀深度总量

**中图分类号:** TP399

## Sandblasting Erosion Characteristics Based on Coupled CFD-DEM Method

ZHOU Dapeng MA Xuedong CHEN Yan

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**Abstract:** The research of traditional sandblasting is mainly based on experience and lacks of theoretical support, so the erosion wear law and influencing factors of sandblasting technology are simulation studied. On the basis of CFD-DEM coupling, the Archard wear model is introduced to solve the erosion process of sandblasting gas-solid two-phase flow on the flat plate, and predict the impact state of particles and the effect of erosion area. The effects of different jet angles, sand particle size and sand supply rate on the total erosion depth of the flat plate and the variation reasons are studied. The results show that the shape of the erosion zone formed by sandblasting on the flat plate is basin shape, but it may be elliptic or circular due to the different jet angle. In the control of single-factor variable conditions, the total depth erosion with the injection angle increases first slowly to the peak, followed by a basically linear decrease. Therefore, sandblasting operations should be maintained as far as possible to tilt the angle of injection  $50^\circ$  is appropriate. In addition, from the energy point of view, the injection angle of  $50^\circ$  when the normal-tangential cumulative contact energy are relatively large. At the same time, sand particle size in the range of  $0.25\text{ mm} < d < 0.55\text{ mm}$ , the total depth erosion decreases fastest. The total erosion depth increases in a linear gradient with increasing sand supply rate. This paper provides a feasible research method for the sandblasting process in the form of numerical simulation and experimental verification.

**Keywords:** sandblasting technology; CFD-DEM; gas-solid two-phase flow; jet angle; sand particle size; sand supply rate; total erosion depth

\* 国家自然科学基金(51775258)、辽宁省自然科学基金重点(20170540458)和精密与特种加工教育部重点实验室基金(B201703)资助项目。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51775258), Liaoning Provincial Natural Science Foundation Plan Key Projects of China (20170540458), and Key Laboratory Fund of Ministry of Education for Precision and Special Processing (B201703).

20211207 收到初稿, 20220323 收到修改稿

## 0 前言

冲蚀是指材料受到小而松散的流动颗粒冲击时表面出现破坏的一类磨损现象, 恰恰喷砂作业表现为在高速气流携带下的砂粒作用到工件表面, 造成表面材料的挤压和移除, 出现一片粗糙的区域, 这种气固两相流冲击行为, 在学术上称为喷砂型冲蚀<sup>[1-3]</sup>。然而, 在气动喷砂方面基于数值模拟对工件表面冲蚀特性的文献研究鲜有报道。因此, 为了给喷砂作业提供理论支持和现实指导, 节省非必要的时间, 比如选用多大的砂粒粒径、喷嘴轴线与工件表面的冲击角调整为多大等, 能快而节省地获得喷砂件, 提高工作效率, 有必要对传统的气动喷砂冲蚀工件表面做模拟研究。

随着数值模拟软件的发展和广泛运用, 国内外学者对气固两相流的冲蚀行为已有了一定的研究。CHEN 等<sup>[4]</sup>对用于油田行业的弯管和 T 型盲管结构, 采用 CFD 数值模拟和室内试验验证相结合的方法, 研究粒子回弹模型对两者中颗粒轨迹和冲蚀磨损的影响。PENG 等<sup>[5]</sup>针对油气行业管道弯头处的冲蚀问题进行数值模拟预测, 研究不同进口气相速度、颗粒质量流量、管径等参数对弯管的冲蚀分布和粒子轨迹的影响规律。唐洋等<sup>[6]</sup>对开采天然气过程中压控滑套的冲蚀磨损进行数值模拟计算, 预测易发生冲蚀的部位, 得出粒径、流速、质量流量等因素和最大冲蚀速率的关系规律。ZHANG 等<sup>[7]</sup>基于 CFD 软件对常见的三种歧型三通管进行系统性研究, 分析分流和合流对三通管的冲蚀磨损模式和演变规律。杨鸿麟等<sup>[8]</sup>运用 CFD 方法模拟文丘里管内的液固两相流场, 得到收缩角、流速、颗粒直径等参数对管内冲蚀行为的影响变化, 预测变径管内发生冲蚀的位置和程度, 并提出抑制该冲蚀问题的建议。DARIHAKI 等<sup>[9]</sup>对收缩管内气固两相冲蚀问题进行研究, 得出不同的模型网格结构、粒径大小及收缩角对管内壁的冲蚀影响。HONG 等<sup>[10]</sup>通过 CFD 建立 90° 弯管的冲蚀模型, 分析多个工况因素对最大冲蚀速率的影响, 提出以雷诺数、密度比、粒径比和颗粒数目组成的关系式, 进而预测弯管的冲蚀状况。综上所述可以看出, 目前气固两相流对冲蚀磨损的研究运用最多的是 CFD 软件, 但是由于其自身的局限性, 将气固两相看成了混合流体, 固体相被拟流体化, 不能表征固体颗粒相的形状、碰撞以及位置等情况, 其中颗粒间的碰撞对冲蚀磨损的影响尤为重要; CARLOS 等<sup>[11]</sup>研究弯管

中气固两相流颗粒之间的碰撞对冲蚀磨损的作用, 通过与试验数据对比, 计入碰撞的仿真结果更为接近, 说明颗粒间碰撞对数值仿真的结果有积极的影响。因此, 本文将采用计算流体动力学软件 (CFD) 和离散元软件 (DEM) 耦合的方式对喷砂冲蚀板件过程进行数值模拟, 这样无论是流体或是颗粒都有了适合自身物理特性的模拟方法, 使得仿真更趋于真实化、形象化。目前该方法已普遍运用在输运管道<sup>[12]</sup>、流化床<sup>[13]</sup>、谷物风选<sup>[14]</sup>等领域的分析, 然而, 鲜有将这一耦合方法运用到喷砂冲蚀板件的研究中来。

针对气动喷砂冲蚀板件的模拟分析, 本文通过 CFD-DEM 耦合并引入 Archard wear 预测模型的方法, 对喷砂气固两相流冲蚀板件进行数值模拟并分析验证其准确有效性, 运用分析手段, 探究喷砂的不同因素参数对冲蚀深度总量、冲蚀效果和颗粒运动分布状态的影响情况, 得出其变化规律和相应现象原因, 并根据结果提出一些参考取值, 以期能够对生产实际中喷砂技术的决策提供指导。

## 1 喷砂冲蚀板件工作原理

气动喷砂系统主要是由空压机、脱水机、调压阀、喷枪调节支架、喷枪、储砂罐、质量流量阀及输送皮管组成, 如图 1 所示。空压机产生的压缩气体经脱水机干燥后, 在调压阀的控制下进入喷枪, 在喷枪内形成高速气相流场, 会在喷枪侧向砂料进口处产生负压, 在压力差的作用下, 砂料通过质量流量阀的控制下被吸入到喷枪内, 随后在高速气体的携带和喷嘴加速作用下, 以较高的速度冲击到工件表面, 会使工件表面发生一定的变化。其冲蚀机理如图 1 中框图所示。从图中可以看出, 砂料颗粒从喷嘴出口处冲击到工件表面整个运动状态, 喷枪通过调节支架的作用, 在工件正上方的一定距离处被固定, 喷嘴轴线与工件表面的夹角为  $\alpha$ 。经放大后, 有的砂粒速度方向与工件表面形成了一定夹角, 以冲击犁削形式作用于工件表面造成沟痕并产生薄片屑, 如 1a 图所示, 通常该突起的部分不会只受一次冲击就从表面剥落, 而是在后续的砂粒反复撞击下才会最终被剥落; 有的砂粒速度方向垂直于工件表面冲击, 形成凹坑并挤压出唇边, 如 1b 图所示; 前者比后者更容易造成材料流失。还有, 砂粒与工件接触后会反弹, 并与随后的砂粒碰撞干涉, 这种情况会造成一定的冲击动能损失, 降低作业效率, 如 1c 图所示。

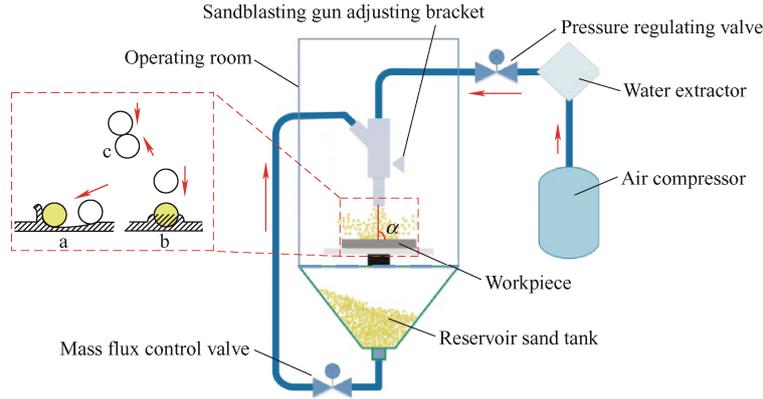


图1 气动喷砂系统及冲蚀机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pneumatic sandblasting system and erosion mechanism

## 2 理论模型仿真计算

### 2.1 气固两相运动方程

在喷嘴对板件冲蚀模型内，将空气设为理想气体，经计算气相流场的颗粒浓度小于10%，可忽略空隙率，来减少计算量，其中主要考虑曳力、重力，忽略萨夫曼升力、马格努斯效应等的影响。继而得到连续性方程、动量守恒方程<sup>[15]</sup>，可以表示如下。

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \right] + \rho g \quad (2)$$

式中， $v_i$ 、 $v_j$ 为气相在*i*、*j*方向的速度，*t*为时间， $\rho$ 为气相密度， $x_i$ 、 $x_j$ 为空间坐标，*P*为气相压力， $\mu_{\text{eff}}$ 为采用标准 *k-ε* 湍流模型计算气相流体的有效黏度。

通过耦合接口的数据传递，离散元模型中的颗粒在气相流场的作用下，做平动和转动运动，根据牛顿第二定律得出颗粒运动公式<sup>[16]</sup>为：

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^N (F_{c,n,ij} + F_{c,t,ij}) + F_f + F_g + F_o \quad (3)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^N (T_{c,ij} + T_{r,ij}) \quad (4)$$

式中，*i*为颗粒，*j*为颗粒或壁面， $m_i$ 为颗粒质量， $v_i$ 为颗粒速度， $F_{c,n,ij}$ 为法向接触碰撞力， $F_{c,t,ij}$ 为切向接触碰撞力， $F_f$ 为气流作用于颗粒的总力， $F_g$ 为

重力， $F_o$ 为其他作用力， $\omega_i$ 为转动角速度， $I_i$ 为转动惯量， $T_{c,ij}$ 为作用于颗粒上的力矩， $T_{r,ij}$ 为作用于颗粒上的扭矩。

对于颗粒与颗粒、颗粒与壁面之间的接触碰撞过程的计算，选用的是 EDEM 中内置的 Hertz-Mindlin 无滑移模型，该模型简图见图 2，从图中可以看出，模型中每个力和力矩可以看作弹簧或阻尼器，因此该模型又称为线性弹性-阻尼碰撞模型<sup>[17-18]</sup>，在保证颗粒运动准确性的前提下，极大地简化了颗粒碰撞过程中的受力变化。

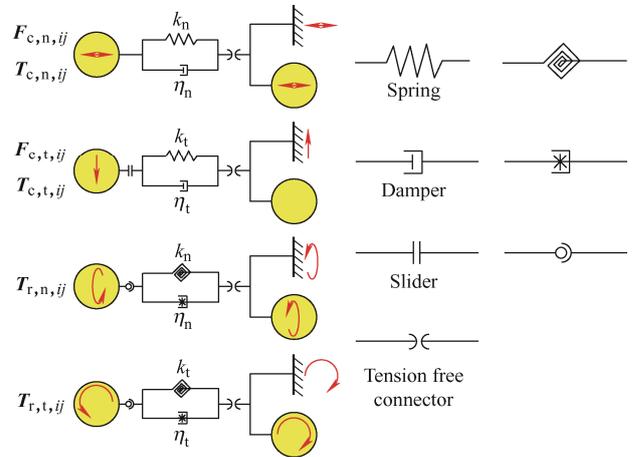


图2 碰撞模型

Fig. 2 Collision model

颗粒-颗粒及颗粒-壁面接触碰撞发生后，碰撞产生的力分解为法向力和切向力，基于线性弹性-阻尼碰撞模型，两个分量的表达式如下：

$$F_{c,n,ij} = -k_n \delta_{n,ij} - \eta_n v_{n,ij} \quad (5)$$

$$F_{c,t,ij} = -k_t \delta_{t,ij} - \eta_t v_{t,ij} \quad (6)$$

式中， $k_n$ 与 $k_t$ 为分别为法向和切向的弹性系数， $\delta_{n,ij}$ 与 $\delta_{t,ij}$ 分别为法向和切向的相对位移， $v_{n,ij}$ 与 $v_{t,ij}$ 分别为法向和与切向的相对速度， $\eta_n$ 与 $\eta_t$ 分别为法向

和切向阻尼系数。

以球形颗粒来说, 切向碰撞力即摩擦力, 摩擦力分为静摩擦和动摩擦, 当摩擦力为静摩擦时, 由式(6)计算即可。但当摩擦力大于静摩擦力的临界值时, 接触位置将发生滑动, 此时切向碰撞力应满足下式:

$$|F_{c,t,ij}| > f_s |F_{c,n,ij}| \quad (7)$$

由库伦摩擦模型计算, 此时切向碰撞力为:

$$F_{c,t,ij} = -f_s |F_{c,n,ij}| \delta_{t,ij} / |\delta_{t,ij}| \quad (8)$$

式中,  $f_s$  为滑动摩擦因数。

在当前模型中, 接触力矩  $T_{c,ij}$  即为切向碰撞力产生的扭矩  $T_{r,ij}$ , 如下表示:

$$T_{c,ij} = T_{r,ij} \quad (9)$$

切向碰撞力造成的扭矩计算如下:

$$T_{r,ij} = r \mathbf{n} \times F_{c,t,ij} \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{n}$  为法向单位矢量,  $r$  为颗粒半径。

## 2.2 冲蚀模型

冲蚀磨损实际上就是流体使颗粒具有一定速度并形成一定的角度冲击到工件表面, 将材料去除的一种现象。一直以来运用的冲蚀磨损的数值模型有很多, 虽然也能够表达规律现象, 但是与具体试验现象贴合得不够紧密, 因此, 本文引入 ARCHARD 等提出的模型<sup>[19-20]</sup>, 材料表面去除是以磨损体积  $W$  形式来表征的。Archard wear 预测模型在软件后处理中是以单位面积的冲蚀深度  $\Delta h$  表达磨损量, 公式表达如下:

$$W = \frac{K}{H} F_n \Delta L \quad (11)$$

$$\Delta h = \frac{W}{A} \quad (12)$$

式中,  $K$  为磨损系数,  $H$  为材料硬度,  $A$  为颗粒与工件表面的接触面积,  $F_n$  为颗粒与工件表面的法向力,  $\Delta L$  为颗粒在工件表面上的滑行距离。

## 2.3 模拟参数设置

运用 Soildwoks 建立喷嘴冲蚀板件的三维模型, 因喷嘴轴线与板件平面角度的不同, 即冲击角度不同, 需建立多个三维模型。以冲击角度为  $90^\circ$  为例, 选择喷嘴进口面命名为 Pressure-inlet, 外部流场域除底面外其余 5 面命名为 Pressure-outlet, 平板表面命名为 wall, 然后进行全局网格划分, 并在进出口和平板表面加密网格, 以便能够更好地提高计算精度, 如图 3 所示。根据喷砂冲蚀板件工艺的实际工况选取相关参数如表 1 所示。

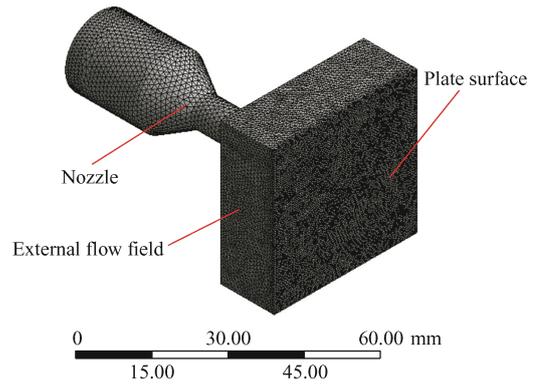


图3 模型网格划分

Fig. 3 Model meshing

表1 工艺参数

Table 1 Technological parameter

Sandblasting process parameter	Value
Inlet pressure / kPa	600
Outlet pressure / kPa	101
Jet angle $\alpha$ / ( $^\circ$ )	20-90
Sand particle size $d$ / mm	0.25-1.4
Sand supply rate $s$ / ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.03-0.11
Distance from nozzle outlet to plate / mm	15

为提高仿真速度, EDEM 中将石英砂粒简化为球形, 颗粒间或颗粒与平板的接触模型选为 Hertz-Mindlin(no slip), 冲蚀模型采用 Hertz-Mindlin with Archard wear, 根据平板的材料属性选取磨损系数为  $10^{-12}$ , 还有一些必要的参数设置<sup>[21]</sup>: 颗粒密度  $2650 \text{ kg/m}^3$ , 平板密度为  $7800 \text{ kg/m}^3$ , 颗粒泊松比为 0.4, 颗粒剪切模量 88 MPa, 平板泊松比 0.3, 平板剪切模量 70 Gpa, 颗粒-颗粒恢复系数 0.44、颗粒-颗粒静摩擦系数 0.27, 颗粒-颗粒滚动摩擦系数 0.01、颗粒-平板恢复系数 0.50, 颗粒-平板静摩擦系数 0.15, 颗粒-平板滚动摩擦系数 0.01, 仿真总时间为 3 s。

## 2.4 模型分析及试验验证

为了分析基于 EDEM-Fluent 耦合模拟喷砂冲蚀板件模型的可行性, 以喷射角度  $90^\circ$ 、砂粒粒径  $0.325 \text{ mm}$ 、供砂速率  $0.07 \text{ kg/s}$  的工艺条件为例, 在三维模型轴心线处做切片, 从 Fluent 中得到气相流场冲击平板时压强分布云图和速度分布云图, 如图 4 所示。可以看出, 喷嘴内形成了负压, 压力分布状态符合气体流动的条件, 相对应的速度分布状态也验证了这一点, 还可以从图中观察到, 超声速气流受到平板的阻挡, 被迫在板前形成激波, 该激波在动力学中称为板激波, 表现为气流速度快速降低, 板激波与平板之间的中心区域部分气流处于亚

声速状态。然后从图 5a 可以看到，正是因为超声速气流的冲击，在平板上形成了中间高向四周降低的压力分布区域，图 5b 为沿平板中线位置变化的压力值曲线，在平板中心区域压力变化较大。计算得到的平板表面压力分布结果与 COBBALD<sup>[22]</sup>气体喷流

冲击平板试验所测得结果（文献[22]中图 3），在沿平板中线位置上，压力分布曲线趋势基本一致，由此，间接证明了该模型在计算流场方面的可行合理性。符合实际工况下喷砂作业中气相流体的状态，也满足砂粒喷射的要求。

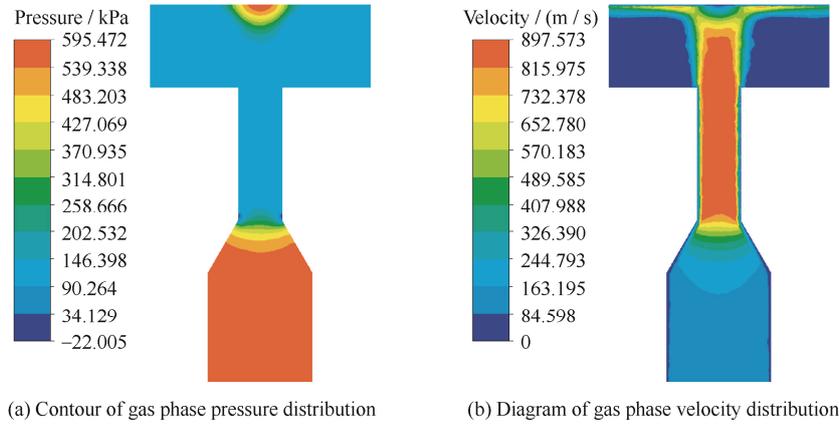


图 4 气相流场云图

Fig.4 Contour of gas phase flow field

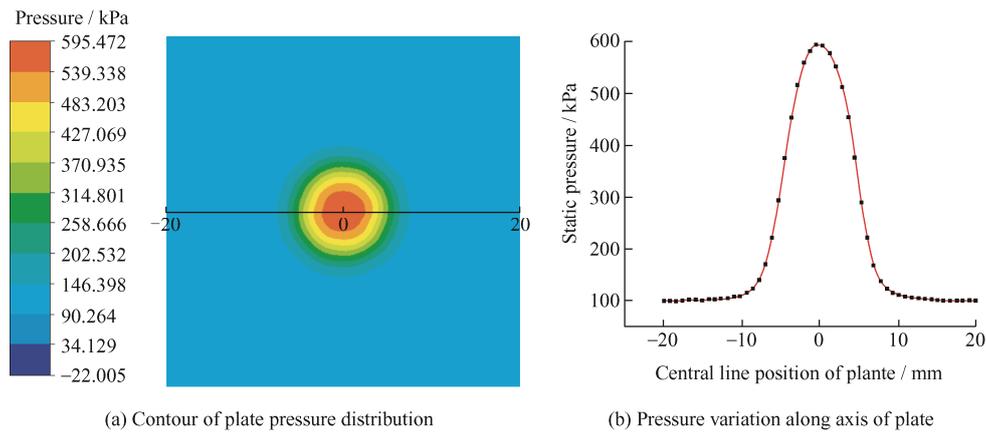


图 5 气流冲击平板表面的数值模拟压力结果变化

Fig. 5 Variation of numerical simulation pressure results of air flow impacting surface of flat plate

以上分析了喷嘴中气相流体在 Fluent 中的合理正确性，接下来分析固体相颗粒在 EDEM 中的运动状态及冲蚀效果，如图 6、7 所示。从图中可以看到，在气体流场的作用下，颗粒在喷嘴收缩段开始加速，到达出口处颗粒速度趋于了稳定，然后颗粒在外流场的作用下继续运动，最终冲击到平板表面上，颗粒速度骤降，并以一定速度向四周或反方向弹开，在颗粒冲击的作用下，平板表面上形成了中间深并逐渐向外变浅具有一定梯度的冲蚀云图，整个喷砂冲蚀平板模型的颗粒运动状态和表现出的效果符合真实的作业情形。后处理中主要运用 Grid Bin Group 功能设置统计网格，这样就能够限定区域（40 mm × 40 mm）内统计出想要的仿真结果，比如平板表面总的冲蚀深度和能量，颗粒个数及颗粒之间碰撞

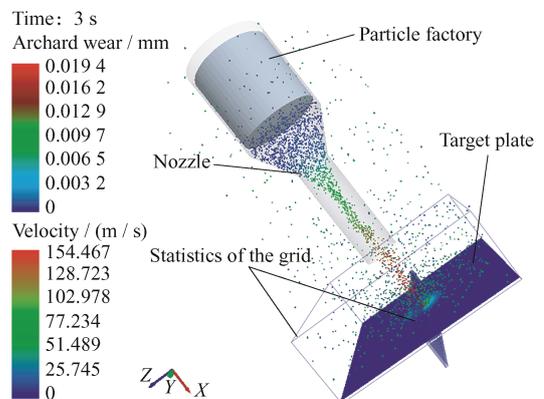


图 6 平板冲蚀云图及砂粒运动分布状态

Fig. 6 Plate erosion contour and sand particle movement distribution state

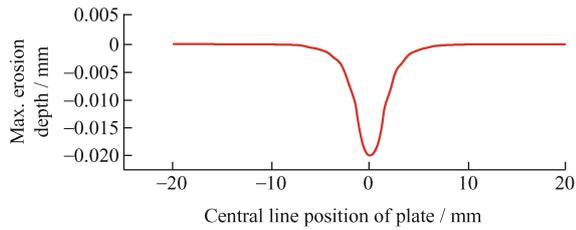


图 7 EDEM 中沿平板中线最大冲蚀深度轮廓

Fig. 7 Maximum erosion depth profile along plate midline in EDEM

次数等。图 7 就是利用统计网格在沿平板中线（长 40 mm）方向平均划分出 80 个 0.5 mm×0.5 mm 小区域，统计出各小区域的最大冲蚀深度值，即平板中线方向剖面的最大冲蚀深度轮廓。

为了验证上述喷砂冲蚀模型所得结果的有效准确性，比较直观且科学的方法就是测量冲蚀区域沿中线位置的深度。因此，依据仿真参数设置试验条件。首先，启动空压机，利用调压阀和 EI 质量流量控制阀分别将喷枪内的压力稳定在 0.6 MPa 和供砂速率控制在 0.07 kg/s；然后调节喷枪支架，使喷嘴轴线与平板表面形成喷射角度为  $\alpha=90^\circ$  的夹角，且喷嘴的出口端到平板表面的距离为 15 mm。为了能够直观且科学地测量出冲蚀区域的深度，使用 VHX-500F 超景深 3D 电子显微镜，针对该设备的特点，设计了一套试验流程，如图 8 所示，只有镜头下同时观测到冲蚀表面和平板原始表面才能为测量出高度差。首先，第一步准备一块 20 mm×40 mm×0.5 mm 和一块 40 mm×40 mm×1 mm 的不锈钢板，即平板 A 和平板 B，并将两块钢板用胶水固定在一起，以防止在喷砂过程中两者分离；第二步将

样件放置于喷嘴下方，喷嘴出口端面中线与样件中线平行且在一个垂直平面上，经喷砂后，冲蚀结果为类圆形区域，且被样件的中线（即两板结合线）平分为两半圆；第三步去掉平板 A，在平板 B 的冲蚀区域和原始表面交界处取三个点（即 a、b、c，且 b 为冲蚀中心区域，a、c 两点区域相对 b 点对称）进行观测。得出 a、b、c 三点区域的 3D 轮廓及高度差，如图 9 所示，从图中可以看出，在放大 600 倍的情况下，测得三点处的最大高度差（即最大冲蚀深度），其深度值分别为 7.3  $\mu\text{m}$ 、19.7  $\mu\text{m}$ 、8.2  $\mu\text{m}$ ，与相同位置处（可参考图 7）模拟仿真提取到的深度值分别为 7.9  $\mu\text{m}$ 、19.3  $\mu\text{m}$ 、8.4  $\mu\text{m}$ 。可以看出，虽有些许误差，但整体上试验结果与仿真结果吻合良好，精准度得到了保证，继而验证了该数值方法的准确可靠性。又由观测所采取的三点位置分布，可以得出喷砂冲蚀区域形貌的深度特点为中心大向外扩展变小。

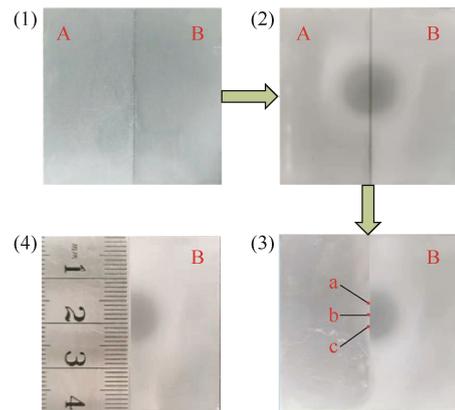
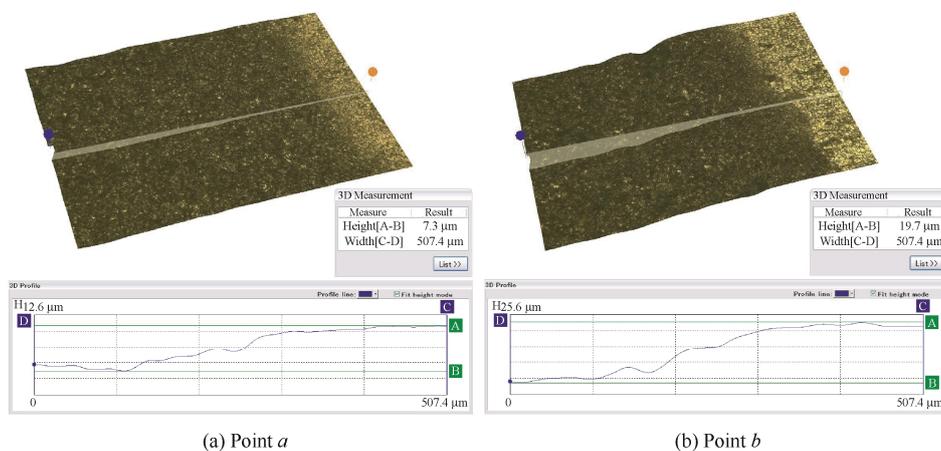


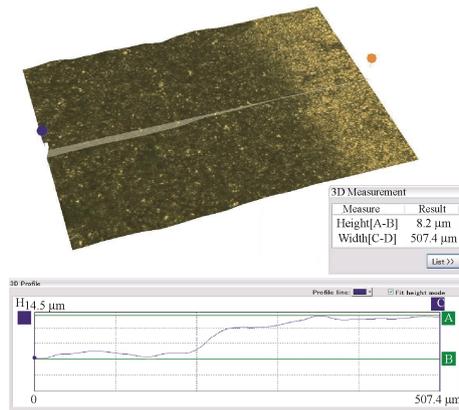
图 8 平板冲蚀过程及试验结果

Fig. 8 Flat plate erosion process and experimental result



(a) Point a

(b) Point b

(c) Point *c*图9 试验平板冲蚀区域中线处(*a*、*b*、*c*)三点位置的3D轮廓及高度差Fig. 9 3D profile and height difference of three points (*a*, *b*, *c*) at middle line of plate erosion area of experimental

### 3 仿真计算结果与讨论

喷砂冲蚀工件是实际工程运用中一项重要的表面处理技术,然而对于这项技术,其不同工艺参数对冲蚀行为的具体作用规律及原因缺乏系统性研究。因此,本节将分别对不同因素的多个参数进行模拟仿真,然后,基于计算结果,对比分析出喷射角度、砂粒粒径、供砂速率对冲蚀深度总量的影响规律,并探究其原因,为喷砂工艺理论研究提供参考。

#### 3.1 喷射角度对冲蚀结果的影响

为了研究喷射角度对冲蚀行为的影响,取供砂速率为  $0.07 \text{ kg/s}$ ,然后分别在  $0.55 \text{ mm}$ 、 $1 \text{ mm}$ 、 $1.4 \text{ mm}$  三种砂粒粒径下,平板表面的冲蚀深度总量随喷射角度变化的规律曲线,如图 10 所示,其中,设置喷射角度分别为  $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $90^\circ$ 。从图中可以看出,在三种砂粒粒径下,冲蚀深度总量随着喷射角度不断增大,整体变化趋势基本一致,喷射角度从  $20^\circ$  增大到  $50^\circ$  时,冲蚀深度总量增长幅度不大,在  $50^\circ$  时达到了最大值,然而,随着喷射角度继续增大,即  $\alpha=50^\circ \sim 90^\circ$  时,冲蚀深度总量几乎呈线性减小,在  $90^\circ$  时降为最小值,此时相比于初始角度  $20^\circ$  的冲蚀深度总量,平均降低了  $66\%$ 。为了更加形象地体现曲线数据,现以粒径为  $0.55 \text{ mm}$  为典型,展现在同一时刻不同喷射角度下的冲蚀深度云图和砂粒运动分布状态,如图 11 所示。从图中可以观察到,最大的冲蚀深度位于冲蚀区域的中心,同一标量下,喷射角度  $50^\circ$  时,云图色彩最深且分明,因此冲蚀深度总量在此时达到最大,喷射角度  $20^\circ$  与  $90^\circ$  相比,在相同的标量下,前者不仅比后者冲蚀区域更大,云图色度也更

深一些,因此前者的冲蚀深度总量远大于后者。从整体上看,随着喷射角度的增大,冲蚀区域轮廓由类椭圆形演变为类圆形,这种变化与 LAGUNA-CAMACHO 等<sup>[23]</sup>研究中(文献[23]中图 8)的钢板在不同喷射角度下的冲蚀痕迹变化基本吻合。喷砂颗粒流从喷嘴出口处以基本相同的速度冲出,在平板的阻挡下,因喷射角度的不同,也形成了具有一定规律性的颗粒运动状态。可以看出,喷射角度从  $20^\circ$  到  $90^\circ$  时颗粒运动分布状态由有序到杂乱,由此猜想,板前颗粒之间的碰撞和颗粒冲击到平板上的次数肯定具有一定的联系,这种关系的存在应该对冲蚀深度总量的变化具有一定的影响,如图 12 所示。从图 12 中可以看出,随着喷射角度的增大,板前颗粒间碰撞次数随之增大,相对应的颗粒冲击平板次数随之减小,说明当颗粒在冲击平板的过程中受到其他颗粒的干扰,会改变其运动状态,从而影响冲蚀效果,这也恰恰可以印证冲蚀深度总量随喷射角度的变化大体上呈下降的趋势。

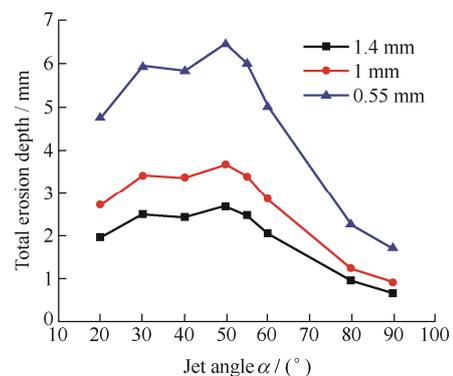
图 10 不同砂粒粒径下冲蚀深度总量随喷射角度的变化关系 ( $s=0.07 \text{ kg/s}$ )

Fig. 10 Variations of between total erosion depth with jet angle under different sand particle sizes

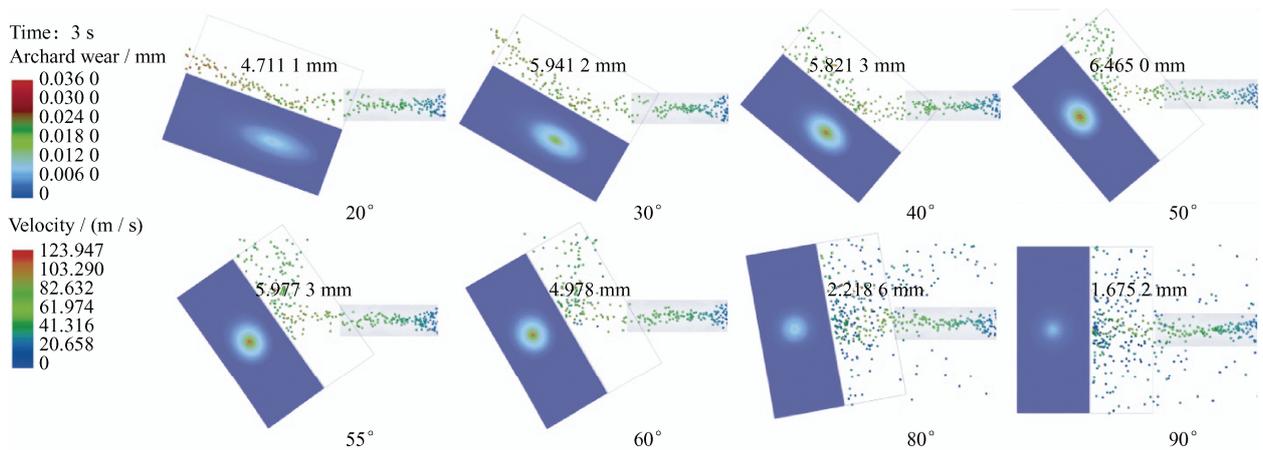


图 11 不同喷射角度下平板冲蚀云图和砂粒运动分布状态 ( $s=0.07 \text{ kg / s}$ ,  $d=0.55 \text{ mm}$ )

Fig. 11 Plate erosion contours and sand movement distribution state under different jet angle ( $s=0.07 \text{ kg / s}$ ,  $d=0.55 \text{ mm}$ )

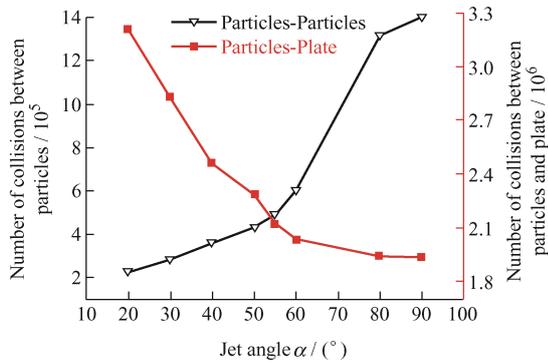


图 12 不同喷射角度下板前颗粒间碰撞次数和颗粒冲击平板次数的变化关系 ( $s=0.07 \text{ kg / s}$ ,  $d=0.55 \text{ mm}$ )

Fig. 12 Variations of number of collisions between particles in front of the plate and number of particles impact on plate under different jet angles ( $s=0.07 \text{ kg / s}$ ,  $d=0.55 \text{ mm}$ )

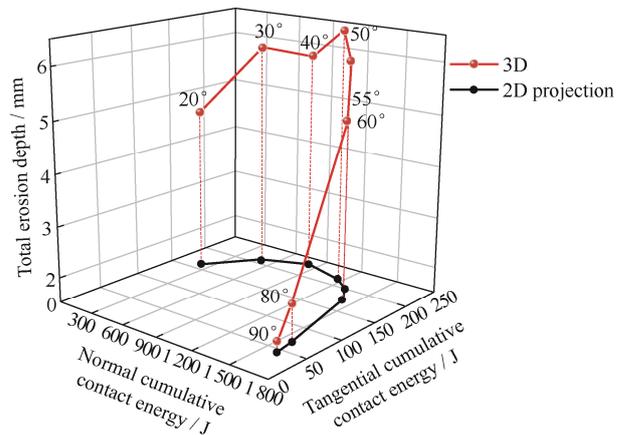


图 13 不同喷射角度下法向-切向累积接触能量与冲蚀深度总量关系变化 ( $s=0.07 \text{ kg / s}$ ,  $d=0.55 \text{ mm}$ )

Fig. 13 Variations of normal-tangential cumulative contact energy and total erosion depth under different jet angles ( $s=0.07 \text{ kg / s}$ ,  $d=0.55 \text{ mm}$ )

然而实际上, 冲蚀深度总量先是缓慢增大, 然后在  $50^{\circ}$  拐点处快速减小。这一现象的产生可以从能量的角度来解释, 喷砂冲蚀平板其实归根结底就是能量的转化, 即颗粒自带动能冲击到平板上, 产生累积的接触能量, 该能量分为法向和切向, 在两者的共同作用下, 决定了冲蚀深度总量, 如图 13 所示。从图 13 中可以看出, 当法向和切向累积接触能量都相对较大时, 即喷射角度为  $50^{\circ}$  时, 冲蚀深度总量更大, 平板表面冲蚀程度也更为严重, 从整体上还可看出, 平板上冲蚀深度总量的值以切向冲击能量为主的远大于以法向冲击能量为主的。综上, 喷砂作业时, 喷枪应尽可能保持倾斜, 这样才能达到更好的冲蚀效果, 效率也会提高, 根据结果喷射角度应以  $50^{\circ}$  为宜。

### 3.2 砂粒粒径对冲蚀结果的影响

砂粒粒径对喷砂冲蚀行为也有重要的影响, 在分析其对冲蚀的作用规律时, 首先设置喷射角度为  $90^{\circ}$ , 然后分别在  $0.03 \text{ kg / s}$ 、 $0.07 \text{ kg / s}$ 、 $0.11 \text{ kg / s}$  三种供砂速率下, 平板表面的冲蚀深度总量随砂粒粒径变化的规律曲线, 如图 14 所示, 其中, 根据实际作业情况, 选取砂粒粒径分别为  $0.25 \text{ mm}$ 、 $0.325 \text{ mm}$ 、 $0.55 \text{ mm}$ 、 $1 \text{ mm}$ 、 $1.4 \text{ mm}$ 、 $1.7 \text{ mm}$ 。为了进一步研究冲蚀效果, 从供砂速率为  $0.07 \text{ kg / s}$  的变化曲线中, 选取了三组不同标量的平板冲蚀云图及砂粒运动分布状态, 其砂粒粒径分别为  $0.25 \text{ mm}$ 、 $0.55 \text{ mm}$ 、 $1.4 \text{ mm}$ , 如图 15 所示。

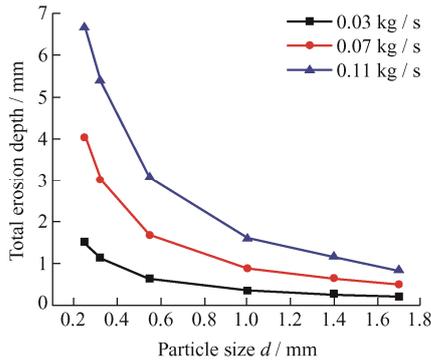


图 14 不同供砂速率下冲蚀深度总量随砂粒粒径的变化关系 ( $\alpha=90^\circ$ )

Fig.14 Variations of total erosion depth with sand particle size under different sand supply rates ( $\alpha=90^\circ$ )

从图 14 可以看出,随着颗粒粒径的增加,平板的冲蚀深度总量也随之减小,颗粒直径从 0.25 mm 增长到 1.7 mm 时,冲蚀深度总量(取三种供砂速率的平均值)降低了 88%。但具体到不同的粒径区间下,冲蚀深度总量下降趋势也有所不同,在  $d=0.25\sim 0.55$  mm 时,冲蚀深度总量下降梯度较大;在  $d=0.55\sim 1.7$  mm

时,冲蚀深度总量下降趋势变缓。经过分析,造成这一变化趋势的原因有二:一是在相同气相流速的作用下,随着粒径的增大,颗粒质量变大,在相同的时间内运动到出口处的颗粒速度随之减小,使得单一颗粒所携带的动能减小,造成颗粒流冲击到平板表面上所转化出的接触能量不多;二是在同等供砂速率条件下,相同时间内随着砂粒粒径的增大,冲击到板前的颗粒数目减少,对平板的冲蚀程度也大为下降。为了佐证其原因,选择了供砂速率为 0.07 kg/s 这一条件下,不同砂粒粒径的最大颗粒速度和板前颗粒数量,如图 16 所示。从图 16 中可以观察到,无论是最大颗粒速度还是板前颗粒数量,在砂粒粒径 0.55 mm 之前,都是快速降低,在 0.55 mm 之后,下降趋势变得平缓。根据图 15 所示的平板冲蚀云图和颗粒运动分布状态可以更为直观地发现,砂粒粒径越大,颗粒速度的最大值就越小,颗粒分布也更为稀疏,这样才导致平板上的冲蚀效果由层次分明且均匀到参差不齐且不均匀。由此可知,喷砂作业时,砂粒粒径越小,冲蚀速率越快,以颗粒直径  $0.25\text{ mm} < d < 0.55\text{ mm}$  范围内最为突出。

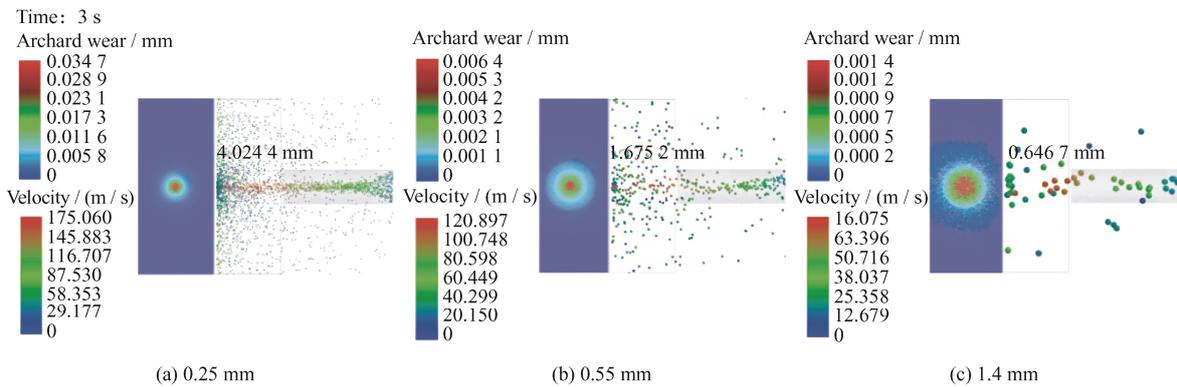


图 15 不同砂粒粒径下平板冲蚀云图和颗粒运动分布状态 ( $\alpha=90^\circ, s=0.07\text{ kg/s}$ )

Fig. 15 Plate erosion contour and particle movement distribution state under different sand particle sizes ( $\alpha=90^\circ, s=0.07\text{ kg/s}$ )

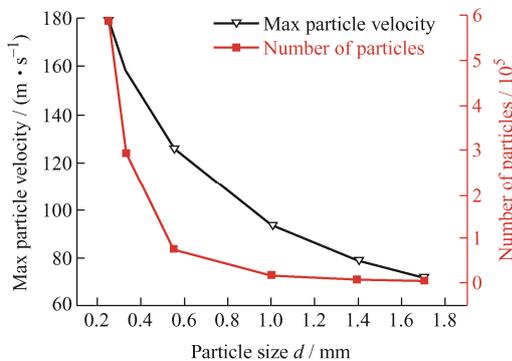


图 16 不同砂粒粒径下最大颗粒速度和板前颗粒数量的变化规律 ( $\alpha=90^\circ, s=0.07\text{ kg/s}$ )

Fig. 16 Variation rule of maximum particle velocity and number of particles in front of plate under different sand particle sizes ( $\alpha=90^\circ, s=0.07\text{ kg/s}$ )

### 3.3 供砂速率对冲蚀结果的影响

供砂速率决定了喷砂作业的出砂量,出砂量的多少又对喷砂冲蚀效果有一定的影响。因此,在分析供砂速率对冲蚀的作用规律时,首先选取砂粒粒径为 1 mm,然后分别在  $20^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $90^\circ$  三种喷射角度下,平板表面的冲蚀深度总量随供砂速率变化的规律曲线,如图 17 所示。其中,根据实际作业情况,选取供砂速率分别为 0.03 kg/s, 0.05 kg/s, 0.07 kg/s, 0.09 kg/s, 0.11 kg/s。为了更好地展示供砂速率影响下喷砂冲蚀的状态效果,截取出了喷砂角度为  $50^\circ$  时,不同供砂速率的平板冲蚀云图和颗粒运动分布状态,如图 18 所示。

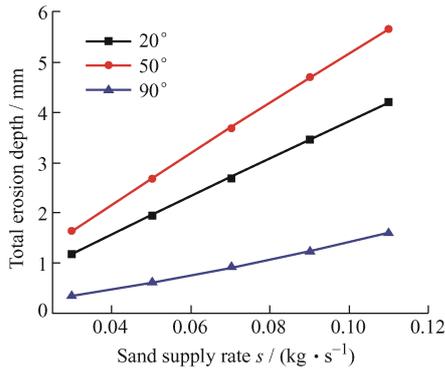


图 17 不同喷射角度下冲蚀深度总量随供砂速率的变化关系 ( $d=1 \text{ mm}$ )

Fig. 17 Variations of total erosion depth with sand supply rate at different jet angles ( $d=1 \text{ mm}$ )

从图 17 可见, 随着供砂速率的增大, 平板的冲蚀深度总量呈均匀线性增长, 供砂速率由  $0.03 \text{ kg/s}$  增加到  $0.11 \text{ kg/s}$  时, 冲蚀深度总量 (取三种喷射角度的平均值) 上涨了 74%。从颗粒的角度来分析其冲蚀效果的原因, 如图 19 所示, 从图中可以看出, 在不同供砂速率下, 颗粒冲击平板次数和板前颗粒数量都呈线性增长, 两者的变化梯度基本一致, 这也恰恰佐证了随着供砂速率变化, 冲蚀深度总量增长梯度均匀。从图 18 的平板冲蚀云图和颗粒运动分布状态可以更为直观地观察到, 供砂速率越大, 颗粒分布更为稠密, 这才造成平板上的冲蚀深度逐渐变大。因此, 在保证喷砂设备合理的范围内, 应尽可能加大供砂速率, 提高工作效率。

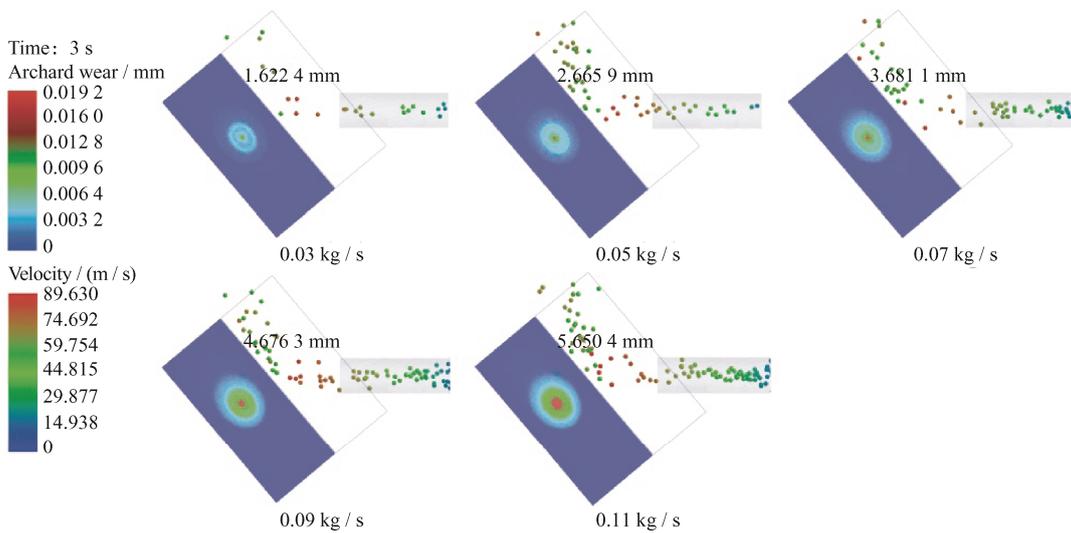


图 18 不同供砂速率下的平板冲蚀云图和颗粒运动分布状态 ( $d=1 \text{ mm}$ ,  $\alpha=50^\circ$ )

Fig. 18 Plate erosion contour and particle movement distribution state under different sand supply rates

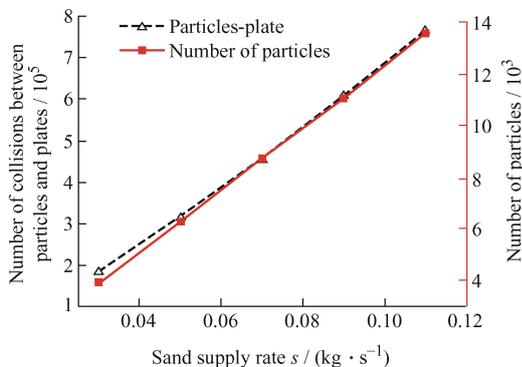


图 19 不同供砂速率下颗粒冲击平板次数和板前颗粒数量的变化关系 ( $d=1 \text{ mm}$ ,  $\alpha=50^\circ$ )

Fig. 19 Variations of number of particles impact on plate and number of particles in front of plate under different sand supply rates

### 4 结论

(1) 基于 CFD-DEM 耦合的 Archard wear 预测模型, 在气固两相运动方程及碰撞模型计算下, 模拟的喷砂运动状态及结果符合自身基本原理, 经试验结果验证比对, 仿真精度很好, 也证明了所提出的方法对喷砂冲蚀预测是准确可靠的。该仿真结果呈现出冲蚀区域的大致形貌轮廓, 但考虑到喷砂工件的表面完整性, 还须进一步构建对残余应力、显微硬度等特征量的仿真模型。

(2) 喷射角度的不同造成冲蚀区域呈现出类圆形或类椭圆形, 冲蚀深度值由中间大向外扩展变小; 喷射角度  $90^\circ$  的冲蚀深度总量相较于  $20^\circ$  平均降低了 66%, 即喷射角度为  $90^\circ$  时冲蚀效果最不理想; 平板近壁面颗粒间的碰撞干涉是冲蚀深度总量随着

喷射角度增大整体上减小的重要原因,其中颗粒碰撞是该模拟方法的一大优势;从能量角度剖析,喷射角度对冲蚀深度总量的影响是由法向-切向累积接触能量共同决定的,喷射角度 $50^\circ$ 冲蚀深度总量达到峰值是两种能量都相对较大的结果,喷砂作业时,喷枪应尽量保持倾斜,以达到最佳的冲蚀效果。

(3)在相同气相流速和供砂速率的作用下,砂粒粒径的变化使颗粒速度和冲击到板前的颗粒数量产生相应的变化,进而造成平板冲蚀深度总量的变化;使用这一区间的砂粒粒径( $0.25\text{ mm} < d < 0.55\text{ mm}$ ),极易获得较大的冲蚀速率。

(4)供砂速率增大,板前颗粒数量和冲击平板次数都有相应增大,为了提高工作效率,应在合理的范围内尽可能加大供砂速率。

### 参 考 文 献

- [1] 张晴波,郭涛,洪国军,等.喷砂冲蚀实验中颗粒轨迹的数值预测[J].爆炸与冲击,2021,41(2):158-165.  
ZHANG Qingbo, GUO Tao, HONG Guojun, et al. Numerical predicting of particle trajectories in an erosion experiment[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(2): 158-165. (in Chinese)
- [2] 李阳,刘阳,段德莉,等.WC-Co-Cr涂层和0Cr13Ni5Mo基材的气体喷砂冲蚀行为[J].中国表面工程,2013,26(2):14-20.  
LI Yang, LIU Yang, DUAN Deli, et al. Sand-blasting erosion behavior of HVOF sprayed WC-Co-Cr coatings and 0Cr13Ni5Mo substrate[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(2): 14-20. (in Chinese)
- [3] 李诗卓,董祥林.材料的冲蚀磨损与微动磨损[M].北京:机械工业出版社,1987.  
LI Shizhuo, DONG Xianglin. Material erosion wear and micro-movement wear[M]. Beijing: China Machine Press, 1987. (in Chinese)
- [4] CHEN X H, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. Application and experimental validation of a computational fluid dynamics(CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees[J]. Computers and Fluids, 2004, 33(10): 1251-1272.
- [5] PENG W S, CAO X W. Numerical prediction of erosion distributions and solid particle trajectories in elbows for gas-solid flow[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 30(3): 455-470.
- [6] 唐洋,何胤,姚佳鑫,等.天然气水合物喷射破碎压控滑套冲蚀磨损特性研究[J].表面技术,2021,50(2): 254-260, 270.  
TANG Yang, HE Yin, YAO Jiixin, et al. Study on erosion and wear characteristics of pressure-controlled sliding sleeve for gas hydrate injection and crushing[J]. Surface Technology, 2021, 50(2): 254-260, 270. (in Chinese)
- [7] ZHANG J, ZHANG H, LIU Y, et al. Erosion wear characteristics of tee tubes with gas-solid two-phase flow[J]. Journal Pressure Vessel Technology, 2021, 143(6): 064502.
- [8] 杨鸿麟,吴玉国,蒋硕硕,等.文丘里管冲刷腐蚀数值模拟[J].表面技术,2018,47(10):193-199.  
YANG Honglin, WU Yuguo, JIANG Shuoshuo, et al. Numerical simulation of erosion prediction in venturi[J]. Surface Technology, 2018, 47(10): 193-199. (in Chinese)
- [9] DARIHAKI F, ZHANG J, SHIRAZI S A. Solid particle erosion in gradual contraction geometry for a gas-solid system[J]. Wear, 2019, 426(4): 643-651.
- [10] HONG B Y, LI X P, LI Y B, et al. Numerical simulation of elbow erosion in shale gas fields under gas-solid two-phase flow[J]. Energies, 2021, 14(13): 3804.
- [11] CARLOS A R D, FRANCISCO J D S, RICARDO D V S, et al. The role of inter-particle collisions on elbow erosion[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 89(3): 1-22.
- [12] 杜俊,胡国明,方自强,等.弯管稀相气力输送CFD-DEM法数值模拟[J].国防科技大学学报,2014,36(4):134-139.  
DU Jun, HU Guoming, FANG Ziqiang, et al. Simulation of dilute pneumatic conveying with bends by CFD-DEM[J]. Journal of National Defense University of Defense Technology, 2014, 36(4): 134-139. (in Chinese)
- [13] ZHAO Y Z, XU L, ZHENG J Y. CFD-DEM simulation of tube erosion in a fluidized bed[J]. Aiche Journal, 2017, 63(2): 418-437.
- [14] 郭柄江,马学东,赵磊,等.基于DEM-CFD耦合的谷物多级风选模拟研究[J].中国农机化学报,2019,40(10):96-102.  
GUO Bingjiang, MA Xuedong, ZHAO Lei, et al. Simulation research of grain multi-stage wind selection based on DEM-CFD coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization. 2019, 40(10): 96-102. (in Chinese)
- [15] XU L, ZHANG Q, ZHENG J Y, et al. Numerical prediction of erosion in elbow based on CFD-DEM simulation[J]. Powder Technology, 2016, 302: 236-246.
- [16] CHENG J R, DOU Y H, ZHANG N S, et al. A new method for predicting erosion damage of suddenly

- contracted pipe impacted by particle cluster via CFD-DEM[J]. *Materials* (Basel, Switzerland), 2018, 11(10): 1858.
- [17] 许磊. 基于切向撞击能量的颗粒尺度磨损模型及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- XU Lei. Study on the particle-scale wear model based on shear impact energy and its applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [18] ZHAO Y, XU L, ZHENG J. CFD-DEM simulation of tube erosion in a fluidized bed[J]. *AIChE Journal*, 2017, 63(2): 418-437.
- [19] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surface[J]. *Applied Physics*, 1953(8): 981-988.
- [20] 桂长林. Archard 的磨损设计计算模型及其应用方法[J]. *润滑与密封*, 1990(1): 12-21.
- GUI Changlin. The Archard design calculation model and its application methods[J]. *Lubrication Engineering*, 1990(1): 12-21. (in Chinese)
- [21] 惠志全, 黄思, 黄家兴, 等. 基于 EDEM-Fluent 耦合计算的喷砂机磨损特性的影响因素研究[J]. *重庆理工大学学报 (自然科学)*, 2019, 33(12): 111-118.
- HUI Zhiqian, HUANG Si, HUANG Jiaying, et al. Study on influencing factors of wear properties in a sandblasting machine based on EDEM-Fluent coupling[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2019, 33(12): 111-118. (in Chinese)
- [22] COBBALD T J. The impingement of underexpanded axisymmetric rocket motor exhausts and cold jets on flat plates[J]. *The Aeronautical Journal*, 1992, 96(951): 27-28.
- [23] LAGUNA-CAMACHO J R, HERNÁNDEZ-ROMERO I, ESCALANTE-MARTÍNEZ J E et al. Erosion wear of AISI 420 stainless steel caused by walnut shell particles[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2015, 68(4): 633-647.
- 
- 作者简介: 周大鹏, 男, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向颗粒物质动力学、计算机仿真技术。  
E-mail: 15689338707@163.com
- 马学东 (通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 教授。主要研究方向颗粒物质动力学。  
E-mail: madong912@126.com