

DOI: 10. 11973/jxgccl230371

# 冷喷涂过程中颗粒加速特性的数值模拟

董脉鸣<sup>1</sup>, 辛红敏<sup>1</sup>, 李光平<sup>2</sup>, 代辉<sup>1</sup>, 程清思<sup>1</sup>, 姚倡锋<sup>3</sup>, 崔敏超<sup>3</sup>

(1. 湖北文理学院, 纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室, 襄阳 441053; 2. 湖北超卓航空科技股份有限公司, 襄阳 441000; 3. 西北工业大学, 航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 西安 710072)

**摘要:**采用ANSYS FLUENT软件建立冷喷涂过程中颗粒沉积的有限元模型,通过颗粒撞击速度的估算公式进行了验证;采用有限元模型开展了载气压力(0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3 MPa)、载气温度(400, 500, 600, 700, 800 K)、喷涂距离(15, 20, 25, 30, 35 mm)等工艺参数对颗粒加速特性的单因素影响研究,通过响应曲面法分析工艺参数对颗粒加速特性的交互影响规律。结果表明:不同工艺参数下颗粒撞击速度模拟值与估算值的平均相对误差为5.37%,验证了有限元模型的可靠性。随着载气压力的增加,颗粒速度增大,相邻载气压力下颗粒撞击速度的平均增加幅度为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,颗粒温度变化不明显;随着载气温度升高,颗粒温度升高,相邻载气温度下颗粒撞击温度的平均增加幅度为60 K,颗粒速度变化不明显;随着喷涂距离的增加,颗粒速度和颗粒温度均变化不明显。载气压力对颗粒速度的影响最为显著,载气温度次之,喷涂距离的影响最不显著。载气压力与载气温度的交互作用对颗粒速度的影响最为显著,载气压力与喷涂距离次之,载气温度与喷涂距离交互作用的影响最小。

**关键词:**冷喷涂;颗粒加速特性;工艺参数;响应曲面法

**中图分类号:** TG174.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3738(2024)09-0087-09

## 0 引言

冷喷涂技术是建立在空气动力学上的以粉末固态沉积为特点的表面喷涂技术<sup>[1]</sup>。在冷喷涂过程中,需要通过Laval喷嘴产生的超音速气流将颗粒加速,使颗粒达到较高的能量,以实现颗粒的有效沉积。目前,国内外学者对冷喷涂过程中颗粒的加速特性开展了一系列研究,并已积累了一些成果,大量研究内容都集中在载气压力、载气温度、喷涂距离、送粉速度、喷管尺寸等单因素的影响上<sup>[2-9]</sup>,而关于多因素交互影响的研究较少。

由于冷喷涂过程中颗粒高速流动且尺寸微小,在现有技术和试验条件下对颗粒速度进行直接测定较难,研究人员引入有限元数值模拟开展了颗

粒加速特性研究<sup>[10-12]</sup>。基于此,作者采用ANSYS FLUENT软件建立冷喷涂过程中颗粒沉积的有限元模型,获取不同载气压力、载气温度、喷涂距离下颗粒加速特性,再通过响应曲面法分析了工艺参数的交互影响规律,研究结果可为冷喷涂作业提供理论指导。

## 1 有限元模型的建立

冷喷涂设备中的Laval喷管由圆形截面的收缩段和扩张段组成<sup>[13]</sup>,压力入口直径、喉部直径和出口直径分别为9, 2, 5 mm,收缩段和扩张段长度分别为20, 120 mm,颗粒入口直径为1 mm,喷管出口与基板之间的喷涂距离暂定为25 mm。计算区域为整个物理模型,采用四边形结构进行网格划分,其中颗粒运动区域网格细小,其余区域网格尺寸渐变以提高计算精度、缩短计算时间<sup>[14]</sup>。喷管入口设置为压力入口,距离喷管入口中心轴3 mm处设置为颗粒入口,喷管出口处的周围环境设置为压力出口<sup>[15]</sup>,喷管管壁和基板均设置为无滑移壁面,不考虑基板与颗粒之间的热传递和Laval喷管本身的温度变化<sup>[16]</sup>。喷管和基板的几何结构、边界条件以及模型的网格

收稿日期: 2023-08-09; 修订日期: 2024-07-21

基金项目: “新能源汽车与智慧交通”湖北省优势特色学科群资助项目;湖北文理学院研究生教育优秀成果培育项目;航空发动机高性能制造工信部重点实验室(西北工业大学)开放课题(HPM-2022-04);2023年襄阳市科技计划项目(关键核心技术攻关专项)

作者简介: 董脉鸣(1999—),男,湖北襄阳人,硕士研究生

通信作者(导师): 辛红敏教授

划分如图1所示。

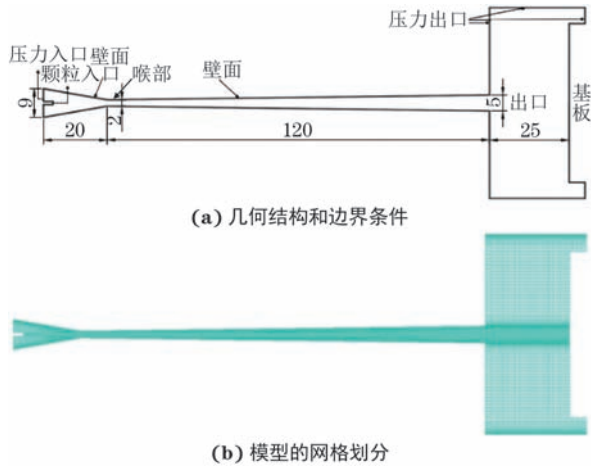


图1 喷管和基板的几何结构、边界条件和模型的网格划分

Fig. 1 Geometric structure and boundary conditions for nozzle and substrate plate (a) and meshing of model (b)

气体选取为理想可压缩氦气,黏性流动,采用基于密度基的隐式方法来求解流场。采用Realizable的k-epsilon模型描述气体的湍流特性,固体颗粒按离散相处理,即假设颗粒是稀疏的,连续相不受离散相影响,运用耦合方法分两步迭代求解流场,即先计算连续相流场,再利用离散相模型(DPM)计算离散相流场<sup>[17]</sup>。颗粒选用粒径为30 μm的铝粉,密度为2 700 kg·m<sup>-3</sup>,比热容为898.2 J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>。参考文献[18],该粒径铝颗粒的临界沉积速率为680~700 m·s<sup>-1</sup>,若颗粒撞击速度(撞击基板时的速度)超过临界沉积速率,则可实现有效沉积。

## 2 模拟结果验证与讨论

### 2.1 模拟结果验证

参考文献[19-20],在冷喷涂过程中颗粒撞击速度估算公式如下:

$$v_p = \frac{M}{\sqrt{\left[ \frac{M_{\text{He}}}{\gamma RT} \right] + 0.85 \sqrt{d_p \rho_s / \rho_0} / x}} \quad (1)$$

式中:  $v_p$  为颗粒撞击速度;  $M$  为局部马赫数;  $M_{\text{He}}$  为氦的摩尔质量, 4 g·mol<sup>-1</sup>;  $\gamma$  为气体比热容比, 1.4;  $R$  为气体常数, 8.314 J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup>;  $T$  为载气温度;  $d_p$  为颗粒直径;  $x$  近似为喷管喉部与基板之间的距离;  $\rho_s$  为颗粒密度;  $\rho_0$  为喷嘴入口处的静压力。

Laval喷管中的流动是非等熵的可压缩流动,是一个很复杂的现象。为了简化问题,通常将喷管内的流动视为一维定常等熵流动<sup>[21]</sup>。根据喷管的等熵流动关系,可以计算出喷管出口处的局部马赫数,具

体表达式为

$$M = \left( K_1 \frac{A_e}{A_t} + 1 - K_1 \right)^{K_2} \quad (2)$$

$$K_1 = 218.0629 - 243.5764\gamma + 71.7925\gamma^2 \quad (3)$$

$$K_2 = -0.122450 + 0.2813\gamma \quad (4)$$

式中:  $A_e$  为喷管出口面积;  $A_t$  为喷管喉部面积。

根据上述公式计算出的颗粒撞击速度与数值模拟得到的颗粒撞击速度进行对比。由表1可以看出,不同工艺参数下颗粒撞击速度模拟值与估算值的平均相对误差为5.37%,验证了有限元模型的可靠性。

### 2.2 气流速度和气流温度

在Laval喷管内,气流速度和气流温度带动着颗粒运动,是影响颗粒加速特性的关键因素。在载气压力为0.9 MPa、载气温度为600 K、喷涂距离为25 mm的工艺参数条件下模拟物理模型内部气流速度和气流温度随轴向距离(距压力入口的距离)的变化曲线。由图2可以看出:随轴向距离的增大,气流速度呈先升后降的趋势,而气流温度则呈先降后升的趋势;气流速度和气流温度呈负相关,符合理想气体状态方程<sup>[22-23]</sup>。在冷喷涂过程中颗粒入口处的压力大于喉部处的压力,产生的压力差造成流场内部气流速度的增加;随着轴向距离的增加,压力逐渐降低,且扩张段沿气流方向的压力差小于收缩段,因此扩张段的气流速度变化小于收缩段,当气流到达喷管出口处压力差的方向开始发生改变,气流速度降低。气流速度和气流温度在轴向距离为20 mm和140 mm处发生突变,这2处的气流速度分别由亚声速转变成超声速以及由超声速转变成亚声速。

### 2.3 载气压力对颗粒速度和温度的影响

在载气温度600 K、喷涂距离25 mm条件下,研究载气压力(0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3 MPa)对颗粒加速特性的影响。由图3可知,随着轴向距离的增加,不同载气压力下颗粒速度呈增大趋势,且均在轴向距离为20 mm处发生突变。Laval喷管是收缩扩张的管式结构,喉部面积小于入口面积,在气流的影响下,颗粒易在喉部区域内堆积,导致入口到喉部这段距离的速度增长缓慢;通过喉部区域后截面面积逐渐变大,同时在超声速气流速度的加持以及惯性力作用下,颗粒速度迅速增大;当颗粒到达喷管出口后,气流速度下降,但在惯性力下颗粒速度依旧增长,但增长速率变缓。随着载气压力增大,颗粒速度增加,相邻载气压力下颗粒撞击速度的平均增加幅度为50 m·s<sup>-1</sup>。

表1 颗粒撞击速度估算值与模拟值的对比以及相对误差

Table 1 Comparison between calculation and simulation for particle impact velocity and relative error

载气压力/MPa	载气温度/K	喷涂距离/mm	颗粒撞击速度/(m·s <sup>-1</sup> )		相对误差/%
			估算值	模拟值	
0.5			673.61	641.37	4.8
0.7			754.85	704.49	6.7
0.9	600	25	796.53	753.37	5.4
1.1			835.38	794.05	4.9
1.3			871.72	826.53	5.2
	400		743.76	695.21	6.5
	500		767.35	727.16	5.2
0.9	600	25	796.53	753.37	5.4
	700		817.69	775.52	5.2
	800		851.07	794.62	6.6
		15	765.34	735.86	3.9
		20	779.62	745.21	4.4
0.9	600	25	796.53	753.37	5.4
		30	801.43	760.78	5.1
		35	815.14	767.79	5.8

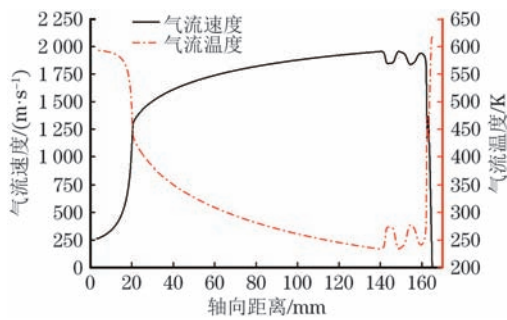


图2 气流速度和气流温度随轴向距离的变化曲线

Fig. 2 Curves of airflow velocity and airflow temperature vs axial distance

随着轴向距离的增加,不同载气压力下颗粒温度呈先升高后降低的趋势。这是由于颗粒流经收缩区域时产生了气动加热,颗粒压缩气体使之升温,而高温气

流又对颗粒进行传热,因此颗粒温度升高;在轴向距离大于20 mm后,气流速度很高,气流温度降低,从而使颗粒温度降低。随着载气压力的增加,颗粒温度变化不明显,相邻载气压力下颗粒撞击温度(撞击基板时的温度)的平均降低幅度仅为10 K。

由图4可以看出,在喷管出口区域,气流膨胀,产生局部激波,当气流在经过激波后,气流速度从超声速转变成亚声速并降为0。随着载气压力的增加,喷管出口区域气流速度场产生的马赫环变大,表明气流在喷管出口处继续膨胀,产生局部激波,进而使气流速度增加。气流速度明显增加的同时,基板前激波区域的气流密度减小,对颗粒的减速效果减弱,两因素的共同作用导致颗粒速度增大。随着载气压力的

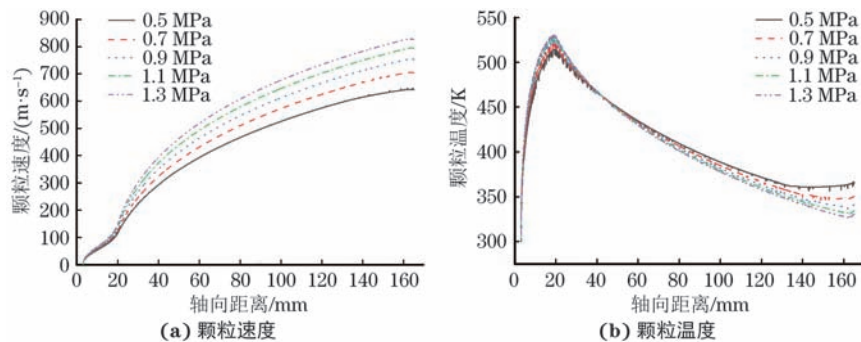


图3 不同载气压力下颗粒速度和温度随轴向距离的变化曲线

Fig. 3 Particle velocity (a) and temperature (b) vs axial distance curves under different gas pressures



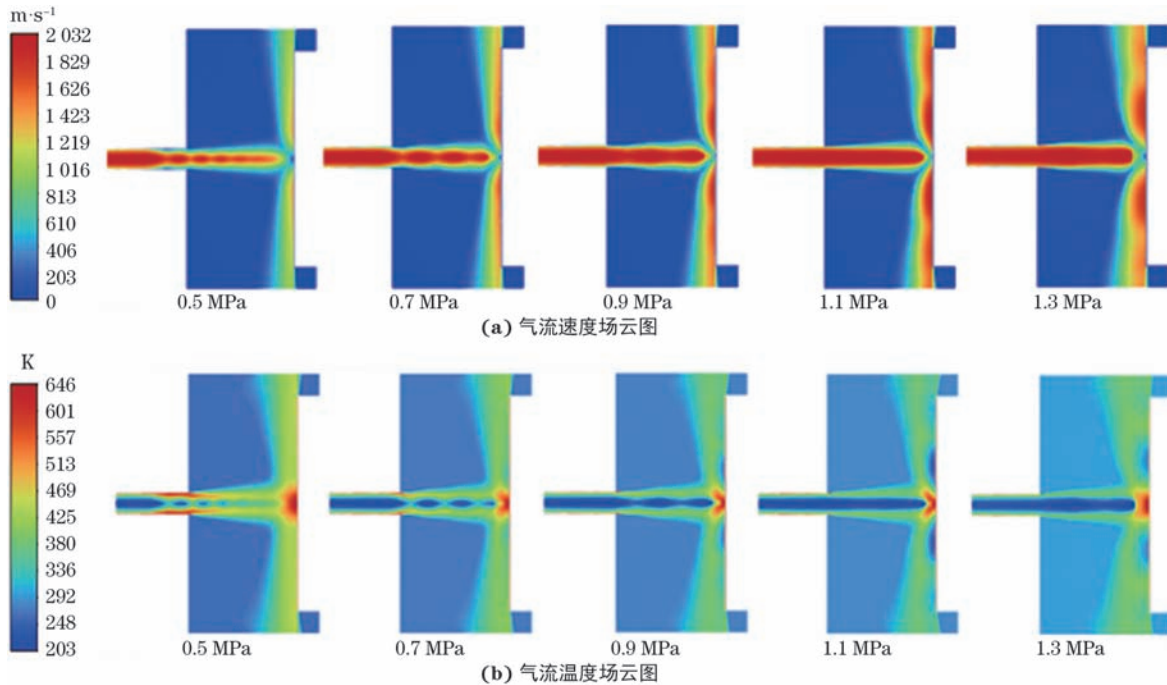


图4 不同载气压力下喷管出口与基板之间区域的气流速度场和温度场云图

Fig. 4 Cloud diagrams of airflow velocity field (a) and temperature field (b) of area between nozzle outlet and substrate plate under different gas pressures

增加,喷管出口与基板之间区域的气流温度变化不明显,使得颗粒温度变化不明显。综上,载气压力对颗粒速度影响较大,但对颗粒温度变化的影响不显著。

#### 2.4 载气温度对颗粒速度和温度的影响

在载气压力0.9 MPa、喷涂距离25 mm条件下,研究载气温度(400, 500, 600, 700, 800 K)对颗粒加

速特性的影响。不同工艺参数下颗粒速度和温度沿轴向距离的变化相同,后文不再赘述。由图5可知,随着载气温度的升高,颗粒速度和温度均增加,相邻载气温度下颗粒撞击速度和温度的平均增加幅度分别为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 60 K。颗粒温度增加幅度较大,这是由于载气温度的升高,增加了气流内能。

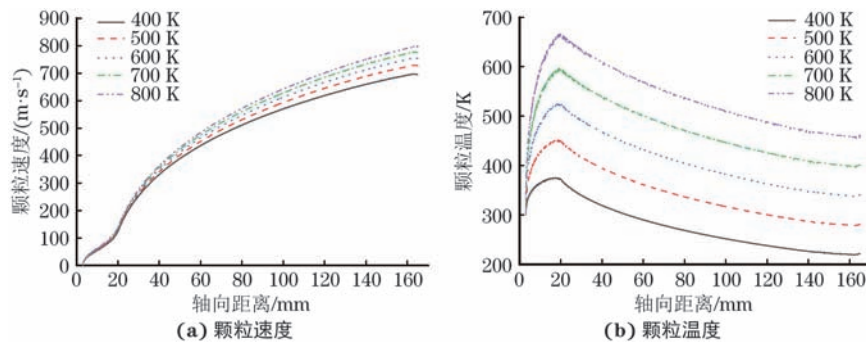


图5 不同载气温度下颗粒速度和温度随轴向距离的变化曲线

Fig. 5 Particle velocity (a) and temperature (b) vs axial distance curves under different gas temperatures

由图6可以看出:随着载气温度的升高,喷管出口与基板之间区域的气流速度基本没有变化,这也是导致颗粒速度变化不显著的原因。随着载气温度的升高,喷管出口与基板之间区域的气流温度逐渐降低。气流温度降低,转化成气流机械能的内能减少,气流内能对颗粒温度的影响增大,因此颗粒温度变化明显。综上,载气温度对颗粒速度的影响较小,

但对颗粒温度变化的影响显著。

#### 2.5 喷涂距离对颗粒速度和温度的影响

对于冷喷涂设备最佳的喷涂距离一般为10~40 mm。若喷涂距离过大,颗粒在离开喷嘴出口后的速度下降,不利于沉积形成涂层;若喷涂距离太小,喷嘴出口到基板之间的湍流会造成喷嘴的堵塞<sup>[24]</sup>。在载气压力0.9 MPa、载气温度600 K条件下,

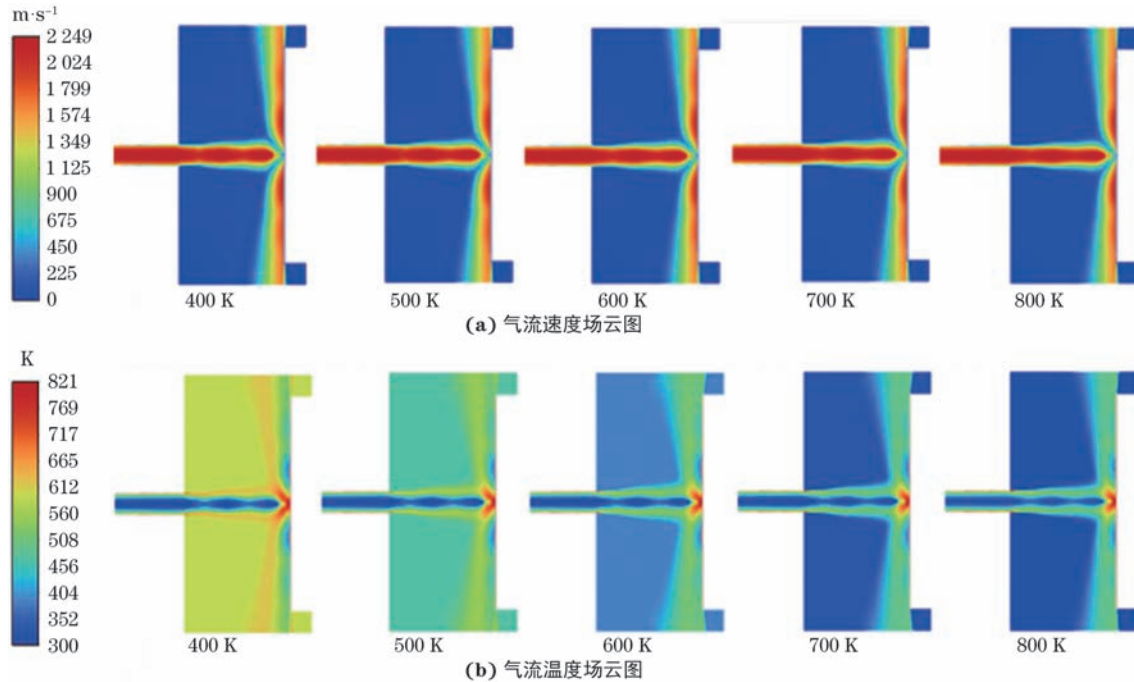


图6 不同载气温度下喷管出口与基板之间区域的气流速度场和温度场云图

Fig. 6 Cloud diagrams of airflow velocity field (a) and temperature field (b) of area between nozzle outlet and substrate plate under different gas temperatures

研究喷涂距离(15, 20, 25, 30, 35 mm)对颗粒加速特性的影响。由图7可知,随着喷涂距离的增加,颗粒速度和温度的变化幅度很小,相邻喷涂距离下颗粒撞击速度的平均增加幅度仅为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 颗粒撞击温度的平均降低幅度仅为 1 K。

由图8可以看出,随着喷涂距离的增加,气流速度场和温度场基本不变,因此颗粒速度和温度变化也不显著。综上,喷涂距离对颗粒速度和颗粒温度变化的影响均较小。

## 2.6 响应面分析及显著性验证

为凸显2个工艺参数交互作用的效果,第3个工艺参数固定为最大值。基于单因素模拟结果,使用Design-Expert 8.0软件采用Box-Behnken Design (BBD) 组合设计方法设计多因素试验,其中载气压

力(A)、载气温度(B)和喷涂距离(C)为自变量,颗粒撞击速度为响应值。若显著性P值小于0.05,则表明该响应面回归模型显著。由表2可知,载气压力、载气温度和喷涂距离的P值均小于0.000 1,且远小于0.05,这表明响应面回归模型高度显著,可靠性较高。根据F值可以判断,3个因素均对颗粒速度有显著的影响,其中载气压力的影响最显著,载气温度次之。两因素交互项AB和AC的P值均小于0.05,但两因素交互项BC的P值远大于0.05,这表明AB和AC对颗粒速度有显著交互影响,而BC对颗粒速度的影响不显著,也说明3个因素具有交互作用。两因素交互项AB的P值最小,这说明载气压力与载气温度对颗粒速度的交互影响最显著。平方项A<sup>2</sup>和B<sup>2</sup>的P值均小于0.05,但平方项C<sup>2</sup>的P值略大于0.05,

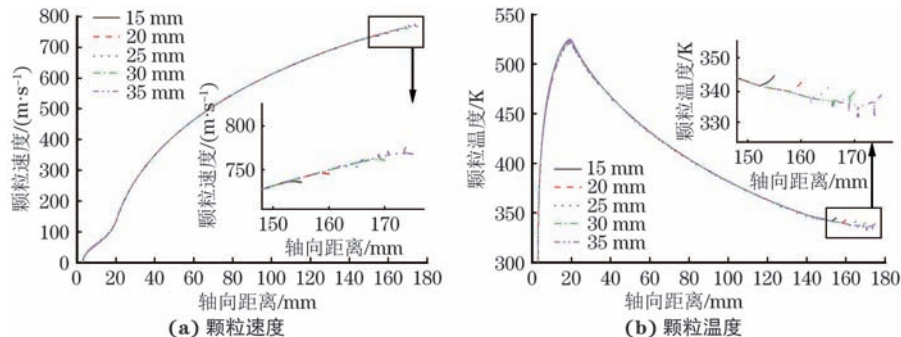


图7 不同喷涂距离下颗粒速度和温度随轴向距离的变化曲线

Fig. 7 Particle velocity (a) and temperature (b) vs axial distance curves under different standoff distances

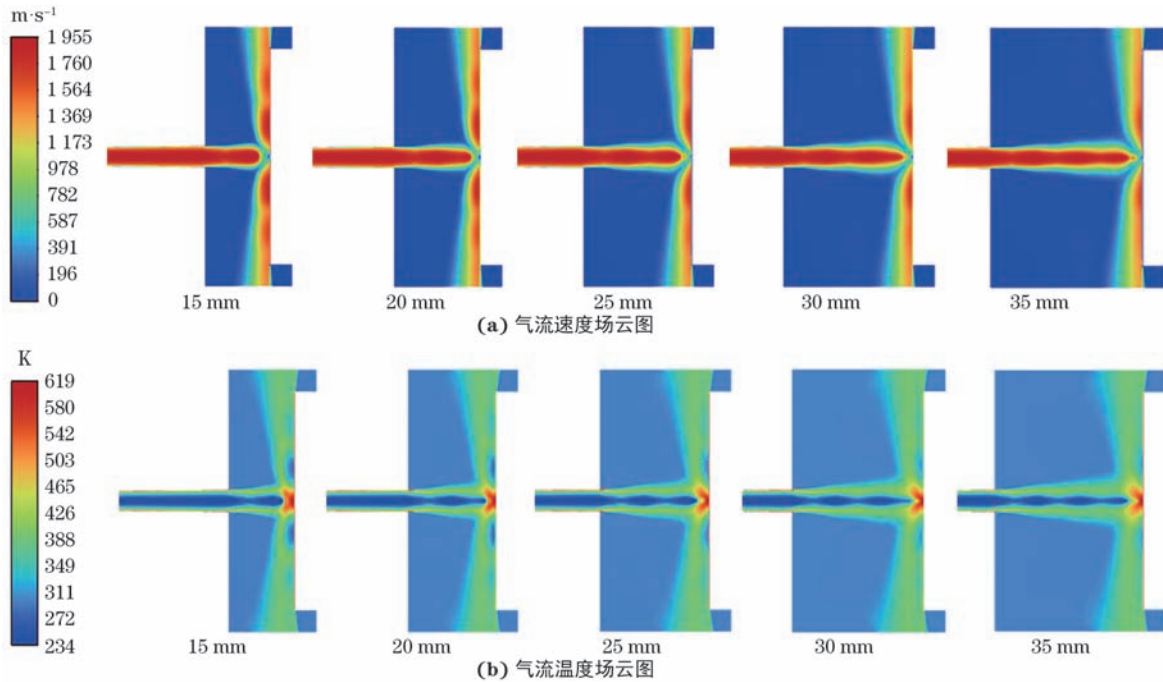


图8 不同喷涂距离下喷嘴出口与基板之间区域的气流速度场和温度场云图

Fig. 8 Cloud diagrams of airflow velocity field (a) and temperature field (b) of area between nozzle outlet and substrate plate under different standoff distances

表2 响应面回归模型显著性检验

Table 2 Significant experiment of response surface regression model

方差来源	均方	自由度	平方和	F值	P值	显著性
模型	91 980.68	9	10 220.08	1 277.48	<0.000 1	显著
A	67 975.38	1	67 975.38	8 496.76	<0.000 1	显著
B	19 373.98	1	19 373.98	2 421.70	<0.000 1	显著
C	1 731.07	1	1 731.07	216.38	<0.000 1	显著
AB	232.87	1	232.87	29.11	0.001 0	显著
AC	130.99	1	130.99	16.37	0.004 9	显著
BC	8.50	1	8.50	1.06	0.337 0	不显著
$A^2$	1 857.64	1	1 857.64	232.20	<0.000 1	显著
$B^2$	465.49	1	465.49	58.19	0.000 1	显著
$C^2$	40.78	1	40.78	5.10	0.058 5	不显著
残差	56.00	7	8.00			
失拟项	18.34	3	6.11	0.65	0.623 5	不显著
纯误差	37.66	4	9.42			
总和	92 036.68	16				

这表明 $A^2$ 和 $B^2$ 对颗粒速度有显著影响,而 $C^2$ 对颗粒速度的影响不显著;平方项 $A^2$ 的 $P$ 值最小,表明载气压力对颗粒速度的影响最显著。失拟项的 $P$ 值不显著,表明试验中的数据点均能够用该模型进行描述,验证了该响应面回归模型具有较好的可信度。

根据响应面回归模型的分析结果,采用Origin软

件绘制各因素交互作用的三维响应曲面图。由图9可见:在所选择的载气温度和载气压力范围内,颗粒撞击速度的变化范围为 $596\sim 894\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,高值区域出现在最大的载气压力和载气温度相交区域,低值区域则出现在最小的载气压力和载气温度相交区域;当载气压力为 $1.3\text{ MPa}$ ,载气温度为 $800\text{ K}$ 时,颗



粒撞击速度达到最大值( $894 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。从曲面的倾斜程度可知,载气压力对颗粒速度的影响最显著,其次为载气温度,载气压力与载气温度的交互作用对

颗粒速度的影响最明显,载气压力与喷涂距离的交互作用次之,载气温度与喷涂距离交互作用的影响最小。

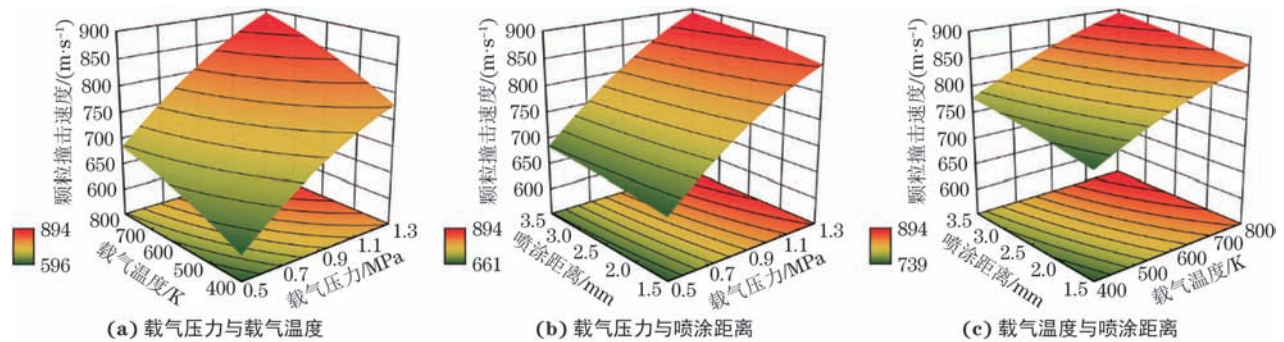


图9 不同工艺参数交互作用的响应曲面

Fig. 9 Response surface of interaction of different process parameters: (a) gas pressure and gas temperature; (b) gas pressure and standoff distance and (c) gas temperature and standoff distance

### 3 结论

(1) 模拟得到不同工艺参数下颗粒撞击速度与冷喷涂过程中颗粒撞击速度估算公式的计算结果间的平均相对误差为5.37%,验证了有限元模型的可靠性。

(2) 在冷喷涂过程中,Laval喷管内气流速度场和温度场是影响颗粒加速特性的主要因素。随着载气压力的增加,颗粒速度增大,相邻载气压力下颗粒撞击速度的平均增加幅度为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但颗粒温度变化不明显;随着载气温度升高,颗粒温度升高,相邻载气温度下颗粒撞击温度的平均增加幅度为60 K,颗粒速度变化不明显;随着喷涂距离的增加,颗粒速度和颗粒温度均变化不明显。

(3) 通过响应面分析得到,载气压力对颗粒速度的影响最为显著,载气温度次之,喷涂距离的影响最不显著,载气压力与载气温度的交互作用对颗粒速度的影响最为显著,载气压力与喷涂距离次之,载气温度与喷涂距离交互作用的影响最小。

#### 参考文献:

- [1] 熊天英,王吉强.中国科学院金属研究所冷喷涂技术研究进展[J].金属学报,2023,59(4):537-546.  
XIONG T Y, WANG J Q. Research progress of cold spray in institute of metal research, Chinese academy of sciences[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(4): 537-546.
- [2] KUMAR S, ZUNAID M, MURTAZA Q, et al. Simulation of injector in cold spray process by fluent-6 [D]// International Conference of Advance Research

and Innovation (ICARI-2015). [S.l.]: [s.n.], 2015.

- [3] TAN A W Y, LEK J Y, SUN W, et al. Influence of particle velocity when propelled using  $\text{N}_2$  or  $\text{N}_2$ -He mixed gas on the properties of cold-sprayed Ti6Al4V coatings[J]. Coatings, 2018, 8(9): 327.
- [4] NEO R G, WU K Q, TAN S C, et al. Effect of spray distance and powder feed rate on particle velocity in cold spray processes[J]. Metals, 2022, 12(1): 75.
- [5] MORENO-MURGUIA B, MORA-GARCIA A G, CANALES-SILLER H, et al. Influence of stand-off distance and pressure in copper coatings deposition efficiency and particle velocity[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 430: 127986.
- [6] 唐文勇,张克声,蒋学勤,等.主流气温度对高压冷喷涂粉末速度和温度的影响[J].表面技术,2016,45(9):38-43.  
TANG W Y, ZHANG K S, JIANG X Q, et al. Effects of main gas temperature on powder velocity and temperature in high pressure cold spraying[J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 38-43.
- [7] 朱红波. Laval喷管喉部结构对冷喷涂气固两相流速度的影响[J].南方农机,2021,52(12):130-131.  
ZHU H B. Influence of Laval nozzle throat structure on gas-solid two-phase flow velocity of cold spray[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 130-131.
- [8] 张创. 高压冷喷涂中送粉气流对粒子流撞击特性的影响[D].重庆:重庆大学,2016.  
ZHANG C. Effect of the powder carrier gas on powder stream impact characteristics in high-pressure cold spray[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [9] YIN S, LIU Q, LIAO H L, et al. Effect of injection

- pressure on particle acceleration, dispersion and deposition in cold spray[J]. *Computational Materials Science*, 2014, 90: 7-15.
- [10] LUPOI R, O'NEILL W. Powder stream characteristics in cold spray nozzles[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 206(6): 1069-1076.
- [11] HUANG G S, GU D M, LI X B, et al. Numerical simulation on syphonage effect of Laval nozzle for low pressure cold spray system[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2497-2504.
- [12] YIN S, MEYER M, LI W Y, et al. Gas flow, particle acceleration, and heat transfer in cold spray: A review[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(5): 874-896.
- [13] 刘陈光. 冷气体动力喷涂过程中颗粒的加速性能及沉积机理分析[D]. 衡阳: 南华大学, 2015.  
LIU C G. The analysis on the particles' acceleration performance and deposition mechanism in the cold-gas dynamic spraying processes[D]. Hengyang: University of South China, 2015.
- [14] 郑建新, 金耀辉, 刘传绍. 真空冷喷涂铜颗粒加速特性数值研究[J]. *表面技术*, 2013, 42(1): 5-8.  
ZHENG J X, JIN Y H, LIU C S. Numerical study on accelerating characteristics of copper particles in vacuum cold spraying process[J]. *Surface Technology*, 2013, 42(1): 5-8.
- [15] 殷硕. 冷喷涂粉末粒子加速行为及沉积机理的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
YIN S. A systematic investigation on the acceleration behavior and deposition mechanism of cold sprayed particles[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [16] LEITZ K H, O'SULLIVAN M, PLANKENSTEINER A, et al. CFDEM modelling of particle heating and acceleration in cold spraying[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, 73: 192-198.
- [17] 冯力, 关畅, 畅继荣, 等. 喷涂距离对铝基体上低压冷喷涂铜涂层的影响[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(6): 94-97.
- FENG L, GUAN C, CHANG J R, et al. Influence of spraying distance on low pressure cold sprayed copper coating on aluminum substrate[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(6): 94-97.
- [18] 唐伟, 解闻, 张家园. 冷喷涂镁合金基体残余应力的数值研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(1): 62-70.  
TANG W, XIE W, ZHANG J Y. Numerical study on residual stress of cold sprayed Mg-alloy substrate[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(1): 62-70.
- [19] GRUJICIC M, ZHAO C L, TONG C, et al. Analysis of the impact velocity of powder particles in the cold-gas dynamic-spray process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 368(1/2): 222-230.
- [20] SONG X, NG K L, CHEA J M K, et al. Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) simulation of multiple particle impact during metal cold spray process for coating porosity prediction[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 385: 125433.
- [21] 解闻. 镁合金表面冷喷涂 Al-7075 涂层形貌及残余应力研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.  
XIE W. Study on appearance and residual stress of cold spray Al-7075 coating on Mg-alloy surface[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [22] LIN E Q, CHEN Q Y, OZDEMIR O C, et al. Effects of interface bonding on the residual stresses in cold-sprayed Al-6061: a numerical investigation[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, 28(3): 472-483.
- [23] TANG W, ZHANG J Y, LI Y, et al. Numerical simulation of the cold spray deposition of copper particles on polyether ether ketone (PEEK) substrate[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2021, 30(7): 1792-1809.
- [24] WAN W P, LI W Y, WU D, et al. New insights into the effects of powder injector inner diameter and overhang length on particle accelerating behavior in cold spray additive manufacturing by numerical simulation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 444: 128670.



## Numerical Simulation of Particle Acceleration Characteristics During Cold Spraying

DONG Maiming<sup>1</sup>, XIN Hongmin<sup>1</sup>, LI Guangping<sup>2</sup>, DAI Hui<sup>1</sup>, CHENG Qingsi<sup>1</sup>,  
YAO Changfeng<sup>3</sup>, CUI Minchao<sup>3</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China; 2. Hubei Chaozhuo Aviation Technology Co., Ltd., Xiangyang 441000, China; 3. Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A finite element model of particle deposition during cold spraying was established by ANSYS FLUENT software, and was verified by estimation formula of particle impact velocity. Single factor influence research of gas pressure (0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3 MPa), gas temperature (400, 500, 600, 700, 800 K), and standoff distance (15, 20, 25, 30, 35 mm) on particle acceleration characteristics was conducted by the finite element model. The effect of interaction between process parameters on particle acceleration characteristics was analyzed by response surface methodology. The results show that the average relative error between simulated and estimated particle impact velocities under different process parameters was 5.37%, which verified the reliability of the finite element model. With the increase of gas pressure, the particle velocity increased, with the average increase of particle impact velocity under adjacent gas pressure of  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , but the particle temperature did not change significantly. With the increase of gas temperature, the particle temperature increased, with the average increase of particle impact temperature under adjacent gas temperature of 60 K, but the particle velocity did not change significantly. As the standoff distance increased, the particle velocity and particle temperature did not change significantly. The gas pressure had the most significant effect on particle velocity, followed by gas temperature, and the standoff distance had the least effect. The interaction of gas pressure and gas temperature had the most significant effect on particle velocity, followed by the interaction of gas pressure and standoff distance, and the interaction of gas temperature and spraying distance had the least effect.

**Key words:** cold spraying; particle acceleration characteristic; process parameter; response surface method