

# 主气流温度对高压冷喷涂粉末速度和温度的影响

唐文勇<sup>1</sup>, 张克声<sup>1</sup>, 蒋学勤<sup>1</sup>, 宋俊<sup>2</sup>

(1. 贵州理工学院, 贵阳 550003; 2. 重庆大学, 重庆 400044)

**摘要:** 目的 研究高压冷喷涂中, 送粉气流在室温时主气流温度对冷喷涂粒子速度和温度的影响。方法 利用计算流体力学软件 FLUENT 对冷喷涂流场进行数值模拟, 分析不同送粉压差、不同喷管喉部直径的情况下, 主气流温度对气体流场、粉末速度和温度的影响状况。结果 送粉压差为 0.1 MPa 且喷管喉部直径为 2 mm 时, 进入喷管的送粉气流流量占总气流流量的比值超过 50%, 此时提升主气流温度对冷喷涂粒子撞击速度和温度的提升幅度十分有限。在不改变送粉气流流量的情况下, 增加喷管喉部直径可有效削弱送粉气流对粒子加速的不利影响。结论 考虑送粉气流时, 主气流温度对冷喷涂粉末沉积效果较弱, 为了提高冷喷涂粉末沉积效率应保证顺利送粉的前提下尽可能地减小送粉气流流量, 并且在设计喷管时应适当增加喷管喉部直径。

**关键词:** 冷喷涂; 送粉气流; 压差; 主气流温度; 数值模拟

中图分类号: TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)09-0038-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.006

## Effects of Main Gas Temperature on Powder Velocity and Temperature in High Pressure Cold Spraying

TANG Wen-yong<sup>1</sup>, ZHANG Ke-sheng<sup>1</sup>, JIANG Xue-qin<sup>1</sup>, SONG Jun<sup>2</sup>

(1. Guizhou Institute Technology, Guiyang 550003, China; 2. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the effects of main gas temperature on speed and temperature of particles under the condition that the powder carrier is at room temperature in high pressure cold spraying. **Methods** The effects of main gas flow temperature on gas flow field, powder speed and temperature within different pressure differential and different size of nozzle throat were investigated based on numerical simulation of cold spraying field with computational fluid dynamics software Fluent. **Results** When the pressure differential was 0.1 MPa and the diameter of the nozzle throat was 2 mm, the ratio of the mass flow of powder carrier gas on the total mass flow of the gas in nozzle exceeded 50%. At this time the increasing range of the particles

收稿日期: 2016-02-17; 修订日期: 2016-03-31

Received: 2016-02-17; Revised: 2016-03-31

基金项目: 国家自然科学基金 (61461008); 贵州省科学技术基金 ([2014]7361, [2015]2065); 贵州理工学院高层次人才引进项目 (XJGC20150107, XJGC20140601)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China (61461008), the Natural Science Foundation of Guizhou Province, China ([2014]7361, [2015]2065), the recruitment Program of Guizhou Institute of Technology (XJGC20150107, XJGC20140601)

作者简介: 唐文勇 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为冷喷涂技术及其应用。

**Biography:** TANG Wen-yong (1987—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: cold spraying process and its applications.

通讯作者: 张克声 (1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料表面技术及传感器设计。

**Corresponding author:** ZHANG Ke-sheng (1978—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: material surface technology and sensor design.

impact velocity and temperature was limited with the increasing of the temperature of main gas. Using nozzle with larger size of throat could weaken the adverse effects effectively of powder carrier gas on particle accelerating. **Conclusion** The effect of main gas temperature on powder deposition is weakened when the powder carrier gas is considered. In order to improve the powder deposition efficiency, the flow of the powder carrier gas should be as small as possible under the premise of normal powder feeding, and also the nozzle throat diameter should increase appropriately when the nozzle would be designed.

**KEY WORDS:** cold spraying; powder carrier gas; pressure differential; main gas temperature; numerical simulation

冷喷涂中经预热的高压气体在拉瓦尔喷管内绝热膨胀而形成超音速气流, 粉末由超音速气流携带并加速, 高速撞击基板产生剧烈的塑性变形而形成涂层。冷喷涂过程中, 喷涂材料的温度远低于其熔点温度, 因此可削弱甚至消除传统热喷涂由于高温引起的材料氧化、蒸发、残余应力、融化等缺点, 喷涂材料的机械性能及组织结构得以很好的保存, 特别适用于温度敏感材料的喷涂, 并为纳米涂层的制备提供了一种新的可能<sup>[1-2]</sup>。

冷喷涂中存在一个由材料特性决定的临界沉积速度, 只有超过该临界速度的粉末才能沉积在基板上而形成涂层<sup>[3-4]</sup>。并且该临界速度与颗粒撞击时的温度相关, 粉末撞击时的温度越高其临界沉积速度越低, 粉末越容易沉积在基板上<sup>[5]</sup>。因此冷喷涂中粉末沉积效果可由粉末撞击时的速度和温度来反映。全面系统地分析冷喷涂参数对粒子速度和温度的影响是过去几年冷喷涂技术的研究热点。大量研究结果显示, 影响粒子速度和温度的因素包括工作气体种类、喷管结构、气体压力、温度、喷涂距离等, 其中工作气体种类和进口参数是主要的影响因素<sup>[6-10]</sup>。由于氦气分子量远低于氮气和空气, 相同进口参数的氦气在喷管中的速度要远远高于氮气和空气, 使用氦气作为工作气体可大幅度提高粒子的撞击速度, 然而使用氦气成本太高, 因此在大部分冷喷涂的应用中一般使用氮气或空气作为工作气体, 并提高其进口温度和压力以获得更好的沉积效果<sup>[11-12]</sup>。

在以往的研究中, 通常将由气体加热器预热的高压主气流的温度和压力作为喷管的进口参数而忽略送粉气流。然而在高压冷喷涂中, 粉末由送粉气流携带并在喷管喉部之前的高压区域(喷管渐缩段或预混腔)注入到喷管内, 为将粉末注入到主气流内, 送粉气流压力应高于当地主气流压力, 且送粉气流通常为室温。因此高压冷喷涂过程使用了温度和压力均不相同的两股气流。最近送粉气流对冷

喷涂粒子的加速特性及粉末沉积效果的影响正引起研究者的重视, Han 等<sup>[13]</sup>通过数值模拟与实验研究了送粉压差与送粉管堵塞之间的关系。Han 等<sup>[14]</sup>通过数值模拟讨论了送粉压差、送粉管管径及预混腔长度对冷喷涂流场及粒子撞击参数的影响。Suo 等<sup>[15]</sup>利用数值模拟研究了送粉气流种类对冷喷涂流场的影响。Yin 等<sup>[16]</sup>利用数值计算研究了送粉气流温度对粒子速度和温度的影响。这些研究为送粉气流对冷喷涂粉末沉积提供了许多有益结论, 然而在考虑送粉气流情况下, 主气流温度对粒子速度和温度的影响仍不明确。因此, 本文利用计算流体力学(CFD)软件 FLUENT 对冷喷涂流场进行数值模拟, 研究了送粉气流温度为室温、不同送粉压差和喷管喉部直径下主气流温度对冷喷涂流场及粒子撞击参数的影响, 以期为提高粉末沉积效率提供一定的理论依据。

## 1 数值计算模型

根据冷喷涂的基本原理建立几何模型, 由于整个计算模型为二维轴对称结构, 可简化为二维模型并取其一半进行数值模拟即可。喷管的几何结构、尺寸、计算区域及边界条件如图 1 所示。送粉气流进口和主气流进口均设置为压力进口,  $p_1$ 、 $T_1$  分别为主气流进口压力和温度,  $p_2$ 、 $T_2$  分别为送粉气流进口压力和温度(送粉压差  $\Delta p = p_2 - p_1$ 、温差  $\Delta T = T_1 - T_2$ ), 模拟中送粉气流温度为室温即  $T_2 = 300$

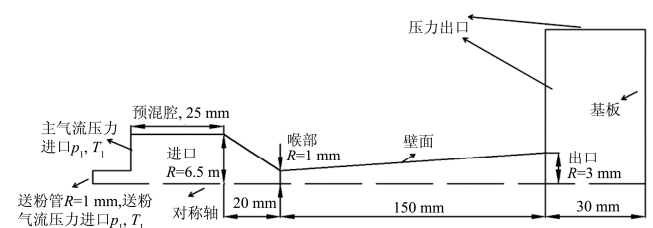


图 1 喷管的几何结构、尺寸、计算区域及边界条件  
Fig.1 Geometric construction, dimension, computational domain and boundary conditions of nozzle

K。喷管和基板壁面设置为无滑移壁面，喷管出口处设置为压力出口，压力为一个大气压，温度为室温。主气流和送粉气流均采用氮气，气体在超音速下具有较强的可压缩性，可视为可压缩的理想气体，气体的密度、温度和压力间的关系采用理想气体状态方程进行描述。气体的质量守恒、动量守恒及能量守恒方程如下。

质量方程：

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

动量方程：

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

能量方程：

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho e u_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial(p u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(u_j \tau_{ij} - q_i)}{\partial x_i} \quad (3)$$

其中  $\tau_{ij}$  为黏性应力张量，对于牛顿流体：

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (4)$$

式中： $\delta_{ij}$  为单位张量。以上为 Boussinesq 涡旋黏性假设条件下，忽略质量力的可压缩粘性气体的 *N-S* 控制方程组<sup>[17-18]</sup>。对于可压缩气体，理想气体状态方程如下：

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (5)$$

式中： $\rho$  为气体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $u$  为气体速度 ( $\text{m}/\text{s}$ )； $p$  为压力 ( $\text{Pa}$ )； $T$  为温度 ( $\text{K}$ )； $e$  为单位质量的内能 ( $\text{J}/\text{kg}$ )； $\tau$  为粘性剪切应力 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )； $q$  为热通量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )； $R$  为气体常数 ( $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ )； $\mu$  为动力黏度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )。

采用重整化群 (RNG) *k-ε* 模型描述气体的湍流流动，采用二阶迎风差分格式对控制方程进行离散，选用耦合隐式求解器进行求解<sup>[15]</sup>。计算区域的网格采用四边形结构化网格，网格无关性测试表明，10 万个网格足以消除网格密度对计算结果的影响。选用铜作为喷涂材料，喷涂颗粒按离散相处理，颗粒对连续相的影响及颗粒之间的相互影响可忽略<sup>[19]</sup>，FLUENT 中通过求解拉式坐标下的力平衡方程来确定离散相的运动轨迹，计算过程分为两步，先计算气体流场，然后利用 DPM 模型计算颗粒运动轨迹<sup>[20]</sup>。

## 2 结果及分析

### 2.1 主气流温度对气体流场的影响

送粉气流进入喷管后会对喷管内气体流场产生一定的影响。图 2 为主气流温度和压力分别为 773 K 和 1.8 MPa，不同送粉压差下的冷喷涂气体温度场。图 2a 为不考虑送粉气流的理想状况 (即  $\Delta p=0$ ， $\Delta T=0$ )，与理想状况时的温度场不同，送粉压差为 0.1 MPa 和 0.2 MPa 时，预混腔内气体分为两个温度区域，高温主气流与从送粉管注入的室温送粉气流在预混腔内进行热量交换，从图 2b、c 中可看出，两股气流在喷管渐缩段内已基本换热充分。由气体连续性方程可知，特定参数的气体进入喷管后，喷管内最大气体流量由喷管喉部直径决定。因此当送粉压差大于 0 时，一定流量的送粉气流进入喷管势必导致进入喷管的高温主气流流量下降。由计算结果可知，送粉压差为 0.1 MPa 和 0.2 MPa 时，喷管气体总流量分别为 10.88 g/s 和 11.86 g/s，其中主气流流量分别仅占 49.1% 和 37.4%。由于高温主气流所占比例较低，因此两股气流换热后使得喷管的气体有效温度大幅下降。以喷管喉部气体平均温度为例，理想状态下喉部气体平均温度为 693 K，压差为 0.1 MPa 和 0.2 MPa 时，平均温度分别仅为 445 K 和 376 K。气体在缩放喷管加速，进入喷管的气体滞止焓越低，其通过喷管后获得的动能越小。图 3 为不同送粉压差下喷管轴线上气体速度的变化，从图中可看出随送粉压差的增加喷管轴线上气体速度大幅下降。

通常认为，提高气体预热温度能大幅度提高喷管内气体速度，进而提高粉末的撞击速度。然而低温送粉气流进入喷管后，主气流所占份额大幅下降，

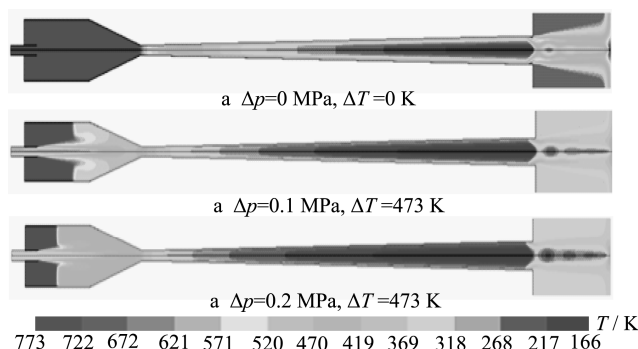


图 2 不同参数下的气体温度场

Fig.2 Gas temperature counter under different pressure differential

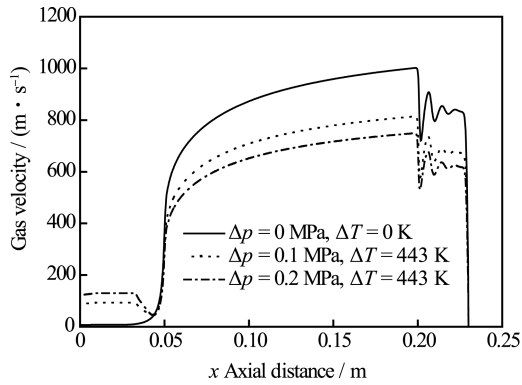
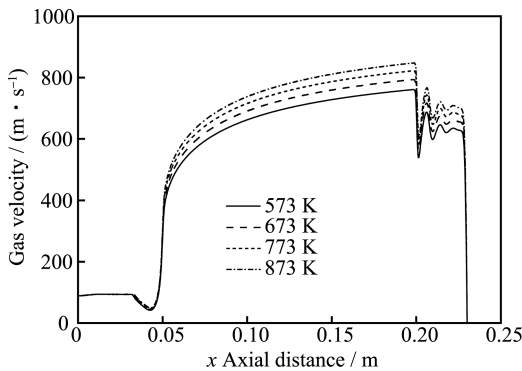


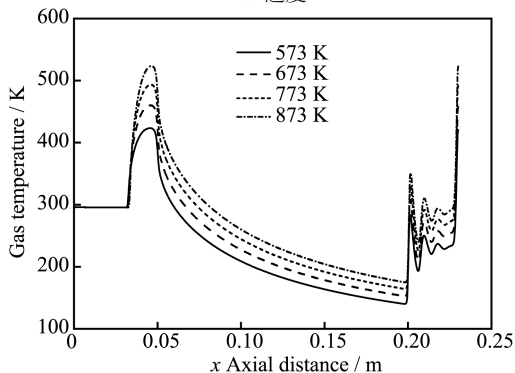
图 3 不同参数下喷管轴线气体速度变化

Fig.3 Gas velocity along the nozzle centerline for different parameters

此时提高主气流的进口温度，对喷管内气体速度的提升幅度十分有限，这可从图 4a 所示的送粉压差为 0.1 MPa 时喷管中心线上不同主气体温度时的气体速度分布可看出。图 4b 为喷管轴线上气体温度变化，由于室温送粉气流轴向进入喷管，因此两股气流混合前轴线上气体处于室温状态，两股气流混合后轴线上气体温度有所提高，然而进入喷管渐扩段后由于气体膨胀，其温度迅速下降。随主气流温度的增加，轴线上气体温度略有提高，但提升幅度不大。



a 速度



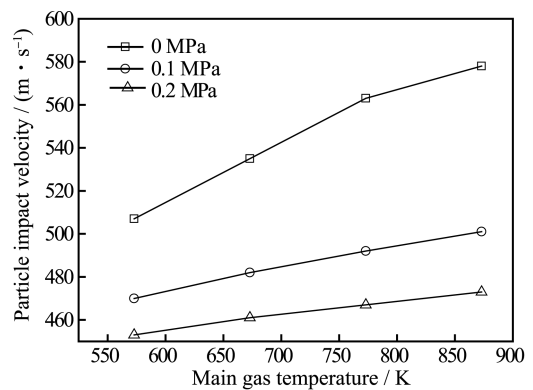
b 温度

图 4 喷管中心线气体速度和温度随主气流温度的变化 ( $\Delta p=0.1$  MPa)

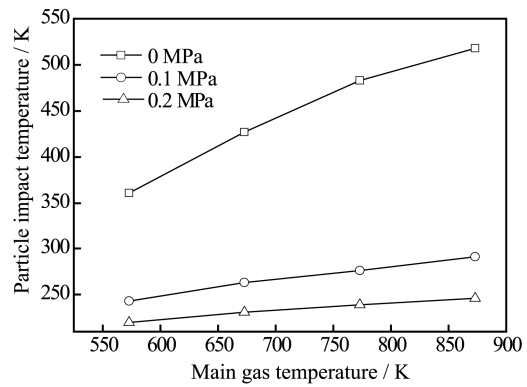
Fig. 4 Gas velocity and gas temperature along the nozzle centerline for different main gas temperature ( $\Delta p=0.1$  MPa)

## 2.2 主气流温度对粒子撞击速度和温度的影响

图 5 为不同送粉压差下喷管轴线上 15  $\mu\text{m}$  铜粉末撞击速度和温度随主气流温度的变化。由图 5a 可看出，理想状态下（即  $\Delta p=0$ ），随主气流温度的提升，粒子撞击速度大幅增加；然而随送粉压差的增加，相同主气流温度下粒子撞击速度大幅下降，且随主气流温度的增加，粒子撞击速度虽略有提高，但提升幅度与理想状态时相比大为减小。



a 撞击速度



b 撞击温度

图 5 不同送粉压差下主气流温度对喷管轴线上粒子撞击速度和撞击温度的影响

Fig.5 Effect of main gas temperature on the impact velocity and impact temperature of the 15 $\mu\text{m}$  copper Particle along the nozzle centerline under different pressure differential

喷涂颗粒在喷管喉部前的预混腔和渐缩段高温区域被预热，在喷管渐扩段，随着气体膨胀气体的温度急剧下降，颗粒随之被冷却，因此颗粒在喷管喉部前能否被充分预热是决定颗粒撞击温度的关键因素。从图 3 所示的气体温度场和图 4b 所示的气体轴线温度分布可看出，在考虑送粉气流的情况下，粒子开始处于室温的送粉气流中，两股气流在预混腔充分换热后，在一段很短的区域内气体温

度有所提高,但其最大值同样较低,因此大部分颗粒在预混腔内不能被充分预热。图 5b 为喷管中心线上粒子温度随主气流温度的变化情况,可以看出理想状态下随主气流温度的增加,粒子撞击时的温度提升十分明显,而当送粉压差为 0.1 MPa 和 0.2 MPa 时,粒子撞击温度远低于理想状态下粒子撞击温度,且随主气流温度的增加,粒子撞击温度几乎没有变化。

### 2.3 喷管喉部直径对粒子速度和温度的影响

喷管喉部直径为 2.0 mm 时,一定送粉压差下喷管内送粉气流流量所占比例过大是导致粒子速度和温度下降的主要因素。为了削弱这一不利影响,应保证稳定送粉,且不发生送粉管堵塞的情况下尽可能地降低送粉气流所占比例。为实现这一目标,一方面可减小送粉气流流量(由送粉压差和送粉管管径决定),然而 Tan 等<sup>[13]</sup>通过实验研究发现,当送粉压差为 0.14 MPa、粉末注射管管径为 1.74 mm 时,喷涂一段时间后粉末注射管内出现堵塞现象。因此,为保证冷喷涂系统正常运行,送粉压差或送粉管管径不能太小。

另一方面,可在送粉气流流量不变的前提下提高喷管内气体总流量。由喷管内气体连续性方程可知,进口参数一定时,喷管内气体最大流量由喷管最小截面积(喉部)决定。因此,本节对不同喷管喉部直径的情况进行了数值计算。表 1 为  $\Delta p=0.1$  MPa,  $\Delta T=273$  K (即  $p_1=1.9$  MPa、 $p_2=1.8$  MPa,  $T_1=300$  K、 $T_2=573$  K) 时,不同喷管喉部直径下喷管内气体流量。从表 1 可看出,随喷管喉部直径的增加,进入喷管内高温主气流大幅增加。

表 1 不同喷管喉部直径时喷管内的气体流量

Tab.1 The gas mass flow in the nozzle under different nozzle throat diameters

喉部直径 /mm	气流总流量 / $(g \cdot s^{-1})$	主气流流量 / $(g \cdot s^{-1})$	送粉气流流量 / $(g \cdot s^{-1})$	主气流流量所占比值/%
2.0	10.88	5.34	5.54	49.1
2.4	15.74	10.20	5.54	64.8
2.8	20.82	15.28	5.54	73.4

图 6 为送粉压差为 0.1 MPa 时不同喷管喉部直径下粒子撞击速度和温度随主气流温度的变化,从图中可看出,主气流温度相同时,喷管喉部直径越

大,粒子撞击速度和温度越大,且随喷管喉部直径的增加,提高主气流温度对粒子撞击参数的提升效果越好。因此,使用较大喉部直径的喷管是削弱送粉气流对粒子加速和预热的不利影响的有效手段。然而,进入喷管的主气流流量增加,为了将主气流加热到相同温度所需的气体加热器功率也应增加,因此在冷喷涂作业中应综合考虑这些因素。

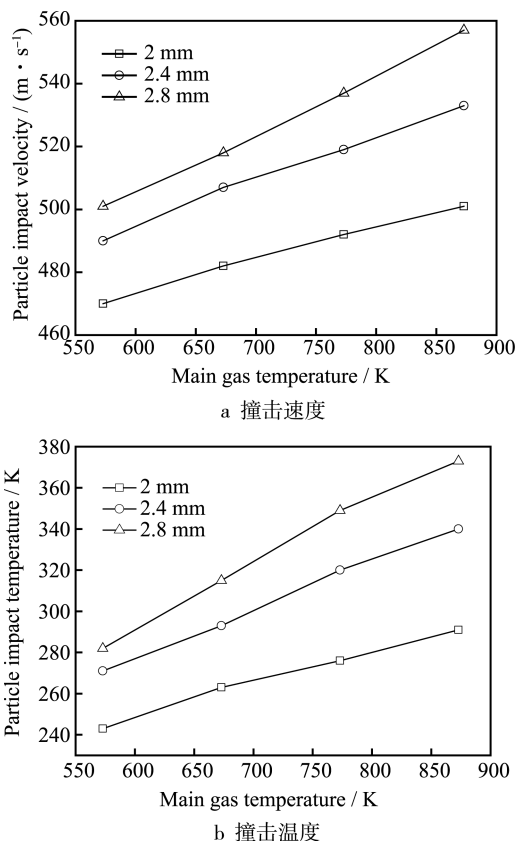


图 6 不同喷管喉部直径下主气流温度对喷管轴线上粒子撞击速度和撞击温度的影响

Fig.6 Effect of main gas temperature on the impact velocity and impact temperature of the 15  $\mu$ m copper Particle along the nozzle centerline under different size of nozzle throat

### 3 结论

1) 室温下送粉气流进入喷管后,导致进入喷管的高温主气流流量下降,两股气流在预混腔内换热后以较低的温度进入喷管,对粒子加速和预热产生不利影响。

2) 主气流温度对粒子速度和温度的影响与两股气流流量相关。当喷管喉部直径较小时,一定送粉压差下进入喷管的送粉气流流量可能超过主气流流量,此时粒子撞击速度和温度随主气流温度的增加虽略有提升,但提升幅度与忽略送粉气流时相

比大为减小。保持送粉压差不变, 增加喷管喉部直径可使进入喷管的高温主气流流量增加, 从而有效削弱送粉气流对粒子加速的不利影响。

## 参考文献

- [1] 李长久. 中国冷喷涂研究进展[J]. 中国表面工程, 2009, 22(4): 5—14.  
LI Chang-jiu The State-of-art of Research and Development on Cold Spraying in China[J]. China Surface Engineering, 2009, 22(4): 5—14.
- [2] 李文亚, 余敏. 冷喷涂技术的最新研究现状[J]. 表面技术, 2011, 39(5): 95—99.  
LI Wen-ya, YU Min. The Latest Development State of the Cold Spraying Technique[J]. Surface Technology, 2011, 39(5): 95—99.
- [3] KLINKOV S V, KOSAREV V F, REIN M. Cold Spray Deposition: Significance of Particle Impact Phenomena[J]. Aerospace Science and Technology, 2005, 9(7): 582—591.
- [4] STOLTENHOFF T, KREYE H, RICHTER H J. An Analysis of the Cold Spray Process and Its Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2002, 11(4): 542—550.
- [5] ASSADI H, SCHMIDT T, RICHTER H, et al. On Parameter Selection in Cold Spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(6): 1161—1176.
- [6] KATANODA H, FUKUHARA M, IINO N. Numerical Study of Combination Parameters for Particle Impact Velocity and Temperature in Cold Spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(5/6): 627—633.
- [7] TABBARA H, GU S, MCCARTNEY D G, et al. Study on Process Optimization of Cold Gas Spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(3): 608—620.
- [8] YIN S, WANG X, LI W. Computational Analysis of the Effect of Nozzle Cross-Section Shape on Gas Flow and Particle Acceleration in Cold Spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(8): 2970—2977.
- [9] LI W Y, LIAO H, DOUCHY G, et al. Optimal Design of a Cold Spray Nozzle by Numerical Analysis of Particle Velocity and Experimental Validation with 316L Stainless Steel Powder[J]. Materials & Design, 2007, 28(7): 2129—2137.
- [10] GRUJICIC M, TONG C, DEROSSET W S. Flow Analysis and Nozzle-Shape Optimization for the Cold-gas Dynamic-Spray Process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, 217(11): 1603—1613.
- [11] SOVA A, KLINKOV S, KOSAREV V, et al. Preliminary Study on Deposition of Aluminum and Copper Powders by Cold Spray Micronozzle Using Helium[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 220(15): 98—101.
- [12] SCHMIDT T, ASSADI H, GARTNER F, et al. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(5/6): 794—808.
- [13] HAN T, GILLISPIE B A, ZHAO Z B. An Investigation on Powder Injection in the High-pressure Cold Spray Process [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(3): 320—330.
- [14] TANG W Y, LIU J F, CHEN Q H, et al. The Effects of Two Gas Flow Streams with Initial Temperature and Pressure Differences in Cold Spraying Nozzle[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 240(7): 86—95.
- [15] SUO X K, YIN S, PLANCHE M P, et al. Strong Effect of Carrier Gas Species on Particle Velocity during Cold Spray Processes[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 268: 90—93.
- [16] YIN S, SUO X, LIAO H, et al. Significant Influence of Carrier Gas Temperature during the Cold Spray Process [J]. Surface Engineering, 2014, 30(6): 1117—1125.
- [17] 吴子牛. 计算流体力学基本原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
WU Zi-niu. The Basic Principles of Computational Fluid Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [18] 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 Shuo. A Systematic Investigation on the Acceleration Behavior and Deposition Mechanism of Cold Sprayed Particles[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [19] KOSAREV V F, KLINKOV S V, ALKHIMOV A P, et al. On Some Aspects of Gas Dynamics of the Cold Spray Process[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2003, 12(2): 265—281.
- [20] VAN STEENKISTE T H, SMITH J R, TEETS R E. Aluminum Coatings via Kinetic Spray with Relatively Large Powder Particles[J]. Surface & Coatings Technology, 2002, 154(2): 237—252.