

喷嘴下游形状对冷喷涂粒子加速 行为影响的数值模拟研究

李尊甲, 周红霞*

(青海大学 机械工程学院, 西宁 810016)

摘要: **目的** 冷喷涂过程中喷嘴内流道关键尺寸是影响粒子加速的重要因素。虽然喷嘴下游长度与扩张比是喷嘴的 2 个最重要参量, 但目前对喷嘴优化设计的研究仍有深入空间, 比如喷嘴下游形状。**方法** 本文利用计算流体动力学的软件 ANSYS/Fluent 进行数值模拟研究, 在与传统锥形下游相比较后, 设计了钟形下游与喇叭形下游喷嘴。同时研究了喷嘴下游形状对气流与粒子加速行为的影响。**结果** 对于钟形下游喷嘴, 其气流速度在过喉部后迅速增加到较高数值, 随后变化缓慢; 对于喇叭形下游喷嘴, 其气流速度在过喉部后先增加缓慢, 直至截面积开始快速增加时, 气流速度迅速增加; 喷嘴下游形状对粒子撞击基板时的速度有一定影响, 且随着喷嘴下游长度和粉末粒度的变化而改变。对于 Cu 粉, 当为下游 100 mm 短喷嘴时, 锥形下游喷嘴对 10~20 μm 的粒子加速效果最好。当粉末在 20 μm 以上时, 喇叭形下游喷嘴的加速效果最好。对于下游 220 mm 长喷嘴, 钟形下游喷嘴对 10~30 μm 的粒子加速效果最好。当粉末在 30 μm 以上时, 锥形下游喷嘴的加速效果最好。对于 Al 粉, 当为下游 220 mm 长喷嘴时, 钟形下游喷嘴对 10~50 μm 的粒子加速效果最好, 喇叭形下游喷嘴加速效果最差。**结论** 冷喷涂喷嘴下游形状对气体与粒子加速有显著的影响。

关键词: 冷喷涂; 喷嘴下游形状; 数值模拟; 粒子速度

中图分类号: TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)09-0451-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.09.041

Numerical Simulation on Effect of Nozzle Downstream Shape on Acceleration Behavior of Cold Spray Particles

LI Zun-jia, ZHOU Hong-xia*

(School of Mechanical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

ABSTRACT: The particle impact velocity is one of the most important and crucial factors which determine the deposition process and coating quality in cold spraying. When the gas conditions (gas type, pressure, temperature) and powder parameters (particle morphology, particle size and distribution) are selected, the dimensions of the spray nozzle inside are important for the particle acceleration. Although it has been known that the nozzle downstream length and expansion ratio (the cross-sectional area of exit divided by that of the throat) are two very significant parameters that influence the particle velocity, the nozzle dimension optimization is still necessary for some aspects, such as nozzle upstream length and downstream shape.

Taking into the great difficulty to manufacture the nozzles with a curved inner wall, this study tried to examine the effect of

收稿日期: 2022-07-27; 修订日期: 2022-10-26

Received: 2022-07-27; Revised: 2022-10-26

基金项目: 国家自然科学基金 (52001180)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52001180)

引文格式: 李尊甲, 周红霞. 喷嘴下游形状对冷喷涂粒子加速行为影响的数值模拟研究[J]. 表面技术, 2023, 52(9): 451-458.

LI Zun-jia, ZHOU Hong-xia. Numerical Simulation on Effect of Nozzle Downstream Shape on Acceleration Behavior of Cold Spray Particles[J]. Surface Technology, 2023, 52(9): 451-458.

nozzle downstream shape by the numerical simulation method with the commercial software ANSYS/Fluent. A two dimensional axisymmetric model was employed as used before. The flow gas was taken as the ideal gas and the standard k- ϵ turbulence model was used to solve the equations. Besides the conventional cone shaped downstream, bell shaped and horn shaped downstream nozzles were also considered, while the other dimensions such as inlet diameter, throat diameter, exit diameter, and upstream length were fixed. In addition, two downstream lengths were also used to investigate the interaction of downstream length and shape. The standoff distance was fixed as 30 mm. The main driving gas and powder carrier gas were both nitrogen (N_2) with an inlet pressure of 3 MPa and temperature of 600 °C. The discrete phase model was used to solve the particle acceleration and the interaction between the particles and gas flow was omitted in this study based on previous experience. The spherical Cu powder was used with the particle size of 10 μm , 20 μm , 30 μm , 40 μm , and 50 μm . The initial velocity of particles was 10 m/s and they were fed at room temperature.

The results showed that all different nozzles presented a similar gas flow behavior, i.e., the gas velocity increased greatly after the nozzle throat until the nozzle exit. But there was some obvious difference. For the bell shaped nozzle, the gas expanded more quickly after the throat and then shortly its velocity increased slowly until near the nozzle exit; while for the horn shaped nozzle, the gas expanded slowly after throat until somewhere near the exit and then it expanded quickly to a higher velocity before it impinged the substrate. The particle impact velocity also changed with the nozzle downstream shape and particle size. When the Cu powder was used, for the short downstream length nozzle (i.e. 100 mm), the conventional cone shaped nozzle showed a better particle impact velocity when the particle size was in the range of 10-20 μm ; while when the particle size was larger than 20 μm , the horn shaped nozzle showed a better acceleration. For the long downstream length nozzle (i.e. 220 mm), the bell shaped nozzle showed a better particle impact velocity when the particle size was in the range of 10-30 μm ; while when the particle size was larger than 30 μm , the conventional cone shaped nozzle was better. When the 10~50 μm Al powder was used, for the long downstream length nozzle (i.e. 220 mm), the bell shaped nozzle showed the highest particle impact velocity and the horn shaped nozzle showed the worst acceleration.

Therefore, based on the above results, the nozzle downstream shape and length have interaction for different particle size ranges. Since the nozzle downstream shape has a significant effect on particle acceleration, a comprehensive design method should be paid more attention to in future nozzle optimization.

KEY WORDS: cold spraying; nozzle downstream shape; numerical simulation; particle velocity

冷喷涂是一种基于固态金属粉末粒子沉积制备涂层的技术。因其突出的冶金优势,在制备高性能金属、金属基复合材料等方面具有广阔的应用前景^[1-6]。经过 30 余年的发展,冷喷涂已经在航空航天、能源动力、石油化工等领域的防护涂层制备、零件修复、增材制造、表面强化等方面获得应用^[1-3,7-10]。

在冷喷涂过程中,粒子碰撞基体时的条件(速度与温度)对涂层质量影响显著^[2,11-12]。而粒子碰撞速度是决定喷涂效果与质量的最重要的条件之一。一般认为,粒子沉积存在一个“临界速度”,只有当粒子速度大于此速度时才能在基体表面形成有效沉积^[13-15]。要想获得高质量的结合,需要更高的粒子碰撞速度,或者说希望粒子速度超过临界沉积速度的量要大。因此,如何提高粒子速度一直是本领域重点关注的问题^[16-17]。目前业内认可的提高粒子速度的方法主要有^[2,15-24]:采用加速效果极佳的氦气;提高工作气体的压力与温度;采用小粒度的粉末;喷嘴优化设计。但是,氦气的价格非常昂贵,使用的成本极高。而提高压力与温度则对设备要求严苛,升高温度会使金属

粉末的氧化倾向增大,尤其是小粒度的粉末,对涂层质量影响较大。因此,喷嘴优化设计是提高粒子速度较好的方法^[25-29]。

目前喷嘴设计主要涉及喷嘴的入口直径、喉部直径、出口直径、上游长度与下游长度,其中喷嘴扩张比(出口截面积与喉部截面积的比值)与下游长度是影响较大的参数^[15-27]。也有研究者对送粉嘴的尺寸与位置进行了优化^[28-29]。但是很少有学者研究喷嘴下游形状对粒子加速行为的影响,仅有 SUDHAN 等^[30]数值模拟研究了喷嘴喉部直径(20 mm)、出口直径(63.1 mm)、下游长度 124.5 (mm)的内壁钟形几何形状对粒子加速的影响,结果表明下游使用钟形内壁的喷嘴确实一定程度上优于锥形内壁的喷嘴的加速效果,但是其过大喉部直径基本没有任何冷喷涂实用价值。因此,本文将对钟形下游喷嘴、喇叭形下游喷嘴以及常规的锥形下游喷嘴进行数值模拟计算,通过对相同温度、相同压力、相同扩张比条件下不同喷嘴下游形状下气流速度分布及加速粒子碰撞速度的研究,来证明改变喷嘴下游形状的喷嘴优化设计方法

具有可行性。

1 数值计算方法

1.1 计算区域及边界条件

本研究采用计算流体动力学(CFD)软件 ANSYS/Fluent 进行求解计算。根据冷喷涂过程中喷嘴内流动的轴对称性,采用二维轴对称模型,计算的几何模型如图 1 所示。该模型由对称轴(Axis)、喷嘴入口(Inlet)、喷嘴出口(Exit)、喷嘴壁面、基体表面、流出边界(Outlet)等组成。网格划分采用了结构化四边形网格,为了使壁面求解更精确,壁面附近网格逐步细化。本文重点研究喷嘴下游形状对气流与粒子加速的影响,因此采用了图 1 所示的 3 种下游形状:

锥形(Cone-shaped);钟形(Bell-shaped);喇叭形(Horn-shaped)。

流体求解的基本控制方程分别为质量、动量、能量 3 个基本守恒方程。湍流模型为标准的 k-ε 模型。气体当作理想可压缩气体处理。采用离散相模型(Discrete Phase)求解粒子的加速与加热过程,且基于文献[15-25],本次研究忽略了粒子对气流的影响。

1.2 计算条件

为了充分考察喷嘴下游形状对粒子加速的影响,借鉴已报道的喷嘴^[15-16],本文使用了 2 种典型的喷嘴下游长度:100 mm 的短喷嘴与 220 mm 的长喷嘴,喷嘴的其他尺寸如表 1 所示。

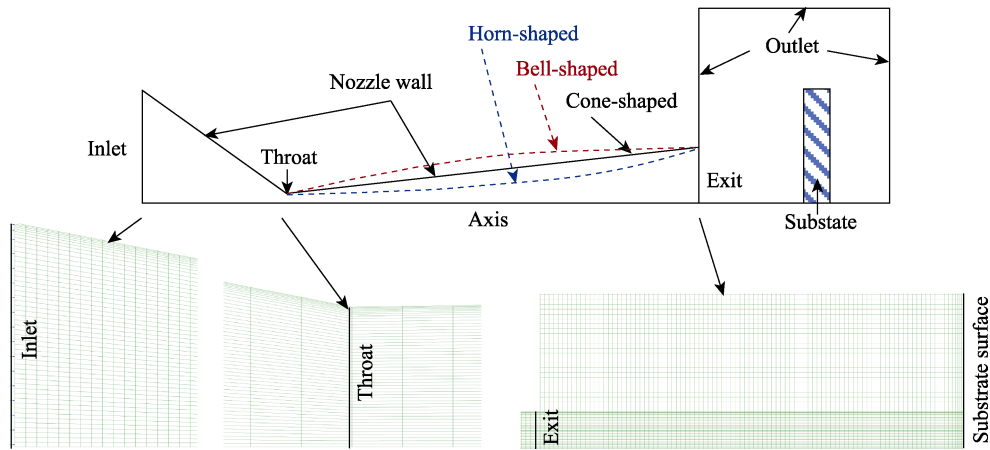


图 1 喷嘴计算区域示意图及局部网格划分
Fig.1 Schematic diagram of nozzle calculation zone and local meshing

表 1 本文研究的两种喷嘴尺寸
Tab.1 Dimensions of two types of nozzles used in this study

Nozzle	Inlet diameter/mm	Throat diameter/mm	Exit diameter/mm	Upstream length /mm	Downstream length/mm	Expansion ratio
Short	20	2	6	30	100	9
Long	20	2.7	7.62	30	220	7.96

计算中所用气体为冷喷涂常用的氮气,工作条件为冷喷涂常用参数:预热温度 600 ℃;压力 3 Mpa;基体为半径 15 mm、厚度 3 mm 的圆盘;喷涂距离为 30 mm。粉末选用球形 Cu 粉和 Al 粉(2 者密度差别大,便于研究粉末影响),粒度为 10~50 μm(在研究其他参数影响时粉末粒径固定为 20 μm),室温下从喷嘴入口中心点送入,初始速度为 10 m/s。

2 计算结果及讨论

2.1 短喷嘴下游形状对气流加速行为的影响

短喷嘴不同下游形状下气流速度云图,见图 2。图 2 中的情况与以前报道的文献一致^[15,17],气流速度经过喉部迅速上升,并在出口附近达到最高。由于 3

种喷嘴出口的马赫数相同,所以气流到达出口的速度十分接近。图 3 所示的中心轴向气流速度变化可更清晰地看出这一点。但是,对于不同喷嘴下游形状,气流在喷嘴下游的加速行为差别较大:当喷嘴下游为钟形时(如图 2b 所示),由于喉部以后扩张程度更大,使气流速度很快增加到较高的数值,然后速度变化减缓,直至出口产生冲击波。而下游形状为喇叭形的喷嘴,过了喉部以后,喷嘴截面积开始缓慢增加,气流速度也相应地增加较慢,当截面积开始快速增加时,气流速度迅速增加,到达出口时的速度略高于传统的锥形下游喷嘴(如图 3 所示)。

上述结果表明,对于短喷嘴和钟形喷嘴,2 者的下游流场情况相对较好,但从后面粒子加速效果来看,钟形喷嘴并不比其他 2 种喷嘴的粒子加速效果

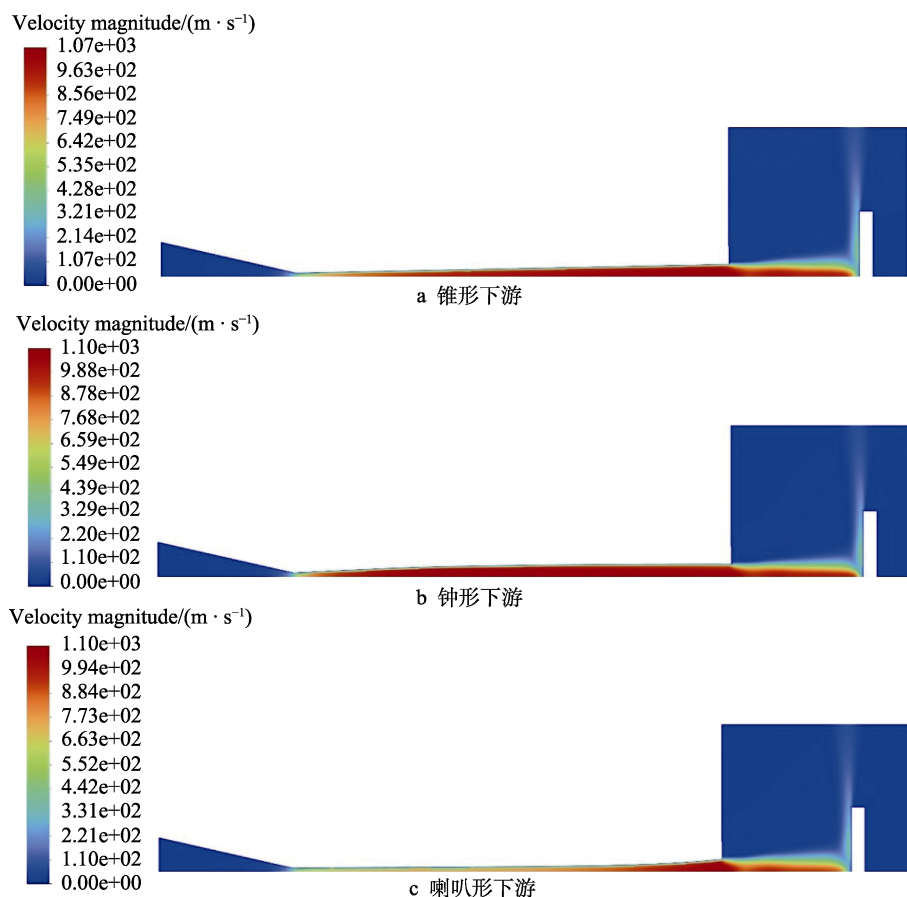


图2 短喷嘴不同下游形状下气流速度云图 (N_2 , 600 °C, 3 MPa)

Fig.2 Contour of gas velocity under different short nozzle downstream shapes (N_2 , 600 °C, 3 MPa): a) cone-shaped; b) bell-shaped; c) horn-shaped

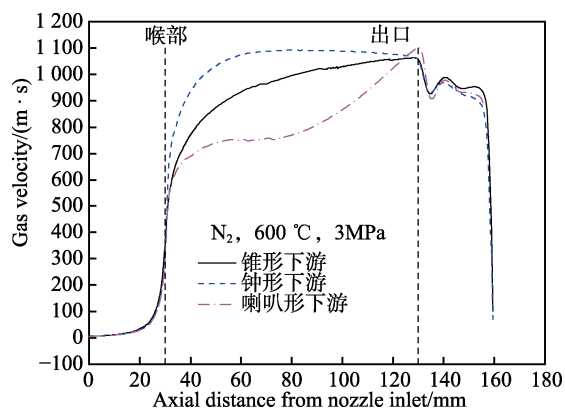


图3 喷嘴下游形状对短喷嘴中心轴向气流速度的影响

Fig.3 Effect of short nozzle downstream shapes on gas velocity along axis

好, 具体原因见 2.2 节。

2.2 短喷嘴下游形状对粒子加速行为的影响

图 4a 所示为 20 μm 球形 Cu 粒子在 3 种喷嘴内的加速情况。由图 4a 可知, 在喷嘴下游较短时, 使用传统的锥形下游喷嘴的粒子速度最高, 其次是喇叭形下游喷嘴, 最低的是钟形下游喷嘴。该结果与最初设想不同, 究其原因 (如图 4b 所示), 主要是因为钟形下游气体快速膨胀导致气体密度显著降低, 反而削弱

了对粒子的加速效果。因此, 虽然在离开喉部最开始的 10 mm 距离内钟形下游喷嘴的粒子速度最高, 但是很快就先后被锥形下游喷嘴和喇叭形下游喷嘴超越。喇叭形下游喷嘴虽然在出口处的气流速度高于锥形下游喷嘴, 但使用喇叭形下游喷嘴加速的粒子速度却低于锥形下游喷嘴所加速的粒子。结果分析表明, 在使用下游为 100 mm 的短喷嘴情况下, 和其他 2 种形状的下流相比, 锥形下游喷嘴拥有更好的粒子加速效果。从图 4a 还可看出, 喇叭形下游喷嘴的粒子加速曲线在出口附近上升趋势明显, 有超过锥形下游喷嘴的倾向。因此, 本文接下来将分析更长下游喷嘴的加速情况, 详见 2.3 节和 2.4 节。

2.3 长喷嘴下游形状对气流加速行为的影响

长喷嘴不同下游形状下气流速度云图, 见图 5。由图 5 可知, 其气流加速过程与短喷嘴类似, 气流速度过喉部上升, 并在出口附近达到最高。由图 6 中心轴向气流速度变化也可看出这点。同样, 当喷嘴下游为钟形时 (如图 5b 所示), 由于喉部以后扩张程度更大, 使气流速度很快增加到较高的数值, 然后速度变化缓慢, 直至出口产生冲击波。而当下游形状为喇叭形的喷嘴时, 过了喉部以后, 喷嘴截面积开始缓慢增加, 气流速度也相应地增加较慢, 直至截面积开始快

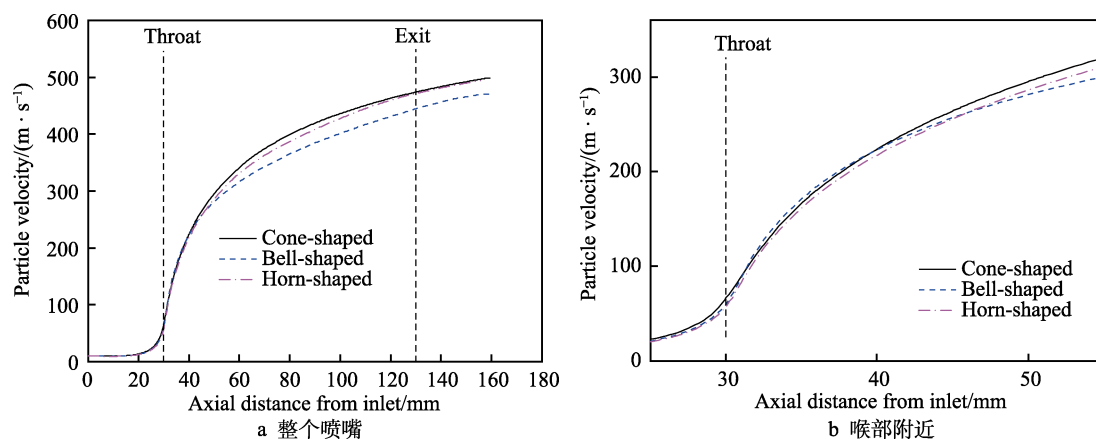
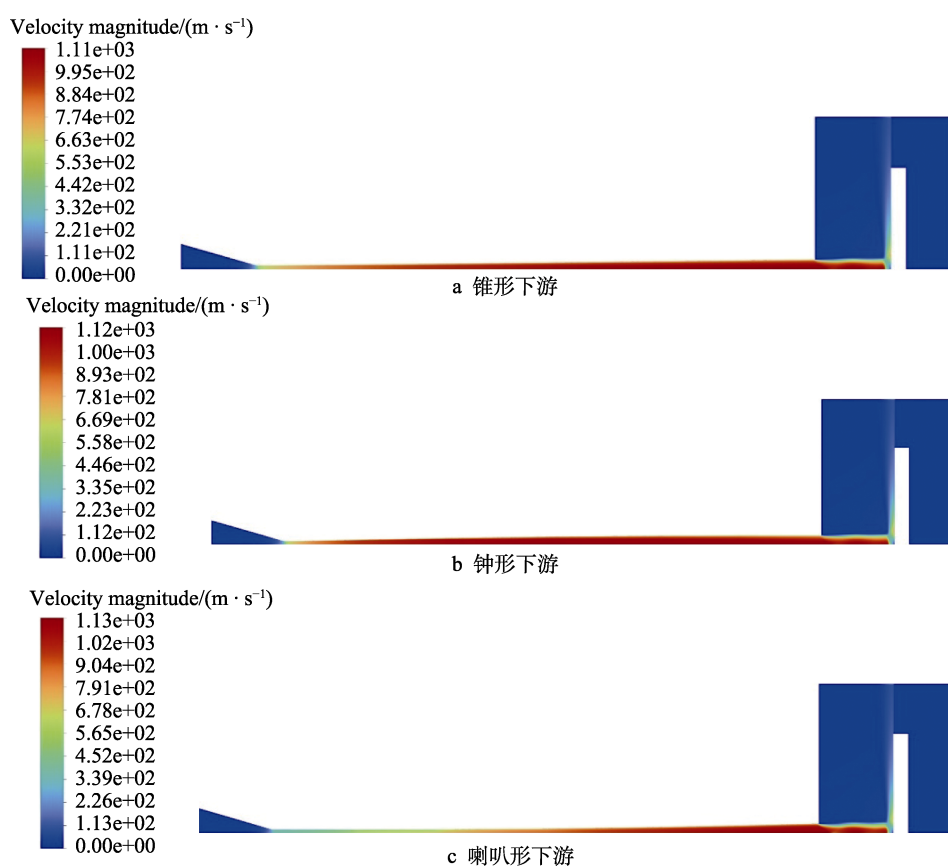


图 4 喷嘴下游形状对短喷嘴 Cu 粒子加速行为的影响

Fig.4 Effect of downstream shapes on Cu particle acceleration behavior of short nozzle: a) along whole nozzle; b) near throat

图 5 长喷嘴不同下游形状下气流速度云图 (N_2 , 600 °C, 3 MPa)Fig.5 Contour of gas velocity under different long nozzle downstream shapes (N_2 , 600 °C, 3 MPa):

a) cone-shaped; b) bell-shaped; c) horn-shaped

速增加时, 气流速度迅速增加, 到达出口时的速度仍略高于锥形下游喷嘴 (如图 6 所示)。

上述结果表明, 无论长短喷嘴还是钟形喷嘴, 2 者下游的流场情况均相对较好, 其次是锥形下游喷嘴, 而喇叭形下游喷嘴较差。

2.4 长喷嘴下游形状对粒子加速行为的影响

图 7 所示为 20 μm 球形 Cu 粒子在 3 种下游形状长喷嘴内的加速情况。由图 7 可知, 在喷嘴下游较长

时, 与较短下游喷嘴相比 (见 2.2 节), 会发生较大的变化: 使用钟形下游喷嘴的粒子速度始终保持最高, 使用传统的锥形下游喷嘴的粒子速度较高, 而原本可能会在长喷嘴情况下粒子速度较高的喇叭形下游喷嘴却拥有最低的粒子速度。

分析以上结果的原因, 可能是因为下游长度与形状存在交互影响。当喷嘴较短时, 喇叭形下游喷嘴的急速扩张部分占比相对较大, 在喷涂距离处能使粒子速度增加较多。当下游较长时, 喇叭形下游的快速加

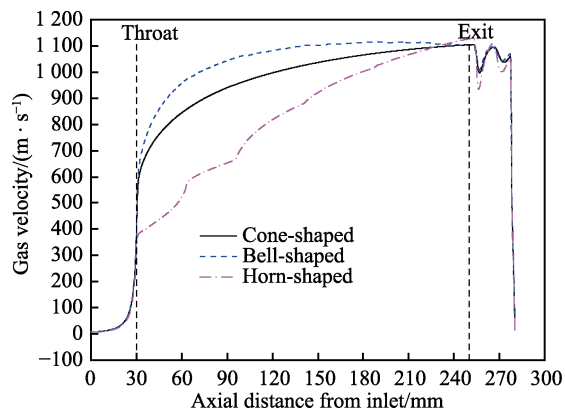


图6 喷嘴下游形状对长喷嘴中心轴向气流速度的影响
Fig.6 Effect of long nozzle downstream shapes on gas velocity along axis

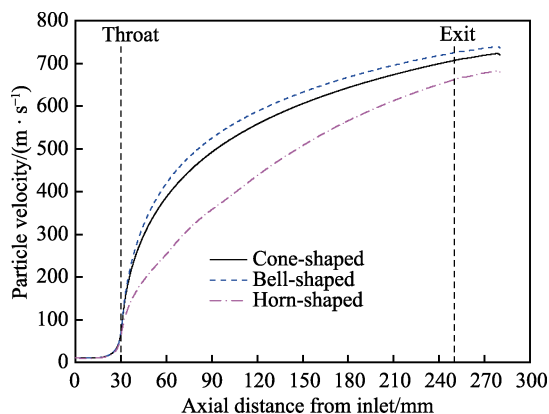


图7 喷嘴下游形状对长喷嘴Cu粒子加速行为的影响
Fig.7 Effect of downstream nozzle shapes on Cu particle acceleration behavior of long nozzle

速段相对较少, 因此一直无法追赶上其他2个喷嘴。而对于钟形下游喷嘴, 虽然有过早膨胀造成的气体密度较低这个不利因素, 但长距离处于高速状态的气体能换回加速效果, 保持较高的粒子速度。

2.5 粉末粒径对粒子加速的影响

考虑到金属粒度对粒子加速的影响, 改变金属粒径, 使用3种不同形状、2类不同长度的下游喷嘴对粒子进行加速。分别取粒径10、20、30、40、50 μm 的粒子进行加速, 得到不同粒径的粒子碰撞基体前速度, 如图8和图9所示。从图8和图9可知, 情况与先前的文献研究一致^[26]。无论喷嘴下游长度长短, 粒子粒径越大, 粒子碰撞基体速度越低。但是图8和图9的曲线高低关系存在着很大的差别, 长喷嘴有着显著良好的加速效果。

图8所示为不同粒径下, 短喷嘴3种不同形状下游的粒子碰撞速度。从图8可知, 钟形下游喷嘴的碰撞速度仅在粉末粒径为10 μm 时高于喇叭形下游喷嘴, 且低于锥形下游喷嘴的碰撞速度, 之后一直在锥形和喇叭形下游喷嘴的碰撞速度之下。随着粉末粒径增大, 喇叭形下游喷嘴的碰撞速度在粉末粒径接近

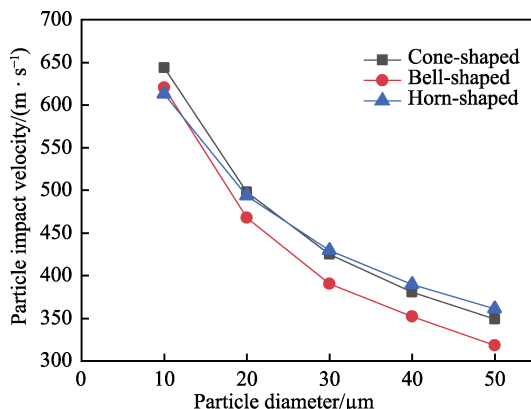


图8 不同粒径下短喷嘴下游形状对Cu粒子碰撞速度的影响

Fig.8 Effect of short nozzle downstream shapes with different Cu particle size on particle impact velocity

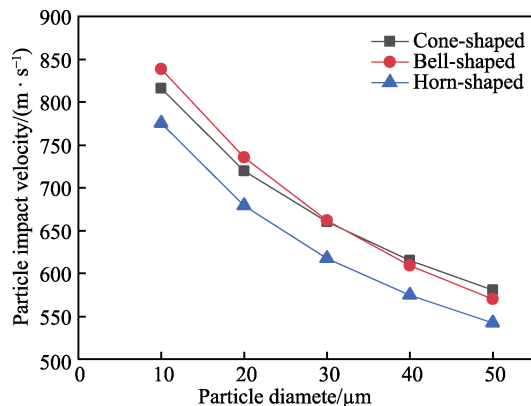


图9 不同粒径下长喷嘴下游形状对Cu粒子碰撞速度的影响

Fig.9 Effect of long nozzle downstream shapes with different Cu particle size on particle impact velocity

25 μm 时超过了锥形下游喷嘴, 之后便一直在锥形和钟形的碰撞速度之上。结果分析表明, 在使用下游100 mm的短喷嘴时, 若粉末粒径为10~20 μm , 传统锥形下游喷嘴的粒子加速效果最好。若粉末粒径在20 μm 以上, 喇叭形下游喷嘴的粒子加速效果最好。

图9所示为不同粒径下长喷嘴3种不同形状下游的粒子碰撞速度。由图9可知, 喇叭形下游喷嘴的碰撞速度一直处于锥形和钟形下游喷嘴的碰撞速度之下, 且在不同粒径下都没有任何上升趋势, 速度也逐步下降, 这与得到的短喷嘴条件下的速度有很大差别。钟形下游喷嘴的碰撞速度在粉末粒径30 μm 之前一直高于锥形下游喷嘴的碰撞速度, 但在30 μm 以后的碰撞速度与锥形下游喷嘴相比还是较低。结果分析表明, 在使用下游220 mm的长喷嘴情况时, 若粉末粒径为10~30 μm , 钟形下游喷嘴的粒子加速效果最好。若粉末粒径在30 μm 以上, 传统锥形下游喷嘴的粒子加速效果最好。

2.6 粉末种类(密度)对粒子加速的影响

考虑到金属密度对粒子质量的显著影响, 改变金

属材料种类, 典型地选取纯 Al 粉末 (密度不到纯 Cu 的 3 分之 1), 结果如图 10 所示。由图 10 可知, 在相同下游形状、气流、粒度条件下, 较轻的 Al 粉末速度显著高于 Cu 粉末, 且均随粒度增加而减小。但喷嘴下游形状对粒子加速的影响不同: 相比于其他 2 种下游形状的喷嘴, 在 10~50 μm 粒度条件下, 钟形下游喷嘴加速效果一直处于最佳的状态, 其次是锥形下游喷嘴, 而喇叭形下游喷嘴一直较差。

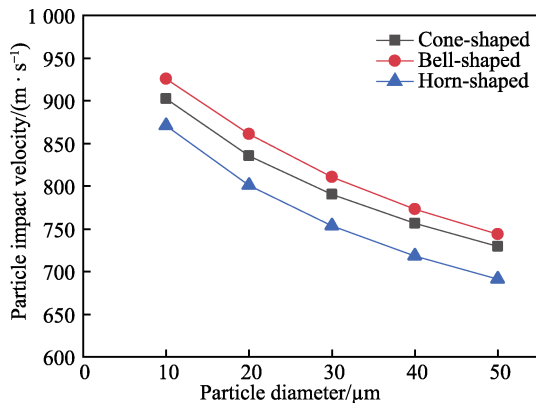


图 10 不同粒径下长喷嘴下游形状对 Al 粒子碰撞速度的影响

Fig.10 Effect of long nozzle downstream shapes with different Al particle size on particle impact velocity

3 结论

通过对相同工作气体温度、相同气体压力、相同扩张比条件下 2 种下游长度喷嘴, 不同下游形状下气流速度分, 以及粒子加速行为进行深入的数值模拟研究, 得到了以下主要结论。

1) 通过改变喷嘴下游形状, 从而优化喷嘴的设计方法确实具有可行性。

2) 在使用下游 100 mm 的短喷嘴情况下, 当 Cu 粉末粒径在 10~20 μm 时, 传统锥形下游喷嘴的粒子加速效果最好; 当 Cu 粉末粒径在 20 μm 以上时, 喇叭形下游喷嘴的粒子加速效果最好。

3) 在使用下游 220 mm 的长喷嘴情况下, 当 Cu 粉末粒径在 10~30 μm 时, 钟形下游喷嘴的粒子加速效果最好; 当 Cu 粉末粒径在 30 μm 以上时, 传统锥形下游喷嘴的粒子加速效果最好。

4) 在使用下游 220 mm 的长喷嘴情况下, 当 Al 粉末粒径在 10~50 μm , 钟形下游喷嘴的粒子加速效果最好, 其次为锥形, 喇叭形最差。

5) 喷嘴下游形状与下游长度对粒子加速的影响相互关联, 较好的下游形状设计还取决于工作气体条件与喷涂粉末粒径, 需要综合考虑。

参考文献:

[1] GUO D, KAZASIDIS M, HAWKINS A, et al. Cold

Spray: Over 30 Years of Development toward a Hot Future[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(4): 866-907.

[2] LI Wen-ya, CAO Cong-cong, YIN Shuo. Solid-state Cold Spraying of Ti and Its Alloys: A Literature Review[J]. Progress in Materials Science, 2020, 110: 100633.

[3] 黄春杰, 殷硕, 李文亚, 等. 冷喷涂技术及其系统的研究现状与展望[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 1-23.

HUANG Chun-jie, YIN Shuo, LI Wen-ya, et al. Cold spray technology and its system: research status and prospect[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 1-23.

[4] 李文亚, 黄春杰, 余敏, 等. 冷喷涂制备复合材料涂层研究现状[J]. 材料工程, 2013, 41(8): 1-10.

LI Wen-ya, HUANG Chun-jie, YU Min, et al. State-of-the-art of Cold Spraying Composite Coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 41(8): 1-10.

[5] 周红霞, 李成新, 李长久. 冷喷涂制备钛及钛合金涂层研究进展[J]. 中国表面工程, 2020, 33(2): 1-14.

ZHOU Hong-xia, LI Cheng-xin, LI Chang-jiu. Research Progress of Cold Sprayed Ti and Ti Alloy Coatings[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(2): 1-14.

[6] 付树仁, 杨理京, 李争显, 等. 冷喷涂技术制备 Al 基复合材料涂层研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 75-84.

FU Shu-ren, YANG Li-jing, LI Zheng-xian, et al. Research Progress of Al-matrix Composite Coatings Prepared by Cold Spraying Technique[J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 75-84.

[7] 邹阳帆, 王非凡, 鄢东洋, 等. 冷喷涂改善 2219 铝合金熔焊接头残余应力新方法[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 240-246.

ZOU Yang-fan, WANG Fei-fan, YAN Dong-yang, et al. New Method to Modify the Residual Stress in Variable Polarity TIG Welded 2219 Aluminum Alloy Joints by Cold Spraying[J]. Surface Technology, 2019, 48(12): 240-246.

[8] 虞思琦, 杨夏炜, 王非凡, 等. 镁合金表面冷喷涂层防护研究进展[J]. 表面技术, 2018, 47(5): 43-56.

YU Si-qi, YANG Xia-wei, WANG Fei-fan, et al. Protection for Cold Sprayed Coatings on Magnesium Alloy[J]. Surface Technology, 2018, 47(5): 43-56.

[9] YIN S, CAVALIERE P, ALDWELL B, et al. Cold Spray Additive Manufacturing and Repair: Fundamentals and Applications[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 628-650.

[10] 邓楠, 董浩, 车洪艳, 等. 冷喷涂制备金属涂层及其在增材制造应用中的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 57-66.

DENG Nan, DONG Hao, CHE Hong-yan, et al. The Research Progress on Preparation of Metal Coatings by Cold Spraying and Its Application in Additive Manufacturing[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 57-66.

[11] 罗政刚, 陈永雄, 程延海, 等. 冷喷涂粒子速度-温度协同作用及复合喷涂新工艺研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 180-191.

- LUO Zheng-gang, CHEN Yong-xiong, CHENG Yan-hai, et al. Research Progress in the Synergy between Velocity and Temperature of Cold-Sprayed Particle and Novel Composite Technology[J]. Surface Technology, 2021, 50(8): 180-191.
- [12] 吴增荣, 胡永俊, 代明江, 等. 气体温度对冷喷涂 7075 铝合金涂层性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 318-325.
- WU Zeng-rong, HU Yong-jun, DAI Ming-jiang, et al. Effect of Gas Temperature on Properties of Cold Sprayed 7075 Aluminum Alloy Coatings[J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 318-325.
- [13] ALKIMOV A P, KASAREV V F, PAPYRIN A N. A Method of Cold Gas Dynamic Deposition[J]. Dokl Akad Nauk SSSR, 1990, 315(5): 1062-1065.
- [14] GILMORE D L, DYKHUIZEN R C, NEISER R A, et al. Particle Velocity and Deposition Efficiency in the Cold Spray Process[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1999, 8(4): 576-582.
- [15] 李文亚. 粒子参量对纳米结构金属涂层冷喷涂沉积特性影响的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005: 12-28.
- LI Wen-ya. Study on the Effect of Particle Parameters on Deposition Behavior, Microstructure Evolution and Properties in Cold Spraying[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2005: 12-28.
- [16] YIN Shuo, MEYER M, LI Wen-ya, 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.
- [17] 李文亚, 樊柠松, 殷硕. 冷喷涂过程中气固两相流动行为及喷涂工艺优化研究新进展[J]. 中国表面工程, 2020, 33(4): 82-101.
- LI Wen-ya, FAN Ning-song, YIN Shuo. State-of-the-art of Gas-solid Two-phase Flow Behavior during Cold Spray and Process Parameters Optimization[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(4): 82-101.
- [18] 唐文勇, 张克声, 蒋学勤, 等. 主气流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 Wen-yong, ZHANG Ke-sheng, JIANG Xue-qin, 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.
- [19] DYKHUIZEN R C, SMITH M F. Gas Dynamic Principles of Cold Spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1998, 7(2): 205-212.
- [20] LEE M W, PARK J J, KIM D Y, et al. Numerical Studies on the Effects of Stagnation Pressure and Temperature on Supersonic Flow Characteristics in Cold Spray Applications[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(5): 1085-1097.
- [21] 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.
- [22] LI S, MUDDLE B, JAHEDI M, et al. A Numerical Investigation of the Cold Spray Process Using Underexpanded and Overexpanded Jets[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(1): 108-120.
- [23] SAMAREH B, STIER O, LÜTHEN V, DOLATABADI A. Assessment of CFD Modeling via Flow Visualization in Cold Spray Process[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(5-6): 934-943.
- [24] CHAMPAGNE V K, HELFRITCH D J, DINAVAH S P G, et al. Theoretical and Experimental Particle Velocity in Cold Spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(3): 425-431.
- [25] LI Wen-ya, LI Chang-jiu. Optimization of Spray Conditions in Cold Spraying Based on the Numerical Analysis of Particle Velocity[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2004, 14(S2): 43-48.
- [26] CAO Cong-cong, LI Wen-ya, ZHANG Zheng-mao, et al. Cold Spray Additive Manufacturing of Ti6Al4V: Special Nozzle Design Using Numerical Simulation and Experimental Validation[J]. Coatings, 2022, 12, 210.
- [27] 李文亚, 韩天鹏, 杨夏炜. 一种冷喷涂的冷喷嘴的设计方法: 中国, ZL201710717725.6[P]. 2020.05.22.
- LI Wen-ya, HAN Tian-peng, YANG Xia-wei. A Design Method for Cold Spray Nozzles: China, ZL201710717725.6[P]. 2020.05.22
- [28] CAO Cong-cong, HAN Tian-peng, XU Ya-xin, et al. The Associated Effect of Powder Carrier Gas and Powder Characteristics on the Optimal Design of the Cold Spray Nozzle[J]. Surface Engineering, 2020, 36(10): 1081-1089.
- [29] WAN Wen-peng, LI Wen-ya, WU Dong, 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.
- [30] SUDHAN K H, PRASAD P G K, KOTHURKAR N K, et al. Studies on Supersonic Cold Spray Deposition of Microparticles Using a Belltype Nozzle[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 383: 125244.

责任编辑: 蓝英侨