

冷喷涂喷嘴材料对粒子加速行为影响的模拟研究

曹聪聪, 李文亚, 韩天鹏, 杨夏炜, 徐雅欣, 胡凯玮

(西北工业大学 材料学院 凝固技术国家重点实验室 陕西省摩擦焊接技术重点实验室, 西安 710072)

摘要: **目的** 研究冷喷涂过程中喷嘴材料对粒子加速行为的影响。**方法** 建立喷嘴内外壁的几何模型, 设定喷嘴几何尺寸及边界条件, 划分喷嘴入口、收缩段、喉部及扩张段的网格, 采用模拟软件 Fluent 14.5 进行模拟分析。**结果** 在冷喷涂过程中, 喷嘴内部包含高温气体、室温粒子流及喷嘴内壁的热交换, 导热系数最低的喷嘴材料(陶瓷)的喷嘴内壁温度最低, 气流和粒子的热损失最小, 粒子的速度略高(441 m/s); 导热系数最高的纯铜喷嘴内壁温度最高, 有利于粒子温度提升, 因此粒子的温度最高, 从而促进粒子塑性变形, 改善沉积效果, 然而温度过高的内壁会因粒子粘附导致喷嘴堵塞。**结论** 数值模拟方法可以用来研究喷嘴内外壁的传热行为, 为喷嘴材料的选择做理论指导, 通过综合考虑喷嘴材料的选择和使用来优化喷嘴设计。

关键词: 冷喷涂; 喷嘴; 数值模拟; 加速行为

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.022

中图分类号: TG406 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0149-05

Simulation Study on Effect of Cold Spray Nozzle Material on Particle Acceleration Behavior

CAO Cong-cong, LI Wen-ya, HAN Tian-peng, YANG Xia-wei, XU Ya-xin, HU Kai-wei

(Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, State Key Laboratory of Solidification Processing, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: The paper aims to investigate the effect of nozzle material on particle acceleration behavior during cold spray. The geometric model of the nozzle was established, and geometric dimension and boundary conditions of the nozzle was set. The inlet, convergent section, throat, divergent section of nozzle was divided in to small meshes. Subsequently, the simulation software Fluent 14.5 was used for simulation analysis. The results show that the heat exchange happened among gas with high temperature, particle flow with room temperature, and nozzle wall in the cold spray. The inner wall of ceramic nozzle had the lowest temperature, because its thermal conductivity was the lowest. Hence, the heat loss of gas flow and the particle was the smallest, and the velocity of particles was slightly high (441 m/s). The inner wall of copper nozzle had the highest temperature, which was conducive to the improvement of particle temperature. Therefore, the temperature of particles was the highest. And the particle with high temperature can easily produce plastic deformation, improving the deposition effect of particles. However, the inner wall with too high temperature caused the nozzle blockage because that the particles adhered on the inner wall of nozzle. In summary, the numerical simulation method can be used to study the heat transfer behavior of the inner and outer walls of the nozzle, which can provide theoretical guidance for the selection of nozzle materials. Hence, the nozzle design can be optimized by comprehensively considering the selection and use of nozzle materials.

收稿日期: 2019-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(51875471); 凝固技术国家重点实验室自主课题(2019-QZ-01)

作者简介: 曹聪聪(1986—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为冷喷涂和搅拌摩擦加工。

通讯作者: 李文亚(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为冷喷涂和摩擦焊接。

KEY WORDS: cold spraying; nozzle; numerical simulation; acceleration behavior

冷喷涂属于快速固态成形工艺,一定温度和压力的气流携带着金属颗粒,通过特殊设计的收缩-扩张型喷嘴(Laval 喷嘴),经充分加速后,低温高速金属粒子依次撞击到基体上形成涂层(或沉积体),制备过程快,且“近净成形”。与传统的超音速火焰喷涂(HVOF)^[1]、电子束熔覆^[2]等热加工工艺相比,冷喷涂过程的相对低温使得金属颗粒的氧化、分解、相变、晶粒长大等缺陷可得到避免^[3]。冷喷涂技术制备的材料非常广泛,迄今为止已经实现铜、铝、钛及合金等有色金属^[4-6]、金属基复合材料^[7-8]、高熵合金^[9]甚至纳米晶^[10]等材料的制备。目前冷喷涂用于涂层制备、增材制造及修复等领域^[11-13]。

作为冷喷涂装置关键部件的喷嘴,在冷喷涂过程中具有重要作用。高温的气流和室温的粉末粒子流在喷嘴的收缩段进行混合和热交换,经过喷嘴喉部进入喷嘴扩张段,粒子在扩张段加速,撞击到基体上沉积形成涂层^[6-14]。这是一个复杂而快速的过程,喷嘴内外壁与高温气流、室温粒子流等进行热交换或者热对流,并且粒子在喷嘴内进行加速。采用试验方法对气流、喷嘴壁面进行测温,对粒子进行测速比较困难,然而采用模拟方法来研究喷嘴内部的热交换及粒子的加速行为,简单可靠。喷嘴材料属性会影响喷嘴壁面的传热行为^[15],然而相关研究较少。

文中采用数值模拟的方法,研究喷嘴内外的传热行为,以及喷嘴材料对粒子加速行为的影响。旨在为冷喷涂喷嘴材料的选择提供理论基础,优化冷喷涂喷嘴的设计,促进冷喷涂技术的发展。

1 数值模拟建模及计算方法

1.1 计算模型

数值模拟所使用的模型结构如图1所示,喷嘴为圆形截面的Laval 喷嘴,图1中的灰色部分为喷嘴壁面实体结构。图1中实体结构包围的区域(白色)为喷嘴的内部结构。在喷嘴出口外30 mm处设置了直径20 mm,厚度5 mm的圆盘基体,基体也为实体结构。

模型的参数分为送粉针参数、喷嘴内部结构参数及喷嘴外部尺寸参数。为保证粉末可以顺利送进喷嘴并进行加速,采用轴向送粉,直径($D=2$ mm)的送粉针位于喷嘴的轴线,穿过长度($L=20$ mm)的平行段,进入喷嘴的收缩段(收缩长度 $L_c=30$ mm)。喷嘴的入口直径标记为 $D_i=16$ mm,高温的气流和室温的粉末粒子在喷嘴的收缩段混合,进行热交换,经过喉部(喉部直径 $D_t=2.7$ mm),粉末粒子在扩张段(扩张段长度 $L_d=200$ mm)进行加速,经过喷嘴

出口(出口直径 $D_e=7$ mm),以超音速的速度撞击基板,沉积形成涂层。为探究喷嘴材料对冷喷涂过程中粒子加速行为的影响,引进喷嘴的外部尺寸参数:收缩段外部直径($D_{i1}=26$ mm)和扩张段外部($D_{e1}=17$ mm)直径。

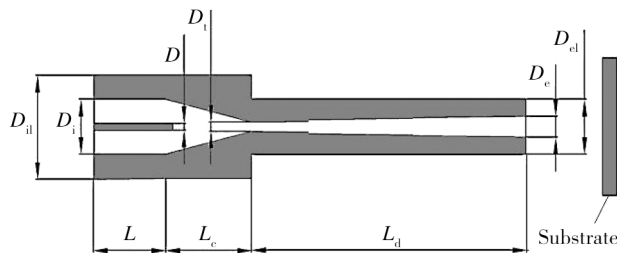


图1 数值模拟所采用模型结构示意图
Fig.1 Schematic of the nozzle used in simulations

1.2 计算方法

采用模拟软件Fluent 14.5进行模拟分析。模型中流场结构具有较强的对称特性,可简化为二维轴对称结构,喷嘴入口区域、喉部区域和出口区域及对应壁面,以及基体的网格划分如图2所示。

喷嘴的入口压力设置为1 MPa,入口温度分别设定为573 K,送粉气体压力设置为1 MPa,送粉气体温度设置为300 K,喷嘴出口外的环境压力设置为0.1 MPa,环境温度为300 K。关于热边界条件的设置,文中的传热计算为流固耦合传热,在模型的建立过程中根据气体和固体存在的区域分别定义流体域(喷嘴内部以及外界环境)和固体域(喷嘴壁面以及基体),两种区域的交界面为流固耦合传热边界,该传热边界主要包括喷嘴内外壁和基体表面。交界面处的传热条件设置为耦合传热,计算过程中FLUENT 14.5会利用流体温度、壁面温度以及能量守恒自动计算流体与壁面的换热情况。

工作气体设置为理想状态的 N_2 ,喷涂粉末设置为球形铜粒子,粒子直径为20 μm ,初始速度20 m/s,初始温度300 K,使用DPM模型计算粒子运动,不考虑粒子对气流的反作用。基体材料选用纯铝,喷嘴材料分别选用纯铜、不锈钢(SS304)以及陶瓷。纯铜的密度、比热容和导热系数分别为:8978 kg/m^3 , 387.6 $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 和381 $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ 。不锈钢(SS304)的密度、比热容和导热系数分别为:7920 kg/m^3 , 499 $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 和16 $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ 。陶瓷的密度、比热容和导热系数分别为:2700 kg/m^3 , 1200 $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 和1.15 $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$,因此3种材料的物理特性差异较大,以用来研究喷嘴不同材料特性对冷喷涂过程粒子加速行为的影响。

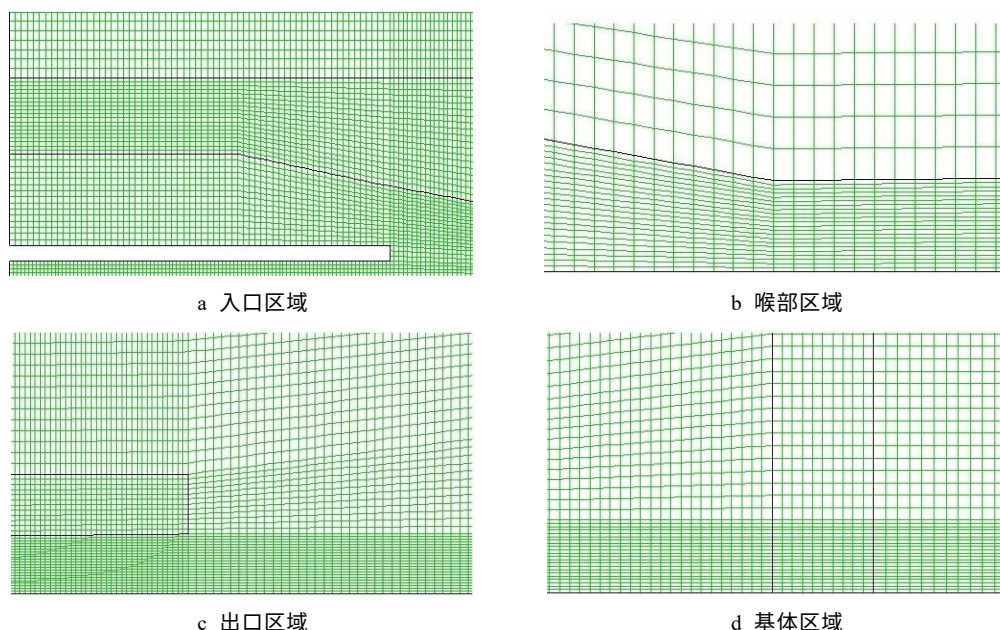


图 2 网格划分示意图

Fig.2 Schematic of quad meshing

2 试验结果及分析

2.1 冷喷涂过程中喷嘴内外壁传热

图 3 所示为冷喷涂喷嘴内外部存在的传热过程，主要包含工作气体与喷嘴内壁、喷嘴内外壁之间以及喷嘴外壁与外界空气等 3 个传热环节。在冷喷涂过程中，高温气体流经喷嘴加速后形成高速射流，喷嘴内壁温度在初始时为室温，所以高温气体流入喷嘴后与内壁形成对流换热，这种对流换热中的气体流动是由高压产生的，所以该换热环节属于强迫对流换热；随后喷嘴内壁温度升高，而外壁仍然处于室温，喷嘴内外壁之间便产生热传导；最后喷嘴外壁温度也逐渐升高，喷嘴外壁与外界空气形成对流换热，这种对流换热中的空气流动不存在外部驱动，所以属于自然对流换热。在整个换热过程中，辐射换热占比很小，可以忽略不计。

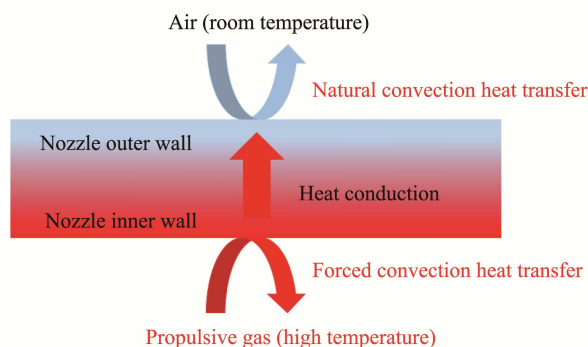


图 3 冷喷涂过程中喷嘴传热示意图

Fig.3 Schematic of heat transfer during cold spraying process

2.2 喷嘴材料对冷喷涂过程中粒子加速行为的影响

以冷喷涂过程中喷嘴内外壁传热理论分析为基础，并采用模拟来研究喷嘴材料对冷喷涂过程中粒子加速行为的影响。影响高温气流与喷嘴热交换的因素包含外因和内因，外因主要为气流温度、外部保温或冷却装置等，内因主要为喷嘴材料的自身属性。图 4a 所示为气体压力为 1 MPa，温度为 573 K 时纯铜、不锈钢及陶瓷喷嘴壁面的温度场，可以看出，所有喷嘴内收缩段温度整体高于扩张段温度，图 4b 所示为不同材料喷嘴的内壁温度分布曲线，同样可以看出壁面温度由收缩段向扩张段逐渐降低。另外还可以发现，纯铜喷嘴的内壁温度最高，陶瓷喷嘴的内壁温度最低。这是因为纯铜的比热容最低，热导率最高，在吸收相同热量的情况下纯铜的温度升得更高，所以纯铜喷嘴内壁温度最高。

图 5 所示为不同材料喷嘴内气流及粒子速度变化曲线，可以发现，陶瓷喷嘴内的气体速度和粒子速度（441 m/s）最高，纯铜喷嘴内的气体速度和粒子速度（437 m/s）最低。这是因为，陶瓷的导热系数小，在相同条件下，陶瓷喷嘴收缩段壁面热传导造成的热损失最小，并且陶瓷喷嘴扩张段温度更低，对气流的保温作用也更弱，最终气流速度较高，但是喷嘴造成的这种气流速度差以及粒子速度差较小。喷嘴传热过程中除了高温载气与内壁面的传热外，还包含喷嘴外壁面与空气的自然对流，自然对流的传热量与流体的物理性质、换热表面的形状以及温度差有关，不同材料喷嘴内的温度差有一定的差异，但是根据图 4

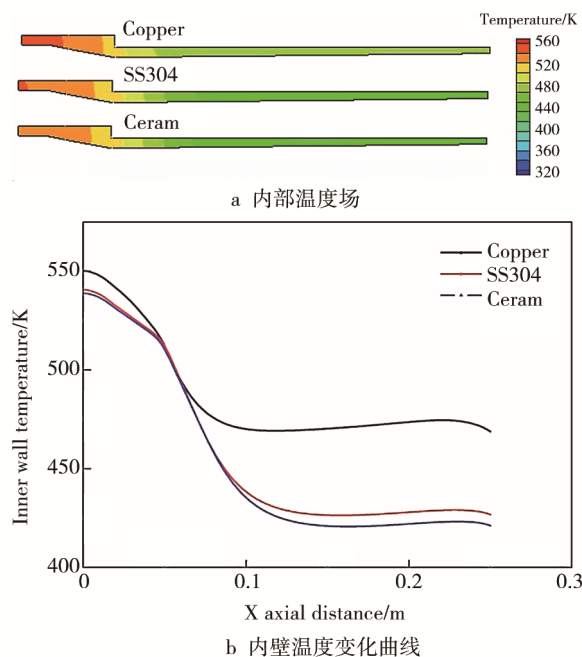


图4 不同材料喷嘴温度分布

Fig.4 Temperature distribution of nozzles of different materials

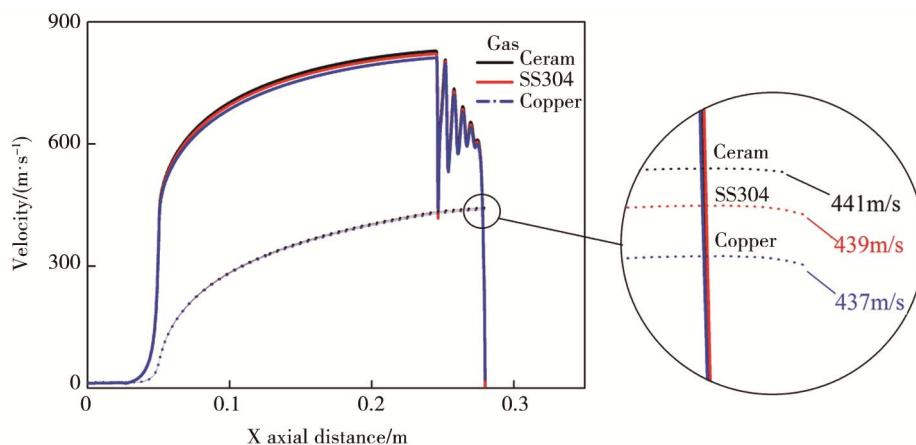


图5 不同材料喷嘴内气流及粒子速度变化曲线

Fig.5 Variation of gas and particle velocity in nozzles of different materials

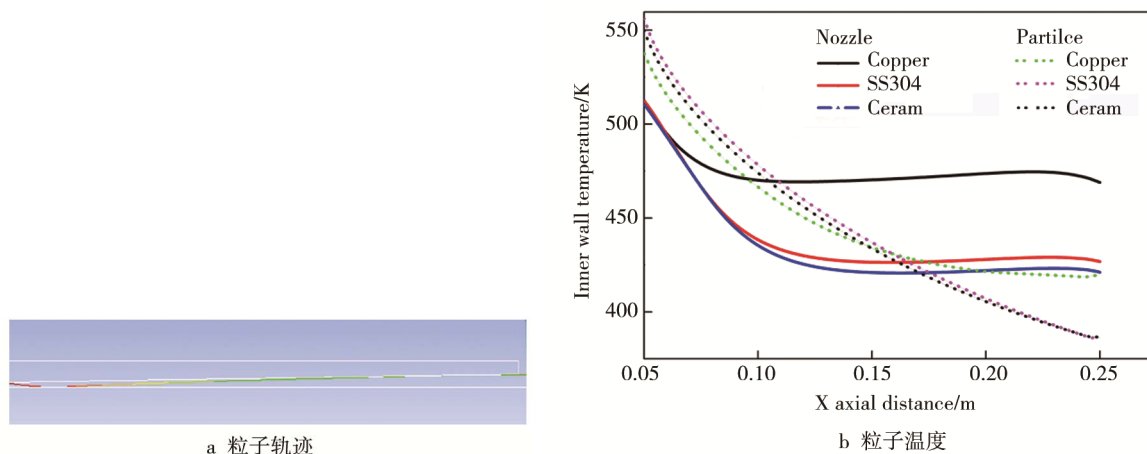


图6 不同材料喷嘴扩张段中粒子轨迹及温度变化

Fig.6 Particle trajectories and temperatures in different divergent sections of different material nozzle

可发现,该温度差并没有很大,所以在该换热环节中喷嘴材料对热损失的影响较为有限,最终导致不同材料喷嘴内的粒子速度较为接近。

虽然喷嘴材料对粒子速度造成的影响有限,但是仍然会对粒子沉积效果造成影响。影响粒子沉积的因素除了粒子速度外,还有粒子温度^[14],提高粒子温度能够降低粒子的临界沉积速度,从而提高沉积率。图6a所示为某个粒子在喷嘴扩张段的运动轨迹,可以看出,该粒子与喷嘴扩张段壁面碰撞后才运动到出口外。图6b为铜粒子及喷嘴内壁温度变化曲线,可以发现,粒子的温度逐渐降低,最终低于喷嘴的内壁温度。根据上述两个现象分析可知,粒子与喷嘴壁面存在温度差,在二者之间有接触的情况下,粒子温度会升高,其中铜喷嘴的壁面温度最高,对粒子的加热效果也就最好,从而提升粒子的沉积率。Macdonald^[15]的研究中也证明了这种可能性,他们采用纯铜制造喷嘴,从而提高了涂层厚度。提升喷嘴壁面温度能够改善粒子的沉积效果,但是过高的壁面温度又会使粒子黏在喷嘴内壁上^[16],从而造成喷枪的堵塞,所以喷嘴材料的选用应综合考虑上述因素。

3 结论

使用 CFD 软件 Fluent 14.5 对冷喷涂过程中粒子加速行为进行了数值模拟, 分析了冷喷涂过程中喷嘴内的传热过程, 喷嘴材料对粒子加速造成的影响。从这项研究中可以得出以下结论。

1) 冷喷涂过程中, 喷嘴内包含高温气体与喷嘴内壁的强迫对流换热、喷嘴内外壁的热传导以及喷嘴外壁与空气的自然对流换热。

2) 陶瓷材料的比热容最高, 导热系数最低, 因此陶瓷材料的喷嘴热损失最小, 喷嘴壁面温度最低, 喷嘴内气体速度和粒子速度 (441 m/s) 最高, 纯铜材料喷嘴内气体速度和粒子速度 (437 m/s) 最低, 然而粒子速度的差值很小。

3) 高热导率材料 (纯铜) 喷嘴壁面温度最高, 提高了粒子的温度, 粒子温度最高, 改善沉积效果, 然而过高的壁面温度会造成喷嘴堵塞, 应综合考虑选择喷嘴材料。

参考文献:

- [1] 杨翔麟, 王善林, 龚玉兵, 等. 热输入量对 HVOF 铁基非晶涂层制备及性能的影响[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 107—112.
- [2] 吴中文, 黄春平, 江畅. TC4 钛合金表面电子束熔覆 Ti40 阻燃钛合金工艺研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(1): 70—75.
- [3] CHAMPAGNE V K, HELFRITCH D J. Mainstreaming Cold Spray-Push for Applications[J]. Surface Engineering, 2014, 30(6): 396—403.
- [4] FENG Yan, LI Wen-ya, GUO Chao-wei, et al. Mechanical Property Improvement Induced by Nanoscaled Deformation Twins in Cold-Sprayed Cu Coatings[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 727: 119—122.
- [5] LI Na, LI Wen-ya, YANG Xia-wei, et al. Corrosion Characteristics and Wear Performance of Cold Sprayed Coatings of Reinforced Al Deposited onto Friction Stir Welded AA2024-T3 Joints[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 1069—1076.
- [6] 曹聪聪, 李文亚, 杨康, 等. 基体硬度和热学性质对冷喷涂 TC4 钛合金涂层组织和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(1): 277—282.
- [7] WU Xiang-kun, ZHOU Xiang-lin, CUI Hua, et al. Deposition Behavior and Characteristics of Cold-sprayed Cu-Cr Composite Deposits[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21: 792—799.
- [8] LI Wen-ya, ASSADI Hamid, GAERTNER Frank, et al. A Review of Advanced Composite and Nanostructured Coatings by Solid-state Cold Spraying Process[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials, 2018, 44(2): 109—156.
- [9] YIN Shuo, LI Wen-ya, SONG Bo, et al. Deposition of FeCoNiCrMn High Entropy Alloy (HEA) Coating via Solid-state Cold Spraying[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2019, 35(6): 1003—1007.
- [10] CHO Seungchan, TAKAGI Kenta, KWON Hansang, et al. Multi-walled Carbon Nanotube-reinforced Copper Nanocomposite Coating Fabricated by Low-pressure Cold Spray Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206: 3488—3494.
- [11] CHAMPAGNE V, HELFRITCH D. The Unique Abilities of Cold Spray Deposition[J]. International Materials Reviews, 2016, 61: 437—455.
- [12] LI Wen-ya, YANG Kang, YIN Shuo, et al. Solid-state Additive Manufacturing and Repairing by Cold Spraying: a Review[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2018, 34: 440—457.
- [13] LI Wen-ya, CAO Cong-cong, WANG Guo-qing, et al. 'Cold spray+' as a New Hybrid Additive Manufacturing Technology: a Literature Review[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2019, 24(5): 420—445.
- [14] ASSADI H, KREYE H, GÄRTNER F, et al. Cold Spraying-A Materials Perspective[J]. Acta Materialia, 2016, 116: 382—407.
- [15] MACDONALD D, LEBLANC-ROBERT S, FERNÁNDEZ R, et al. Effect of Nozzle Material on Downstream Lateral Injection Cold Spray Performance[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2016, 25(6): 1—9.
- [16] YIN Shuo, LIU Qi, LIAO Han-lin, et al. Effect of Injection Pressure on Particle Acceleration, Dispersion and Deposition in Cold Spray[J]. Computational Materials Science, 2014, 90(1): 7—15.