引用格式：黄春杰，何三润，万文鹏，等.冷喷涂纯铝抗堵嘴实验研究：从涂层到增材制造[J].材料工程，2025，53(12)：14-23.
HUANG Chunjie，HE Sanrun，WAN Wenpeng，et al.Experimental study of anti-clogging nozzle in cold sprayed pure aluminum：from coating to additive manufacturing[J].Journal of Materials Engineering，2025，53(12)：14-23.

冷喷涂纯铝抗堵嘴实验研究：从涂层到增材制造

Experimental study of anti-clogging nozzle in cold sprayed pure aluminum：from coating to additive manufacturing

黄春杰[1,2*]，何三润[1]，万文鹏[1]，WICK Filip[3]，WIEHLER Levke[2]，GÄRTNER Frank[2]，KLASSEN Thomas[2]，李文亚[1]
（1 西北工业大学 陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室，西安 710072；
2 德国赫尔穆特-施密特大学/德国汉堡联邦国防军大学 材料技术研究所，德国 汉堡 22043；3 捷克理工大学 机械工程学院，捷克 布拉格 16000）

HUANG Chunjie[1,2*]，HE Sanrun[1]，WAN Wenpeng[1]，WICK Filip[3]，WIEHLER Levke[2]，GÄRTNER Frank[2]，KLASSEN Thomas[2]，LI Wenya[1]
（1 Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies，Northwestern Polytechnical University，Xi'an 710072，China；
2 Institute of Materials Technology，Helmut-Schmidt-University/University of the Federal Armed Forces Hamburg，Hamburg 22043，Germany；3 Faculty of Mechanical Engineering，Czech Technical University，Prague 16000，The Czech Republic）

摘要：采用聚合物聚苯并咪唑（PBI）喷嘴结合轴向中心送粉的改进工艺，对喷嘴堵塞行为及其对涂层沉积的作用规律进行研究，并利用X射线计算机断层扫描（X-CT）、光学显微镜及电子背散射衍射对涂层形貌和微观组织进行多尺度表征。结果表明：在现有工艺下，SiC喷嘴因铝粉软化粘连于内壁形成堵塞物，致使涂层表面出现粉末团聚现象，孔隙率为0.32%；而采用PBI喷嘴配合轴向中心送粉工艺，可显著降低颗粒黏附，形成均匀的气固两相流，实现连续稳定沉积，所制备涂层内部颗粒塑性变形明显，孔隙率降至0.16%。基于优化工艺开展铝金属增材制造实验，成功实现连续2 h无堵嘴喷涂，在铝合金基体上制备出38 mm厚的沉积体。X-CT检测显示，沉积体界面处和内部均无明显缺陷，其平面方向与法向方向的抗拉强度分别约为180 MPa和80 MPa，表现出显著的各向异性。

关键词：冷喷涂；铝金属；喷嘴堵塞；组织性能；增材制造
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000118 **CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000118
中图分类号：TG174.442；TB31 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4381(2025)12-0014-10

Abstract：The improved process combining a polybenzimidazole (PBI) polymer nozzle with axial center powder feeding is employed to study the nozzle clogging behavior and its impact on coating deposition. Multi-scale characterization of the coating morphology and microstructure is carried out using X-ray computed tomography(X-CT), optical microscopy, and electron backscatter diffraction. The results show that in the existing process, aluminum powder softening causes adhesion to the inner wall of the SiC nozzle, forming clogging materials. This leads to a powder agglomeration on the coating surface and a porosity of 0.32%. In contrast, the PBI nozzle, when used with the axial center feeding process, significantly reduces particle adhesion and forms a uniform gas-solid two-phase flow, enabling continuous

and stable deposition. The resulting coating exhibits significant internal particle plastic deformation with the porosity reduced to 0.16%. Based on the optimized process, aluminum metal additive manufacturing experiments are carried out, achieving continuous spraying for 2 h without nozzle clogging and depositing a 38 mm thick coating on an aluminum alloy substrate. X-CT analysis indicates that there are no significant defects at the interface or within the deposit. The in-plane and out-of-plane tensile strengths of the deposit are about 180 MPa and 80 MPa, respectively, indicating significant anisotropy.

Key words: cold spraying; aluminum metal; nozzle clogging; microstructure and property; additive manufacturing

铝基材料具有优异的耐腐蚀性、高比强度及成型加工特性，因而成为航空航天与汽车工业中重要的结构材料[1-2]。然而，铝金属熔点低、反射率高，传统熔融增材制造（additive manufacturing，AM）技术如激光选区熔化，易造成氧化和热应力等问题。而冷喷涂（cold spraying，CS）因其低温特性（颗粒碰撞温度远低于熔点），可有效避免这些问题。研究证明[3-8]，基于金属颗粒高速碰撞的固态沉积技术——冷喷涂增材制造（cold spray additive manufacturing，CSAM）是铝金属构件制备的有效方法之一。其具体原理是：一定粒径的微米级（5～50 μm）粉末颗粒和预热的高压气流混合后，通过收缩-扩张的Laval喷嘴，高速（300～1200 m/s）撞击基体表面，产生大的塑性变形沉积而形成涂层[9-13]。近年来，该技术在工业部件增材/修复领域已展现出良好的工程应用前景[14-15]。然而，铝粉的低熔点特性与易氧化倾向导致粉末流动性下降，并引发喷嘴堵塞问题[16]，与沉积钛[17]和镍[18]等部件相比，在CS铝金属构件增材/修复过程中生产效率受到一定限制。为了解决CS过程中喷嘴堵塞的问题，研究人员开展了大量的工作。Ozdemir等[19]通过实验和计算流体动力学（computational fluid dynamics，CFD）模拟得到，当输粉管与喷嘴喉部保持相同直径（2 mm）时，可有效避免颗粒与喷嘴壁面接触，从而将堵塞风险降至最低。Viscusi等[20]研究发现，喷嘴内部表面的粗糙度在沉积过程中逐渐增加，在长时间沉积过程中，颗粒逐渐粘在喷嘴壁上，导致沉积效率下降，最终堵塞喷嘴。Macdonald等[21]比较了四种不同材料（聚合物、陶瓷、不锈钢和铜）的喷嘴，结果发现，喷嘴材料的热扩散率越高，颗粒在喷嘴内壁的温度越高，从而更容易粘在喷嘴内壁。例如，铜喷嘴由于其高热扩散率，导致颗粒温度升高，更容易在喷嘴内壁沉积。此外，研究人员还通过冷却喷嘴或改变送粉方式来延缓堵塞问题[22-23]。经过大量实验，人们提出了一种由聚苯并咪唑（PBI）组成的聚合物喷嘴材料[21]，其在抗黏附方面表现出优良的特性。除聚合物外，各种陶瓷材料也被认为是避免喷嘴堵塞的材料[21]。

本工作通过对比研究陶瓷SiC喷嘴径向送粉和聚合物PBI喷嘴轴向中心送粉两种CS铝粉喷涂工艺，研究喷嘴堵塞行为，分析所制备涂层和沉积体的表面形貌、微观组织和力学性能，旨在为CSAM大尺寸铝金属构件提供一种新的思路。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

喷涂采用平均粒径为40 μm的纯铝粉（TLS Technik公司），通过气雾化法制备，纯度在99.7%以上。基体材料采用厚度为10 mm的Al5754铝合金板，尺寸为100 mm×100 mm。喷涂前，使用无水乙醇对基板进行超声清洗，并采用刚玉砂对基板进行喷砂处理。

1.2　冷喷涂实验

采用Impact Innovations 5/11 CS系统进行喷涂实验，具体参数如表1所示。Laval喷嘴型号为SiC材质OUT1和PBI材质OUT3（Impact Innovations公司），扩张比分别为5.6和14，下游扩张长度分别为130 mm和180 mm。图1为CS送粉方式和喷涂路径。CS实验采用两种方式：（1）现有方法，如图1（a）所示径向送粉配置OUT1喷嘴（标记为OUT1涂层），进行涂层实验；（2）改进方法，如图1（b）所示轴向中心送粉配置OUT3喷嘴（标记为OUT3涂层），进行涂层和沉积体增材制造实验。所有喷涂实验中，喷涂路径为平行直线双向扫描，如图1（c）所示。

1.3　颗粒碰撞条件计算

采用动力喷涂软件（KSS）得到CS铝颗粒的沉积窗口（见图2，图中v_e为冲蚀速度，v_c为临界沉积速度）和颗粒碰撞条件。该软件基于计算流体动力学模拟和颗粒加速模型，结合颗粒自身参数（粒径、强度）、Laval喷嘴的几何参数（如喉部直径、扩张段长度）和气体参数（压力、温度），来预测颗粒碰撞条件和临界沉积速度[6]。使用OUT1喷嘴时，粒径40 μm的铝颗粒碰撞速度为602 m/s，使用OUT3喷嘴时，颗粒碰撞速度增加至741 m/s。

表 1 冷喷涂参数

Table 1 CS parameters

Process gas	Gas temperature/℃	Gas pressure/MPa	Spray distance / mm	Line speed/(mm·s^{-1})	Line distance/mm	Feeder speed/(r·m^{-1})
N_2	550	5	20	500	1.5	3

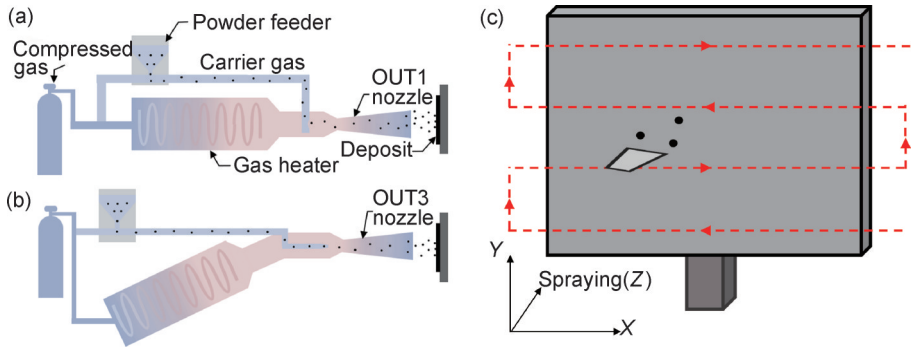


图 1 冷喷涂送粉方式和喷涂路径 (a)径向送粉;(b)轴向中心送粉;(c)喷涂路径

Fig.1 CS powder feeding method and CS trajectory (a)radial powder feeding;(b)axial center powder feeding;(c)CS trajectory

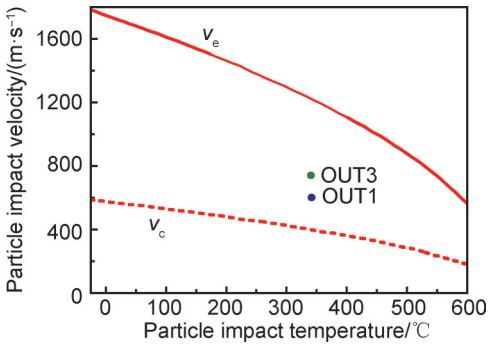


图 2 KSS 软件计算冷喷涂纯铝沉积窗口

Fig.2 Window of deposition of CSed Al calculated by KSS software

1.4 表征方法

1.4.1 纯铝粉末表征

采用 Camsizer X2 粉末粒度仪表征纯铝粉末的粒径分布。将纯铝粉末镶嵌在镶样块上,用 2000#砂纸轻微打磨后使用抛光液抛光,然后采用无水乙醇超声清洗 10 min,将试样风干后用于颗粒内部组织观察。使用 Quanta 650 型扫描电子显微镜(SEM)的背散射电子(BSE)模式揭示粉末颗粒的显微结构。铝粉的粒度分布、SEM 表面形貌及单个颗粒的截面组织如图 3 所示。图 3(a)是颗粒的粒径分布。实验所用为流动性较好的纯铝粉末,粉末的颗粒粒径范围为 28~46 μm,有助于获得高的沉积效率[3]。Al 粉颗粒以球形和近球形为主(图 3(b)),颗粒表面通常较为光滑,部分小颗粒附着在大颗粒表面,形成卫星颗粒(如箭头所示)。铝粉末颗粒的截面显微组织如图 3(c)所示,在 SEM 的 BSE 模式下观察,可以看到有少量的合金元素在晶界处析出(如箭头所示),颗粒整体无明显缺陷,晶粒分布均匀。

1.4.2 涂层和沉积体表征

为了获得涂层组织的更多信息,使用电子背散射

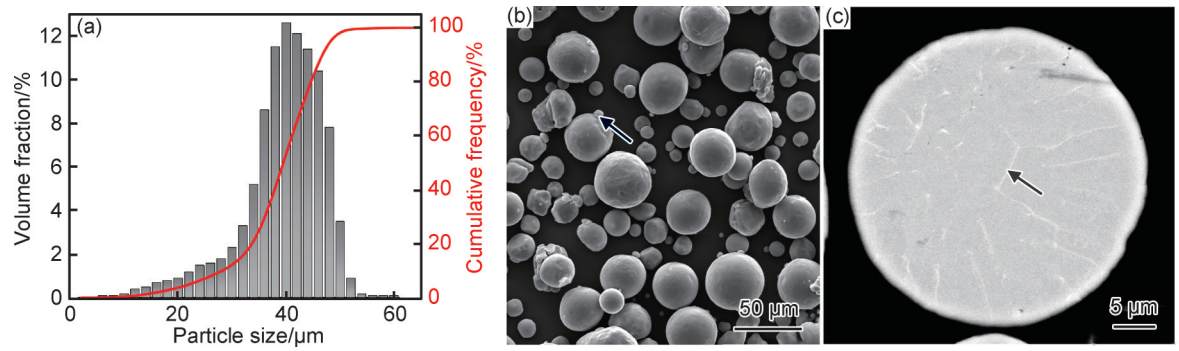


图 3 纯铝粉末表征

(a)粒度分布;(b)SEM 表面形貌;(c)单个铝颗粒截面组织

Fig.3 Characterization of pure aluminum powder

(a)particle size distribution;(b)SEM surface morphology;(c)cross-sectional structure of single aluminum particle

衍射（EBSD，Quanta 650）分析OUT1涂层表面和截面的微观结构，采用TSL OIM软件进行数据的分析，加速电压和电流分别为20 kV和5 nA，以0.2 mm的步长进行EBSD标测；采用KEYENCE VHX-7000型光学显微镜（OM）分别对抛光后的OUT1涂层和OUT3涂层进行截面组织分析，并采用图像分析软件Image-Pro Plus6.0对其进行孔隙率的测定；采用OM对CSAM铝沉积体表面形貌进行分析；采用Xradia 520 Versa型计算机断层扫描仪（X-CT）对OUT3涂层和增材沉积体宏观形貌进行表征。

1.4.3　力学性能表征

使用电火花线切割从铝沉积体的平面方向和法线方向分别切割尺寸为4 mm×3 mm×32 mm的试样。具体试样形貌和力学性能测试方法参考文献[24]。为了获得精确的尺寸，去除受线切割影响的表层，同时防止试样表面出现缺口或裂纹，对试样进行抛光。抛光后采用四点弯曲实验测量沉积体的应力-应变曲线，以此测试铝涂层平面方向和法线方向的力学性能。

2　结果与分析

2.1　OUT1涂层

2.1.1　表面形貌

图4为采用陶瓷SiC喷嘴搭配径向送粉方式获得的OUT1涂层实验过程。如图4（a）所示，样品表面形成约3 mm厚的涂层，并且涂层表面有一些粉末团聚（如黑色箭头所示）。这些粉末团聚的形成可归因于，铝粉末因高温软化粘连陶瓷喷嘴内壁形成堵塞物，导致气体流速分布畸变，局部湍流增强，粉末颗粒碰撞概率增大，易形成粉末二次团聚，之后又被高速气流或粉末带出从而碰撞已沉积涂层表面。涂层表面出现粉末团聚体现象是喷嘴已经发生堵塞的结果。在实验过程中陶瓷SiC喷嘴连续工作后发生堵塞，如图4（b）所示，造成堵塞的原因为：径向送粉时粉末在预混室和喷嘴收缩段的发散程度较大，增加了粉末与喷嘴壁面碰撞的概率。虽然粉末在喷嘴上游速度较慢，无法达到临界速度，但是陶瓷SiC材料的低热导率使得喷嘴内部热量分布不均匀，容易在某些区域（如喉部或收缩段）形成局部高温，从而软化颗粒，使其粘在喷嘴壁面上。此外，粘在喷嘴壁面上的粉末逐渐增加，破坏喷嘴几何结构，这会影响气流及粉末加速，同时也会影响粉末颗粒的流动路径。颗粒在通过喷嘴时，会改变方向或速度，导致部分颗粒与内壁碰撞，降低速度并增加堵塞风险。喷嘴堵塞往往伴随着预混室堵塞，预混室堵塞的原因可能是因为在喷涂过程中发生颗粒回流，这种回流会使颗粒与预混室内壁发生碰撞，增加颗粒在内壁的堆积，从而导致堵塞[25]。对喷涂过程发生堵塞的涂层进行铣削，铣削后的表面形貌

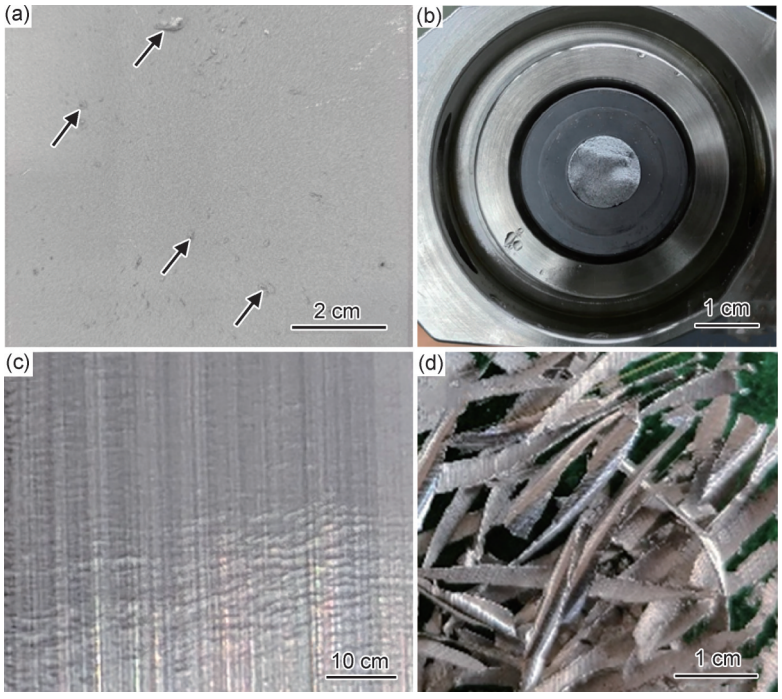


图4　冷喷涂OUT1涂层实验过程

（a）沉积涂层；（b）喷涂过程中陶瓷SiC喷嘴上游堵塞；（c）涂层铣后表面形貌；（d）铣削后碎屑

Fig.4　CS OUT1 coating process

(a)as-sprayed coating; (b)upstream plug of ceramic SiC nozzle during CS process; (c)surface topography after milling of coating; (d)milled chips

如图4(c)所示,可以看出涂层表面比较光滑,不存在明显的裂纹和其他表面损伤。铣削碎屑如图4(d)所示,碎屑呈长条状,表明在铣削加工时能够顺利流动而不发生脆断形成颗粒状碎屑。

2.1.2 微观组织

OUT1涂层表面的EBSD图如图5所示。从图5(a),(b)的灰度图(image quality,IQ)和反极图(inverse pole figure,IPF)可以看出,在变形颗粒的结合边界处存在许多小尺寸晶粒,而颗粒内部的晶粒则明显较大。涂层整体的晶粒取向表现出随机分布的特征。图5(b_1)中的白色线条为亚晶界,在CS过程中,铝粉末高速撞击基材表面,形成较大的塑性变形,晶粒在这种外力作用下发生晶格转动(箭头所示),导致晶粒内部形成亚晶界,广泛分布在晶粒内部。图5(c)为晶粒取向分布图(grain orientation spread,GOS),蓝色标定的是再结晶晶粒,红色标定的是变形晶粒,黄色标定的是亚结构晶粒。再结晶晶粒多分布在颗粒-颗粒间界面处,这是由于在喷涂过程中这些区域经历严重的绝热剪切失稳,使得晶粒发生动态再结晶,形成局部的冶金结合,有利于涂层结合强度的提高。动态再结晶通过位错运动细化晶粒,这也解释了为什么小尺寸晶粒多存在于颗粒结合边界处(图5(b_2))。变形晶粒主要分布在颗粒的内部区域,由于这些区域未能达到再结晶的条件,保留了较多的位错和晶格缺陷,表现为变形晶粒。亚结构晶粒分布在再结晶晶粒区域附近,该区域经历了较大的应变,但并未完全发生再结晶。图5(d)为铝涂层表面的局部取向差(kernel average misorientation,KAM),其中绿色和红色区域代表较大局部应变和高位错密度的区域,出现在变形颗粒内部取向差较大的晶粒内,这与图5(b_1)结果一致。

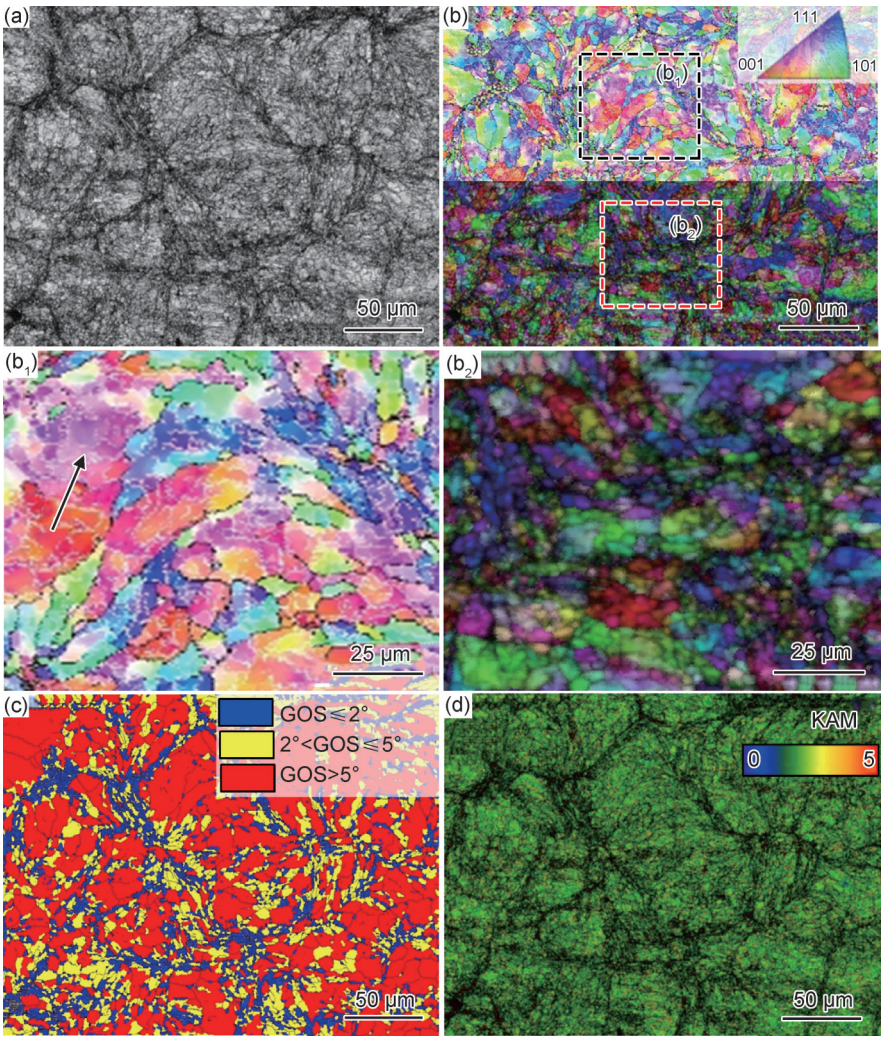


图5 OUT1涂层表面EBSD图 (a)IQ;(b)IQ+IPF;(b_1),(b_2)图5(b)局部放大图;(c)GOS;(d)KAM

Fig.5 EBSD maps of OUT1 coating surface (a)IQ;(b)IQ+IPF;(b_1),(b_2)enlargement images in Fig.5(b);(c)GOS;(d)KAM

OUT1涂层截面的EBSD图如图6所示。可以看出,截面的变形颗粒呈现明显的扁平,颗粒间结合主要以机械互锁为主。此外,由图6(a),(b)可知,颗粒间界面处存在着大量的细小晶粒,这是由于绝

热剪切失稳促进颗粒间的界面剧烈塑性流动,破坏表面氧化层,暴露新鲜金属表面,从而实现金属键合。GOS图(图6(c))显示再结晶晶粒、变形晶粒和亚结构晶粒的分布,进一步揭示颗粒内部晶粒的变形和颗粒间界面处再结晶行为。从图6(d)的KAM图可以看出,涂层截面颗粒的应变和位错密度仍然保持较高的水平。在颗粒的内部能够看到一些局部应变低的区域(图6(d)中圆圈),这是因为在颗粒内部塑性变形程度较低,导致晶粒间晶界处局部应变分布较低[6]。

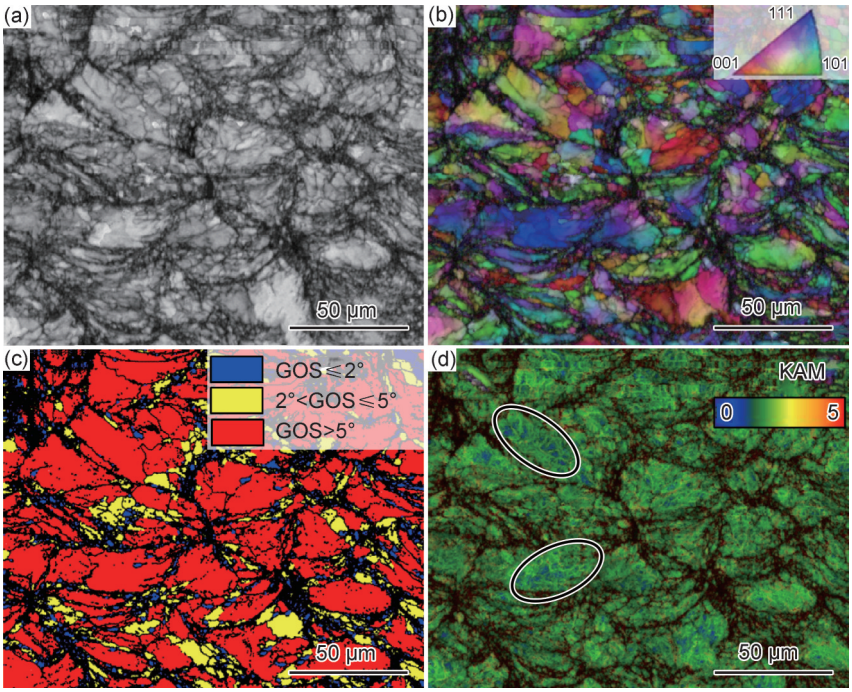


图6　OUT1涂层截面EBSD图　(a)IQ;(b)IQ+IPF;(c)GOS;(d)KAM

Fig.6　EBSD maps of OUT1 coating cross-section　(a)IQ;(b)IQ+IPF;(c)GOS;(d)KAM

2.2　OUT3涂层

2.2.1　表面形貌

图7为OUT3涂层的三维表面形貌。可知涂层表面较为平整,没有明显的凹凸不平或粉末颗粒团聚,表明颗粒沉积较为均匀。在制备涂层的过程中聚合物喷嘴未发生堵塞,这主要归因于聚合物的材料特性以及轴向中心送粉的优势。

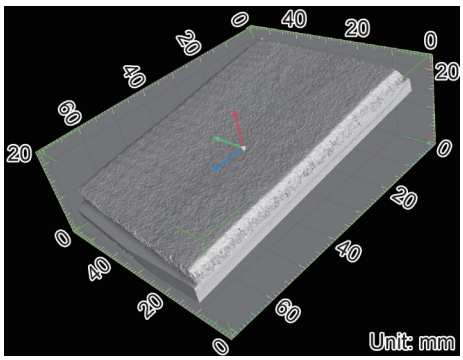


图7　OUT3涂层三维表面形貌

Fig.7　Three-dimensional surface topography of OUT3 coating

2.2.2　微观组织

图8为OUT3涂层截面的EBSD图。与OUT1涂层截面(图6)相比,OUT3涂层中铝颗粒表现出更显著的塑性变形(图8(a),(b))。这一现象主要归因于OUT3喷嘴的几何结构(扩张比为14,下游扩张长度为180 mm),使得气流在喷嘴内能够充分膨胀,同时为颗粒提供更长的加速时间和距离。在气流的驱动下,颗粒能够获得更快的碰撞速度(图2),促进绝热剪切失稳和颗粒剧烈塑性变形。此外,涂层中的晶粒呈现出随机取向,存在大量大角度晶界和小角度晶界(图8(b_1)中白色线条),晶粒的分布与OUT1涂层中的晶粒分布类似(图8(b),(b_2))。

2.3　涂层组织对比

图9为OUT1涂层和OUT3涂层的截面OM图。在OUT1涂层中可以看到一些明显的孔隙(图9(a)中箭头所示),这些孔隙可能会成为裂纹源,降低涂层的力学性能和防护性能。图9(b)为OUT3涂层的OM图,由于颗粒的碰撞速度更快,从而引发颗粒更显著的塑性变形,与基体或已沉积颗粒结合更紧密,从而减少孔隙率。计算得出OUT1和OUT3两种涂层的孔隙率分别为0.32%和0.16%,说明OUT3涂层质量更好,有助于提高涂层的力学性能。

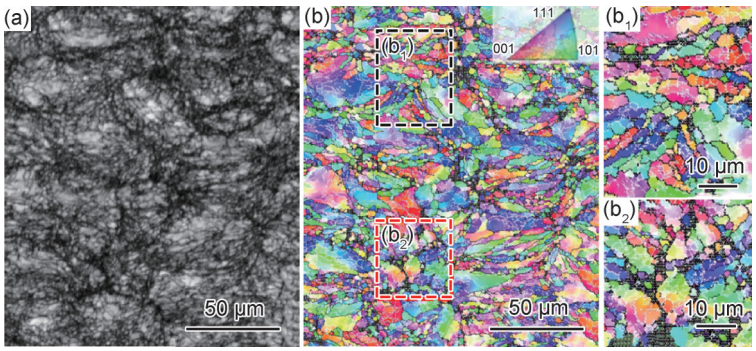


图 8 OUT3 涂层截面 EBSD 图 (a)IQ;(b)IPF;(b_1),(b_2)图 8(b)局部放大图

Fig.8 EBSD maps of OUT3 coating cross-section (a)IQ;(b)IPF;(b_1),(b_2)enlargement images in Fig.8(b)

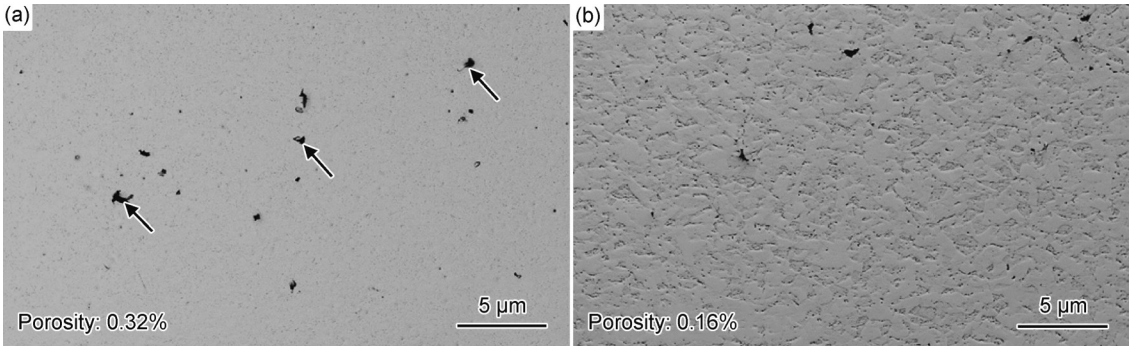


图 9 OUT1 涂层(a)和 OUT3 涂层(b)截面 OM 图

Fig.9 OM images of OUT1 coating(a) and OUT3 coating(b) cross-sections

2.4 增材制造沉积体

2.4.1 增材制造过程

上述实验结果表明,与现有 CS 工艺相比,改进后的喷涂工艺可有效解决喷嘴堵塞问题,进而提高涂层质量,故采用改进工艺对后续的增材制造实验进行进一步的研究。图 10 为采用聚合物喷嘴轴向中心送粉方式所得的实验结果。图 10(a)~(c)分别为喷涂前、喷涂 111 层和喷涂 135 层的过程,图 10(d)为喷涂后铝沉积体的宏观形貌,可以看到整个 100 mm×100 mm 的铝基板上形成了均匀且较厚的沉积体。沉积体共 135 层,质量约为 0.99 kg,厚度约为 38 mm,整个实验时长约 2 h,实验期间预混室和喷嘴均未发生堵塞,且沉积体与基体结合良好。由此可见,由聚合物制备的喷嘴搭配轴向中心送粉的方式能够有效避免喷嘴堵塞的问题。聚合物通常具有较低的润湿性,表明喷涂粉末(如铝粉末)在喷嘴内壁的附着力较小,不易形成沉积物或结块,从而有效减少喷嘴堵塞的可能性。Macdonald 等[21]利用四种不同材料的喷嘴喷涂 7075 铝合金粉末,研究发现,除了聚合物喷嘴之外,其他三种材料的喷嘴都观察到颗粒粘在喷嘴内壁,并最终长时间使用后堵塞喷嘴。聚合物本身具有较好的自润滑性,能够防止粉末在预混室中发生黏附或积聚,从而降低堵塞的风险。Yogeswar 等[26]采用不同的喷嘴材料(石墨、聚合物、钢、铜和铝)进行喷涂实验,结果表明使用石墨喷嘴时,喷涂的铝粉、铜粉和锌粉的飞行速度较快,且喷嘴堵塞现象较少。本工作轴向中心送粉方式使粉末沿喷嘴的轴向方向流动,降低粉末冲击喷嘴内壁的概率。这种送粉方式可以减少粉末颗粒在喷嘴内壁的沉积和黏附,从而降低堵塞的风险。Ozdemir 等[19]使用 Siemens Star-CCM 软件对喷涂送粉方式进行了三维 CFD 模拟,采用两种不同的粉末注入方式:(1)粉末输送管与喷嘴轴线完美对齐;(2)粉末输送管偏离中心轴 1°。结果发现,粉末输送管与喷嘴轴线完美对齐时,颗粒与喷嘴内壁的碰撞最少,喷嘴磨损和堵塞的风险最低。粉末输送管偏离中心轴 1°时,颗粒会在喷嘴的收敛段、喉部和扩散段与喷嘴内壁发生碰撞,导致喷嘴磨损和堵塞。本工作通过采用聚合物喷嘴结合轴向中心送粉方式进一步优化了 CSAM 工艺,为实际应用提供重要的参考。

2.4.2 OM 表面形貌

图 11 为冷喷涂铝沉积体表面形貌 OM 照片。可见沉积体表面最高点与最低点的高度差为 4.9 mm,表明尽管沉积体在沉积时较为充分,但表面依然存在较大的起伏。尽管采用聚合物喷嘴结合轴向送粉的方式有效避免喷嘴堵塞和粉末流动不畅的问题,但粉

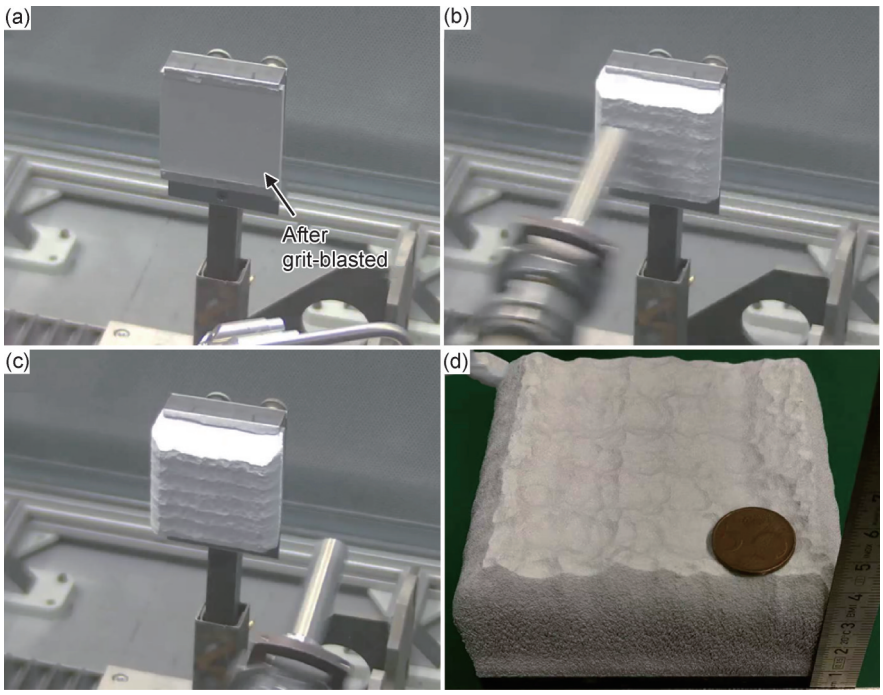


图 10　冷喷涂增材制造实验过程　(a)喷涂前;(b)喷涂 111 层;(c)喷涂 135 层;(d)沉积体形貌

Fig.10　CSAM experimental process　(a)before CS;(b)CS 111 layer;(c)CS 135 layer;(d)deposit morphology

末颗粒的大小、喷涂压力、喷嘴与基材的距离等因素依然影响沉积体的粗糙度。喷涂压力过高或颗粒过大可能导致颗粒撞击基材时产生较强的冲击力,形成较高的表面起伏;喷嘴与基材的距离过近,则可能导致颗粒沉积过于集中,形成局部堆积的现象。Wu 等[27]的研究证明,涂层的粗糙度因喷涂角度不同而不同,尤其当喷涂角度减小到 60°时,涂层的沉积效率急剧下降。Li 等[28]和 Chen 等[29]的研究也获得了与此类似的结果。Li 等[30]研究了喷涂距离对涂层沉积性能的影响,发现 Al 和 Ti 粉末的沉积效率随着喷涂距离从 10 mm 增加到 110 mm 而降低。Van 等[31]报道了当喷涂距离从 19 mm 增加至 38 mm 时,铝粉末的沉积效率会降低。因此进一步优化喷涂参数,尤其是颗粒的流动性、喷涂的气流稳定性和喷嘴与基材的距离,对于减小表面粗糙度、提高涂层质量至关重要。

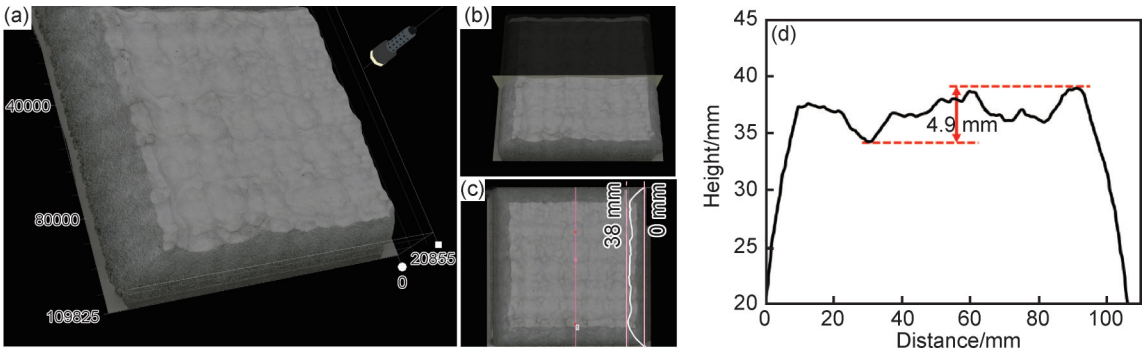


图 11　冷喷涂铝沉积体表面形貌 OM 图

(a)三维表面形貌;(b),(c)俯视图;(d)沉积体截面高度差

Fig.11　OM images of surface topography of CS aluminium deposit

(a)three-dimensional surface topography;(b),(c)top view;(d)deposit cross-sectional height difference

2.4.3　X-CT 扫描

为了进一步分析沉积体的表面形貌、内部结构和截面特性,对铝沉积体进行 X-CT 扫描,如图 12 所示。图 12(a)为铝沉积体的三维表面形貌,可知虽然涂层表面有起伏,但整体没有出现明显的开裂或孔洞现象,表明沉积体表面较为完整。图 12(b),(c)为沉积体不同方向的截面 X-CT 图。观察发现,沉积体的内部结构相对致密,没有明显的缺陷或孔洞。此外,沉积体和基体界面处也未发现明显的裂纹,这进一步表明涂层和基体的结合强度较高。

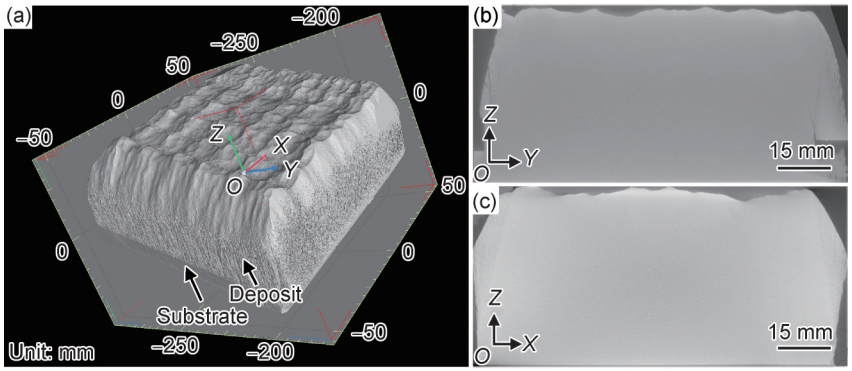


图 12 铝沉积体 X-CT 分析 (a)三维表面形貌;(b)*YOZ*截面;(c)*XOZ*截面

Fig.12 X-CT analysis of aluminum deposit (a)three-dimensional surface topography;(b)*YOZ* cross-section;(c)*XOZ* cross-section

2.4.4 沉积体的各向异性

沉积体的应力-应变曲线如图 13 所示。可以看出,沉积体平面方向上(黑色曲线)的力学性能整体优于法线方向(红色曲线)。沉积体平面方向的极限抗拉强度(ultimate tensile strength,UTS)接近 180 MPa,而法线方向的 UTS 约为 80 MPa,平面方向上的强度是法线方向的 2.25 倍,表现出明显的各向异性。沉积体产生各向异性的原因为,在喷涂过程中,粉末被加速到超音速后撞击到基体表面,颗粒发生严重的塑性变形并逐层堆积形成涂层。在平面方向上,由于颗粒是以界面塑性变形为主的碰撞沉积行为,增加了相邻颗粒之间的“互锁效应”,使得颗粒间结合更为紧密,因此在受力时能够承受更大的应力,表现出更高的强度[32]。在法线方向上,颗粒间的机械互锁效应显著减弱。这是由于颗粒高速碰撞过程中,颗粒底部中心区域的塑性变形受到几何约束,导致该区域形成类似“南极圈”的环形未结合界面。此类界面缺陷不仅成为裂纹形核的优先位置,而且通过应力集中效应导致裂纹沿颗粒沉积方向扩展,从而显著削弱涂层的抗拉强度。熊天英等[33]研究了 7075 铝合金 CS 沉积层三维空间不同方向上的微观组织和力学性能,结果表明,平面方向上的颗粒呈圆形状,法线方向上的颗粒呈扁平状。因此,从平面方向过渡到法线方向,沉积层的抗拉强度逐渐降低,呈现明显的各向异性。

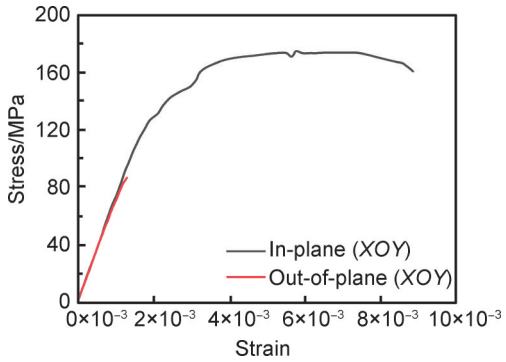


图 13 增材制造铝沉积体应力-应变曲线

Fig.13 Stress-strain curves of additive manufactured aluminium deposit

3 结论

(1)采用改进后的喷涂策略(聚合物喷嘴结合轴向中心送粉)可有效解决喷嘴堵塞的问题,喷嘴连续工作近 2 h 后成功在 100 mm×100 mm 的铝基板上制备约 38 mm 厚的 CSAM 铝沉积体。

(2)现有工艺制备的铝涂层的孔隙率为 0.32%,使用改进工艺后涂层孔隙率降至 0.16%。

(3)铝沉积体在力学性能上呈现明显的各向异性,平面方向上的性能整体优于法线方向。平面方向 UTS 接近 180 MPa,法线方向 UTS 约为 80 MPa。

致谢:感谢德国赫尔穆特-施密特大学/德国汉堡联邦国防军大学制造技术所的 E. Musienko 博士、德国亥姆霍兹 Hereon 研究所的 T. Chen 博士和捷克理工大学的 O. Kovarik 助理教授在材料制造和样品分析上的支持。

参考文献

[1] HIRSCH J.Recent development in aluminium for automotive applications[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014,24(7):1995-2002.

[2] HEINZ A, HASZLER A, KEIDEL C, et al. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications[J]. Materials Science and Engineering:A,2000,280(1):102-107.

[3] WIEHLER L, CAPAN J, ARABGOL Z, et al. Calibration of the critical velocity description in cold spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology,2024,34,587-596.

[4] XIE X, REN X, JING Y, et al. Deposition behavior of the gas-atomized 7075Al and TiB_2/7075Al composite powders during cold spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2025, 496: 131623-131633.

[5] FAN N,CIZEK J,HUANG C,et al.A new strategy for strengthen-

ing additively manufactured cold spray deposits through in-process densification[J].Additive Manufacturing,2020,36:101626-101637.
[6] CHUNJIE H,ALEXANDER L,JUNJUN S,et al.Tailoring powder strengths for enhanced quality of cold sprayed Al6061 deposits [J].Materials & Design,2022,215:110494-110506.
[7] CHUNJIE H,ALEXANDER L,LEVKE W,et al.Cold spray deposition of graded Al-SiC composites[J].Additive Manufacturing,2022,59:103116-103133.
[8] WENPENG W,WENYA L,DONG W,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 & Coatings Technology,2022,444:128670-128682.
[9] GARTNER F,STOLTENHOFF T,SCHMIDT T,et al.The cold spray process and its potential for industrial applications[J].Journal of Thermal Spray Technology,2006,15(2):223-232.
[10] ASSADI H,GARTNER F,STOLTENHOFF T,et al.Bonding mechanism in cold gas spraying[J].Acta Materialia,2003,51(15):4379-4394.
[11] SCHMIDT T,GARTNER F,ASSADI H,et al.Development of a generalized parameter window for cold spray deposition[J].Acta Materialia,2006,54(3):729-742.
[12] PAPYRIN A N,KLINKOV S,ALKHIMOV A,et al.Cold spray technology[M].Amsterdam:Elsevier,2007.
[13] CHAMPAGNE V K.The CS materials deposition process[M].Cambridge:Woodhead Publishing Ltd,2007.
[14] HENAO J,CONCUSTELL A,CANO I G.Novel Al-based metallic glass coatings by cold gas spray[J].Materials & Design,2016,94:253-261.
[15] RECH S,TRENITIN A,VEZZU S,et al.Different cold spray deposition strategies:single-and multi-layers to repair aluminium alloy components[J].Journal of Thermal Spray Technology,2014,23(8):1237-1250.
[16] LIEBERSBACH P,FOELSCHE A,CHAMPAGNE V K,et al.CFD simulations of feeder tube pressure oscillations and prediction of clogging in cold spray nozzles[J].Journal of Thermal Spray Technology,2020,29(3):400-412.
[17] BARBOSA M,CINCA N,DOSTA S,et al.Cold spray deposition of titanium onto aluminium alloys[J].Ciência & Tecnologia dos Materiais,2010,22(1/2):48-56.
[18] WONG W,IRISSOU E,VO P,et al.Cold spray forming of Inconel 718[J].Journal of Thermal Spray Technology,2013,22(2/3):413-421.
[19] OZDEMIR C O,WIDENER A C.Influence of powder injection parameters in high-pressure cold spray[J].Journal of Thermal Spray Technology,2017,26(7):1411-1422.
[20] VISCUSI A,ASTARITA A,CARRINO L,et al.Experimental study and numerical investigation of the phenomena occurring during long duration cold spray deposition[J].International Review on Modelling and Simulations,2018,11(2):84-92.
[21] MACDONALD D,LEBLANC-ROBERT S,FERNANDEZ R,et al.Effect of nozzle material on downstream lateral injection cold spray performance[J].Journal of Thermal Spray Technology,2016,25(6):1149-1157.
[22] WANG X D,ZHANG B,LV J S,et al.Investigation on the clogging behavior and additional wall cooling for the axial-injection cold spray nozzle[J].Journal of Thermal Spray Technology,2015,24(4):696-701.
[23] 姚建华,林钟卫,李波,等.便携式低压冷喷涂用无拆卸换粉简易送粉器及送粉方法:CN202311502728.X[P].2024-02-13.
YAO J H,LIN Z W,LI B,et al.Portable low-pressure cold spray non-removal powder replacement simple powder feeder and powder feeding method:CN202311502728.X[P].2024-02-13.
[24] KOVARIK O,WICK F,WIEHLER L,et al.The effect of powder particle size on mechanical and fracture properties of cold sprayed Al[C]// International Thermal Spray Conference,ITSC 2024.Milan:ASM Thermal Spray Society,2024:514-519.
[25] WAN W P,LI W Y,WU D,et al.3D analysis of gas flow behavior and particle acceleration characteristics in cold spray additive manufacturing based on non-axisymmetric numerical models[J].Journal of Materials Research and Technology,2024,29:1335-1349.
[26] YOGESWAR K,KUMAR S,CHAVAN M N.Nozzle materials solution to clogging in cold spray[J].Manufacturing Letters,2024,40:22-25.
[27] WU H J,XIE X L,LIU M M,et al.A new approach to simulate coating thickness in cold spray[J].Surface & Coatings Technology,2020,382(34):125151-125161.
[28] LI C J,LI W Y,WANG Y Y,et al.Effect of spray angle on deposition characteristics in cold spraying[C]// International Thermal Spray Conference,ITSC 2003.Orlando:ASM Thermal Spray Society,2003:91-96.
[29] CHEN C,XIE Y,VERDY C,et al.Modelling of coating thickness distribution and its application in offline programming software[J].Surface & Coatings Technology,2017,100(44):315-325.
[30] LI W Y,ZHANG C,GUO X P,et al.Effect of standoff distance on coating deposition characteristics in cold spraying[J].Materials & Design,2008,29(2):297-304.
[31] VAN S H,SMITH J R,TEETS R E,et al.Kinetic spray coatings [J].Surface & Coatings Technology,1999,111(1):62-71.
[32] YANG K,LI W,YANG X,et al.Effect of heat treatment on the inherent anisotropy of cold sprayed copper deposits[J].Surface & Coatings Technology,2018,350:519-530.
[33] 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 of institute of metal research,chinese academy of sciences[J].Acta Metallurgica Sinica,2023,59(4):537-546.

基金项目：德国科学基金会Deutsche Forschungsgemeinschaft项目资助(448318292)；中央高校基本科研业务费专项(G2024KY05107)
收稿日期：2025-03-04；**录用日期**：2025-05-07
通讯作者：黄春杰(1988—)，男，教授，博士生导师，博士，研究方向为喷涂及焊接等金属连接与增材/修复技术，联系地址：陕西省西安市友谊西路127号西北工业大学陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室(710072)，E-mail:huangc@nwpu.edu.cn

（本文责编：王　晶）