

激光与光电子学进展

表面预处理对超音速激光沉积 Ti6Al4V 涂层界面结合的影响(特邀)

姚建华^{1,2*}, 李波^{1,2}, 张群莉^{1,2}, 胡耀峰^{1,2}, 姜家涛^{1,2}, 宋其伟^{1,2}, 王健君^{1,2}¹浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310023;²浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310023

摘要 以 Ti6Al4V 沉积层为基体, 研究基体表面预处理对超音速激光沉积涂层/基体界面结合的影响。试验前, 基体表面经过三种不同方式的预处理, 分别为抛光、打磨和喷砂。利用 X 射线衍射仪和表面轮廓仪对基体表面的物相组成和粗糙度进行了分析, 利用光学显微镜对涂层/基体界面结合进行了分析, 利用单颗粒撞击有限元模型对颗粒与不同表面粗糙度基体的结合情况进行了分析。研究结果表明, 打磨处理的基体由于表面生成氧化钛陶瓷相, 涂层发生脱落。抛光处理的基体较喷砂处理的基体有更低的表面粗糙度, 其涂层/基体界面结合更紧密。数值模拟表明, 基体表面的起伏特征在颗粒/基体界面处促成温度和应变的不均匀分布, 阻碍颗粒与基体间的紧密结合。

关键词 超音速激光沉积; 钛合金; 表面预处理; 界面结合; 有限元分析

中图分类号 TN249; TG146.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232685

Effect of Surface Pretreatment on Interfacial Bonding of Ti6Al4V Coating Prepared by Supersonic Laser Deposition (Invited)

Yao Jianhua^{1,2*}, Li Bo^{1,2}, Zhang Qunli^{1,2}, Hu Yaofeng^{1,2}, Jiang Jiatao^{1,2},
Song Qiwei^{1,2}, Wang Jianjun^{1,2}¹Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou 310023, Zhejiang, China;²College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China

Abstract This study is focused on the investigation of the effect of substrate surface pretreatment on the interfacial bonding between a Ti6Al4V coating, prepared by supersonic laser deposition, and a substrate. Prior to the deposition, the substrate surface is pretreated by three different methods, namely polishing, grinding, and sand blasting. The phase composition and roughness of the substrate surface are analyzed using an X-ray diffractometer and a surface profilometer, respectively. An optical microscope is employed to analyze the interfacial bonding between the coating and substrate, while the bonding characteristics between the particles and substrates with different surface roughness, is numerically evaluated using a finite element model based on single particle impact. The results indicate that the coating detaches from the substrate treated by grinding owing to the formation of titanium-oxide ceramic phases on the substrate surface. However, the surface roughness of the polished substrate is lower than that of the sand blasted one, and thus, the coating/polished substrate interface is more tightly bonded. The numerical simulation results demonstrate that because of the undulating characteristics of the substrate surface, the particle/substrate interface shows inhomogeneous temperature and strain distributions, which prevent close bonding between the particles and substrates.

Key words supersonic laser deposition; titanium alloy; surface pretreatment; interfacial bonding; finite element analysis

1 引言

超音速激光沉积(Supersonic laser deposition, SLD)技术, 也称激光辅助冷喷涂(Laser-assisted cold spray,

LACS), 是基于冷喷涂(Cold spray, CS)发展起来的一种新型材料沉积技术, 在表面改性领域中引起了国内外学者的广泛关注^[1-3]。在 CS 沉积过程中, 需要利用高速高压的工作载气将喷涂颗粒加速到某个沉积速

收稿日期: 2023-12-16; 修回日期: 2023-12-27; 录用日期: 2023-12-28; 网络首发日期: 2023-12-31

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY22E050017)、浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划(2023R403070)

通信作者: *laser@zjut.edu.cn

度(即临界沉积速度)以上才能实现有效沉积。而对于高强度材料而言,则需要利用价格昂贵的氦气(加速效果较氮气更好)才能实现较好沉积,这会导致工艺成本大幅增加^[4]。SLD是在CS的过程中同步引入激光辐照,对喷涂颗粒和基体材料进行加热软化,提高其塑性变形能力,并降低喷涂颗粒的临界沉积速度,因此可在利用氮气替代氦气作为载气的情况下,实现高强度/高硬度材料的沉积,在降低成本的同时扩大CS沉积材料的范围。目前,已有国内外学者利用SLD技术实现了7075铝合金、Stellite-6合金、Cu等材料涂层的制备,并对其耐磨、耐蚀以及力学等性能进行了评估^[5-8]。

钛合金由于具有较高的比强度、较强的耐腐蚀性以及较好的生物相容性,已在航空航天、海洋、生物医疗等领域获得广泛应用^[9]。但其耐磨性较差,因此如何通过表面工程技术在钛合金表面制备耐磨涂层或者对失效Ti合金部件进行再制造已成为表面领域的研究热点。然而,钛合金在空气中具有较高的活性,采用激光熔覆或者热喷涂等表面技术处理钛合金时,常需采取保护措施。CS由于其较低的热输入,在相变敏感材料如钛合金的沉积方面具有优势,因此近些年CS在钛合金涂层的制备以及增材制造领域得到了大量关注^[4,10]。但由于钛合金的塑性变形能力较差,用CS制备的钛合金涂层中通常存在孔隙率高的问题^[11-13]。为此,已有国内外学者采用SLD技术来制备钛合金涂层以改善其致密性,如Bray等^[14]采用SLD技术制备了致密性良好的钛合金涂层,其孔隙率远低于CS和高速火焰喷涂(HSFS)制备的涂层;李波等^[15]研究了激光辐照对SLD制备Ti6Al4V合金涂层的沉积效率、致密性以及耐腐蚀性能的影响规律;汪伟林等^[16]利用数值模拟和试验相结合的方法研究了激光加热温度对SLD沉积Ti6Al4V合金涂层内部颗粒界面结合的影响;Boruah等^[17]研究了基体预热温度对LACS-Ti6Al4V界面结合、显微硬度以及残余应力的影响。

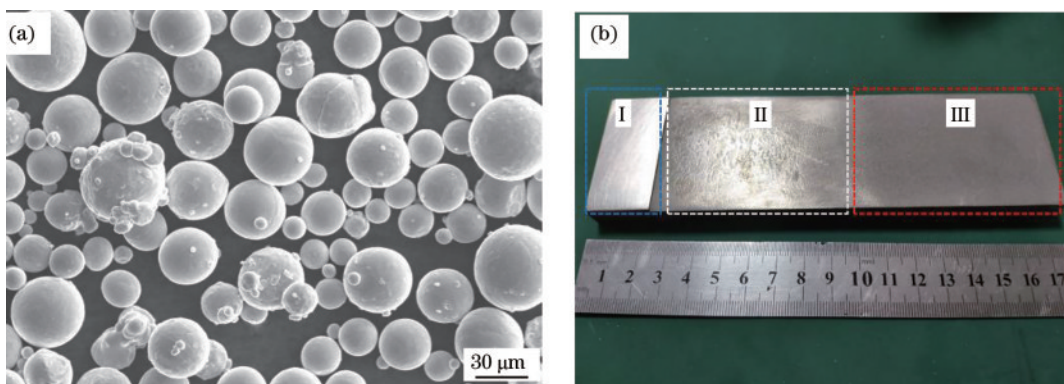


图1 Ti6Al4V粉末和基体形貌。(a)Ti6Al4V粉末微观形貌;(b)不同表面预处理后的Ti6Al4V基体宏观形貌

Fig.1 Morphologies of Ti6Al4V powder and substrate. (a) Micro-morphology of Ti6Al4V powder; (b) macro-morphology of Ti6Al4V substrate with different pretreatments

除了涂层内部颗粒间的界面结合(致密性)以外,SLD和CS制备的涂层与基体的结合情况也是评估材料沉积效果的非常重要的一个指标,它将影响后续的材料沉积以及涂层服役性能。为此,不少学者针对CS涂层/基体的界面结合开展了研究,如曹聪聪等^[18]对比了AA2024基体和TC4基体对CS-TC4涂层/界面结合的影响,结果显示硬度较高、比热容和导热系数较低的TC4基体与TC4涂层间的结合情况要优于AA2024基体与TC4涂层间的结合情况;Sharma等^[19]研究了AA2024基体粗糙度对CS-Al涂层微观结构、结合强度以及拉伸性能的影响;Sun等^[20]研究了Ti6Al4V基体的表面状态对CS-Ti6Al4V涂层断裂行为的影响;Kumar等^[21]研究了基体表面粗糙度对不同的涂层/基体组合(软/软、软/硬、硬/软、硬/硬)界面结合机制的影响。由此可以看出,基体的状态对SLD和CS涂层的制备及性能影响较大,已引起国内外学者的广泛关注。

目前,虽然国内外学者对SLD制备的Ti合金涂层内部颗粒的界面结合(致密性)给予了不少关注^[15-17,22],但对于涂层与基体之间的结合情况的研究较少。因此本文将利用SLD技术在Ti6Al4V基体上制备Ti6Al4V涂层,重点研究Ti6Al4V基体的表面处理状态对SLD-Ti6Al4V涂层与基体界面结合情况的影响,并通过数值模拟对其影响机制进行分析。本文的研究成果将为调控SLD-Ti6Al4V涂层/基体界面结合行为提供理论指导,推动SLD技术在钛合金构件表面涂层的制备以及增材再制造领域的应用。

2 试验

2.1 试验材料

试验基体材料为Ti6Al4V合金,后文简称为基体,试样尺寸为150 mm×50 mm×10 mm。所用粉末材料为雾化制备的Ti6Al4V合金粉末,其显微形貌如图1(a)所示,粉末呈球形,平均粒径为35 μm。

Ti6Al4V 粉末和基板的化学成分如表 1 所示。试验前,对 Ti6Al4V 基体表面分别进行手工砂纸抛光、角磨机

打磨和 SiO₂ 喷砂预处理,分别对应图 1(b)中的 I、II、III 区域,并用无水乙醇对基体表面进行超声清洗。

表 1 Ti6Al4V 粉末和基板化学成分的质量分数

Table 1 Mass fraction of chemical composition of Ti6Al4V powder and substrate

Element	Al	Fe	N	O	V	C	H	Ti
Mass fraction /%	5.500-6.500	0.250	0.050	0.130	3.500-4.500	0.080	0.012	Bal.

2.2 试验设备与方法

试验所用的 SLD 系统示意图见文献[7],该系统主要由光纤耦合半导体激光器(Laserline LDF6000-100)、冷喷涂设备(PCS-1000, Plasma Giken)、高压气瓶组和机械手臂(STAÜBLI TX200L)组成。激光光束是波长为 960~980 nm 的平顶光束,光斑直径为 5 mm 的圆形光斑。在 SLD 过程中,激光辐照同步软化沉积区域的 Ti6Al4V 喷涂粉末和 Ti6Al4V 基体,激光器配有高速红外测温仪,用于实时监测沉积区域的温度,并通过闭环反馈系统动态调整激光功率,保证沉积

温度的均匀稳定控制。工作载气采用高压 N₂,在不同表面预处理的 Ti6Al4V 基体上沉积 Ti6Al4V 涂层的工艺参数如表 2 所示。利用光学 3D 表面轮廓仪(SuperView W1, CHOTEST)对 Ti6Al4V 基体表面的粗糙度进行表征,利用 X 射线衍射仪(XRD, Rigaku, Ultima VI)对经过不同表面预处理的 Ti6Al4V 基体表面物相进行分析,利用光学显微镜(OM, Axio Scope A1, Zeiss)和扫描电子显微镜(SEM, ΣIGMA HV-01-043, Carl Zeiss)对 Ti6Al4V 沉积粉末以及 Ti6Al4V 涂层/基体界面结合形貌进行表征。

表 2 SLD-Ti6Al4V 涂层的工艺参数

Table 2 Process parameters for SLD-Ti6Al4V coating

N ₂ pressure /MPa	N ₂ temperature /°C	Standoff distance /mm	Scanning velocity /mm·s ⁻¹	Laser heating temperature /°C
5	1000	30	15	800

2.3 数值模拟

采用 ABAQUS/Explicit 有限元分析软件对 Ti6Al4V 单颗粒与不同表面粗糙度的 Ti6Al4V 基体碰撞过程进行数值模拟。由于颗粒碰撞具有轴对称特点,为了提高计算效率,采用如图 2 所示的 1/4 轴对称模型。颗粒直径为 35 μm,基体为 100 μm × 100 μm × 100 μm 的立方体。对颗粒与基体撞击区域的网格进行细化处理,对其他区域网格进行粗化处理。所采用的单元类型为热-力耦合的减缩积分八节点六面体单元(C3D8RT)。采用的材料模型是同时考虑应变、应变率、温度影响的 Johnson-Cook 材料模型^[23],材料的流动应力为

$$\sigma_y = \left[A + B(\epsilon^p)^N \right] \left[1 + C \ln \dot{\epsilon}^* \right] \left[1 - (T^*)^M \right], \quad (1)$$

式中: A 是材料的屈服强度; B 是材料的硬化系数; N 是材料的应变硬化指数; C 是材料的应变率常数; M 是材料的软化指数; ϵ^p 是等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 是等效塑性应变率; T^* 是无量纲温度,可表示为

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}, \quad (2)$$

式中: T 为材料的温度; T_m 为熔点温度; T_0 为参考温度。Ti6Al4V 材料参数如表 3 所示。根据试验参数,将 Ti6Al4V 颗粒的初始撞击速度设置为 800 m/s。由于激光加热作用,将 Ti6Al4V 颗粒和基体的初始温度设置为 1073 K。

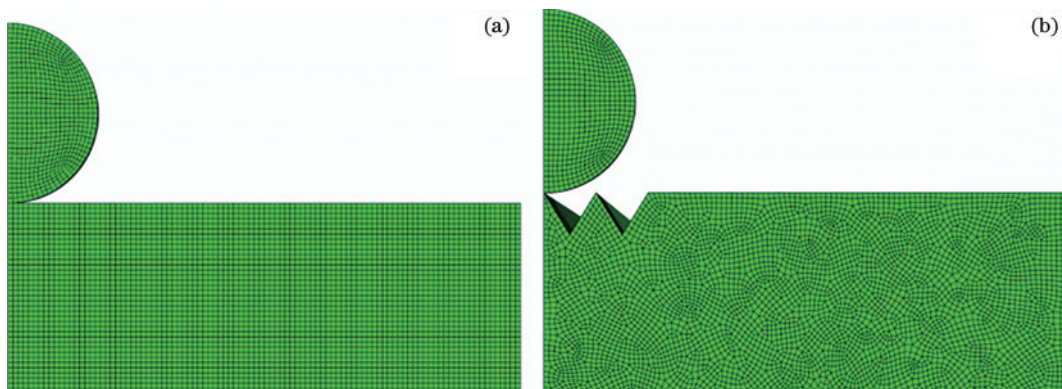


图 2 Ti6Al4V 颗粒撞击 Ti6Al4V 基体的计算模型。(a)光滑表面;(b)粗糙表面

Fig. 2 Computational models of Ti6Al4V particle impacting Ti6Al4V substrates. (a) Smooth surface; (b) rough surface

表 3 模拟所采用的 Ti6Al4V 材料参数^[24]

Table 3 Material parameters of Ti6Al4V for simulation^[24]

Parameter	Value
Density / (kg·m ⁻³)	4428
Young modulus / GPa	110
Poisson ratio	0.33
Specific heat / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	580
Heat conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	7.955
A / MPa	862
B / MPa	331
N	0.34
C	0.012
M	0.8
T _m / °C	1605
T ₀ / °C	25
Reference strain rate / s ⁻¹	1

3 结果与讨论

3.1 经不同表面预处理后的 Ti6Al4V 基体表面特性

Ti6Al4V 基体经过不同的表面预处理后,采用 3D 表面轮廓仪对其表面粗糙度进行了测量。针对每种预处理后的 Ti6Al4V 基体,随机选取 3 个不同的区域进行测试,取其平均值作为最终的测量结果。图 3 和图 4 分别是 Ti6Al4V 基体的表面 3D 轮廓形貌以及粗糙度测量结果。可以看出,抛光的 Ti6Al4V 基体表面起伏较小,其表面粗糙度为 0.11 μm;打磨的 Ti6Al4V 基体表面起伏较抛光后的表面有所增大,其表面粗糙度为 0.41 μm;喷砂的 Ti6Al4V 基体表面则存在明显的起伏特征,其表面粗糙度最大,为 1.83 μm。在喷砂处理中,SiO₂ 硬质颗粒以较高的速度对基体表面进行撞击,相较于抛光处理和打磨处理,其对表面形貌的影响更大,因此常被用于提高 CS 或者热喷涂基体的粗糙度以调控涂层/基体的界面结合情况。

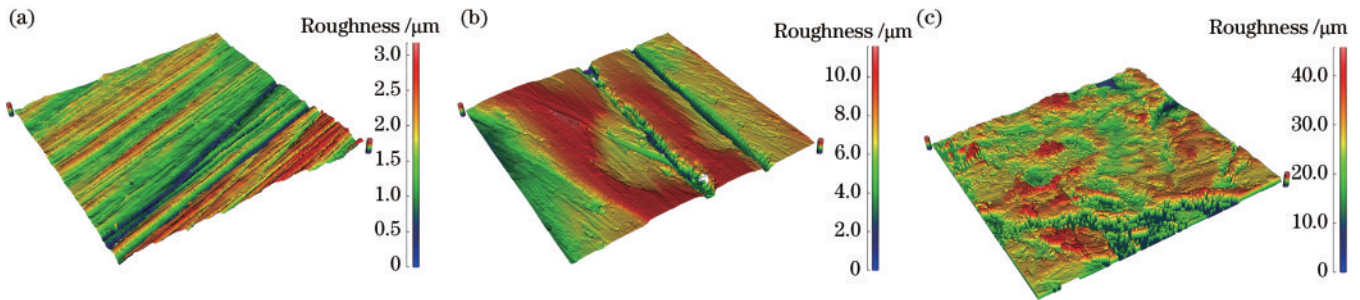


图 3 经过不同表面预处理后的 Ti6Al4V 基体 3D 轮廓形貌。(a)抛光;(b)打磨;(c)喷砂

Fig. 3 3D surface profiles of Ti6Al4V substrate after different surface pretreatments. (a) Polishing; (b) grinding; (c) sand blasting

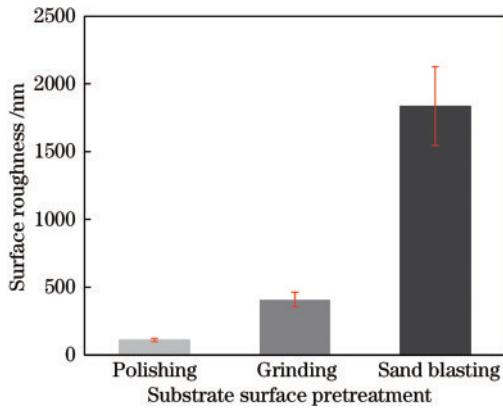


图 4 经过不同表面预处理后的 Ti6Al4V 基体表面粗糙度

Fig. 4 Surface roughness of Ti6Al4V substrate after different surface pretreatments

图 5 是不同预处理的基体表面 X 射线衍射 (XRD) 物相分析结果, θ 为衍射半角。可以看出,抛光和喷砂的基体表面物相主要为 α -Ti, 保持了基体的原始物相, 表明在这两种预处理方式下, 基体表面未发生物相的改变。然而, 打磨的基体表面除了 α -Ti 以外还有 TiO₂, 表明在该预处理方式下, 基体表面的物相发生了

改变。这是由于在角磨机打磨过程中, 高活性的 Ti 合金表面在打磨产生的热量作用下, 极易与空气中的 O₂ 反应生成 TiO₂ 陶瓷相, 而基体表面陶瓷相的生成对涂层与基体的界面结合将产生影响。此外, 还可以从图 5 发现, 喷砂处理的基体表面 XRD 衍射峰相较于抛光处理的基体表面 XRD 衍射峰, 出现了衍射峰强度降低和衍射峰变宽的现象。这是由于喷砂处理会使基体

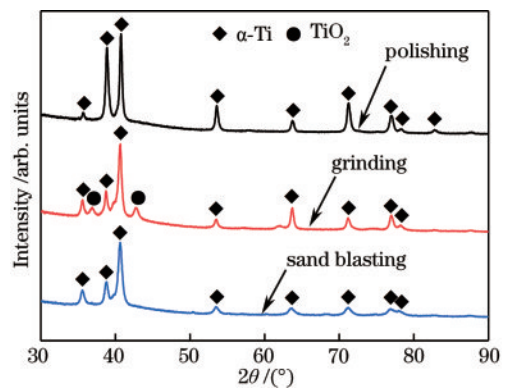


图 5 经过不同表面预处理后的 Ti6Al4V 基体表面 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of Ti6Al4V substrate surface after different surface pretreatments

表面薄层发生塑性变形,导致晶格畸变(加工硬化),从而使衍射峰强度降低以及衍射峰变宽。这种现象表明基体表面硬化也会对后续颗粒的沉积产生影响。

3.2 经过不同表面预处理后的 Ti6Al4V 涂层/基体界面结合行为

在 SLD 试验后,打磨 Ti6Al4V 基体上制备的涂层发生脱落,表明涂层与基体未能形成有效结合,这与其表面生成 TiO₂ 陶瓷相有关。在 SLD 和 CS 过程中,基体表面的清洁程度是影响涂层与基体形成有效结合的重要因素。若基体表面存在氧化膜,喷涂颗粒需要高速撞击基体表面,使氧化膜破碎,颗粒和基体裸露出“新鲜”表面,然后两者在较高的撞击应力作用下形成有效结合。Yin 等^[25]的数值模拟研究表明,虽然颗粒撞击基体形成的金属射流有助于清理破碎的氧化膜,但由于金属射流一般存在于接触区域的边缘,有部分破碎的氧化膜会残留在颗粒与基体接触界面的中心区域,不利于颗粒与基体之间的结合。在 SLD 中,激光辐照会对撞击颗粒和基体同步加热。若基体表面存在陶瓷相,由于其具有高熔点,软化效果不明显;沉积颗粒则在高能激光束的作用下较易得到有效软化。这样就会导致颗粒较大变形、而基体较小变形的非协调模式。根据巫湘坤等^[26]的数值模拟研究结果,颗粒和基体之间非协调的变形模式不利于涂层/基体的界面结

合。因此,打磨基体表面 TiO₂ 陶瓷相的生成以及由此带来的颗粒和基体非协调变形模式是未能实现涂层/基体之间有效结合的原因。

图 6 显示了在抛光和喷砂基体上制备的 Ti6Al4V 涂层与基体的界面结合情况。可以看出,抛光基体与涂层的界面结合较致密,无明显缝隙,而喷砂基体与涂层之间能观察到明显的缝隙,且存在较大的孔隙,这表明其涂层/基体界面结合较差。这是由两种预处理方式下的基体表面粗糙度差异造成的。当基体表面粗糙度较大时,相当于基体表面由许多连续分布的斜面组成,颗粒垂直撞击斜面的过程如图 7 所示,图中 V_p 为颗粒的沉积速度, V_n 和 V_t 分别为 V_p 的法向分量和切向分量, V_n 是颗粒撞击斜面时的有效速度,它随着 θ_s 的增大而减小, θ_s 为斜面与水平面之间的夹角,这些变量之间的关系为

$$V_t = V_p \sin \theta_s, \quad (3)$$

$$V_n = V_p \cos \theta_s. \quad (4)$$

当基体表面粗糙度较大时, θ_s 也较大,有效撞击速度 V_n 的减少使颗粒不能有效沉积,甚至出现反弹现象,从而会在涂层/基体界面处留下间隙,如图 6(b) 所示。此外,根据图 5 分析,喷砂基体存在加工硬化薄层,SLD 过程中的激光辐照对其的加热软化效果有限,也会导致界面结合不良。

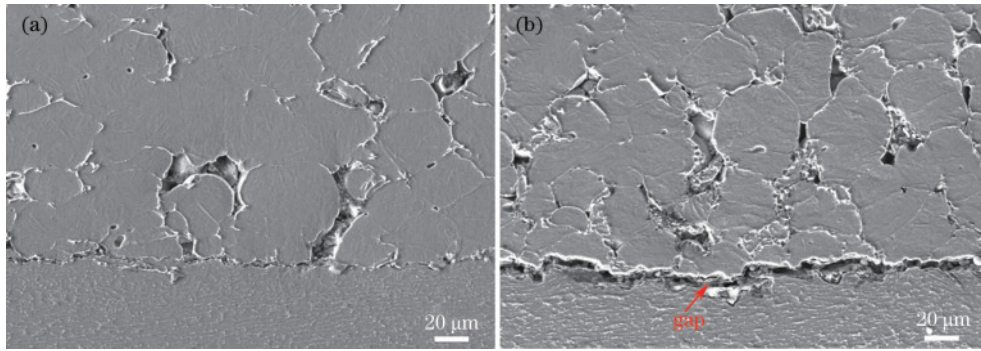


图 6 经不同表面预处理后的 Ti6Al4V 涂层/基体界面结合形貌。(a) 抛光;(b) 喷砂

Fig. 6 Coating/substrate interfacial bonding morphologies for Ti6Al4V after different surface pretreatments. (a) Polishing; (b) sand blasting

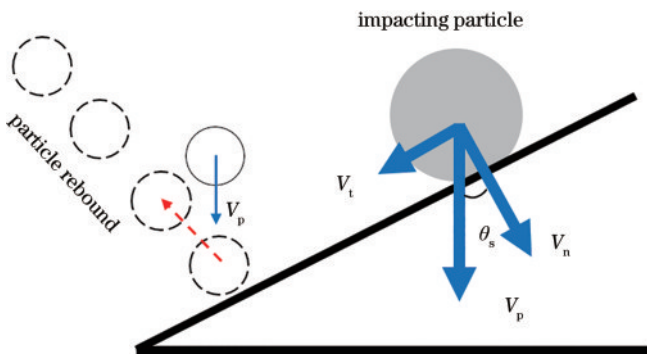


图 7 斜面对颗粒撞击行为的影响示意图

Fig. 7 Schematic diagram of influence of slope on particle impacting behavior

3.3 Ti6Al4V 颗粒撞击不同表面状态 Ti6Al4V 基体的数值模拟

为了进一步探究基体粗糙度对 SLD-Ti6Al4V 涂层/基体界面结合的影响,分别模拟了 Ti6Al4V 颗粒撞击光滑基体(对应于抛光)和粗糙基体(对应于喷砂)的沉积过程。图 8 是 Ti6Al4V 颗粒在相同条件下(相同的沉积速度和激光加热温度)撞击 Ti6Al4V 基体的变形形貌以及温度分布图。对于光滑表面,颗粒与基体接触界面的边缘处产生了明显的金属射流,如图 8(a) 所示,但粗糙表面没有产生金属射流。金属射流的产生是 SLD 和 CS 涂层与基体形成良好结合的一个重要特征。因此,两种基体的数值模拟结果与试验

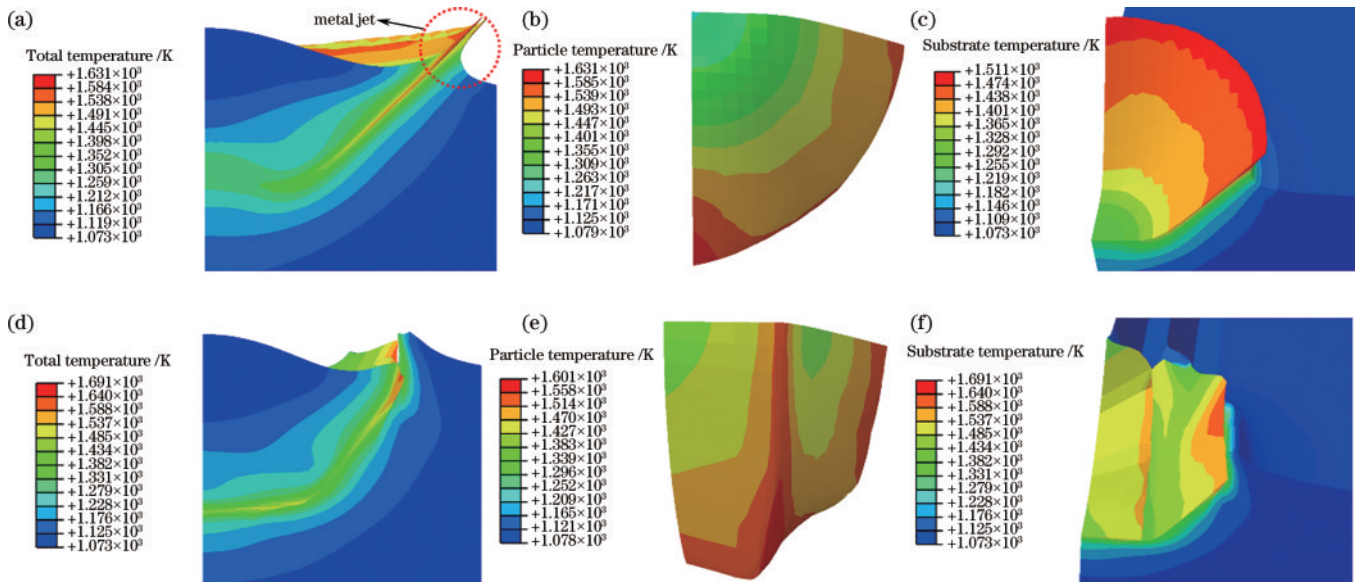


图 8 Ti6Al4V 颗粒碰撞不同表面状态 Ti6Al4V 基体的变形形貌以及温度分布图。(a)~(c)光滑表面；(d)~(f)粗糙表面
 Fig. 8 Deformation morphologies and temperature distribution diagrams of Ti6Al4V substrates when Ti6Al4V particles collide with different surface conditions. (a)–(c) Smooth surface; (d)–(f) rough surface

结果相吻合。图 8(b)显示了颗粒撞击光滑基体时颗粒底部的温度分布,可以看出温度从颗粒中心到颗粒边缘逐渐增加,中心温度最低,边缘温度最高,基体与颗粒有相同的温度分布。然而,当颗粒撞击粗糙表面时,颗粒和基体显示出非均匀的温度分布,波峰比波谷具有更高的温度,如图 8(e)和图 8(f)所示。此外,与粗糙基体相比,光滑基体的颗粒和基体的高温区域更大,增大了绝热剪切失稳的面积,从而可获得更高的界面结合强度。

CS 以及 SLD 过程中,颗粒撞击基体后,两者的塑性变形程度是影响颗粒与基体结合强弱的重要因素。图 9 是颗粒碰撞光滑基体与粗糙基体的等效塑性应变 (PEEQ) 对比。可以看出,两者的等效塑性应变变化趋势与温度变化趋势类似。光滑基体的边缘由于产生金属射流,具有较高的等效塑性应变值。然而,粗糙基体的最大等效塑性应变位于起伏波峰位置,起伏波谷的等效塑性应变较小,颗粒与基体间容易存在缝隙,不利于颗粒与基体间的结合。

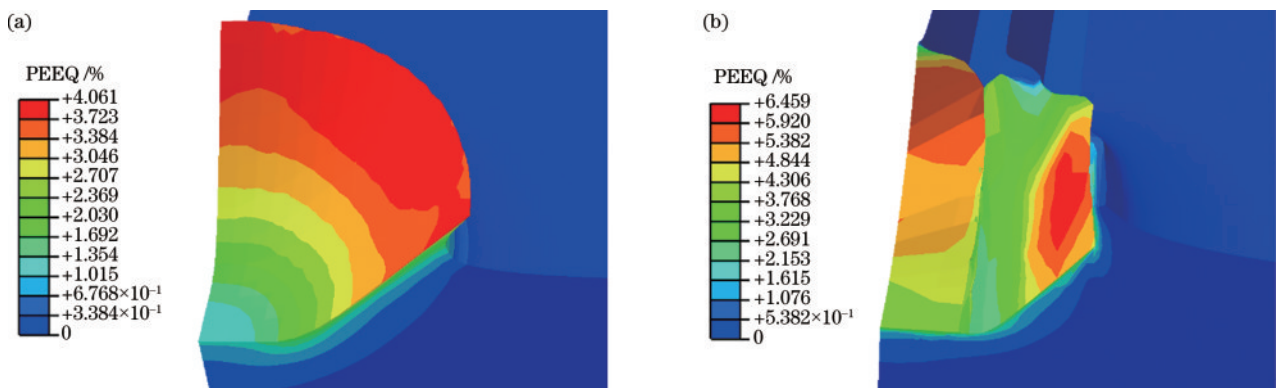


图 9 不同表面状态基体的等效塑性应变分布图。(a)光滑表面；(b)粗糙表面

Fig. 9 Equivalent plastic strain distribution of substrates with different surface conditions. (a) Smooth surface; (b) rough surface

图 10 为 SLD-Ti6Al4V 颗粒与基体撞击过程中颗粒与基体的能量演变过程。可以看出,在颗粒撞击基体前,系统的总能量为颗粒的初始动能。随着碰撞的进行,颗粒的能量不断减少,基体的能量不断增加,颗粒的能量不断转移到基体材料中。碰撞结束后,颗粒的初始动能分配到颗粒和基体中。根据巫湘坤等^[26]的研究,定义碰撞之后分配到颗粒中与分配到基体中的能量比值为能量分配系数 K ,以临界速度碰撞时的 K

值在 0.4~0.6 之间。 K 值过高或过低,均表明颗粒和基体之间的变形能力相差较大,不利于颗粒与基体结合形成良好的涂层。本试验颗粒撞击光滑基体和粗糙基体后的 K 值分别为 0.58 和 0.54,两者相差不大,且均位于 0.4~0.6 的范围内。根据能量分配理论,两种情况下的颗粒与基体都将紧密结合。然而,颗粒与粗糙基体的接触界面存在明显的缝隙,没有实现预期中的良好界面结合,如图 6(b)所示。颗粒转移到粗糙基

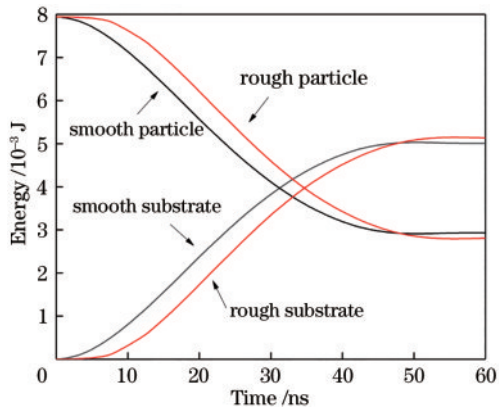


图 10 颗粒与基体的能量演变过程

Fig. 10 Energy evolution process of particle and substrate

体中的能量大部分用于基体表面起伏波峰处的塑性变形,较少部分用于起伏波谷的塑性变形,这会导致波峰与波谷的非协调变形,从而导致界面结合不良。Bae 等^[27]提出储存在颗粒与基体内并在碰撞后期释放的弹性应变能使颗粒从基体反弹,不利于颗粒与基体的结合。根据数值模拟分析,颗粒撞击光滑基体和粗糙基体获得的弹性应变能分别为 2.44×10^{-4} J 和 2.87×10^{-4} J,后者高于前者。Wu 等^[28]指出弹性应变能与颗粒和基体材料的弹性模量有关。在本试验中,粉末颗粒和基体均为 Ti6Al4V,唯一不同的就是基体表面粗糙度。根据图 8 的模拟结果,光滑基体具有更大的颗粒/基体界面高温区域,更强的材料塑性流动能力,因此储存在颗粒与基体内的弹性应变能较低,颗粒撞击后反弹的可能性降低,会形成良好结合,与图 6(a) 的试验结果相吻合。

4 结 论

Ti6Al4V 基体表面预处理对超音速激光沉积 Ti6Al4V 涂层与基体的界面结合有显著影响。打磨基体表面生成 TiO_2 陶瓷相,导致颗粒与基体的非协调变形模式,表现出较低的结合强度。抛光基体有利于颗粒发生绝热剪切失稳,在颗粒与基体接触界面边缘区域形成金属射流,颗粒/基体界面结合紧密。喷砂基体表面特征阻碍颗粒形成金属射流,导致颗粒/基体界面结合不良。

数值模拟结果表明,基体表面粗糙度影响颗粒撞击基体后颗粒与基体的温度分布。当颗粒撞击光滑基体表面后,颗粒和基体的温度呈现中心低、边缘高的分布,颗粒与基体紧密结合;当颗粒撞击粗糙基体表面后,颗粒和基体的温度呈现起伏波峰高、起伏波谷低的非均匀分布,颗粒与基体的结合界面存在明显的缝隙。此外,基体表面粗糙度对颗粒初始动能再分配的影响甚微。光滑基体较粗糙基体具有更大的颗粒/基体界面高温区域,导致储存在颗粒与基体内的弹性应变能较低,表现出更紧密的颗粒/基体界面结合。

参 考 文 献

- [1] 姚建华, 吴丽娟, 李波, 等. 超音速激光沉积技术: 研究现状及发展趋势[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0300001. Yao J H, Wu L J, Li B, et al. Research states and development tendency of supersonic laser deposition technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0300001.
- [2] Jones M, Cockburn A, Lupoi R, et al. Solid-state manufacturing of tungsten deposits onto molybdenum substrates with supersonic laser deposition[J]. Materials Letters, 2014, 134: 295-297.
- [3] 张群莉, 王昌仪, 刘博, 等. 镀钨金属化对超音速激光沉积金刚石/铜复合涂层导热性能影响[J]. 稀有金属, 2023, 47(5): 748-756. Zhang Q L, Wang C Y, Liu B, et al. Thermal conductivity of diamond/copper composite coatings prepared by supersonic laser deposition with W metallization[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47(5): 748-756.
- [4] Yin S, Cavaliere P, Aldwell B, et al. Cold spray additive manufacturing and repair: fundamentals and applications[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 628-650.
- [5] Wang K, Zhao L J, Mao T L, et al. Effect of laser power on the microstructure and mechanical properties of laser-assisted cold sprayed 7075 aluminum alloy deposits[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 879: 145224.
- [6] Wang Q, Li N, Zhou L C, et al. Microstructure and fatigue performance of hard Al alloy repaired by supersonic laser deposition with laser shock peening treatment[J]. Materials Characterization, 2023, 200: 112827.
- [7] 孙景勇, 晏宇亮, 李波, 等. 超音速激光沉积与激光熔覆 Stellite-6 涂层的抗气蚀性能及其机制对比研究[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002118. Sun J Y, Yan Y L, Li B, et al. Comparative study on cavitation-resistance and mechanism of stellite-6 coatings prepared with supersonic laser deposition and laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002118.
- [8] 刘博, 马磊, 田凯, 等. 激光辅助低压冷喷涂表面金属化 CNTs/Cu 复合涂层[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21): 2114008. Liu B, Ma L, Tian K, et al. Surface-metallized CNTs/Cu composite coating prepared by laser-assisted low-pressure cold spray[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21): 2114008.
- [9] Nguyen H D, Pramanik A, Basak A K, et al. A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 4641-4661.
- [10] Li W Y, Yang K, Yin S, et al. Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: a review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34 (3): 440-457.
- [11] Zhou H X, Li C X, Yang H, et al. Pores structure change induced by heat treatment in cold-sprayed Ti6Al4V coating[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28(6): 1199-1211.

- [12] Chen C Y, Ren Z M, Xie Y C, et al. Effect of hot isostatic pressing (HIP) on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy fabricated by cold spray additive manufacturing[C]//International Thermal Spray Conference, Thermal Spray 2019: Proceedings from the International Thermal Spray Conference, May 26-29, 2019, Yokohama, Japan. New York: ASM International, 2019: 781-788.
- [13] Luo X T, Wei Y K, Wang Y, et al. Microstructure and mechanical property of Ti and Ti6Al4V prepared by an *in-situ* shot peening assisted cold spraying[J]. Materials & Design, 2015, 85: 527-533.
- [14] Bray M, Cockburn A, O'Neill W. The Laser-assisted Cold Spray process and deposit characterisation[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(19): 2851-2857.
- [15] 李波, 吴丽娟, 张欣, 等. 超音速激光沉积 Ti6Al4V 涂层的微观结构及耐蚀性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 159-166.
- Li B, Wu L J, Zhang X, et al. Microstructure and corrosion-resistant property of Ti6Al4V coating prepared by supersonic laser deposition[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 159-166.
- [16] 汪伟林, 吴丽娟, 李波, 等. 超音速激光沉积 Ti-6Al-4V 合金结合界面特征数值模拟及试验验证[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 324-332.
- Wang W L, Wu L J, Li B, et al. Numerical simulation and experimental verification of interfacial bonding behavior of Ti-6Al-4V alloy via supersonic laser deposition[J]. Surface Technology, 2020, 49(8): 324-332.
- [17] Boruah D, McNutt P, Sharma D, et al. Understanding the effect of substrate preheating temperature and track spacing on laser assisted cold spraying of Ti6Al4V[J]. Metals, 2023, 13(10): 1640.
- [18] 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(2): 277-282.
- Cao C C, Li W Y, Yang K, et al. Influence of substrate hardness and thermal characteristics on microstructure and mechanical properties of cold sprayed TC4 titanium alloy coatings[J]. Materials Reports, 2019, 33(2): 277-282.
- [19] Sharma M M, Eden T J, Golesich B T. Effect of surface preparation on the microstructure, adhesion, and tensile properties of cold-sprayed aluminum coatings on AA2024 substrates[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(3): 410-422.
- [20] Sun W, Tan A W Y, Khun N W, et al. Effect of substrate surface condition on fatigue behavior of cold sprayed Ti6Al4V coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 320: 452-457.
- [21] Kumar S, Bae G, Lee C. Influence of substrate roughness on bonding mechanism in cold spray[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 304: 592-605.
- [22] 章钢, 张杰, 李波, 等. 激光辐照对超音速激光沉积 Ti6Al4V 涂层致密性及耐磨性能的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1414002.
- Zhang G, Zhang J, Li B, et al. Influence of laser irradiation on compactness and wear resistance of Ti6Al4V coating prepared by supersonic laser deposition [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1414002.
- [23] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.
- [24] Tan A, Lek J, Sun W, et al. Influence of particle velocity when propelled using N₂ or N₂-He mixed gas on the properties of cold-sprayed Ti6Al4V coatings[J]. Coatings, 2018, 8(9): 327-348.
- [25] Yin S, Wang X F, Li W Y, et al. Deformation behavior of the oxide film on the surface of cold sprayed powder particle[J]. Applied Surface Science, 2012, 259: 294-300.
- [26] 巫湘坤, 周香林, 王建国, 等. 冷喷涂过程中能量变化及沉积行为的模拟研究[J]. 金属学报, 2010, 46(4): 385-389.
- Wu X K, Zhou X L, Wang J G, et al. Numerical investigation on energy balance and deposition behavior during cold spraying[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(4): 385-389.
- [27] Bae G, Xiong Y M, Kumar S, et al. General aspects of interface bonding in kinetic sprayed coatings[J]. Acta Materialia, 2008, 56(17): 4858-4868.
- [28] Wu J W, Fang H Y, Yoon S, et al. The rebound phenomenon in kinetic spraying deposition[J]. Scripta Materialia, 2006, 54(4): 665-669.