

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180412001

超音速激光沉积 Ti6Al4V 涂层的微观结构及耐蚀性能

李 波^{1,2}, 吴丽娟^{1,2}, 张 欣^{1,2}, 马春飞^{1,2}, 张群莉^{1,2}, 姚建华^{1,2}

(1. 浙江工业大学 激光先进制造研究院, 杭州 310014; 2. 浙江省高端激光制造装备协同创新中心, 杭州 310014)

摘 要: 超音速激光沉积技术是将激光加热与冷喷涂同步耦合的一种新型材料沉积技术。文中利用超音速激光沉积技术在中碳钢基体上制备 Ti6Al4V 涂层, 并采用 SEM、XRD、电化学腐蚀测试等手段对涂层厚度、显微组织、相成分以及耐蚀性能进行了表征分析。结果表明, 在一定的激光辐照温度(即沉积区温度)范围内, 涂层沉积效率、致密性以及涂层与基体之间的结合强度均随激光辐照温度的升高而增加, 当激光辐照温度为 800 °C 时, 沉积效率是冷喷涂的 4 倍, 涂层中的孔隙率仅为 4.38%, 涂层与基体的结合强度达 75 MPa。由于低热输入的原因, 涂层的物相组成与原始钛合金粉末基本一致。随着激光辐照温度的进一步提高, 涂层中有 TiN 相的产生, 不利于粉末的沉积, 涂层的沉积效率、致密性以及结合强度均下降, 但是在酸性腐蚀介质中, TiN 的存在提高了涂层的耐蚀性能。

关键词: 超音速激光沉积; 钛合金; 显微组织; 相组成; 耐蚀性能

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)05-0159-08

Microstructure and Corrosion-resistant Property of Ti6Al4V Coating Prepared by Supersonic Laser Deposition

LI Bo^{1,2}, WU Lijuan^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}, MA Chunfei^{1,2}, ZHANG Qunli^{1,2}, YAO Jianhua^{1,2}

(1. Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Collaborative Innovation Center of High-end Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Supersonic laser deposition (SLD) is a newly developed material deposition technique that synchronously combines the laser heating with cold spray (CS). The deposition of Ti6Al4V powder onto medium carbon steel substrate by SLD was studied. The thickness, microstructure, phase composition and corrosion-resistant property of the deposited coating were examined by SEM, XRD and electrochemical test. Results show that the deposition efficiency, coating density and bonding strength between the coating and the substrate increase by evaluating the laser irradiation temperature within certain range. As the laser irradiation temperature reaches 800°C, the deposition efficiency is 4 times as that of the CS coating. The coating porosity is as low as 4.38%, and the bonding strength between coating and substrate increases to 75 MPa. Due to relatively low heat input during SLD process, the phase composition of the deposit is similar to that of the pristine powder. Further increasing the laser irradiation temperature results in the presence of TiN in the deposit, which prevents the effective deposition of Ti6Al4V powder. However, the existence of TiN in the deposit can improve its corrosion-resistant property in acid solution.

Keywords: supersonic laser deposition; titanium alloy; microstructure; phase composition; corrosion-resistant property

收稿日期: 2018-04-12; 修回日期: 2018-08-30

网络出版日期: 2018-09-18 10:19; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20180918.1019.010.html>

通信作者: 姚建华 (1965—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 激光表面改性与激光制造; **E-mail:** laser@zjut.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB1103601); NSFC-浙江省两化融合联合基金 (U1509201); 国家自然科学基金 (51701182)

Fund: Supported by National Key R&D Program of China (2017YFB1103601), NSFC-Zhejiang Joint Fund for the Integration of Industrialization and Information (U1509201) and National Natural Science Foundation of China (51701182)

引用格式: 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, Z 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.

0 引言

钛合金由于具有比强度和比刚度高、耐腐蚀性好、生物兼容性好等优异的机械、物理和化学性能，成为航空、航天、海洋等领域不可或缺的关键材料，并在能源、石油、化工、生物医学等多个领域得到了广泛应用，其中钛合金的耐腐蚀特性在其应用中占有重要角色。但由于钛合金价格较高，如果在一些只需要表面性能的应用场合整体使用钛合金会增加成本，因此采用合适的表面改性技术在零部件表面制备耐腐蚀的钛合金涂层是节约成本的一种有效手段。

目前制备钛合金涂层的方法有热喷涂、冷喷涂以及激光熔覆等^[1-3]。高活性的钛合金在诸如热喷涂和激光熔覆等高热量输入的涂层制备过程中极易被氧化或烧蚀。因此，通常需要在密闭的真空环境下或者充有惰性气体保护的环境中进行，这会导致制备工艺复杂和制造成本提高。此外，较高的热输入还会在涂层中形成不必要的杂质相、不均匀的显微组织以及较高的热应力等，影响涂层的性能和使用效果。冷喷涂是一种依靠高速颗粒(通常需加速到 300~1200 m/s 的速度)撞击基材发生塑性变形实现固态沉积的低热量输入技术，可以有效避免前述的热致不良影响。但冷喷涂对沉积材料的塑性有一定的要求，在沉积高强度材料时致密性和结合强度较差，因此冷喷涂目前在钛基材料的沉积方面主要用于制备多孔钛基涂层^[4-5]，尚未能获得高致密度的钛基涂层。

针对冷喷涂沉积材料范围窄、致密性差、结合力弱的缺点，剑桥大学 O'Neill 课题组提出将激光加热与冷喷涂(Cold spray, CS)相结合的超音速激光沉积技术(Supersonic laser deposition, SLD)^[6]，利用激光同步加热冷喷涂颗粒和基材，使二者软化，达到降低颗粒临界沉积速度的目的，从而实现高强度材料的有效沉积，扩大沉积材料范围的同时提高涂层的致密性和结合强度。目前，国内外学者利用 SLD 技术已成功制备了 Stellite 6、Ni60、W 等单一高强度材料涂层以及 WC/SS316L、WC/Stellite 6、Diamond/Ni60、Ni/Ni60 等复合材料涂层^[7-13]。在钛基材料的沉积方面，Bray 等^[14]利用 SLD 技术制备了高致密度的 Ti 涂层，该涂层的孔隙率(0.5%)远低于冷喷涂(3.1%)和高速氧燃料火焰喷涂(5.4%)制备的涂

层。Ti6Al4V 合金作为目前应用最广的钛合金，在航空航天、生物医用以及耐蚀涂层等方面均有涉及。在单一 CS 技术制备 Ti6Al4V 涂层时，为得到较好的致密性，通常需用价格昂贵的 He 气作为载气，成本较高。而在 SLD 中，由于引入了同步激光辐照，可用廉价的 N₂ 替代 He 气，降低成本的同时有望实现高强度材料的沉积。

因此，为了进一步探索 SLD 技术在钛基材料沉积方面的可行性，文中试验利用 SLD 技术在低廉的中碳钢基材上沉积 Ti6Al4V 合金，系统研究激光辐照温度(即沉积区温度)对涂层厚度、孔隙率、微观组织结构、物相等的影响规律，并对涂层的耐腐蚀性能进行评估，以推动 SLD 技术在钛基材料沉积领域(包括表面沉积和增材制造)的应用。

1 试验

1.1 试验材料

文中试验采用机械粉碎法制备的 Ti6Al4V 合金粉末作为沉积材料，其显微形貌和化学成分分别示于图 1 和表 1。粉末呈不规则形状，在同样的工艺参数下非球形颗粒能达到更高的碰撞速度，有利于颗粒的沉积。试验之前，将钛合金粉末在烘箱里保温 1 h，保温温度为 120 ℃，以增加粉末的流动性。基体选用 45 钢，尺寸为 100 mm×

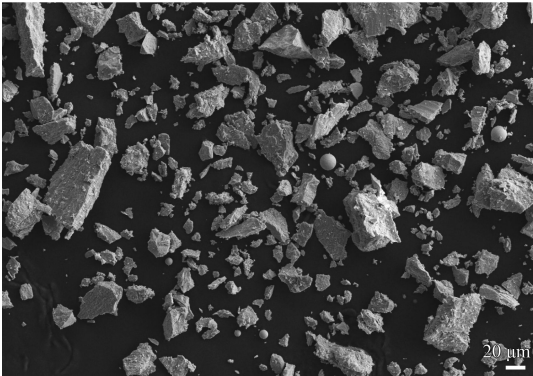


图 1 Ti6Al4V 合金粉末的显微形貌

Fig.1 SEM image of Ti6Al4V powder

表 1 Ti6Al4V 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti6Al4V alloy (w/%)				
Element	Al	Fe	N	O
Content	5.5–6.5	0.25	0.05	0.13
Element	V	C	H	Ti
Content	3.5–4.5	0.08	0.012	Bal.

60 mm×10 mm。试验前基体表面进行喷砂、脱脂预处理。

1.2 试验系统与涂层制备

文中试验采用的超音速激光沉积系统的示意图见参考文献[7], 该系统主要包括冷喷涂系统、激光设备和其它的一些辅助装置, 如机械手臂、气源供应装置等。冷喷涂系统为自主研制, 激光器为光纤耦合半导体激光器 (LDF4000-100 VGP, Laserline), 最大功率为 4.4 kW。高压气源由空气压缩机和高压气瓶组 (氮气) 提供。激光设备配有

红外高温仪, 用于监测沉积区域的温度, 并实时反馈调节激光器的输出功率来保持恒定的激光辐照温度。

在 SLD 过程中, 通过控制机械手臂, 使拉瓦尔喷嘴、激光头与红外高温仪同步运动。工作载气为 N₂, 压力 3 MPa, 载气预热温度为 500 ℃, 喷涂距离为 30 mm, 扫描速度为 10 mm/s, 送粉量 30 g/min。在这些参数不变的情况下, 通过改变激光辐照温度来制备 SLD 涂层, 具体的工艺参数见表 2。

表 2 超音速激光沉积 Ti6Al4V 的工艺参数
Table 2 Experimental parameters of Ti6Al4V coating by SLD

Sample	N ₂ pressure/ MPa	N ₂ temperature/ ℃	Spray distance/ mm	Scanning velocity/ (mm·s ⁻¹)	Powder feeding rate/ (g·min ⁻¹)	Laser irradiation temperature/ ℃
a	3	500	30	10	30	RT
b	3	500	30	10	30	600
c	3	500	30	10	30	700
d	3	500	30	10	30	800
e	3	500	30	10	30	900
f	3	500	30	10	30	1000

1.3 涂层表征

涂层的厚度和结合状态利用扫描电子显微镜 (SEM, IGMA HV-01-043, Carl Zeiss) 进行表征, 涂层的孔隙率通过扫描电镜的背散射图进行分析。采用图像处理软件 (Image-Pro Plus 6.0) 对不同激光辐照温度下制备的 Ti6Al4V 涂层的孔隙率进行计算。原始粉末和涂层的物相通过 X 射线衍射仪 (XRD, D8 Advance, Bruker) 进行测试。采用电化学腐蚀法测试涂层的耐腐蚀性能。涂层/基体的结合强度根据 HB5476-91 标准测试, 每个试验参数制备的试样测试 3 次, 取其平均值为最终的结合强度值。电化学测试采用 CHI660E 电化学工作站, 电解池为三电极体系, 腐蚀介质为 1 mol/L 的 H₂SO₄ 水溶液, 辅助电极为铂电极, 参比电极选用饱和甘汞电极 (SCE)。

2 结果与讨论

2.1 激光辐照温度对涂层沉积效率的影响

图 2 是利用 SEM 图像分析软件测得的不同激光辐照温度下制备的 Ti6Al4V 涂层峰值厚度。可以看出, 在其它工艺参数一定的条件下, 改变激光辐照温度可以使涂层的厚度发生比较明显的变

化, 尤其是在 800 ℃ 的激光辐照温度下, 涂层的厚度 (1425 μm) 接近 CS 涂层厚度的 4 倍。由此可见, 通过激光的加热作用, 可以显著提高 Ti6Al4V 合金粉末的沉积效率。

在 CS 过程中, 颗粒要实现有效沉积, 其撞击速度 (v_p) 和临界沉积速度 (v_{cr}) 必须满足条件^[15]:

$$\eta = \frac{v_p}{v_{cr}} \geq 1$$

(1)

颗粒的撞击速度由颗粒特征 (如颗粒尺寸、形状等) 和 CS 工艺参数 (如喷涂载气种类、载气压力、载气预热温度、喷涂距离、喷嘴结构等) 决定, 临界沉积速度可由以下经验公式获得^[16]:

$$v_{cr} = 667 - 14\rho + 0.08T_m + 0.1\sigma_u - 0.4T_i$$

(2)

其中 ρ 是材料的密度, T_m 是材料的熔点, σ_u 是衡量材料抵抗变形能力的强度, T_i 是沉积颗粒的初始温度。

由于 Ti6Al4V 合金粉末是由不同尺寸的颗粒组成 (如图 1 所示), 加速后不同尺寸的颗粒其撞击速度不一样。在单一冷喷涂的情况下, 由于未引入激光加热辅助, 只有尺寸较小的那一部分颗粒的撞击速度达到 (或超过) 临界沉积速度 (即

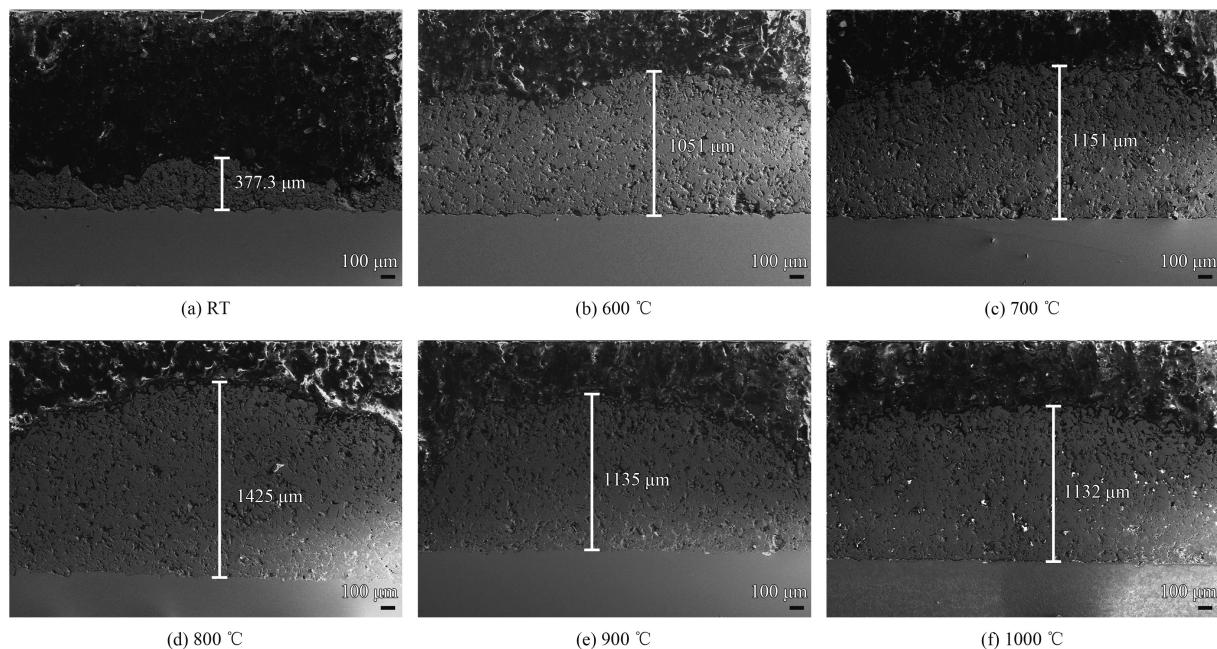


图2 不同激光辐照温度下制备的 Ti6Al4V 涂层的厚度

Fig.2 Thickness of Ti6Al4V coatings prepared at different laser irradiation temperature

$\eta \geq 1$), 能够在基体上实现沉积, 因此沉积效率较低。SLD 中由于引入了激光对沉积颗粒进行加热, 提高了颗粒的初始温度, 根据式 (2) 可知, 颗粒初始温度的提高可以降低其临界沉积速度。虽然沉积颗粒在 SLD 与 CS 过程中的撞击速度一样, 但在 SLD 中由于临界沉积速度的降低, 使得更多的颗粒能够满足式 (1) 的条件实现有效沉积, 从而提高了沉积效率, 使涂层厚度增加。

图 3 是涂层厚度随激光辐照温度的变化趋势。可以看出, 激光辐照温度为 800 °C 时涂层厚度达到最大值。当激光辐照温度进一步提升至

900 °C 及以上时, 涂层厚度不升反降。这是由于在 SLD 中使用的载气为 N_2 , 激光辐照温度较高时, Ti6Al4V 合金颗粒会与 N_2 反应, 在其表面生成 TiN, 提高了颗粒表面的强度, 激光加热对其软化作用减弱。而且, 由式 (2) 可知, 颗粒的临界沉积速度随着其强度的提高而升高, 在撞击速度不变的情况下能够满足式 (1) 所示条件的颗粒将减少, 从而导致沉积效率降低, 涂层厚度下降。

2.2 激光辐照温度对涂层界面结合的影响

图 4 所示为不同激光辐照温度制备的 Ti6Al4V 涂层内部颗粒的结合情况。CS 涂层中可以看到明显的孔隙, 表明颗粒之间结合较差, 如图 4(a) 所示。SLD 引入激光加热后, 涂层中的孔隙减少, 特别是激光辐照温度为 800 °C 时, 涂层中几乎观测不到孔隙的存在, 表明颗粒之间结合良好, 如图 4(d) 所示。继续升高激光辐照温度, 涂层的致密性没有进一步提升, 反而又出现了明显的孔隙, 如图 4(e)~(f) 所示。图 5 是涂层孔隙率测试结果, 可以看出涂层的孔隙率随着激光辐照温度的提高先降低后升高, 在 800 °C 时具有最好的致密性, 与图 4 的结果相一致。此外, 对不同激光辐照温度下制备的涂层与基体的结合强度进行了测试, 结果如图 6 所示。可以看出, 涂层与基体的结合强度先随着激光辐照温度的提高而提高, 在

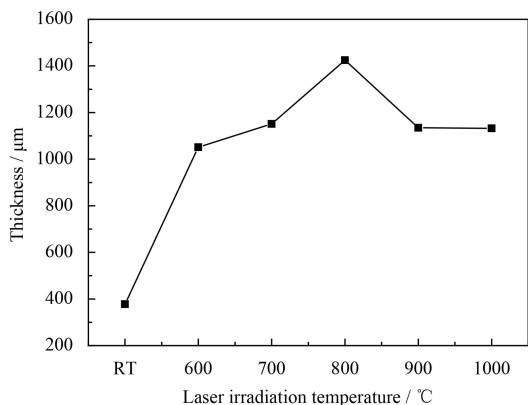


图3 涂层厚度随激光辐照温度的变化

Fig.3 Variation of coating thickness with laser irradiation temperature

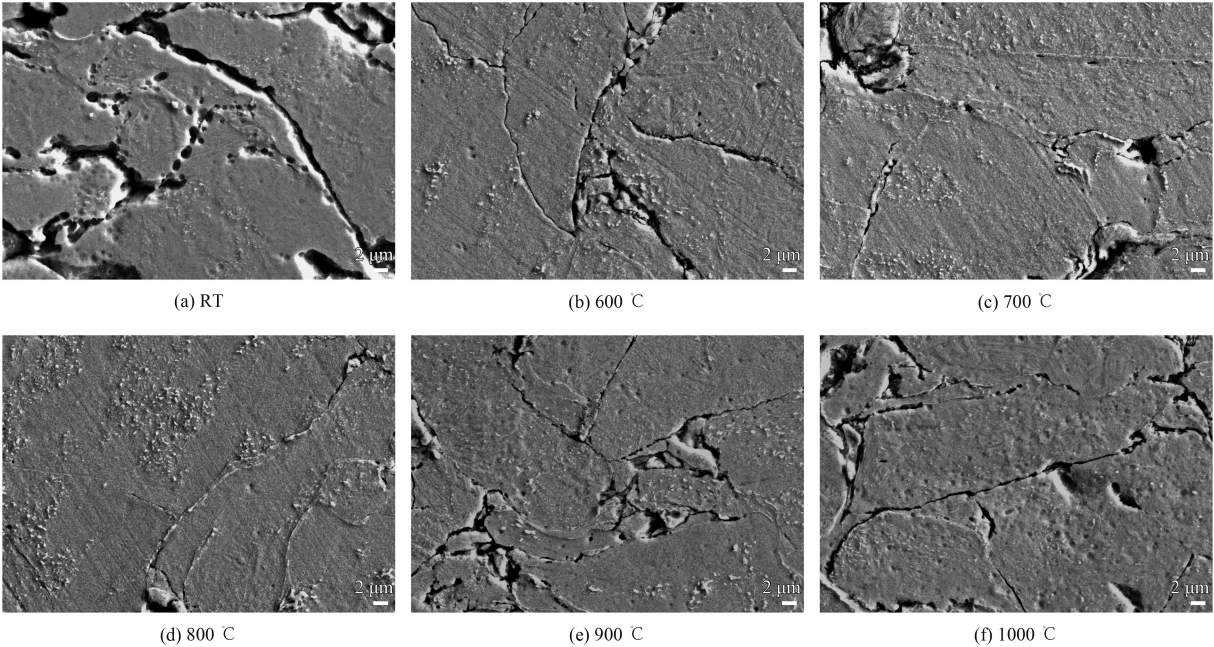


图 4 不同激光辐照温度下制备的 Ti6Al4V 涂层的界面结合

Fig.4 Interfacial bonding of Ti6Al4V coatings prepared at different laser irradiation temperature

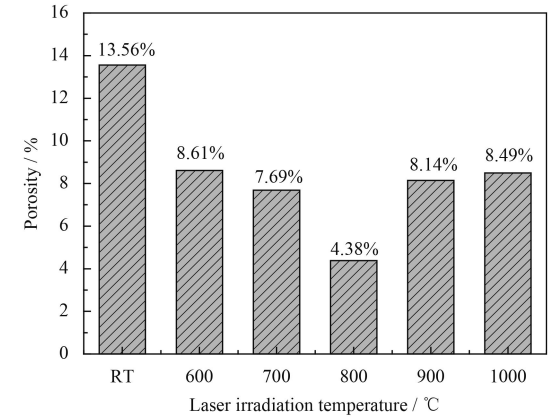


图 5 涂层孔隙率随激光辐照温度的变化

Fig.5 Variation of coating porosity with laser irradiation temperature

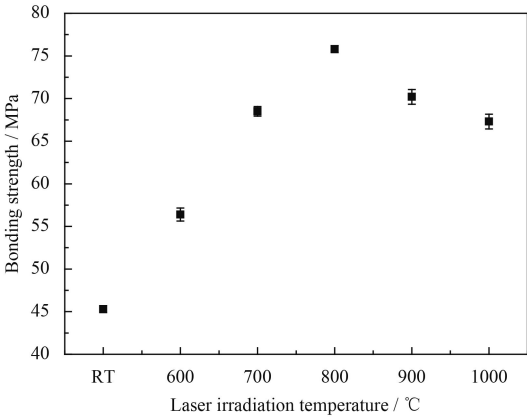


图 6 涂层/基体界面结合强度随激光辐照温度的变化

Fig.6 Variation of interfacial bonding strength between coating and substrate with laser irradiation temperature

800 °C 时具有最高的结合强度 (75 MPa), 随后继续提高激光辐照温度, 结合强度不升反降, 这与涂层致密性随激光辐照温度的变化规律相似。

在 CS 过程中, 沉积颗粒高速撞击基材 (或已沉积颗粒) 的瞬间, 动能转化的热能来不及扩散, 使接触界面温度升高, 发生热软化和塑性流变 (即“绝热剪切失稳”现象), 从而实现颗粒之间或者颗粒与基材之间的相互结合^[17]。在未引入激光加热时, 接触界面温度的升高主要依靠动能转化的热能, 热软化作用有限, 颗粒之间以及颗粒与基材之间的变形不充分, 因此不能形成良好结合, 从

而导致较差的致密性和较低的结合强度。而在 SLD 中由于引入了激光, 接触界面除了前述的绝热温升外, 还有激光对其进行加热。这双重作用使得沉积颗粒和基材的热软化作用充分, 提高了二者的塑性变形能力, 颗粒之间以及颗粒与基材之间相互结合更好, 从而表现出较好的致密性和较高的结合强度。但由于所用载气为 N₂, 当激光辐照温度较高时, Ti6Al4V 颗粒会与 N₂ 反应在其表面生成高硬度的 TiN, 使颗粒的塑性变形能力变差, 激光加热的软化作用减弱, 从而导致沉积颗粒之间以及颗粒与基材之间不能通过充分的塑

性变形形成紧密结合。此外,沉积颗粒表面陶瓷相(如氧化物、氮化物等)的生成会阻碍颗粒的新鲜表面裸露,从而不利于颗粒之间以及颗粒与基材之间的界面充分接触以形成良好结合。

2.3 激光辐照温度对涂层物相的影响

图 7 所示为原始粉末与不同激光辐照温度下制备的 Ti6Al4V 涂层的 XRD 图谱。可以看出,当激光辐照温度较低(800 ℃ 及以下)时,涂层的物相与原始粉末一致,主要由 α -Ti 和 V_2C 组成。当激光辐照温度超过 800 ℃ 时,XRD 图谱中能够看到明显的 TiN 衍射峰,说明涂层中生成了 TiN 相。通过对 900 ℃ 制备的涂层进行 EDS 分析(图 8 所示),发现有 N 元素存在,这些均佐证了前述

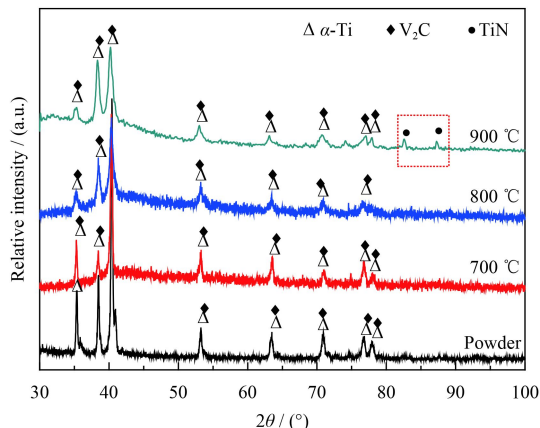
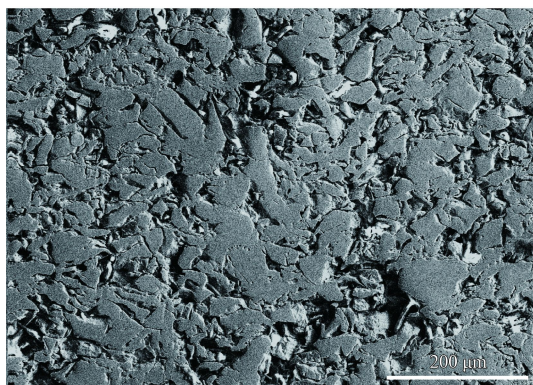
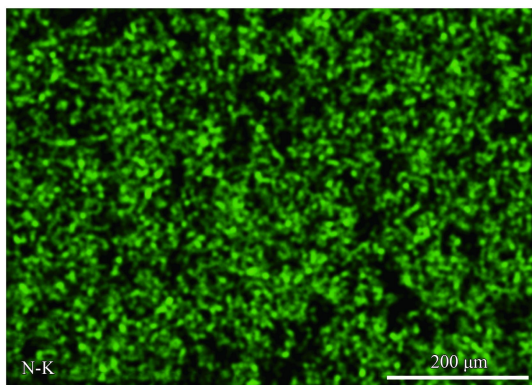


图 7 Ti6Al4V 粉末与不同激光辐照温度制备 Ti6Al4V 涂层的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of Ti6Al4V powder and as-prepared Ti6Al4V coatings at different laser irradiation temperature



(a) SEM image



(b) EDS mapping

图 8 900 ℃ 制备的超音速激光沉积 Ti6Al4V 涂层的 EDS 分析

Fig.8 EDS analysis of Ti6Al4V coating prepared by SLD at laser irradiation temperature of 900 ℃

的 TiN 的生成对涂层厚度、致密性以及结合强度影响的推论。值得注意的是,用激光引入 CS 后的物相变化不大,基本保留了原始粉末的物相,表明 SLD 保持了 CS 固态沉积的特性,这对开放环境下实现高活性钛合金材料的沉积具有重要意义。

2.4 涂层耐蚀性能

图 9 是 CS 涂层与 SLD 涂层(激光辐照温度: 800 ℃)的极化曲线,电化学特征参数拟合结果列于表 3。从极化曲线的结果可以看出,CS 涂层的自腐蚀电位相对较负,SLD 涂层的腐蚀电位相对于 CS 涂层出现正移,从热力学的角度来讲,CS 涂层更倾向于被腐蚀。从表 3 的腐蚀电流密度可以看出 CS 涂层的腐蚀电流密度大于 SLD 涂层,从动力学的角度来讲,CS 涂层的腐蚀速率快于 SLD 涂层。因此,综合来说,SLD 涂层的耐蚀

性能优于 CS 涂层。二者耐蚀性能的差异一方面与其致密性有关,图 4 和图 5 的结果显示,SLD 涂层的致密性优于 CS 涂层,孔隙率的降低可以抵抗腐蚀溶液侵蚀涂层内部,减缓腐蚀速率;另一方面,由于激光加热软化效应,SLD 涂层较 CS 涂层塑性变形更充分,沉积颗粒内部位错密度增加。虽然激光加热可能会导致涂层回复和再结晶从而消除位错和变形,但由于激光与涂层的相互作用时间较短,因此不足以完全消除涂层中的变形。与单一的 CS 涂层相比,SLD 涂层仍然具有较高的位错密度,这可以从图 7 所示的衍射峰的宽化对比看出,激光辐照温度 800 ℃ 制备的涂层变形最充分,位错密度最高,因此其衍射峰宽化最明显。位错密度的增加会使腐蚀电位发生正移,从而增加涂层的耐蚀性。

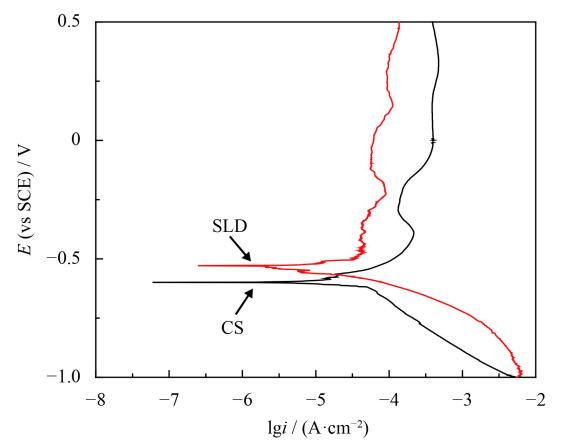


图 9 Ti6Al4V 涂层的极化曲线

Fig.9 Polarization curves of Ti6Al4V coatings

表 3 CS 与 SLD 涂层的电化学特征参数拟合结果
Table 3 Fitting results of electrochemical characteristic parameters for CS and SLD coatings

Sample	Potential, $E_{\text{corr}} / \text{V}$	Current density, $I_{\text{corr}} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
CS	-0.599	6.547×10^{-5}
SLD	-0.529	5.744×10^{-5}

3 结 论

采用 SLD 技术在中碳钢基体上制备了 Ti6Al4V 涂层, 对涂层的沉积效率、颗粒界面结合、物相组成以及耐蚀性能进行了表征。

(1) SLD 中由于引入激光对沉积颗粒进行加热, 降低了临界沉积速度, 提高了沉积颗粒的沉积效率。激光辐照温度为 800 ℃ 时, 涂层沉积效率最高, 涂层厚度是冷喷涂涂层的 4 倍。但当激光辐照温度过高时, 沉积颗粒会与工作载气 N₂ 发生反应生成 TiN, TiN 的存在提高了颗粒的临界沉积速度, 从而降低了沉积效率。

(2) SLD 中绝热剪切失稳和激光加热软化的共同作用使沉积颗粒的塑性变形更充分, 颗粒之间以及颗粒与基材之间的相互结合更致密, 800 ℃ 激光辐照温度下制备的涂层孔隙率仅为 4.38%, 涂层与基体的结合强度达到 75 MPa。但激光辐照温度过高时, 沉积颗粒与载气 N₂ 反应生成高硬度的陶瓷相 TiN, 塑性变形能力减弱, 对涂层的致密性有不利影响。

(3) SLD 涂层较 CS 涂层具有更好的耐蚀性能, 这是由于 SLD 涂层比 CS 涂层具有更好的致密性以及充分塑性变形导致较高的位错密度。

参考文献

[1] 赵征. 热喷涂制备钛涂层工艺技术探讨[J]. 焊接, 2011(6): 16-21.
ZHAO Z. Discussion on preparation technology of titanium coating by thermal spraying[J]. Welding, 2011(6): 16-21 (in Chinese).
[2] SUN W, TAN A W Y, MARINESCU I, et al. Adhesion, tribological and corrosion properties of cold-sprayed CoCrMo and Ti6Al4V coatings on 6061-T651 Al alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 326: 291-298.
[3] ZHAO Z, CHEN J, GUO S, et al. Influence of α/β interface phase on the tensile properties of laser cladding deposited Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33: 675-681.
[4] FENG S, LIU G, LING G, et al. Preparation of porous titanium coating by cold spray technology[J]. Ordnance Material Science & Engineering, 2013, 36(3): 53-54.
[5] SUN J F, HAN Y, CUI K. Innovative fabrication of porous titanium coating on titanium by cold spraying and vacuum sintering[J]. Materials Letters, 2008, 62(21): 3623-3625.
[6] COCKBURN A, BRAY M, O'NEILL B. The laser-assisted cold spray process[J]. The Laser User, 2008, 53: 30-31.
[7] YAO J H, LI Z H, LI B, et al. Characteristics and bonding behavior of stellite6 alloy coating processed with supersonic laser deposition[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016, 661: 526-534.
[8] 杨理京, 李祉宏, 李波, 等. 超音速激光沉积制备 Ni60 涂层的显微组织及沉积机理[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 132-138.
YANG L J, LI Z H, LI B, et al. Microstructure and deposition mechanism of Ni60 coatings prepared by supersonic laser deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 132-138 (in Chinese).
[9] 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.
[10] 李鹏辉, 李波, 张群莉, 等. 超音速激光沉积与激光熔覆 WC/SS316L 复合沉积层显微组织与性能的对比研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 76-83.
LI P H, LI B, ZHANG Q L, et al. Comparative study on microstructure and performance of WC/SS316L composite coating prepared by supersonic laser deposition and laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 76-83 (in Chinese).
[11] 李祉宏, 杨理京, 张群莉, 等. 超音速激光沉积与激光熔覆 Stellite6 涂层的对比研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 132-138.
LI Z H, YANG L J, ZHANG Q L, et al. Comparative re-

search of stellite6 coatings prepared by supersonic laser deposition and laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 132-138 (in Chinese).

[12] YANG L J, LI B, YAO J H, et al. Effects of diamond size on the deposition characteristic and tribological behavior of diamond/Ni60 composite coating prepared by supersonic laser deposition[J]. Diamond & Related Materials, 2015, 58: 139-148.

[13] YAO J H, YANG L J, LI B, et al. Deposition characteristics and microstructure of a Ni60-Ni composite coating produced by supersonic laser deposition[J]. Lasers in Engineering, 2017, 36(1): 117-131.

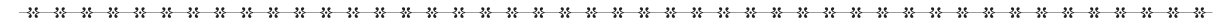
[14] BRAY M, COCKBURN A, O'NEILL B. The laser-assisted cold spray process and deposit characterisation[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(19): 2851-2857.

[15] ASSADI H, KREYE H, GARTNER F, et al. Cold spraying-a materials perspective[J]. Acta Materialia, 2016, 116: 382-407.

[16] ASSADI H, GARTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding mechanism in cold gas spraying[J]. Acta Materialia, 2003, 51(15): 4379-4394.

[17] SINGH H, SIDHU T S, KALSI S B S, et al. Development of cold spray from innovation to emerging future coating technology[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 2013, 35(3): 231-245.

(责任编辑: 陈茜)



• 本刊讯 •

2018 年先进激光制造产业发展大会将在张家港举行

由张家港市人民政府、中国光学工程会主办的 2018 年先进激光制造产业发展大会将于 2018 年 11 月 27—29 日在张家港举行, 此次大会以“探索激光前沿技术, 助力激光制造产业发展”为主题, 包含技术交流、成果展示对接、项目路演等多项活动, 汇聚百余位行业专家、企业家、知名咨询机构及投融资机构, 合作媒体。届时激光行业各企业、科研院所、高等院校的优秀成果、技术及产品将参加大会交流和产品展示, 同时组委会还将邀请汽车制造、智能制造、精密机械加工、电子/半导体工业、金属/材料加工、船舶制造业、轨道交通、航空航天、激光增材制造 (3D 打印)、国防军工等应用部门到会交流。组委会致力于将会议交流和产业对接有机结合, 合力打造成一场高规格、高水平的先进激光制造业产业应用盛会。

大会议题包括: ①高功率激光加工技术及装备; ②中小功率激光精密加工应用及设备; ③激光物理与技术; ④光纤激光及应用; ⑤先进全固态激光器及新型激光器; ⑥半导体激光器与先进光电子器件; ⑦先进激光材料、薄膜及元器件精密加工; ⑧增材制造; ⑨激光清洗最新技术进展; ⑩飞秒激光加工技术及应用; ⑪太赫兹技术及应用等。

会议将同期举办激光技术与军民融合应用成果展示对接会, 成果展示与对接范围: 先进光源、先进激光制造技术、激光检测、质量控制、高端智能装备、3D 打印和增材制造等。

组委会联系方式:

中国光学工程学会: 战嘉鹤 022-58168878; E-mail: zhanjiahe@csoe.org.cn;
先进激光 (装备) 产业园: 石燕 0512-58763837。

(本刊编辑部 供稿)