

超音速激光沉积 WC/Stellite 6 复合涂层显微组织特征的研究

李祉宏^{1,2} 杨理京^{1,2} 李 波^{1,2} 张群莉^{1,2} 姚建华^{1,2*}

¹浙江工业大学激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014

²浙江省高端激光制造装备协同创新中心, 浙江 杭州 310014

摘要 超音速激光沉积技术(SLD)将激光技术与冷喷涂技术相结合,在保持冷喷涂固态沉积的优势下,极大地拓展了单一冷喷涂技术的可喷涂材料范围。采用超音速激光沉积技术制备了单一冷喷涂难以制备的 WC/Stellite 6 金属基复合涂层(MMC),并与激光熔覆(LC)涂层在宏观形貌、显微组织、界面稀释、未熔 WC 占比、涂层抗裂纹扩展性能等方面进行对比研究。研究表明:具有固态沉积特点的超音速激光沉积涂层避免了热加工过程中的 WC 分解与溶解问题,在采用相同比例的 WC/Stellite 6 复合材料情况下,超音速激光沉积涂层中 WC 体积占比为 27.6%,高于激光熔覆涂层的 3.7%;激光熔覆层稀释率约为 8.9%,而超音速激光沉积涂层无宏观稀释区;大载荷压痕测试结果显示激光熔覆涂层压痕处出现大量放射状裂纹而超音速激光沉积涂层无裂纹出现,表明超音速激光沉积涂层抗裂纹扩展能力优于激光熔覆涂层。

关键词 激光光学;金属基复合材料;超音速激光沉积;Stellite 6; WC; 微观结构

中图分类号 TG146.1; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1106002

Microstructural Characteristics of WC/Stellite 6 Composite Coating Prepared by Supersonic Laser Deposition

Li Zhihong^{1,2} Yang Lijing^{1,2} Li Bo^{1,2} Zhang Qunli^{1,2} Yao Jianhua^{1,2}

¹Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

²Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract Supersonic laser deposition (SLD) is a new coating and fabrication process in which a supersonic powder stream produced by cold spray (CS) impinges on a substrate simultaneously heated by laser irradiation to expand the range of materials deposited under solid-state during SLD process. WC/Stellite 6 metal matrix composite (MMC) coating prepared by SLD and laser cladding (LC) are studied and compared in terms of macro-morphology, microstructure, interface dilution and unmelted WC proportion of coating, crack propagation resistance. The results show that the dense, crack-free coatings with uniform distribution of WC are achieved by SLD coating because of solid-state deposition, which can avoid the root causes of WC decomposition and dissolution in high temperature processing. The dilution rate of laser cladding coating is about 8.9%, while no macroscopic dilution zone is found in SLD coatings. The unmelted WC proportion of SLD coatings is about 27.6%, which is much higher than that of

收稿日期: 2015-05-04; 收到修改稿日期: 2015-06-02

基金项目: 浙江省自然科学基金青年基金(LQ13E050012)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201307)、浙江省博士后科研择优资助项目(Z42102002)

作者简介: 李祉宏(1988—),男,博士研究生,主要从事激光复合表面改性与激光制造方面的研究。

E-mail: lizhihongok@163.com

导师简介: 姚建华(1965—),男,博士,教授,主要从事激光复合表面改性与激光制造方面的研究。

E-mail: laser@zjut.edu.cn(通信联系人)

LC coatings. The results show that a great number of cracks around the indentation in LC coating while no cracks is found in SLD coatings under 50 kg load indentation indicate that the crack propagation resistance of supersonic laser SLD coating is superior to that of LC coating.

Key words laser optics; metal-matrix composite; supersonic laser deposition; Stellite 6; WC; microstructure

OCIS codes 160.3900; 350.3390; 350.3850

1 引言

Stellite 6 硬质合金具有优异的综合性能,被广泛应用于制备耐蚀、耐磨等功能涂层^[1-4]。WC 具有高硬度、低热膨胀系数,且与钴基合金浸润性好,常加入 Stellite 6 合金中,形成既有金属强度和韧性又有陶瓷耐高温、耐腐蚀、耐磨损等优点的金属基复合涂层(MMC)^[5]。然而在高热输入的涂层制备过程中[如激光熔覆(LC)、热喷涂等],WC 极易分解、并溶解于金属基合金中。WC 分解出的碳元素与熔融金属中的氧反应,生成 CO、CO₂,使得涂层中极易产生气孔^[6];同时,WC 的溶解不仅降低了涂层中未熔 WC 含量和涂层耐磨性能,而且溶解的 WC 在金属基合金中形成碳化物,降低了金属基合金的韧性,增加了涂层开裂敏感性^[7-9]。

冷喷涂是一种低热量输入的涂层制备方法^[10],该技术借助高压气体携带粒子经 Laval 喷管产生超音速气固双相流,粒子在完全固态下撞击基板,发生剧烈的塑性变形而沉积形成涂层,是一种低热量输入的“冷加工过程”,可有效避免热喷涂和激光熔覆等“热加工过程”导致的热致不良影响^[11]。但是,由于冷喷涂涂层的制备完全依靠颗粒和基体的塑性变形,因此对材料的塑性有一定的要求,多适合喷涂塑性好的材料而难以实现硬质材料的有效沉积。针对冷喷涂技术的不足,英国剑桥大学的 O'Neill 课题组提出将冷喷涂与激光相结合的超音速激光沉积技术(SLD),该技术是在冷喷涂的过程中利用高功率激光同步加热喷涂颗粒和基体,使两者得到有效软化,从而大大降低颗粒沉积所需的临界速度^[12]。由于临界沉积速度的降低,可用价格低廉的氮气替代氦气,实现硬质材料的沉积,在降低成本的同时扩大了冷喷涂技术可沉积材料的范围。

基于超音速激光沉积的优点,利用该技术制备 WC/Stellite 6 金属基复合涂层,并将该涂层与激光熔覆涂层在宏观形貌、显微组织、界面稀释、未熔 WC 占比、涂层抗裂纹扩展性能等方面进行系统的对比研究。

2 试验材料和方法

2.1 超音速激光沉积系统

超音速激光沉积系统主要由冷喷涂系统、激光器(包括温度反馈控制系统)以及气源供应装置组成,系统示意图如图 1 所示^[13-14]。冷喷涂设备最高气体预热温度为 600 ℃,最高载气压力为 3 MPa,工作载气可为压缩空气、氮气或者氦气,其中压缩空气由空压机提供,氮气和氦气由高压气瓶组提供。激光器为光纤耦合的半导体激光器(LDF 4000-100 VGP, Laserline),其输出波长为 900~1040 nm,最大激光功率为 4.4 kW。

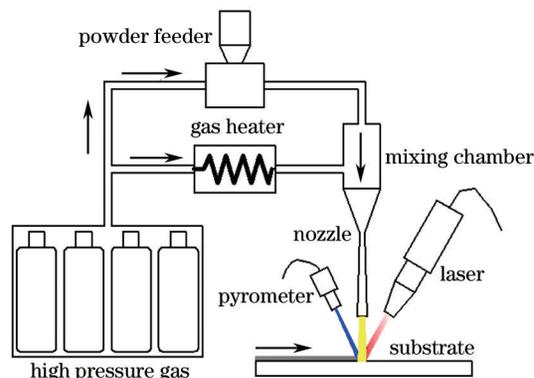


图1 超音速激光沉积原理图

Fig.1 Schematic diagram of SLD systems

在涂层制备过程中,预热后的主气与携带喷涂颗粒的载气在混合腔内充分混合后进入 Laval 喷嘴进行加速,加速后的气固两相流以较高的速度撞击激光同步加热的基体区域,颗粒通过剧烈的塑形变形与基体结合形成涂层。喷涂区域的温度可通过红外高温仪实时监控与调节。

2.2 试验材料

试验用的基体材料为45#钢,其尺寸为100 mm×60 mm×10 mm。喷涂和熔覆前需喷砂、脱脂预处理。金属基复合涂层的金属粘结相是Stellite 6合金粉末,粉末球形度好,颗粒内部具有枝晶结构,如图2所示,其化学成分的质量分数为:29%Cr、4%W、1.2%C、3%Ni、1.5%Mo、3%Fe、1.1%Si、1%Mn、质量分数小于1%的其他元素、余量为Co。陶瓷相是WC,激光熔覆采用的WC粉末粒径为45~106 μm,超音速激光沉积采用的WC粉末粒径为10~30 μm。综合考虑制备涂层的质量、经济性以及超音速激光沉积与激光熔覆两种工艺的有效对比,采用强化相WC与粘结相Stellite 6粉末配比为体积比3:7。

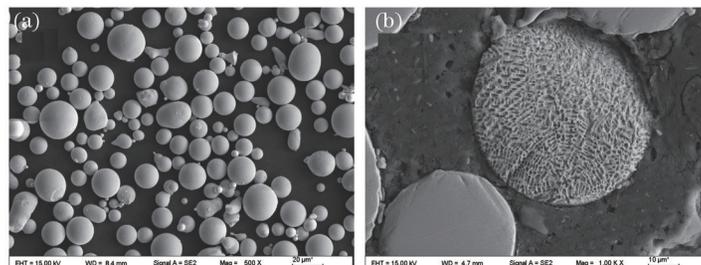


图2 Stellite 6粉末。(a) 微观形貌;(b) 内部结构

Fig.2 Stellite 6 powder. (a) Morphology; (b) microstructure

2.3 试验方法

冷喷气体采用氮气,气体压力为2~3 MPa,送粉率为30~50 g/min,激光加热温度为1100 ℃~1300 ℃,扫描速度为30~50 mm/s,喷涂距离为30~40 mm。激光熔覆WC/Stellite 6对比试验采用同一激光器,激光功率密度为 8.66×10^7 W/m²,扫描速度为10 mm/s,铺粉厚度为0.8 mm。采用型号为Axio Scope.A1的Zeiss金相显微镜观察涂层显微组织,并测量基材熔区截面积、熔覆层截面积,用于计算涂层几何稀释率,采用图像分析软件(IPP)测量截面未熔WC体积占比,均在5个不同截面区域测量后取平均值。采用Bruker Nano Xflash Detector 5010能谱仪(EDS)分析强化相与粘结相界面元素分布。采用HV-50 维氏硬度计测试两涂层的维氏硬度和涂层抗裂纹扩展性能,加载载荷为50 kg,加载时间为15 s。两涂层的平均硬度通过各计算5个测试点的平均值获得,并对比这些测试压痕形貌,评判各涂层抗裂纹扩展性能。

3 试验结果与分析

3.1 涂层截面宏观结构分析

图3所示为激光熔覆技术与超音速激光沉积技术制备的WC/Stellite 6复合涂层截面显微组织形貌。从图3(a)可看出,激光熔覆WC/Stellite 6涂层中存在大量气孔和少量未熔WC颗粒,且未熔WC颗粒大部分分布在涂层底部。这是因为激光熔覆技术需对粉末和基体加热熔化,形成熔池。WC颗粒在熔池中易分解,WC分解产生的碳元素与熔池中的氧反应形成CO或CO₂,在随后的快速凝固过程中,未能及时逸出的气体便残留在凝固的涂层中形成气孔^[6]。同时,WC的密度较45#钢的密度要大的多,易沉底于熔池中。底部偏聚的WC不仅对涂层表面难以起到保护作用,而且易造成应力集中,增加涂层开裂倾向^[15]。激光熔覆涂层平均几何稀释率为8.9%,基体元素对涂层的稀释,将改变涂层成分,影响涂层性能。

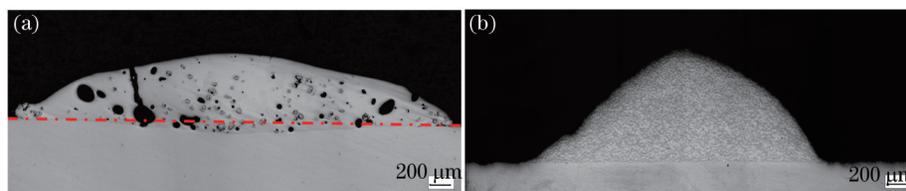


图3 (a)激光熔覆与(b)超音速激光沉积WC/Stellite 6涂层横截面组织形貌

Fig.3 Cross-sectional microstructure of WC/Stellite 6 coating prepared by (a) LC and (b) SLD

图3(b)所示的超音速激光沉积涂层致密,无气孔。WC均匀分布在涂层中,无沉底现象,涂层与基体间无宏观稀释区。这得益于超音速激光沉积技术的固态沉积特性。在超音速激光沉积过程中,颗粒飞行速度高,激光扫描速度快,大大缩短了WC颗粒与激光相互作用时间,同时激光加热温度通常设定为材料熔点

的30%~80%^[16],热输入低,这都保证了颗粒在沉积过程中保持固态,从而避免了WC颗粒的分解和溶解以及气孔的产生。虽然在超音速激光沉积涂层与基体间难以观察到宏观稀释区,但前期超音速激光沉积Stellite 6涂层分析测试表明超音速激光沉积技术中涂层与基体间存在元素的微量互渗,这种微量互渗既保证了扩散冶金结合,又不会过多的稀释涂层改变其性能^[11]。

采用图像分析软件测得超音速激光沉积涂层中的WC体积占比高达27.6%,大大高于激光熔覆涂层中WC含量(3.7%)。在相同的冷喷涂工艺条件下,颗粒经Laval喷嘴加速所得的速度随着颗粒尺寸的减小而增加,但过小的颗粒质量轻、惯性小,易受到高速气流冲击基体表面产生的冲击波的扰动而难以实现沉积。在本试验球磨混粉过程中,WC颗粒球磨细化,细化的WC颗粒经加速可获得更高的撞击速度,同时WC密度大,小尺寸WC颗粒也具有抗冲击波扰动能力,这都有利于WC颗粒的高效沉积,进而获得高WC占比的金属基复合涂层。由此可以看出,超音速激光沉积技术在制备包含WC这种温度敏感、高密度强化相的金属基复合涂层方面具有明显的优势。

3.2 涂层截面显微组织分析

图4所示为激光熔覆WC/Stellite 6复合涂层截面显微组织。从图4(a)可以看出,激光熔覆涂层组织不均匀[图4(a)],在涂层顶部WC颗粒附近[图4(b)]和远离WC颗粒处[图4(c)]以及底部WC富集处[图4(d)]的涂层组织均不相同。

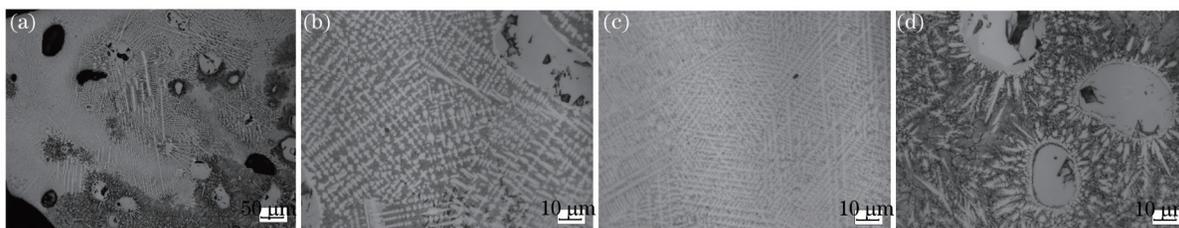


图4 激光熔覆涂层截面显微组织

Fig.4 Microstructure of WC/Stellite 6 coating prepared by LC

在金属基复合涂层中,粘结相通常起到提高涂层韧性和粘合强化相的作用。Stellite 6合金主要以较发达的 γ -Co枝晶为主,树枝晶间分布着层片状的共晶组织,具有优异的韧性^[17]。对比图4(b)、(c),发现靠近WC颗粒的Stellite 6合金组织中枝晶间共晶组织比例明显高于远离WC颗粒处的Stellite 6合金。当WC颗粒添加到Stellite 6熔体中,WC颗粒易溶解并溶入Stellite 6熔体,增加了熔体中碳和钨元素的浓度,使得熔体成分越来越靠近共晶点,枝晶的凝固区间变窄,凝固后枝晶间共晶体的比例增加。因此,大量碳化物以枝晶间共晶体的形式析出,并广泛分布于粘结相基体中,增加了粘结相基体的脆性^[8]。同时在WC颗粒附近,碳和钨元素的浓度很高,易形成过共晶组织^[15],如图4(d)所示,大量初晶碳化物分布在未熔WC颗粒附近,大大降低了粘结相的韧性。

图5所示为超音速激光沉积WC/Stellite 6复合涂层截面显微组织,涂层致密,WC分布均匀。图5(b)中Stellite 6颗粒内具有精细的枝晶组织。该组织与原始粉末[如图2(b)所示]完全一致,表明Stellite 6颗粒在整个制备过程中保持固态,内部组织无改变。图6为激光熔覆与超音速激光沉积WC/Stellite 6复合涂层钨元素EDS面扫描结果。对比表明,激光熔覆复合涂层中钨元素在粘结相中的含量高于其在超音速激光沉积复合涂层粘结相中的含量,这是由于在激光熔覆过程中WC颗粒会分解并溶入Stellite 6熔体,而在超音速激光沉

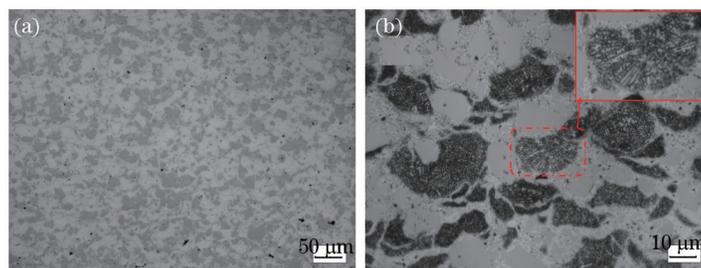


图5 超音速激光沉积涂层显微组织

Fig.5 Microstructure of WC/Stellite 6 coating prepared by SLD

积技术中,激光辐照仅仅是用于软化粉末和基体,降低临界沉积速度,进而拓展沉积材料的范围,并不会改变冷喷涂固态沉积的优势,因此不会出现WC颗粒分解溶入粘结相的现象。图7(a)、(b)为WC体积占比分别为30%、50%的超音速激光沉积WC/Stellite 6复合涂层着色探伤及其截面组织形貌,从图中可以看出涂层均无裂纹,且涂层沉积效率高,单层厚度可达1 mm以上。

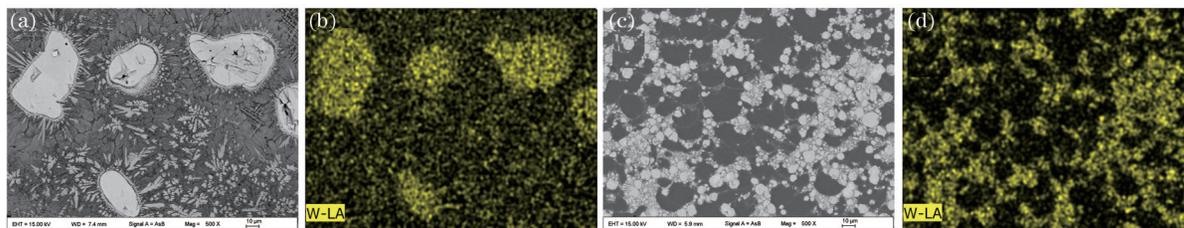


图6 (a)、(b)激光熔覆与(c)、(d)超音速激光沉积WC/Stellite 6复合涂层EDS面扫分析
Fig.6 EDS mapping analysis of WC/Stellite 6 coating prepared by (a)、(b)LC and (c)、(d)SLD

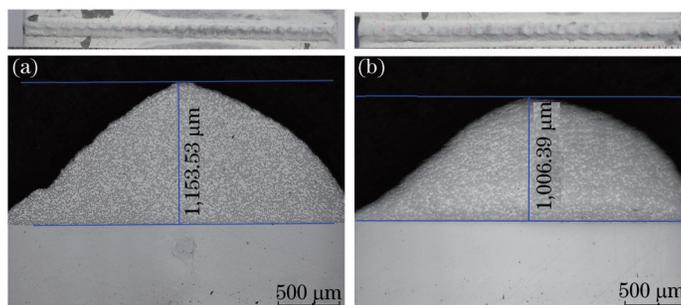


图7 超音速激光沉积单道WC/Stellite 6涂层着色探伤及截面组织形貌。(a) WC体积占比为30%; (b) WC体积占比为50%
Fig.7 Dye penetrating detection and cross-sectional microstructure of WC/Stellite 6 coating prepared by SLD. (a) 30%; (b) 50%

3.3 超音速激光沉积涂层中粘结相与强化相界面结合分析

图8(a)为超音速激光沉积涂层中WC颗粒与Stellite 6粘结相的结合形貌,其中右上角为方框区域的放大图。图8(b)为WC强化相与Stellite 6粘结相界面结合处形貌,箭头所示为EDS线扫描路径,扫描方向从WC强化相到Stellite 6粘结相。图8(c)为界面结合处EDS线扫描结果。从图8(a)中局部放大图发现,相比于喷涂前破碎WC颗粒的棱角分明,喷涂后涂层中WC颗粒边界呈现微小波浪状,这暗示着WC颗粒与粘结相Stellite 6间存在元素扩散。图8(b) SEM背散色照片显示,WC强化相与Stellite 6粘结相界面结合处存在一浅

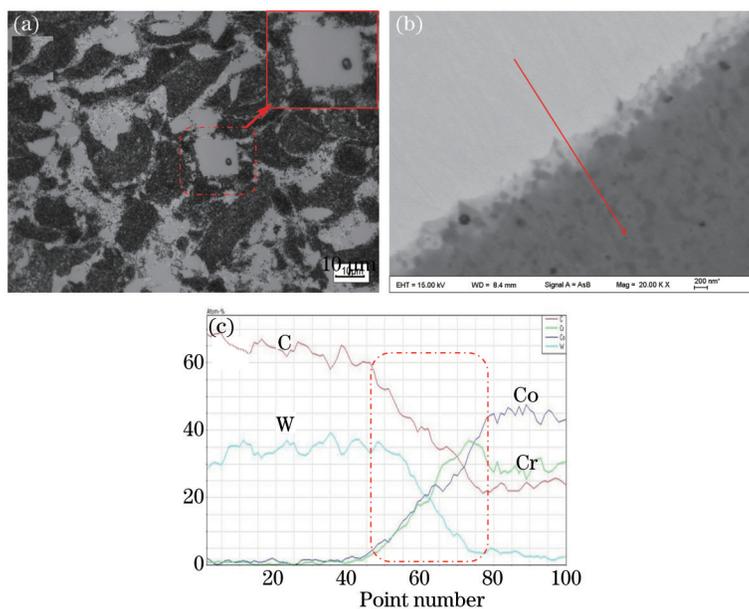


图8 超音速激光沉积涂层中WC与Stellite 6(a)、(b)结合界面及(c)EDS线扫描分析
Fig.8 (a)、(b) Interfacial bonding and (c) interfacial EDS analysis between WC and Stellite 6 particles in SLD coating

色层,该浅色区域有别于WC强化相高亮区域和Stellite 6粘结相暗色区域,表明结合处元素互渗混合形成了新的物质。图8(c)EDS线扫结果表明存在于WC颗粒中的钨、碳元素和存在Stellite 6粘结相中的钴、铬元素在界面处呈现过渡渐变现象,进一步表明增强相与粘结相中的元素在界面处存在互相渗透,能够实现两者间的扩散冶金结合,有助于提高粘结相与强化相间的结合强度,增强粘结相对强化相的粘合力。

单一冷喷涂技术通常难以获得冶金结合。这是因为颗粒局部区域的剧烈碰撞变形产生的热量有限,仅能使得该微区温度短时间高于低熔点材料(如Sn、Al、Zn等)的熔点,形成局部冶金结合^[18-19],因此,现有报道表明,冷喷涂中冶金结合仅出现在低熔点材料涂层中剧烈变形的局部区域。在超音速激光沉积技术中,激光辐照对碰撞区域的加热作用以及颗粒碰撞变形产生的热量使得碰撞区域温度大幅提高,出现元素互渗的可能,有利于提高颗粒与颗粒间结合强度。

值得注意的是,与激光熔覆中WC颗粒周围形成一圈脆性层不同,超音速激光沉积涂层中,强化相和粘结相仅仅在界面处存在元素的微量互渗,而在颗粒内部仍然保留原始颗粒的组织结构。这种界面处元素微量互渗,既巩固了粘结相对强化相的粘合力,又不会过多改变粘结相的组织结构和性能。

3.4 涂层抗裂纹扩展性能

采用HV-50维氏硬度计,测得具有更高WC含量的超音速激光沉积WC/Stellite 6涂层平均硬度为893HV₅₀,略高于激光熔覆WC/Stellite 6涂层的平均硬度(871HV₅₀)。这是因为超音速激光沉积技术的固态沉积特性保留了Stellite 6原始颗粒的优异韧性。在大载荷压头压入涂层时,处于均匀弥散分布的WC颗粒间的粘结相能起到良好的缓冲作用。这也进一步表明了超音速激光沉积技术在获得高强化相占比的金属基复合涂层的同时,仍能保留粘结相发挥提高涂层韧性的作用。

图9所示分别为激光熔覆和超音速激光沉积复合涂层在50 kg载荷下的典型维氏硬度压痕形貌。激光熔覆过程中,WC溶解于粘结相中,使其脆性增加,在大载荷情况下压痕周围出现放射性裂纹,如图9(a)所示。裂纹主要萌生于枝晶间共晶组织[如图9(a)方框处放大图]和未熔WC颗粒周边[如图9(a)中箭头所示],表明溶解的WC在粘结相合金中形成碳化物,降低了粘结相的韧性,增加了涂层开裂敏感性。与激光熔覆涂层不同,超音速激光沉积涂层无裂纹出现,如图9(b)所示。这也进一步证实超音速激光沉积技术固态沉积的优势保持了颗粒原始组织结构和韧性。在冷喷涂金属基复合涂层中,颗粒与颗粒界面通常被认为涂层中结合最薄弱的地方,压痕所致裂纹通常沿着该界面扩展延伸。在现有维氏硬度计最大载荷情况下,超音速激光沉积涂层无裂纹出现,表明涂层中颗粒与颗粒间,尤其是强化相与粘结相颗粒间具有牢固结合,这得益于激光辐照对沉积区域的加热作用,使得涂层中颗粒与颗粒间结合机理由冷喷涂的机械咬合为主转变为机械咬合与冶金结合共存。

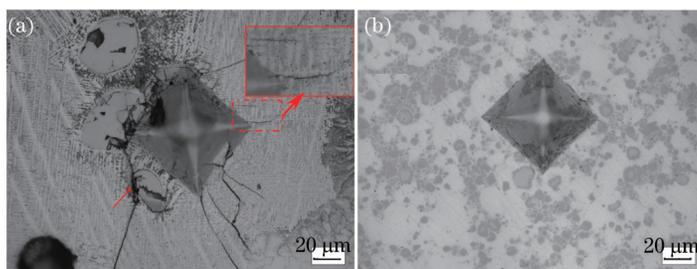


图9 (a)激光熔覆与(b)超音速激光沉积WC/Stellite 6涂层压痕形貌

Fig.9 Indentation morphology of WC/Stellite 6 coating prepared by (a) LC and (b) SLD

4 结 论

1) 采用超音速激光沉积技术成功制备了单一冷喷涂技术难以制备的硬质WC/Stellite 6金属基复合涂层。由于超音速激光沉积仍然保留了冷喷涂固态沉积的优势,能从根源上避免热加工过程中出现的WC分解与溶解,可获得致密、无气孔、WC分布均匀的金属基复合涂层。

2) 超音速激光沉积涂层中WC颗粒与Stellite 6颗粒界面结合处EDS线扫结果表明,在该界面处存在元素的微量互渗,这种界面处元素微量互渗,既巩固了粘结相对强化相的粘合力,又不会改变粘结相的韧性。

3) 50 kg大载荷维氏压痕形貌对比表明,具有更高未熔 WC 占比的超音速激光沉积涂层抗裂纹扩展能力优于激光熔覆涂层。这是因为具有固态沉积优势的超音速激光沉积技术最大程度地保留原始材料的组织结构与特性。

4) 得益于激光辐照对沉积区域的加热作用,超音速激光沉积涂层中颗粒与颗粒间结合机理由冷喷涂的机械咬合为主转变为机械咬合与冶金结合共存。

参 考 文 献

- 1 Liu Yuzhen, Gui Yewei. The properties and applications of stellite alloys[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1992, 16(5): 1-6.
刘玉珍, 桂业伟. 司太立合金的性能及应用 I [J]. 机械工程材料, 1992, 16(5): 1-6.
- 2 Liu Yuzhen, Gui Yewei. The properties and applications of stellite alloys II[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1992, 16(6): 1-5, 47.
刘玉珍, 桂业伟. 司太立合金的性能及应用 II [J]. 机械工程材料, 1992, 16(6): 1-5, 47.
- 3 Zhang Qunli, Xu Weixian, Yao Jianhua, *et al.*. Microstructure and high temperature wear resistance performance of Co/Mesoporous WC laser composite coating[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0503002.
张群莉, 徐卫仙, 姚建华, 等. Co/介孔 WC 激光复合涂层的显微结构与高温磨损性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0503002.
- 4 Zhao Wenyu, Lu Fenggui, Li Zhuguo, *et al.*. Study on high-cycle fatigue behavior of laser-cladding stellite6 on 17-4PH stainless steel [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003014.
赵文雨, 芦凤桂, 李铸国, 等. 17-4 PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层高周疲劳行为研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003014.
- 5 Bartkowski D, Młynarczyk A, Piasecki A, *et al.*. Microstructure, microhardness and corrosion resistance of stellite-6 coatings reinforced with WC particles using laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 68: 191-201.
- 6 Xiong Yun, Wang Yong, Zhang Kaifeng, *et al.*. Microstructures and properties of laser cladding stellite6/WC[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(1): 37-40.
熊云, 王勇, 张开峰, 等. 激光熔覆 Stellite 6/WC 的组织与性能研究[J]. 中国表面工程, 2008, 21(1): 37-40.
- 7 Janicki D. High power direct diode laser cladding of stellite 6+ WC coatings[J]. MTM Virtual Journal, 2012(7): 57-61.
- 8 Zhong Minlin, Liu Wenjin, Chen Yanxia, *et al.*. Laser Ccladding Stellite 6+ WC[J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 2001, 22(2): 27-31.9
钟敏霖, 刘文今, 陈艳霞, 等. 斯太立合金加 WC 激光熔覆[J]. 材料热处理学报, 2001, 22(2): 27-31.
- 9 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Comparative research on cracking tendency in powder feeding laser cladding stellite and NiCrSiB alloys[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(11): 1031-1036.
钟敏霖, 刘文今. Stellite 和 NiCrSiB 合金激光送粉熔覆裂纹倾向的比较研究[J]. 中国激光, 2002, 29(11): 1031-1036.
- 10 Zhou Xianglin, Zhang Jishan, Wu Xiangkun. Advanced Cold Spray Technology and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 2-5.
周香林, 张济山, 巫湘坤. 先进冷喷涂技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 2-5.
- 11 Li Zhihong, Yang Lijing, Zhang Qunli, *et al.*. Comparative research of stellite 6 coatings prepared by supersonic laser deposition and laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0503008.
李祉宏, 杨理京, 张群莉, 等. 超音速激光沉积与激光熔覆 Stellite 6 涂层的对比研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503008.
- 12 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.
- 13 Yang Lijing, Li Zhihong, Li Bo, *et al.*. Microstructure and deposition mechanism of Ni60 coatings prepared by supersonic laser deposition [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0306005.
杨理京, 李祉宏, 李波, 等. 超音速激光沉积法制备 Ni60 涂层的显微组织及沉积机理[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0306005.
- 14 Yao J H, Yang L J, Li B, *et al.*. Beneficial effects of laser irradiation on the deposition process of diamond/Ni60 composite coating with cold spray[J]. Applied Surface Science, 2015, 330: 300-308.
- 15 Huang Xue. Research on Performance of Laser Cladding Mixed Powder with Co-based Alloy and WC[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
黄雪. 激光熔覆钴基合金加碳化钨混合粉末熔覆层性能的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- 16 Olakanmi E O, Doyoyo M. Laser-assisted cold-sprayed corrosion-and wear-resistant coatings: a review[J]. Thermal Spray Technol, 2014, 23(5): 765-785.

- 17 Li Mingxi, He Yizhu, Sun Guoxiong. Microstructure and crystallization direction of laser cladding Co-based alloy[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2002, 32(6): 932-935.
李明喜, 何宜柱, 孙国雄. Co基合金激光熔覆层组织及近表面结晶方向[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2002, 32(6): 932-935.
- 18 Li W Y, Li C J, Yang G J. Effect of impact-induced melting on interface microstructure and bonding of cold-sprayed zinc coating[J]. Applied Surface Science, 2010, 257(5): 1516-1523.
- 19 Li W Y, Zhang C, Guo X, *et al.*. Study on impact fusion at particle interfaces and its effect on coating microstructure in cold spraying[J]. Applied Surface Science, 2007, 254(2): 517-526.

栏目编辑: 张浩佳