

超音速激光沉积法制备 Ni60 涂层的显微组织及沉积机理

杨理京^{1,2} 李祉宏^{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)是一种将激光辐照与冷喷涂相结合的新型涂层制备工艺,因其结合了激光技术和冷喷涂技术的优势,能够沉积冷喷涂难以沉积或不可能沉积的材料。利用超音速激光沉积技术在中碳钢基材上成功制备了 Ni60 涂层,并采用扫描电子显微镜(SEM)、能谱分析(EDS)、X射线衍射(XRD)、显微硬度测试等手段对涂层的沉积效率、显微组织成分、结合机理以及显微硬度进行了表征分析。研究表明:随着激光加热温度升高,涂层沉积厚度增加,表面球型凹坑逐渐减少;Ni60 涂层保持了冷喷涂固态沉积的特征,显微组织结构以及相组成与原始粉末相一致;激光加热导致 Ni60 沉积层与基体间同时存在机械咬合与冶金结合;涂层的平均显微硬度为 867 Hv0.3,比原始粉末提高 8%~10%,沉积过程产生了冷作硬化。

关键词 材料;超音速激光沉积;Ni60 涂层;固态沉积;冷作硬化

中图分类号 TG146.1; TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0306005

Microstructure and Deposition Mechanism of Ni60 Coatings Prepared by Supersonic Laser Deposition

Yang Lijing^{1,2} Li Zhihong^{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 As a new composite spraying technology combining the advantages of laser and cold spray, supersonic laser deposition (SLD) is able to deposit materials which are difficult or impossible to deposit by cold spray technique alone. Ni60 coatings are successfully fabricated on the surface of medium carbon steel by SLD. The deposition efficiency, bonding mechanism, microstructure, composition and micro-hardness are characterized by scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), X-ray diffraction (XRD) and micro-hardness tester, respectively. The results show that the thickness of deposited layer significantly increases with the rising of deposition temperature, the spherical indentation on surface decreases. Compared with Ni60 particles, the Ni60 deposited coating preserves the status of solid-state deposition, and has the same microstructure and phase with powder. The bonding mechanism is mainly mechanical interlocking and metallurgical bonding under laser irradiation. Average micro-hardness of the deposited coating is 867 Hv0.3, which is 8%~10% higher than that of the original powder due to cold hardening.

Key words materials; supersonic laser deposition; Ni60 deposited coating; solid-state deposition; cold hardening

OCIS codes 160.3900; 350.3390; 350.3850

收稿日期: 2014-10-14; 收到修改稿日期: 2014-10-27

基金项目: 浙江省重大科技专项重点工业项目(2012C11001)、浙江省公益技术研究工业项目(2014C31122)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201307)

作者简介: 杨理京(1984—),男,博士研究生,主要从事激光复合表面改性技术方面的研究。E-mail: yanglijing84@126.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技术方面的研究。

E-mail: laser@zjut.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引言

冷喷涂亦称为冷气动力喷涂(CGDS),是一种有别于传统热喷涂的新型喷涂技术^[1]。该技术基于空气动力学与高速碰撞动力学原理,利用高速气流(300~1200 m/s)将粉末颗粒(1~50 μm)送入拉瓦尔喷嘴加速,在完全固态的形式下高速撞击基体,产生较大的塑性变形而沉积于基体表面形成涂层^[2]。相比热喷涂和激光熔覆,冷喷涂技术由于具有低热输入的特性,对基材与粉末材料的热影响小,可以避免喷涂粉末发生氧化、烧损、相变、偏析、残余应力以及晶粒粗大等现象,制备涂层的化学成分以及显微组织结构可与原材料保持一致,因此该技术在制备温度敏感材料(如纳米材料^[3]、非晶材料^[4])、氧化敏感材料(如Cu^[5]、Ti^[6])以及相变敏感材料(如WC-Co^[7])的涂层方面具有明显优势。虽然冷喷涂在保持涂层材料原始成分、减少热影响等方面具有独特的优势,但由于其涂层的沉积完全依靠喷涂颗粒的塑性变形,因此目前文献报道的冷喷涂涂层主要以低硬度材料为主^[3-7]。利用冷喷涂技术沉积硬度较高的涂层材料时,必须以氦气为工作载气,成本较高,而且沉积涂层的结合强度较低,这些现状极大限制了该技术的推广应用。

针对冷喷涂技术的不足,英国剑桥大学 William O'Neill 课题组提出了超音速激光沉积技术(SLD)^[8-9],将激光束同步引入冷喷涂加工过程,利用激光辐照对喷涂颗粒、基材或两者同时加热软化,瞬间调节和改善材料的力学性能和碰撞沉积状态,从而提高低压冷喷涂层的厚度、沉积效率、致密度和结合强度,进而提高涂层的使用性能。此外,由于激光加热对喷涂颗粒和基材的软化作用,喷涂颗粒的临界沉积速度降至原来的一半,因此可用价格低廉的氮气替代昂贵的氦气,实现高硬度材料的沉积,在降低成本的同时拓宽了冷喷涂沉积材料的范围。剑桥大学利用超音速激光沉积技术实现了Ti、Cu、Al、Stellite 6等金属材料的沉积,并对沉积涂层的组织成分、致密度、耐磨性等进行了研究^[8-10],证明了该技术的可行性和良好的应用潜力。目前,有很多研究者通过实验和数值模拟的方法对冷喷涂的沉积机理进行了研究^[11-14],冷喷涂的沉积机理主要有物理结合、机械咬合、冶金结合、化学结合等,但其实际结合机制仍未能达成共识。超音速激光沉积是基于冷喷涂的原理而发展的,就目前的研究而言,也没有研究者提出有关超音速激光沉积的结合机制。

Ni60是一种低熔点、流动性好、脱氧造渣能力强的镍基自熔性合金粉末,常用于制备耐热、耐蚀、抗氧化和抗高温磨损涂层^[15-17]。传统制备Ni60涂层的方法主要为一些高热输入加工过程,如高速火焰喷涂、等离子喷涂、喷焊工艺、激光熔覆等^[18-23]。这些技术制备的Ni60涂层存在涂层晶粒烧损、氧化严重、涂层组织粗大、致密度低、结合力差、残余应力大、稀释率高等问题。由于超音速激光沉积技术具有冷喷涂技术固态沉积的特征,通过引入激光可改进冷喷涂技术在高硬度合金粉末沉积中涂层结合强度低、涂层致密度差等不足,因此可望实现高硬Ni60涂层的制备,并克服传统高热输入加工过程存在的问题。

本文利用超音速激光沉积技术在45钢基体上实现了Ni60涂层的有效沉积,并针对激光同步辐照对沉积层的表面特性、沉积厚度、显微组织、相成分、显微硬度以及涂层结合机理等的影响进行了分析和研究。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

基体材料选取热处理态45钢,试样尺寸为100 mm×50 mm×10 mm。沉积粉末材料为镍基自熔性合金粉末Ni60,其显微形貌和化学成分分别如图1和表1所示,粉末呈球形,颗粒直径为1~35 μm 。

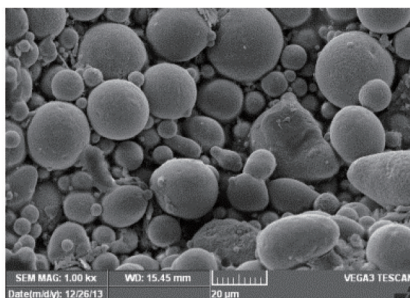


图1 Ni60粉末的显微形貌

Fig.1 Microscopic image of Ni60 powder

表1 Ni60粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ni60 powder

| Element | C | Cr | Si | B | Fe | Ni |
|----------------------------|-----|----|-----|-----|------|------|
| Content (mass fraction) /% | 0.5 | 18 | 4.5 | 3.0 | 15.0 | Bal. |

2.2 试样制备与分析方法

实验所用的超音速激光沉积系统如图2所示,该系统主要包括激光系统、冷喷涂系统和温度反馈系统。激光器选用额定功率为4 kW的半导体激光器(Laserline LDF4.000),冷喷涂采用自主研制的冷喷涂系统;在加工过程中激光光斑与喷涂粉斑保持重合并通过机械手臂控制同步运动。沉积温度可通过红外高温仪实时监测,并通过闭环调控激光功率来保持恒定。在氮气压力为2 MPa、喷涂距离为20 mm、扫描速度为30 mm/s的条件下改变沉积温度制备不同的Ni60涂层,1~5号试样的沉积温度分别为960 ℃、980 ℃、1000 ℃、1020 ℃、1040 ℃。

利用扫描电子显微镜(SEM, SIGMA HV-01-043, Carl Zeiss)对不同工艺参数制备的Ni60沉积涂层的表面形貌特征及涂层厚度进行表征分析,优化工艺;针对最优工艺参数下制备的Ni60涂层,利用SEM对其涂层截面的显微组织特征和界面结合状态进行分析,利用X射线衍射(XRD, D8 Advance, Bruker)和能谱分析(EDS, Nano Xflash Detector 5010, Bruker)对涂层的化学成分进行研究,利用维氏显微硬度计(SHIMADZU)对涂层显微硬度进行表征。

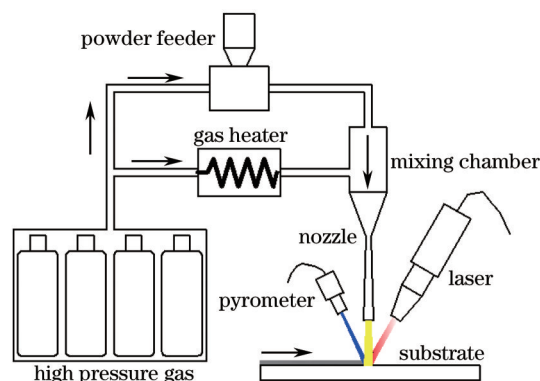


图2 超音速激光沉积原理图

Fig.2 Schematic diagram of SLD system

3 实验结果与分析

3.1 沉积层宏观形貌

图3是在氮气压力、预热温度、扫描速度以及喷涂距离等工艺参数不变的情况下,在960 ℃~1040 ℃范围内改变沉积温度得到的Ni60沉积层表面形貌和横截面形貌,图3(a1)为表面形貌图,图3(a2)为截面形貌图。从图3(a1)中可以观察到不同沉积温度所制备的Ni60涂层表面均有颗粒相互撞击发生塑性变形堆积形成的球形凹坑,这与之前报道的超音速激光沉积Stellite 6涂层的表面形貌特征相一致^[24]。如图3(a1)、(b1)所示,试样的表面球形凹坑较多,且伴有明显的起伏现象,这表明Ni60颗粒在该沉积温度下(960 ℃和980 ℃)已开始软化,塑性变形能力增强,在涂层沉积过程中,软化的颗粒相互碰撞挤压从而形成了球形凹坑和起伏。随着沉积温度的升高(1000 ℃和1020 ℃),沉积层的表面球形凹坑没有明显减少,但沉积层表面起伏现象明显减弱,如图3(c1)、(d1)所示。当沉积温度进一步提高至1040 ℃时,沉积层表面的球形凹坑和起伏均明显减少,如图3(e1)所示。这说明当激光加热温度逐渐升高时,激光不仅对Ni60颗粒有软化作用,同时会导致沉积层表面的微熔现象,熔化的颗粒流动性更好,因此表面凹坑和起伏逐渐减弱,这与Danlos等^[25]报道的利用激光消融技术改善冷喷涂涂层表面形貌相类似。利用超景深三维显微镜(VHX-5000, KEYENCE)对960 ℃~1040 ℃沉积温度下制备的5个涂层表面进行粗糙度测试,结果分别为46.36、41.65、37.47、33.24、29.51 μm,说明随着沉积温度的升高涂层表面粗糙度降低,这进一步证明激光辐照的确有助于改善沉积涂层表面形貌。

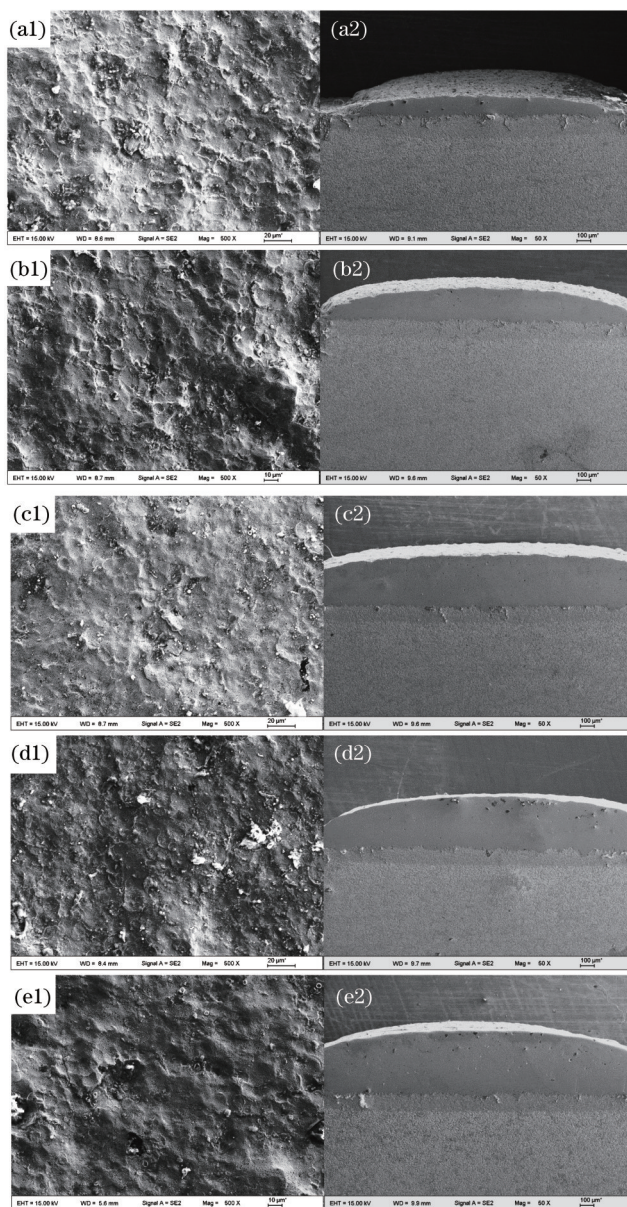


图3 不同沉积温度下制备的Ni60沉积层表面和截面形貌。(a1)(a2) 960 °C; (b1)(b2) 980 °C; (c1)(c2) 1000 °C; (d1)(d2) 1020 °C; (e1)(e2) 1040 °C

Fig.3 Surface and cross-section SEM image of SLD-Ni60 coatings at different deposition temperatures. (a1)(a2) 960 °C; (b1)(b2) 980 °C; (c1)(c2) 1000 °C; (d1)(d2) 1020 °C; (e1)(e2) 1040 °C

从图3(a2)~(e2)不同沉积温度制备的Ni60涂层的截面形貌可以看出,沉积层的厚度随着沉积温度的提高逐渐增加。利用SEM自带图像分析软件测得涂层的峰值厚度随着沉积温度从低到高依次为141、249、377、386和467 μm,且沉积层厚度增加明显,如图4所示。在冷喷涂实验中,喷涂粉末的颗粒尺寸在10~50 μm之间,尺寸不一的颗粒在冷喷涂喷嘴中的加速效果不一样,因此在碰撞基材之前具有不同的撞击速度,只有超过临界沉积速度的颗粒才能有效沉积形成涂层。在超音速激光沉积过程中,激光加热作用软化颗粒并改变其塑性变形能力,降低其临界沉积速度,从而增加能有效沉积的颗粒比例,最终实现涂层沉积效率的提高。本实验中,当激光加热温度为960 °C时,Ni60颗粒虽然得到了一定软化,但只有那些尺寸较小的颗粒(其撞击速度超过了临界沉积速度)实现了有效沉积。当激光加热温度升至980 °C时,Ni60颗粒得到了进一步软化,其临界沉积速度继续降低,因此有更多颗粒(小尺寸颗粒及部分大尺寸颗粒)的撞击速度超过了临界沉积速度,实现了有效沉积,表现为沉积层厚度的增加。当激光加热温度继续升高时,这种效果愈加显著。特别是激光加热温度为1040 °C时,沉积温度接近Ni60合金的熔点,激光对颗粒的软化效果更显著,绝大部分颗

粒更易发生绝热剪切失稳而沉积,再加上少量直径较小 Ni60 颗粒的表面微熔,两者的共同作用进一步导致涂层厚度突增。

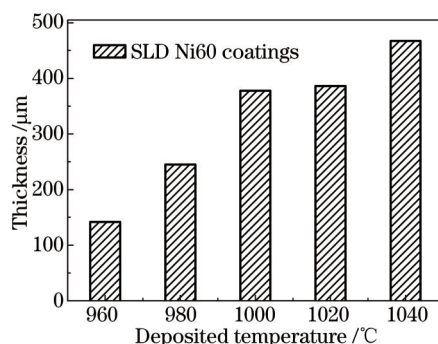


图4 Ni60涂层厚度随沉积温度升高的变化

Fig.4 Variation in Ni60 coating thickness with deposition temperature

3.2 涂层显微组织与相分析

3.2.1 涂层显微组织分析

图 5(a)是原始 Ni60 粉末颗粒的显微组织,图 5(b)是在 1040 °C 的沉积温度下制备的超音速激光沉积 Ni60 涂层的显微组织。由图 5 可以看出沉积层的显微组织和原始粉末颗粒相似,属于典型的镍基合金铸态组织,这与冷喷涂技术固态沉积的特征相符,证明超音速激光沉积技术同样能够在不改变原始粉末组织的情况下使颗粒发生塑性变形沉积形成涂层。此外,从图 5(b)可以明显看出,涂层中含有变形的颗粒以及未变形的球状原始粉末颗粒,同时在颗粒之间出现较粗的铸态组织,这是由于激光加热造成 Ni60 颗粒的表面微熔,微熔的 Ni60 颗粒表面在随后的冷却过程中形成粗大组织。这种颗粒表面的微熔有助于涂层中颗粒之间形成冶金结合,提高涂层内部颗粒间的结合力以及致密度。

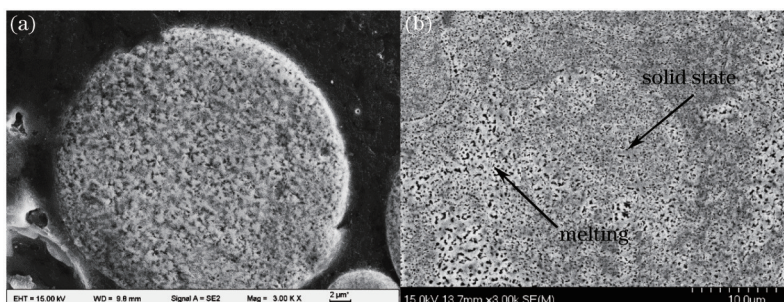


图 5 (a) 原始 Ni60 粉末颗粒的显微组织; (b) 超音速激光沉积 Ni60 涂层的显微组织

Fig.5 Microstructures of (a) Ni60 powder and (b) Ni60 coating deposited by SLD

3.2.2 涂层的相分析

图 6 所示为原始 Ni60 粉末和超音速激光沉积 Ni60 涂层的 X 射线衍射图谱。从 XRD 衍射峰的角度及峰强能够看出,沉积涂层的物相与原始粉末的相组成基本一致,同时也能看到沉积涂层的衍射峰较原始粉末有宽化现象,表明涂层中的 Ni60 颗粒存在晶格畸变。超音速激光沉积 Ni60 涂层的物相主要包括 Ni、FeNi 固溶体和 Cr_mC_n 、CrB、 Ni_3Si_2 、FeB 等金属间化合物,与原始粉末相基本一致;激光加热作用促使更多 FeB 相的产生,其中 Cr_mC_n 、CrB、Fe₃B、 Ni_3Si_2 是典型的 Ni60 合金的硬化相, Cr_mC_n 为主要强化相,通常包括 Cr_7C_3 和 $Cr_{23}C_7$ 两种。XRD 图谱分析表明,超音速激光沉积过程中激光的引入没有造成涂层材料相组成的改变,保持了冷喷涂技术固态沉积的特征,实现了高硬度 Ni60 合金粉末的固态有效沉积。

3.3 涂层结合机理分析

图 7 为超音速激光沉积 Ni60 涂层与基体的界面结合情况。从图 7(a)可以看出在激光作用下冷喷涂 Ni60 涂层与基体结合良好,涂层与基体界面结合处呈现明显的机械咬合状态。对图 7(a)中虚线方框所示的结合界面进行局部放大分析,发现涂层与基体结合部位发生明显的卷曲和漩涡状塑性流变,如图 7(b)、(c)所示,这与 Grujicic 等^[13]提出的微米尺度的机械咬合是冷喷涂涂层主要形成机制的研究结论相一致。这种塑性流变

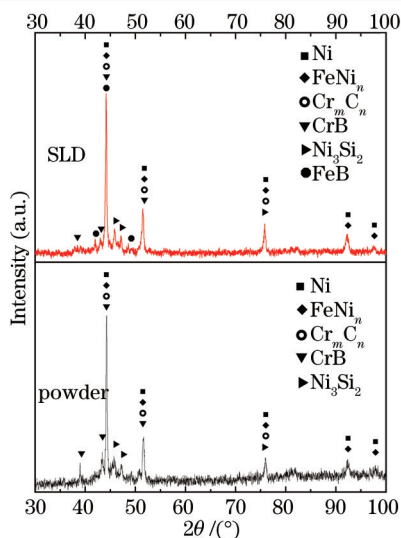


图6 超音速激光沉积Ni60涂层与Ni60原始粉末的XRD图谱

Fig.6 XRD patterns of SLD-deposited Ni60 coating and Ni60 feedstock

的发生主要是由于Ni60颗粒和基体材料在激光加热作用下得到有效软化,高速碰撞基体过程中,接触压力极高,在这种极端高压和高应力作用下,二者的界面材料发生绝热剪切失稳,从而引起Kelvin-Helmholtz效应,材料像粘性流体一样发生流变变形,在流变过程中界面材料流变速度不一致,产生如图7(b)、(c)所示的微米尺度卷曲和漩涡,材料混合互锁,从而形成良好的界面结合。

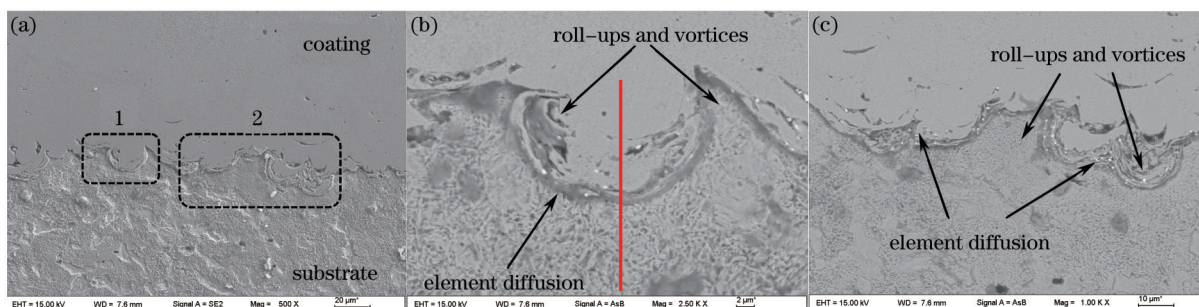


图7 超音速激光沉积Ni60涂层结合界面分析。(a)涂层/基体界面结合区;(b)图7(a)中区域1的放大图;(c)图7(a)中区域2的放大图

Fig.7 Analysis of interfacial bonding of SLD-deposited Ni60 coating. (a) Coating/substrate bonding zone; (b) amplification of highlighted area No. 1 in Fig. 7(a); (c) amplification of highlighted area No. 2 in Fig. 7(a)

对图7(b)中的涂层/基体结合界面沿红线所示方向进行EDS线扫描测试,结果如图8所示。从图8中可以看出,在涂层与基体界面结合处,Fe、Ni、Cr、Si元素在涂层与基体结合界面处存在渐变现象,表明激光加热不但能促进界面材料发生绝热剪切失稳,同时还能促进涂层材料与基体材料的元素扩散过程,这种元素互渗可以实现涂层与基体的冶金结合,有助于提高沉积涂层与基体的结合强度。以上结果表明,超音速激光沉积涂层

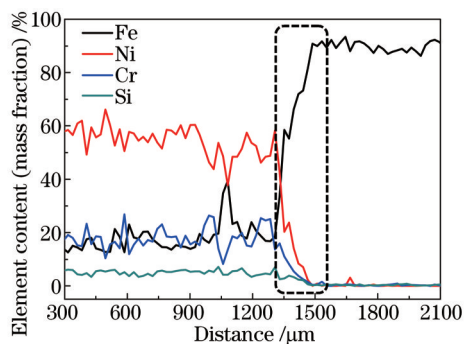


图8 涂层/基体结合界面EDS结果

Fig.8 EDS result of coating/substrate interface

由于激光加热作用,涂层/基体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。

3.4 显微硬度分析

图9为超音速激光沉积Ni60涂层沿层深方向的显微硬度分布曲线,以结合区(BZ)为沉积层与基体的界限,从沉积层开始自上而下测试,压痕间隔为100 μm。由图9可以看出,Ni60沉积层显微硬度的分布曲线呈现3个明显区域,分别为沉积层、热影响区(HAZ)和基体,沉积层的平均硬度为867 Hv0.3(约为66 HRC),Ni60合金粉的硬度一般为58~62 HRC,因此SLD沉积层的显微硬度较原始粉末提高了8%~10%。超音速激光沉积Ni60涂层显微硬度值升高的主要原因是,超音速激光沉积过程中,高速飞行颗粒持续撞击基体和已沉积涂层,使涂层中的内应力和晶界高密度位错增加,导致涂层产生冷作硬化,这也是冷喷涂技术的特征之一^[26]。图6中X射线衍射峰半峰全宽的宽化是涂层中材料晶格畸变与位错密度增加的综合反映。

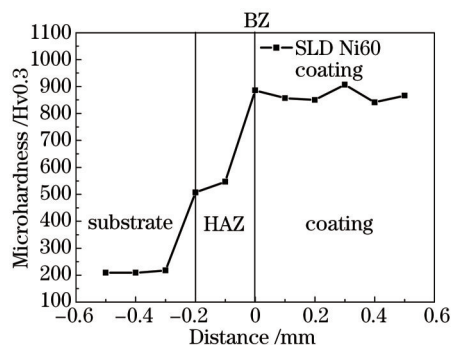


图9 超音速激光沉积Ni60涂层的显微硬度曲线

Fig.9 Micro-hardness curve of Ni60 coating prepared by SLD

4 结 论

超音速激光沉积法制备的Ni60涂层表面有明显的球形凹坑和起伏,起伏随沉积温度的升高逐渐消失,涂层厚度随沉积温度的升高而增加;Ni60沉积层的显微组织特征和相组成与原始Ni60颗粒一致;激光加热促进了Ni60沉积层与基体结合界面处产生微米尺度卷曲和漩涡状混合,且界面处伴有元素扩散现象;Ni60沉积层的平均显微硬度为867 Hv0.3(约66 HRC),相比原始粉末提高了8%~10%。以上结果表明:超音速激光沉积技术保持了冷喷涂固态沉积的特征,激光加热能促进沉积涂层与基体间出现机械咬合和冶金结合,同时沉积过程中高速飞行颗粒持续撞击基体和已沉积涂层使涂层产生冷作硬化,最终利用超音速激光沉积技术在45钢基体上实现Ni60涂层的制备。

参 考 文 献

- 1 Zhou Xianglin, Zhang Jishan, Wu Xiangkun, *et al.*. Advanced Cold Spraying Technology and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- 2 V K Champagne. The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications[M]. New York: CRC Press, 2007.
- 3 H T Wang, C J Li, G J Yang, *et al.*. Effect of heat treatment on the microstructure and property of cold-sprayed nanostructured FeAl/Al₂O₃ intermetallic composite coating[J]. Vacuum, 2008, 83(1): 146-152.
- 4 X T Luo, G J Yang, C J Li, *et al.*. High strain rate induced localized amorphization in cubic BN/NiCrAl nanocomposite through high velocity impact[J]. Scripta Materialia, 2011, 65(7): 581-584.
- 5 P S Phani, V Vishnukanthan, G Sundararajan. Effect of heat treatment on properties of cold sprayed nanocrystalline copper alumina coatings[J]. Acta Materialia, 2007, 55(14): 4741-4751.
- 6 Huang Chunjie, Li Wenya, Yu Min, *et al.*. Investigation on particles reinforced titanium matrix composite coating fabricated by cold spraying[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, (4): 1-5.
- 7 黄春杰,李文亚,余敏,等.冷喷涂制备颗粒增强钛基复合材料涂层研究[J].材料工程,2013,(4):1-5.
- 7 R S Lima, J Karthikeyan, C M Kay, *et al.*. Microstructural characteristics of cold-sprayed nanostructured WC-Co coatings[J]. Thin Solid Films, 2002, 416: 129-135.

- 8 M Bray, A Cockburn, W O'Neill. The laser-assisted cold spray process and deposited characterization[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(19): 2851-2857.
- 9 A Cockburn, M Bray, W O'Neill. The laser-assisted cold spray process[J]. The Laser User, 2008, 53: 30-31.
- 10 R Lupoi, A Cockburn, C Bryan, *et al.*. Hardfacing steel with nanostructured coatings of Stellite-6 by supersonic laser deposition[J]. Light: Science & Applications, 2012, 1: e10.
- 11 H Assadi, T Stoltenhoff, H Kreye. Bonding mechanism in cold gas spraying[J]. Acta Materialia, 2003, 51(15): 4379-4394.
- 12 W Y Li, H L Liao, C J Li, *et al.*. On high velocity impact of micro-sized metallic particles in cold spraying[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(5): 2852-2862.
- 13 M Grujicic, J R Saylor, D E Beasley, *et al.*. Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process[J]. Applied Surface Science, 2003, 219(3-4): 211-227.
- 14 W Y Li, C J Li, Y Y Wang, *et al.*. Effect of parameters of cold sprayed Cu particles on its impacting behavior[J]. Acta Metall, 2005, 41(3): 282-286.
- 15 Wang Chuanqi, Liu Hongxi, Zhou Rong, *et al.*. Effect of tempering on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based reinforced particles composite coating[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1003006.
王传琦, 刘洪喜, 周 荣, 等. 回火处理对激光熔覆颗粒增强镍基复合涂层组织及耐磨性的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1003006.
- 16 Yuan Qinglong, Feng Xudong, Cao Jingjing, *et al.*. Research on microstructure of Ni-based alloy coating by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2116-2120.
袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆镍基合金涂层微观组织研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2116-2120.
- 17 Guo Shirui, Chen Zhijun, Zhang Qunli, *et al.*. Effects of different pressures on laser cladding special powder prepared by gas atomization[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603001.
郭士锐, 陈智军, 张群莉, 等. 不同气压对雾化激光熔覆专用合金粉末的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603001.
- 18 Li Jianing, Gong Shuili, Wang Xichang, *et al.*. Physical and surface performance of laser clad Ni based coating on a TA15-2 alloy [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103008.
李嘉宁, 巩水利, 王西昌, 等. TA15-2合金表面激光熔覆Ni基涂层物理与表面性能[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103008.
- 19 Li Meiyang, Han Bin, Wang Yong, *et al.*. Effects of B₄C and Ti contents on structure and property of laser cladding Fe-Cr-Ni-Si alloy coatings[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203008.
李美艳, 韩 彬, 王 勇, 等. B₄C和Ti含量对激光熔覆Fe-Cr-Ni-Si系合金涂层结构及性能影响[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203008.
- 20 Q Ming, L C Lim, Z D Chen. Laser cladding of nickel-based hardfacing alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 106(2-3): 174-182.
- 21 J G La Barbera-Sosa, Y Y Santana, M H Staia, *et al.*. Microstructural and mechanical characterization of Ni-based thermal spray coatings deposited by HVOF[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(18): 4552-4559.
- 22 S Hong, Y P Wu, G Y Li, *et al.*. Microstructural characteristics of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) sprayed nickel-based alloy coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 581: 398-403.
- 23 H Singh, D Puri, S Prakash. Some studies on hot corrosion performance of plasma sprayed coatings on a Fe-based superalloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 192(1): 27-38.
- 24 Luo Fang, Kong Fanzhi, William O'Neill, *et al.*. Effect of laser heating temperature on coating characteristics of Stellite 6 deposited by cold spray[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(7): 840-846.
骆 芳, 孔凡志, 威廉·欧尼尔, 等. 激光加热温度对冷喷Stellite 6合金沉积层表面特性的影响[J]. 兵工学报, 2012, 33(7): 840-846.
- 25 Y Danlos, S Costil, X Guo, *et al.*. Ablation laser and heating laser combined to cold spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(4): 1055-1059.
- 26 W Li, C Huang, M Yu, *et al.*. Investigation on mechanical property of annealed copper particles and cold sprayed copper coating by a micro-indentation testing[J]. Materials & Design, 2013, 46: 219-226.

栏目编辑: 吴秀娟