

文章编号: 0258-7025(2010)04-1143-04

激光感应复合快速熔覆 Fe 基 WC 涂层的 显微组织特征

周圣丰¹ 曾晓雁²

¹ 南昌航空大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063
² 华中科技大学光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 采用激光感应复合快速熔覆(LIHRC)的方法,在 A3 钢表面制备了 Fe 基 WC 涂层,研究了涂层的显微组织与显微硬度特征。结果表明,WC 颗粒在激光感应复合快速熔覆过程中完全溶解,并与粘结金属 Fe 基金交相互作用后,在树枝晶间析出 M_6C 型碳化物。WC 颗粒的完全溶解与涂层内存在大量残余奥氏体,是 Fe 基 WC 涂层显微硬度偏低的主要原因。

关键词 激光技术;Fe 基 WC 涂层;碳化物;显微组织

中图分类号 TG154.5;TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.1143

Microstructure Characteristics of Fe-Based WC Composite Coatings Prepared by Laser Induction Hybrid Rapid Cladding

Zhou Shengfeng¹ Zeng Xiaoyan²

¹ School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Fe-based WC composite coatings are prepared on the surface of A3 steel by laser induction hybrid rapid cladding (LIHRC). Microstructure and microhardness characteristics of the composite coatings are investigated. The results show that WC particles are almost dissolved completely and interact with Fe-based alloy, so that M_6C are precipitated in the Fe-based interdendrite matrix phase. The reason why the microhardness of Fe-based WC composite coating is relatively low is that WC particles are dissolved completely and the retained austenite is precipitated during laser induction hybrid rapid cladding.

Key words laser technique; Fe-based WC composite coating; carbides; microstructure

1 引 言

与常规的堆焊、热喷涂等工艺相比,激光熔覆技术具有稀释率低、热影响区小、熔覆层与基材呈冶金结合等优点,在关键零部件的表面强化与修复等领域具有广阔的应用前景^[1]。但是,到目前为止,激光熔覆技术并未在工业中得到广泛的应用,原因是激光熔覆的快速加热与快速冷却凝固,极易使熔覆层开裂^[2]。国内外的研究人员提出了许多解决激光熔

覆层开裂的方法,如预热与后热^[3]、优化工艺参数^[4]、采用过渡层或功能梯度涂层^[5]、加入稀土元素^[6]等。其中预热被认为是最有利于消除裂纹的方法之一。一般是采用加热炉或氧乙炔火焰进行预热来减小熔覆层与基材间的温度梯度,从而抑制熔覆层裂纹的产生^[7]。但该方法并不能从根本上解决开裂问题,而且还会引起关键零部件损坏以及由于装卸不方便导致熔覆效率偏低等问题。

收稿日期:2009-06-30;收到修改稿日期:2009-07-21

基金项目:国家自然科学基金(50901040)、航空科学基金(2009ZE56013)和南昌航空大学博士启动基金(EA200901170)资助课题。

作者简介:周圣丰(1977—),男,博士,讲师,主要从事激光表面强化与激光快速制造方面的研究。

E-mail: zhousf1228@163.com

激光感应复合快速熔覆技术是近年来发展起来的一种新型、有效的表面强化技术,该技术不仅解决了单纯激光熔覆过程中熔覆层易开裂的难题,而且大幅度提高了激光熔覆效率^[8]。本文采用激光感应复合快速熔覆的方法,在 A3 钢表面制备了 Fe 基 WC 涂层,并对其显微组织与显微硬度特征进行了研究。

2 实验材料与方法

采用文献[8]中的激光感应复合快速熔覆实验装置进行实验,实验过程中激光功率 $P=5\text{ kW}$,椭圆形光斑尺寸 $8\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ (即椭圆形光斑的长轴与短轴分别为 8 mm 与 6 mm ,激光扫描速度平行于椭圆形光斑的长轴方向),激光扫描速度 $V_s=1000\text{ mm/min}$,感应加热的平均温度为 1123 K ,送粉装置为 HUST-VI 型自动送粉器,采用氩气将复合粉末从直径为 4 mm 的喷嘴吹入激光熔池并保护熔池,送粉量为 $m=30\text{ g/min}$,粉末喷嘴与工件的距离为 10 mm ,夹角为 55° 。

实验用的基材为 A3 钢,加工成尺寸为 $150\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的块状试样。粘结金属是粒度为 $-180\sim +320$ 目($46\sim 80\ \mu\text{m}$)的 Fe 基合金粉末,其化学成分的质量分数为: $0.4\%\sim 0.6\%\text{ C}$, $1.0\%\sim 2.0\%\text{ Si}$, $2.0\%\sim 3.0\%\text{ B}$, $1.0\%\sim 2.5\%\text{ Cr}$, $4.3\%\text{ Ni}$,其余为 Fe。陶瓷相是粒度为 -400 目($38\ \mu\text{m}$)的铸造 WC 颗粒,其化学成分为 WC+W₂C 共晶。实验前将粘结金属与铸造 WC 颗粒按质量比 4:1 均匀混合,采用本实验室开发的造粒法制备成流动性好且适合于同步自动送粉的复合粉末。

实验结束后,将试样沿垂直于激光扫描速度方向切开,制备成金相试样,经研磨抛光后用体积分数为 4% 的硝酸乙醇腐蚀,利用 Quanta 200 型环境扫描电镜(ESEM)分析断面的组织形貌,采用能谱仪(EDS)测定涂层的微区成分,用 X'Pert PRO 型 X 射线衍射仪(XRD)分析复合层的物相结构(靶:Cu, 40 kV , 40 mA),用 Vickers-1000 显微硬度计测量熔覆层的显微硬度。

3 实验结果与分析

图 1 为激光感应复合快速熔覆 Fe 基 WC 涂层的 X 射线衍射图谱。从图中可以看出,涂层主要由 α 相, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, M_{23}C_6 与残余奥氏体等组成。

图 2 为激光感应复合快速熔覆 Fe 基 WC 涂层

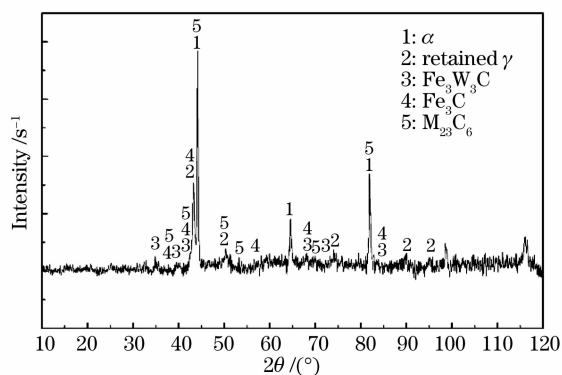


图 1 激光感应复合快速熔覆 Fe 基 WC 涂层的 X 射线衍射图

Fig. 1 X-ray diffraction of Fe-based WC composite coating prepared by LIHRC

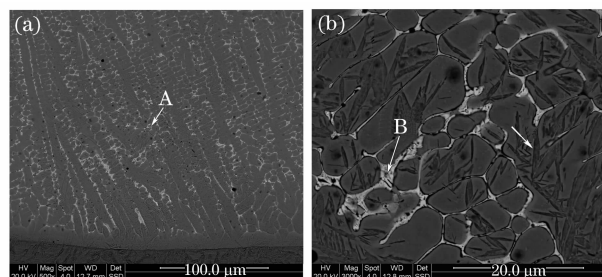


图 2 (a) 激光感应复合快速熔覆 Fe 基 WC 涂层的显微组织;(b) (a)的放大图

Fig. 2 (a) Microstructure of Fe-based WC composite coating prepared by LIHRC; (b) the magnified micrograph of (a)

的显微组织形貌,图中 A, B 区域的 EDS 分析结果如表 1 所示。结合表 1 及图 1, 2 的结果可以看出:

表 1 图 2 中箭头标示区域的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the marked location in Fig. 2 (mass fraction, %)

Location	Composition					
	C	Cr	Mn	Fe	Ni	W
A	4.80	1.30	0.63	75.04	3.19	15.04
B	3.40	1.14	0.60	35.06	1.20	58.60

1) 在复合层与基材的界面处,粘结金属呈快速定向凝固特征,并外延生长成厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 的平面晶,而且熔覆层与基材之间达到良好的冶金结合,没有裂纹与气孔;树枝晶之间的灰色组织为 Fe 基相(即碳过饱和的 $\alpha\text{-Fe}$),其内还固溶有较多的 W 原子,这是 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ (M_6C)型碳化物在析出的过程中排出的 W 原子扩散进入 Fe 基相内所致。

2) 在粘结金属 Fe 基相的树枝晶表面可以清晰地看到针状马氏体组织[图 2(b)中右边箭头所示], WC 颗粒几乎完全溶解,并与粘结金属 Fe 基合金交

相互作用后,在发达的树枝状晶 Fe 基相间析出细小的 M_6C 型碳化物。

3) 在整个涂层内仅发现有少数几颗未完全溶解的 WC 颗粒(约占总数的 0.5%)发生溶解扩散式烧损,在其边缘形成一合金化反应层,而心部的结构保持得较完整,如图 3 所示。

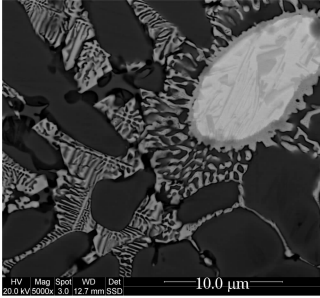


图 3 激光感应复合快速熔覆 Fe 基 WC 涂层内 WC 颗粒的形貌

Fig. 3 Morphology of WC particle in Fe-based WC composite coating prepared by LIHRC

4 讨 论

4.1 WC 颗粒的溶解特征

根据图 4 所示的 Fe-W-C 三相相图可知,在激光感应复合快速熔覆过程中,熔池内可能会发生复杂的冶金反应而析出 Fe_3W_3C (M_6C) 型碳化物^[9]。Babu 等^[10]通过动力学计算了激光熔覆 Fe 基 WC 涂层过程中的相稳定性。结果表明,WC 颗粒能够在液态的 Fe 基合金中优先溶解而形成游离态的 W 与石墨 C,然后扩散进入高温 Fe 基合金液内形成 Fe-W-C 合金液,在随后的快速凝固过程中,因合金元素在树枝晶 Fe 基相中溶解度的降低,导致树枝晶间合金元素的富集,结果在树枝晶间析出以 M_6C (Fe_3W_3C 或 Fe_4W_2C) 型碳化物为主的多相组织。

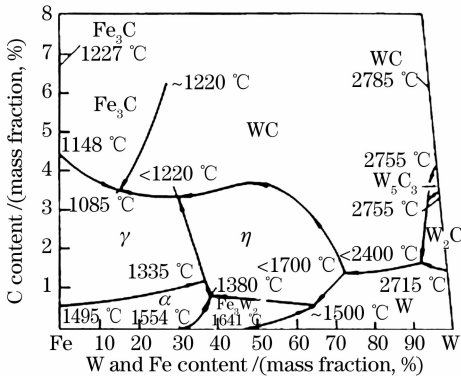


图 4 Fe-W-C 系的液相面投影图

Fig. 4 Liquidus projection of the Fe-W-C ternary phase diagram

此外,当基材被感应预热后,基材对激光能量的吸收率大大增加,极大地提高了熔池内的温度,相应地也促进了 WC 颗粒的溶解。因此,在激光感应复合快速熔覆过程中,当粘结金属为 Fe 基合金时,WC 颗粒在复合层内完全溶解并析出 M_6C 型碳化物,导致在复合层内很少观察到几颗完整的 WC 颗粒,如图 2(a)所示。

在激光感应复合快速熔覆过程中,少数未完全溶解的 WC 颗粒与 Fe 基合金液交互作用后在其边缘形成一合金化反应层,如图 3 所示,这可以通过以下原因进行解释。根据 Gibbs-Thompson 公式可知^[11]

$$\frac{C_1}{C_2} = \exp\left[\frac{3\sigma M}{RT\rho}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)\right], \quad (1)$$

式中 σ 为第二相粒子的界面张力, M 为其分子量, ρ 为第二相粒子的密度, R 为气体普适常数, C_1 与 C_2 分别代表粒径为 r_1 与 r_2 ($r_1 > r_2$) 的第二相粒子在溶剂中的溶解度。(1)式表明,当其他条件相同时,第二相粒子在溶剂中的溶解度与其曲率半径的大小成指数规律变化,即 WC 颗粒上曲率半径较小的部位溶解度较大。因此,未完全溶解的 WC 颗粒其边缘的尖角处将优先溶解并扩散进入粘结金属 Fe 基合金液内,同时 Fe 基合金液内的合金元素如 Fe, Ni, Cr 等原子也向 WC 颗粒内部扩散,然后在快速冷却凝固过程中,由于浓度梯度而形成一合金化反应层并被保留下来。可见,WC 颗粒在此过程中发生了溶解扩散式烧损^[12]。

4.2 粘结金属的生长特征

在激光感应复合快速熔覆过程中,在复合层与基材界面处,由于温度梯度最大而生长速度最小,高温液态的粘结金属从体心立方的 δ -Fe 很快转变为面心立方的 γ -Fe,并成为平面状生长的过冷奥氏体。此外,基材表面被熔化的 Fe 也大量地扩散进入粘结金属内,使基材表面附近的平面状组织成分过冷减小。因此,平面状 Fe 基相的生长厚度达 $10 \mu m$ 。随着离基材表面距离的增加,温度梯度逐渐减小,成分过冷增加,平面状固/液界面前沿变得不稳定,导致富 Fe 基相树枝状结构的形成。此外,由于 Fe 基合金粉末中碳的质量分数较高(0.4%~0.6%),激光感应复合快速熔覆也是一个快速加热与快速凝固的过程,导致复合层中、下部区域的树枝晶 Fe 基相内因固溶有过饱和的碳而形成针状马氏体组织[如图 2(b)中的右边箭头所示]。但是,Fe 基 WC 涂层的显微硬度较低,平均值仅为 $440 HV_{0.2}$

(如图 5 所示),其主要原因包括两个方面:1) 涂层内存在大量的残余奥氏体(通过直接对比法的半定量计算^[13],涂层内残余奥氏体的体积分数约为 23%);2) WC 颗粒几乎完全溶解后,析出的碳化物较少且主要分布于树枝晶 Fe 基相之间,并没有对涂层起到较好的强化效应[如图 2(a)所示]。此外,从图 5 还可以看出,靠近界面结合区涂层具有相对较高的显微硬度,这可能是因为冷却速度很高,树枝晶更易发生马氏体相变,形成细小的针状马氏体组织[如图 2(b)所示],导致该区域涂层的显微硬度较其他部位的高。

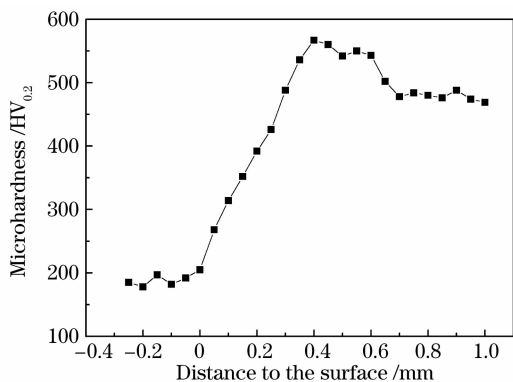


图 5 激光感应复合快速熔覆 Fe 基 WC 涂层的显微硬度

Fig. 5 Microhardness of Fe-based WC composite coating prepared by LIHRC

5 结 论

1) 采用激光感应复合快速熔覆的方法,在 A3 钢表面制备了无气孔与裂纹的 Fe 基 WC 涂层,该涂层主要由固溶体 α 相,碳化物 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ (M_6C) 与 M_{23}C_6 , 残余奥氏体等组成。

2) 在激光感应复合快速熔覆过程中,WC 颗粒几乎完全溶解,并与粘结金属 Fe 基合金交互作用后在发达的树枝晶间析出细小的 M_6C 型碳化物,只有少数几颗 WC 颗粒呈溶解扩散式烧损,在其边缘形成一合金化反应层。

3) 激光感应复合快速熔覆 Fe 基 WC 涂层显微硬度偏低的主要原因是 WC 颗粒的完全溶解与涂层内存在大量的残余奥氏体所致。

参 考 文 献

- Chao Mingju, Zhang Xianhu, Yang Ning *et al.*. In situ synthesized VC-VB-B₄C complex particulates reinforced Ni-based composite coating by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1723~1729
晁明举,张现虎,杨宁等.原位生成 VC-VB-B₄C 复合颗粒增强镍基激光熔覆层[J].中国激光,2008,**35**(11):1723~1729
- He Qingkun, Wang Yong, Zhao Weimin *et al.*. Cracking control technology of TiC/Ni coatings prepared by in-situ fabrication through laser cladding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, **30**(4):21~24
赫庆坤,王勇,赵卫民等.激光合成 TiC/Ni 涂层裂纹控制技术[J].焊接学报,2009,**30**(4):21~24
- Rafal Jendrzewski, Gerard Sliwinski, Ana Conde *et al.*. Influence of the base preheating on cracking of the laser-cladded coatings [C]. *SPIE*, 2003, **5121**:356~361
- Guojian Xu, Kutsuna Muneharu, Zhongjie Liu *et al.*. Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding process [J]. *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, 2006, **417**(1-2):63~72
- Wu Ping, Zhou Changzhi, Tang Xinan. Preparation of wear-resistant graded metal-ceramic coating by laser-alloying [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1994, **30**(11):B508~B512
吴萍,周昌智,唐西南.激光合金化熔覆制备耐磨陶瓷梯度涂层[J].金属学报,1994,**30**(11):B508~B512
- Cui Aiyong, Hu Fangyou, Hui Li. Microstructure and wear-resisting property of (Ti + Al/Ni)/(Cr₂O₃ + CeO₂) laser cladding on titanium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):438~441
崔爱永,胡芳友,回丽.钛合金表面激光熔覆(Ti+Al/Ni)/(Cr₂O₃+CeO₂)复合涂层组织与耐磨性能[J].中国激光,2007,**34**(3):438~441
- Yoshiwara, Kawaname. Method for surface alloying metal with a high density energy beam and an alloy steel [P], US Patent, 4750947, 1988
- Shengfeng Zhou, Yongjun Huang, Xiaoyan Zeng *et al.*. Microstructure characteristics of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding [J]. *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, 2008, **480**(1-2):564~572
- Cui Zhongqin. Metallurgy and Heat Treatment [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. 163~164
崔忠圻.金属学与热处理[M].北京:机械工业出版社,2000.163~164
- S. S. Babu, R. P. Martukanitz, K. D. Parks *et al.*. Toward prediction of microstructural evolution during laser surface alloying [J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 2002, **33**(4):1189~1200
- Liao Weixin, Xie Zizhang. Thermodynamic Analysis of Powder Metallurgical Processes [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984. 256~257
廖为鑫,解子章.粉末冶金过程热力学分析[M].北京:冶金工业出版社,1984.256~257
- Zeng Xiaoyan. Behavioral investigation of ceramic phase in laser cladded ceramic-metal composite coating [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1993. 24~157
曾晓雁.激光熔覆金属陶瓷复合层中陶瓷相的行为研究[D].武汉:华中理工大学,1993.24~157
- A. Taylor. X-Ray Metallography [M]. New York: John Wiley & Sons, 1961. 116~130