表面改性技术

激光合成 FeAl金属间化合物涂层

张来启[1], 陈光南[2],林均品[1],孙祖庆[1]

(1. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室,北京 100083; 2. 中国科学院 力学研究所,北京 100080)

摘要:用优化的工艺参数,在 45钢基体上用激光合成了表面质量好的 FeAl金属间化合物涂层。结果表明,多道搭接处理对涂层相组成无影响。涂层外层 (约 1/3涂层)组织为灰白相间的 FeAl及基体上分布少量黑色针状 $FeAl_3$,里层只有 FeAl。FeAl的组织生长形态为树枝晶,白色枝晶富 Fe,灰色枝间富 Al。涂层/基体界面清晰,呈凹凸状。能量分散谱仪 (EDS)成分线扫描分析结果表明,从 1/3涂层处 Al、Fe开始缓慢过渡,结合区比合成区成分过渡明显,但梯度不大,涂层/基体间有明显互扩散,为冶金结合。激光合成 FeAl涂层的最高硬度为 565 HV0.025,比基体高 1.7倍。

关键词:激光合成; FeAl金属间化合物涂层;组织特征;硬度

中图分类号: TG.99 **文献标识码**: A **文章编号**: 0254-6051(2006)08-0001-03

Laser Synthesizing FeAl Intermetallic Compound Coating

ZHANG Lai-qi[1], CHEN Guang-nan[2], LIN Jun-pin[1], SUN Zu-qing[1]

(1. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The FeAl intermetallic compound coating with good surface quality has been synthesized by laser beam on 45 steel substrate with optimal process parameters. The results show that the treatment of multi-track overlapping for the coating has no effects on phase constituent of the coating. The microstructure of the outer layer (about one-third thickness of the whole coating) of the coating is a small amount of the black needle-like $FeAl_3$ distributed within the FeAl matrix with the grey and the white alternating, while there is only FeAl existing in the inner layer. The crystal morphology of FeAl is dendritic, white dendrites are Fe-rich, and grey interdendritics are Al-rich. The interface between the coating and the substrate is distinct and knaggy. The composition analysis results of the EDS line scanning show that the contents of Fe and Al begin to gradually transit by inches from the site of one-third thickness of the whole coating, transit more obviously in the bonded zone than in the synthesized zone, but the transition gradient is not too steep, illustrating that the atoms of constituent elements of the coating and the substrate diffuse each other, and the coating is metallurgically bonded to the substrate. The hardness of the laser-synthesized FeAl coating reaches 565 HV0.025, 1.7 times higher than that of the substrate.

Key words: laser synthesizing; FeAl intermetallic compound coating; microstructural characteristics; hardness

FeAl金属间化合物具有体心立方 B2有序结构,密度为 5.56 g/cm^3,在相图上有很宽的成分范围 (23.3 at%～54.9at%Al)[1],并保持 B2结构至熔点。它有良好的抗氧化、硫化性和在中温时有较高的强度。FeAl在渗碳、硫蚀和熔融碳酸盐等环境条件下的抗腐蚀能力明显优于 Fe_3Al及低 Al铁铝化合物[2-4]。因此 FeAl是一种极好的抗蚀涂层材料。文献[5]以成分 (at%)为 Fe-28Al-2Cr-8Ti-8C的合金粉末作为熔覆材料在 1Cr18Ni9Ti不锈钢基体上激光熔覆 TiC/FeAl复合材料涂层 (实际上,文献[5]所称谓的"FeAl"应该是 B2结构的 Fe_3Al)。本文在 45钢基体上预置单质 Al粉末,激光合成 FeAl金属间化合物涂层,并对其组织特征和性能进行研究。

1 试验材料及方法

选用供货态的 45钢棒材为基体材料,其组织为:铁素体+珠光体,试样尺寸为 Φ60 mm ×8 mm。预置涂层材料为单质铝粉末,其纯度 ≥99.0%,粒度 ≤48 μm。

采用 2 kW横流 CO_2激光器进行激光合成试验,合成过程中轴向吹送氩气保护熔池以防氧化。所用激光加工参数为:功率 600～1500 W,扫描速度 3.3～

作者简介:张来启 (1966.11—),男,山东高密人,博士,副教授,主要从事金属间化合物及其复合材料、渗硼渗金属以及激光表面改性研究工作,发表论文 30余篇,授权专利 1项。联系电话: 010-62334333 E-mail: zhanglq@skl.ustb.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金 (50274005)

收稿日期: 2006-03-28

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

28.2 mm/min,光斑直径约 1.8～2.8 mm,预涂覆厚度约 0.2 mm。利用 Rigaku D/max型 X射线衍射仪(CuKα)和 Cambridge S-360型扫描电镜及其配带的能量分散谱仪(EDS)进行相结构分析、组织形貌观察及微区成分分析。采用 Leitz Minil Oadz型显微硬度仪测试涂层组织的显微硬度,载荷 0.245 N,加载时间 15 s。

2 试验结果与讨论

2.1 激光合成涂层的宏观形貌

经过从涂层质量和相组成两方面对激光合成工艺参数优化,得到较好的工艺参数为功率 $P = 800$ W,扫描速度 $V_b = 8.2$ mm/s,光斑直径 $D = 2.0$ mm,对应合适的比能 $E = P/(V_b D) = 49$ J/mm^2。用此工艺激光加工处理的试样表面无宏观裂纹、气孔、夹杂存在,与基体结合良好,表面光滑、平直,无熔池对流引起的波纹存在。

2.2 激光合成涂层的相组成

上述工艺参数激光合成处理试样的 XRD结果如图 1所示,B2结构 FeAl的衍射峰全部出现,而且与试验值吻合得很好,且其衍射峰强度很高,从而可以确定涂层主要由 FeAl相组成。另外,谱线中两个强度很弱的衍射峰经分析标定为 $FeAl_3$。综上所述,激光合成涂层的相组成为 FeAl,同时还存在很少量的 $FeAl_3$。

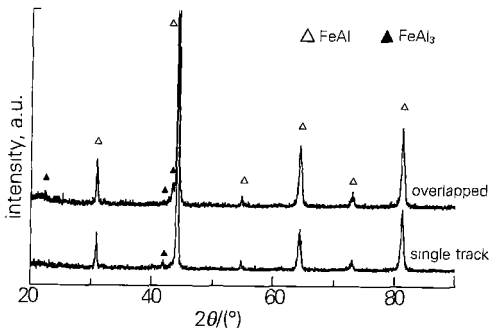

图 1 激光合成涂层的 XRD谱线

Fig 1 XRD pattern of the laser synthesized coating

激光加工处理在很多情况下需大面积搭接加工,因此研究搭接对相组成的影响是十分必要的。图 1中上部的那条 射谱线示出激光合成 FeAl涂层多道搭接处理(搭接率 25%)对涂层相组成的影响。可以清楚看到,激光多道搭接处理对激光合成涂层相组成没有影响。

2.3 激光合成涂层的微观组织形态

图 2为激光合成 FeAl涂层的背散射电子(BSE)形貌。激光处理后,涂层组织包括如下 4个部分:由表及里分别为合成区(SZ)、结合区(BZ)、热影响区(HAZ)和基体(S)。涂层厚度约 85 μm(见图 2a、图 3),热影响区厚约 460 μm。从图 2可以看出,组织中无微观裂纹存在。外层(约占整个涂层的 1/3)组织为在灰白相间的基体上分布少量黑色针状物,EDS分析(见表 1)结合 XRD可以确定黑色针状物为 $FeAl_3$,基体为 FeAl。对外层进行高倍观察,见图 2b,发现基体组织呈现枝晶形态,白色枝晶富集 Fe,而灰色枝间富集 Al(见表 1),FeAl为非线性金属间化合物,是以当量 FeAl为基的固溶体,成分范围(23.3at%～54.9at% Al)[1]。结合 XRD结果可以确定白色枝晶和灰色枝间都为 FeAl相。里层只有 FeAl,其组织形态也为枝晶,其成分跟外层基体相当(见表 1)。涂层/基体界面清晰,但不平直,呈凹凸曲线状,结合区平面晶固溶体白亮带约 8 μm厚。FeAl晶体生长形态跟激光熔覆 α-Fe(Al)/Fe_3Al涂层胞状组织形态不同[6],呈现枝晶的原因可能是:FeAl激光熔池中的溶质 Al含量很高,达到 55at%,见表 1,成分过冷增大;另外熔池中的温度梯度 G比熔覆 α-Fe(Al)/Fe_3Al熔池的 G有所降低,也导致成分过冷增大,因而 FeAl结晶生长形态为树枝晶。激光合成快凝过程为不平衡凝固过程,由于固溶体不平衡凝固时先结晶部分含高熔点组元(Fe)较多,

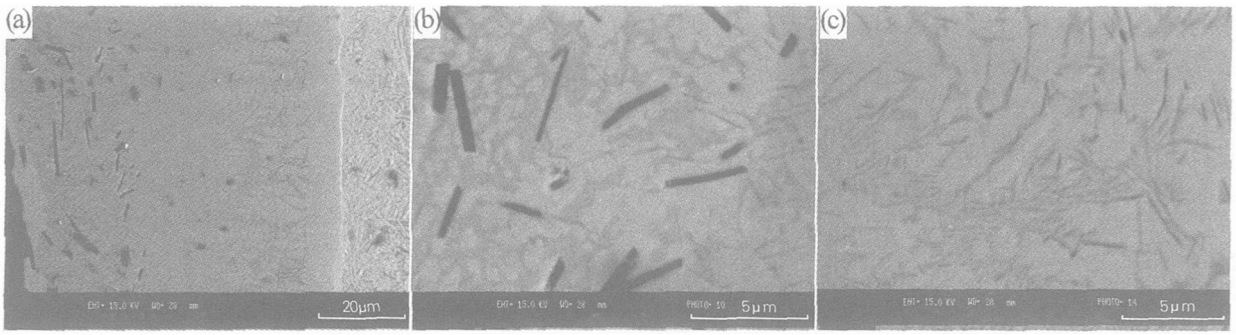

图 2 激光合成 FeAl涂层的背散射电子形貌

(a) 低倍 (b) 高倍外层涂层 (c) 高倍内层涂层

Fig 2 BSE-SEM micrographs of the laser synthesized FeAl coating

(a) lower magnification (b) the outer layer with higher magnification (c) the inner layer with higher magnification

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 激光合成涂层的 EDS结果

Table 1 EDS results of the laser synthesized coating

区域	wt%		at%	
	Fe	Al	Fe	Al
外层黑色针状物	40.05	59.95	24.40	75.60
外层白色枝晶	61.09	38.91	43.13	56.87
外层灰色枝间	52.81	47.19	35.09	64.91
里层白色枝晶	60.96	39.04	43.00	57.00
里层灰色枝间	54.13	45.87	36.30	63.70
外层大面积面扫	62.47	37.53	44.57	55.43

后结晶部分含低熔点组元 (Al)较多,因此图 2中的 FeAl白色枝晶富 Fe,灰色枝间富 Al。

2.4 激光合成涂层的成分分布

用 EDS对激光合成 FeAl涂层整体进行了成分线扫描分析,结果如图 3所示。Al从涂层 1/3处开始往里缓慢降低,结合区处比合成区处下降明显,但下降梯度不大,向基体发生了明显扩散; Fe从涂层 1/3处开始往里缓慢增加,结合区处增加幅度比合成区大,但也是缓慢过渡,向涂层发生了扩散,为冶金结合。

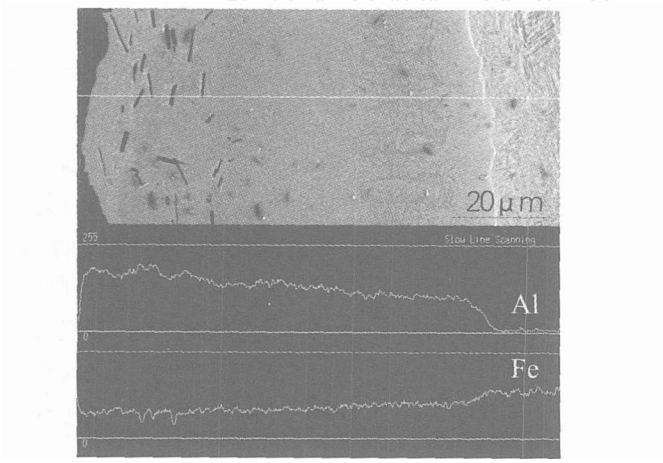

图 3 激光合成 FeAl涂层的 EDS线扫描

Fig 3 EDS line scanning analysis of the laser synthesized FeAl coating

2.5 激光合成涂层的硬度

激光合成 FeAl金属间化合物涂层的显微硬度分布如图 4所示。涂层最高硬度为 565 HV0.025,热影响区最高硬度为 822 HV0.025,基体硬度为 210 HV 0.025。涂层硬度比基体提高 1.7倍。热影响区硬度比激光熔覆 α-Fe(Al)/Fe_3Al涂层 HAZ的高[6],可能与本工艺所用的激光功率低 (800 W),从而导致冷却速度加快, HAZ中马氏体组织细小有关。

3 结论

(1) 用较好的工艺参数,可以在 45钢基体上激光合成表面质量好的 FeAl金属间化合物涂层。厚度约

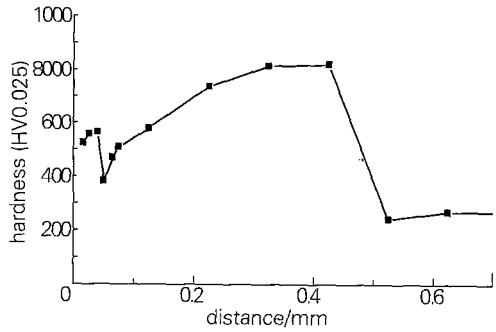

图 4 激光合成 FeAl涂层的硬度分布曲线

Fig 4 Microhardness profile in the laser synthesized FeAl coating

85 μm, HAZ厚度约 460 μm。多道搭接处理对涂层相组成无影响。

(2) 涂层外层 (约 1/3涂层)组织为灰白相间的 FeAl基体上分布少量黑色针状 $FeAl_3$,里层只有 FeAl。FeAl的组织生长形态为树枝晶,白色枝晶富 Fe,灰色枝间富 Al。涂层/基体界面清晰,呈凹凸状,结合区为约 8 μm的平面晶固溶体白亮带。

(3) EDS成分线扫描分析结果表明, Al、Fe从 1/3涂层处开始缓慢过渡,结合区处比合成区处成分过渡明显,但梯度不大,涂层/基体明显发生互扩散,为冶金结合。

(4) 激光合成 FeAl涂层的最高硬度为 565 HV 0.025, HAZ最高硬度为 822 HV0.025,基体硬度为 210 HV 0.025。涂层硬度比基体提高 1.7倍。

参考文献:

[1] Baker H. Alloy Phase Diagrams. ASM handbook Vol 3[M]. Materials Park, Ohio: The Materials Information Society, 1992.

[2] DeVan J H. Oxidation Behaviour of Fe_3Al and Derivative Alloys[A]. Grobstein T and Doychak J. Oxidation of High Temperature Intermetallics [C]. Warrendale, PA: TMS, 1989: 107-118.

[3] Meier G H, Pettit F S. The Oxidation Behaviour of Intermetallic Compounds[J]. Mater. Sci. Eng., 1992, A153: 548-560.

[4] Kai W, Huang R T. The Corrosion Behaviour of Fe-Al Alloys in $H_2/H_2S/H_2O$ Atmospheres at 700～900℃[J]. Oxid. Met., 1997, 48(1/2): 59-86.

[5] 陈 瑶,王华明. 激光熔覆 TiC/FeAl复合材料涂层显微组织及初生 TiC生长机制研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(7): 569-572.

[6] 张来启,陈光南,孙祖庆,杨王↗. 激光熔覆原位合成 α-Fe(Al)/Fe_3Al涂层的研究[J]. 金属热处理, 2004, 29(6): 1-4.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net