doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2011.01.009

激光熔覆纳米贝氏体涂层的组织与性能*

袁 琳,李铸国,黄 坚,李瑞峰

(上海交通大学 材料科学与工程学院 上海市激光制造与材料改性重点实验室,上海 200240)

摘 要:采用高功率 CO₂ 激光熔覆铁基合金粉末,获得了无裂纹、稀释率低、成形良好的熔覆涂层。利用光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM)、X 射线衍射 (XRD) 对熔覆层的显微组织进行了观察与分析,通过 硬度测试与拉伸试验考察了涂层的力学性能。结果显示:熔覆层为纳米贝氏体与残余奥氏体的复合组织,均匀分布的 贝氏体铁素体板条厚度为 50~80 nm,贝氏体板条间为厚度 10~30 nm 更为细小的残余奥氏体薄膜;熔覆层平均硬度 为 610 HV,熔覆涂层的抗拉强度为 1 280 MPa,延伸率为 6.41 %,拉伸断口形貌为韧窝断口。

关键词: 激光熔覆; 纳米贝氏体涂层; 微观组织

中图分类号: TG174.44 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2011)01-0040-04

Microstructure and Properties of Laser Cladded Nanostructured Bainite Coatings

YUAN Lin, LI Zhu-guo, HUANG Jian, LI Rui-feng

(Shanghai Key Lab of Materials Laser Processing and Modification, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract: A Fe-based coating with cracks-free, low dilution and good forming was deposited by high-power CO₂ laser cladding technique. The microstructure of this coating was observed and analyzed by optic microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM) and X-ray diffraction (XRD), and its mechanical properties were tested by means of hardness tests and tensile tests. The results show that the microstructure of this coating consists of uniformly distributed nanostructured bainite and retained austenite. The plates of bainitic ferrite are $50 \sim 80$ nm thick, and each plate is separated by an even finer film of retained austenite with a width of $10 \sim 30$ nm. The average hardness of coatings is about 610 HV, the tensile strength and elongation are 1 280 MPa and 6.41 % respectively. The fracture morphology exhibits the characteristics of ductile fracture with dimples.

Key words: laser cladding; nanostructured bainite coatings; microstructure

0 引 言

贝氏体钢通常具有高硬度、高耐磨性和高淬透 性等特点,但是贝氏体形态十分复杂,而且在不同条 件下会出现形态变异,这些形态变异将导致性能的 变化^[1-5]。近年来,国内外学者研究发现,通过在 高碳、高硅钢中加入一些合金元素可以推迟 TTT 曲线中铁素体和珠光体的开始析出线,而对贝氏体 的开始析出线影响不大,从而可以在很大的冷速 范围内将温度降至较低温度(最低可达到 125 ℃), 再通过长时间的低温等温转变获得极细小的贝氏体组织,其由厚度仅为20~40 nm 的极薄的贝氏体 铁素体板条和板条间富碳的残余奥氏体薄膜组成,称为纳米贝氏体组织。在不同保温工艺条件下,这 种贝氏体钢的极限拉伸强度超过2.3 GPa,维氏硬 度达600~670,延伸率可达5%~30%,具有极好 的综合力学性能^[5-9]。文中结合国内外针对纳米贝 氏体组织的研究,尝试利用激光熔覆技术制备具有 高硬度及高强韧性能的铁基纳米贝氏体涂层。

1 试验方法

以普通船舶用低碳低合金钢 CCS-B 为基体, 尺寸为 200 mm×120 mm×8 mm, 经刨削加工、砂

收稿日期:2010-11-11;修回日期:2010-12-16 基金项目:*国家自然科学基金项目(50971091);科技部国际科技合 作项目(2009DFB50350);上海市重大技术装备项目(ZX08089) 作者简介:袁琳(1984—),男(汉),江苏海门人,硕士生。

纸打磨、丙酮清洗吹干后放置在加热板上。熔覆前, 通过加热板加热基板至 200 ℃,基板上方放置保护 罩对基板表面进行氩气保护,防止其氧化。熔覆材 料采用 Fe 基合金粉末,化学成分如表 1 所示。高 C 的加入可以促使 Bs 点的大幅度降低,适量 Mn 和 Cr 的添加不仅可以增加奥氏体相对于铁素体的稳 定性,有助于降低 Bs 温度,同时有助于熔覆层硬 度的提高。高 Si 可以有效防止 Fe₃C 等碳化物从奥 氏体中析出,是保证获取纳米贝氏体的关键元素之 一。微量的 Mo 可以有效消除时效脆断现象的出现, Al 和 Co 的添加目的是加速奥氏体的分解,从而大 大缩短纳米贝氏体组织的转变时间^[5,6,10]。

表 1 试验粉末的化学成分 (质量分数/%) Table 1 Compositions of powder (w/%)

元 素	С	Si	Mn	Cr	Mo	Co	Al
含量	0.78	1.49	1.95	0.97	0.24	1.60	0.99

激光熔覆试验设备为德国 TRUMPF 公司的 TCF15000型 CO₂激光器,工艺参数为:激光功率 7000W,扫描速度 500 mm/min,采用旁轴同步逆 向送粉方式,送粉枪头与基板表面直线距离为 12 mm,与基板角度呈 60°。激光扫过后,迅速将 试样放入 200℃恒温箱中保温 24 h,取出水冷。 由垂直激光扫描方向线切割熔覆层,制取的横 截面,用 STCMC 维氏硬度计测出从熔覆层表面至 基体各点的显微硬度,测量的试验载荷为 1.0 kg, 加载时间 10 s。金相试样的金相腐蚀剂为 4%的硝 酸酒精,组织观察在蔡司 AXIO Imager A1m 万能材 料显微镜和 JEOL JSM-7600F 场发射扫描电镜上进 行。透射电镜试样是沿激光扫描方向,从熔覆层线 切割 0.3 mm 的薄片,砂纸减薄至 0.02 mm 后,再 由 Gatan Model691 离子减薄仪减薄制取,并在 Philips CM-200 型透射电子显微镜上进行相结构分 析。物相分析在 MDI/JADE5 型 X 射线衍射仪 (XRD)上进行,采用 CuK_a靶(波长 λ =0.254 nm)。

- 2 结果与结论
- 2.1 显微组织

图 1(a)为熔覆层的宏观金相组织, 熔覆层表面成 形良好,稀释率较低, 熔覆层高度约 2.9 mm, 宽度 约 4.4 mm。图 1(b)为熔覆层表层的金相组织, 图 1(c) 为熔覆层中部的金相组织,可以看出熔覆层的显微组 织为均匀细小的板条组织,且板条在长度方向上远大 于厚度方向的尺寸。图 1(d)为熔覆层和基体的结合 区,可以看出熔覆层与基体已经形成了良好的冶金结 合,其上部为合金冶金区,下部为基体热影响区。



(a) 熔覆层横截面 (b) 熔覆层表面 (c) 熔覆层中部 (d) 熔覆层与基体结合区
图 1 熔覆层的显微组织
Fig.1 Microstructure of laser cladding layer

2.2 熔覆层的相结构

42

熔覆层的物相利用 X 射线衍射仪 (XRD) 进 行分析,图2为试验的熔覆层X射线衍射结果。从 图中可以看出熔覆层的相构成主要为铁素体α相和 奥氏体 γ相,以及 Al_{0.7}Fe₃Si_{0.3} 固溶体相。其中铁素 体 α 相对应于高强度衍射峰 (2θ=44.622 °、64.919 °、 82.179°),奥氏体 γ 相主要对应于低强度衍射峰 (20=42.758°、49.787°、73.066°),表明熔覆层组 织以铁素体 α 相为主, 奥氏体含量很少。进一步对 衍射图谱进行仔细分析发现其中无碳化物相的衍 射峰,说明组织中碳化物的含量极少。



图 2 激光熔覆涂层X射线衍射图谱 Fig.2 X-ray diffraction pattern of cladding layer

2.3 纳米贝氏体精细组织分析

图 3(a)、3(b)分别为熔覆层精细组织的明场和 暗场像,3(c)为3(a)中深色窄条纹区域的电子衍射 花样,3(d)为3(a)中浅色区域的电子衍射花样。标 定结果表明, 浅色区域为体心立方点阵结构的贝氏 体铁素体, 深色区域为面心立方点阵结构的残余奥 氏体。从暗场像中可以看出,熔覆层组织中均匀分 布大量的细小贝氏体铁素体板条,板条宽度为 50~80 nm, 贝氏体铁素体之间为厚度约 10~30 nm 的残余奥氏体薄膜。

图 3(e)为残余奥氏体薄膜中位错的放大相,图 3(f)为贝氏体铁素体组织中位错的放大相。从图中可 以看出, 残余奥氏体以及贝氏体板条中均存在高密 度的位错和位错缠结;根据估算,残余奥氏体位错 密度约为 1.9×10¹¹ /cm², 贝氏体板条中位错密度约 为 2.2×10¹¹ /cm²,符合合金粉末经激光熔化后快速 凝固所得组织的典型特征^[11]。

结合上述 XRD 和 TEM 分析结论可知, 熔覆层 主要由铁素体 α 相和奥氏体 γ 相两个单相构成。通 过标定可知,铁素体 α 相为贝氏体铁素体,而非马 氏体铁素体。熔覆层组织为均匀分布的纳米贝氏体 铁素体板条,板条间为残余奥氏体,贝氏体板条及 奥氏体内均存在高密度的位错。



(a) 纳米贝氏体组织(明场像)(b) 纳米贝氏体组织(暗场像)(c) 残余奥氏体电子衍射花样 (d) 贝氏体铁素体板条电子衍射花样 (e) 残余奥氏体中的位错 (f) 贝氏体铁素体板条中的位错

图 3 熔覆层的TEM 照片 Fig.3 TEM micrographs of cladding layer

2.4 熔覆层的力学性能

激光熔覆涂层横截面的显微硬度分布如图4所 示。测量方式为沿横截面中线,从熔覆层表层至基 体方向,每隔0.25 mm 取点测量。图中结果表明, 熔覆层的硬度分布比较均匀,平均显微硬度为 610 HV。高的硬度不仅与精细纳米贝氏体组织有 关,同时合金元素强化、位错强化及贝氏体板条强 化也大大提高了熔覆层的显微硬度^[8]。

拉伸试样长度为 90 mm,中间拉伸段利用线切 割将基体材料完全切除,制成尺寸为 25 mm× 2.5 mm×1.5 mm的熔覆层拉伸试样,两侧各保留 半径为 1.5 mm的倒角。图 5 为熔覆层的拉伸曲线, 结果表明,熔覆层的抗拉强度为 1 280 MPa,延伸 率为 6.41 %。图 6 为拉伸断口的 SEM 照片,从图 6(a)的断口宏观图片来看,熔覆层拉伸断口存在剪 切唇,并且扩展区粗糙,表现为韧性断口。图 6(b) 为图 6(a)中扩展区的放大像,可见断口为韧窝型断 口,但扩展区内主要为细小韧窝。



图 4 熔覆层的硬度分布图 Fig.4 Hardness distribution of the cladding layer



图 5 熔覆层的拉伸曲线 Fig.5 Stress-strain curve of the cladding layer



(a) 宏观形貌 (b) 扩展区

图 6 熔覆层拉伸断口形貌

Fig.6 Fracture surface appearance of the tension specimen of cladding layer

拉伸结果及断口形貌表明,纳米贝氏体组织具 有较好韧性,主要是由于贝氏体铁素体晶界中间夹 杂残余奥氏体薄膜,从而提高了熔覆层的韧性;但 由 XRD 及 TEM 分析结果可知,熔覆层内贝氏体铁 素体板条厚度仍然较大,且熔覆层中残余奥氏体相 对含量较少,随着进一步细化组织结构,韧性仍有 较大提升空间。

3 结 论

利用激光熔覆技术获取稀释率低、无裂纹、成 形好的纳米贝氏体涂层。熔覆层主相为贝氏体铁素 体和残余奥氏体两相,贝氏体铁素体呈板条分布, 板条厚度为 50~80 nm,残余奥氏体分布在贝氏体 板条之间,厚度为 10~30 nm。熔覆层平均显微硬 度达到 610 HV,抗拉强度(1 280 MPa)和延伸率 (6.41%)显示熔覆层具有较好的强韧性能。

参考文献:

[1] 伦宁,秦超,孟凡妍,等. 贝氏体组织及其精细结构 [J].(下转第 48 页)