

17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层 高周疲劳行为研究

赵文雨¹ 芦凤桂¹ 李铸国¹ 王东¹ 王晓娟² 刘霞² 杨仁杰³

¹ 上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240
² 上海电气电站设备有限公司上海汽轮机厂, 上海 200240
³ 上海汽轮机有限公司, 上海 200240

摘要 利用半导体激光器在汽轮机末级叶片材料 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层, 然后分别制备 17-4PH 不锈钢、17-4PH 不锈钢表面激光熔覆和 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆后经 550 °C × 6 h 热处理的疲劳试样, 进行高周拉压疲劳试验, 并对疲劳断口进行扫描电镜 (SEM) 分析。试验结果表明: 在 10⁷ 循环周次条件下, 基材 17-4PH 不锈钢的疲劳极限为 470 MPa, 基材表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层试样的疲劳极限下降到 380 MPa, 而基材表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层经过热处理后的试样可达到 440 MPa; 基材 17-4PH 不锈钢的裂纹源通常位于表面、近表面或内部缺陷处, 裂纹扩展区具有明显的疲劳辉纹特征, 瞬断区为韧窝特征; 而熔覆试样的裂纹源位于熔覆层侧的缺陷处或熔覆层与基体的界面结合处, 然后向熔覆层和基体两侧扩展, 熔覆层侧呈脆性沿晶断裂, 基体呈韧性疲劳断裂。

关键词 光学制造; 高周疲劳寿命; 激光熔覆; 耐水蚀涂层; 疲劳断口

中图分类号 TG146.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1003014

Study on High-Cycle Fatigue Behavior of Laser-Cladding Stellite6 on 17-4PH Stainless Steel

Zhao Wenyu¹ Lu Fenggui¹ Li Zhuguo¹ Wang Dong¹ Wang Xiaojuan²
Liu Xia² Yang Renjie³

¹ Shanghai Key Laboratory of Material Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao
Tong University, Shanghai 200240, China

² Shanghai Turbine Plant, Shanghai Electric Power Generation Equipment Co., Ltd., Shanghai 200240, China

³ Shanghai Turbine Company, Ltd., Shanghai 200240, China

Abstract Stellite6 coating is cladded on the 17-4PH stainless steel using a diode laser. Fatigue behaviors of substrate specimens, as-cladded specimens and the cladded specimens with heat treatment (550 °C for 6 h) are tested with the tension and compression loading method. The fracture surface is characterized by scanning electron microscopy (SEM). The results show that the fatigue strength with 10⁷ cycles of substrate specimens is 470 MPa which is higher than that of the as-cladded specimens with 380 MPa, while the fatigue strength of cladded specimens with heat treatment can reach to 440 MPa. The fatigue surface of substrate specimen shows that the fatigue crack initiates at the surface or inner defects, then propagates forward with the parallel fatigue striations and dimple appearance, while the crack of cladded specimens initiates at the defects in the coating or the interface between the coating and the substrate, then extends to the coating which shows the brittle inter-dendritic fracture and the substrate shows the ductile fatigue fracture respectively.

Key words optical fabrication; high-cycle fatigue life; laser cladding; erosion-resistant coating; fatigue fracture surface

OCIS codes 160.3900; 350.3390; 350.3850

收稿日期: 2014-04-22; 收到修改稿日期: 2014-05-23

基金项目: 上海市教委“曙光计划”(12SG15)

作者简介: 赵文雨(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光熔覆方面的研究。E-mail: jfzwy03@126.com

导师简介: 李铸国(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光焊接与表面工程等方面的研究。E-mail: lizg@sjtu.edu.cn

1 引 言

0Cr17Ni4Cu4Nb(17-4PH) 沉淀硬化不锈钢由于具有良好的力学性能和耐蚀性,已作为 300 MW 和 600 MW 汽轮机末级叶片的常用材料^[1],但在其长期服役过程中,进气边顶部的液滴冲蚀问题非常严重,而且叶片受激振力的作用会产生强迫振动,当强迫振动的频率与叶片自振频率相同时,交变应力增加引起疲劳断裂,导致叶片过早失效^[2]。目前,汽轮机制造厂采用的增加防护层叶片耐水蚀保护方法主要为末级叶片进气边钎焊 Stellite6 合金片^[3]。然而,随着电站机组容量的增加以及沿海和中、北部地区低冷却水温的要求,全球各大汽轮机制造商都在集中力量开发更大排汽面积的长叶片。叶片加长以后,大面积高温钎焊司太立合金片造成的焊接形变非常大,其焊接质量的控制难度很大。

激光熔覆涂层具有加热冷却迅速,与基体呈冶金结合且基体热影响区小、热变形小等特点。由于这种技术优势,目前激光熔覆制备汽轮机叶片耐水蚀涂层已成为该领域的研究热点。例如 D'Oliveira 等^[4]通过 CO₂ 激光熔覆 Stellite6 合金粉末的办法,在 304 不锈钢基板上获得了微观组织均匀,硬度明显高于基体的合金涂层,起到了良好的保护效果;钟敏霖等^[5]通过在低碳钢表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层,发现 Stellite6 的裂纹倾向比较小;Ganesh 等^[6]研究了 AISI

316L 表面激光熔覆 Stellite21 的旋转弯曲疲劳性能,结果表明熔覆后的疲劳强度有所提高;Koehler 等^[7]研究了 X5CrNi18-10 和 42CrMo4 表面激光熔覆 Stellite21 的旋转弯曲疲劳性能,结果表明由于残余应力的影响熔覆后的疲劳强度均降低。然而,针对基体材料激光熔覆 Stellite6 合金涂层后的疲劳行为还缺少相应的研究。

本文在 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆制备了 Stellite6 合金涂层,分别对基材 17-4PH 不锈钢、基材 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层,以及基材 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层经 550 °C×6 h 去应力退火后试样的高周疲劳行为进行了对比研究,为长叶片表面大面积激光熔覆制备耐水蚀涂层提供理论支持。

2 试 验

2.1 激光熔覆方案

试验基材为 17-4PH 不锈钢,尺寸大小为 200 mm×55 mm×10 mm。激光熔覆粉末为 Stellite6 合金粉末,粒度为 50~100 μm,具体化学成分见表 1。试验所用熔覆设备包括最大输出功率为 3.5 kW 的 ROFIN DL-035Q 高功率半导体激光器,FANUC M-710ic 型机器人控制系统及同轴送粉系统。

表 1 Stellite6 合金粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of Stellite6

Elements	C	Cr	Si	W	Fe	Mo	Ni	Mn	Co
Mass fraction /%	1.15	29.00	1.10	4.00	3.00	1.00	3.00	0.5	Bal.

激光熔覆工艺参数为功率 2800 W,激光光斑大小为 2.0 mm×3.3 mm,扫描速度为 12 mm/s,搭接率为 50%,送粉速率为 13.56 g/min,其中保护气和送粉气均为 Ar。熔覆前,将块状 17-4PH 不锈钢基

材按照图 1 所示进行开槽,槽深为 1.5 mm。熔覆时采用双层多道熔覆,第一层为 7 道,第二层为 8 道,每道宽度约 5.5 mm,每层厚度约为 0.9 mm。

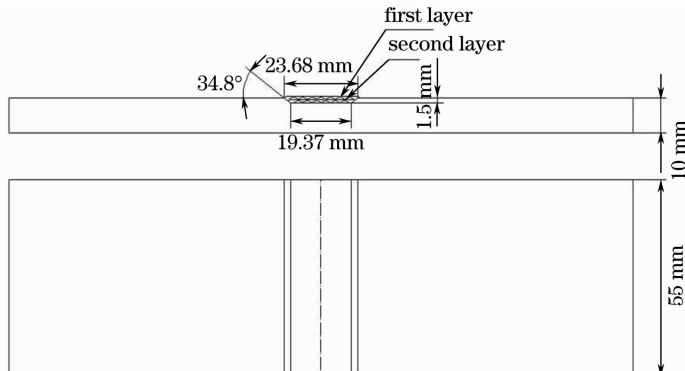


图 1 激光熔覆方案

Fig. 1 Scheme of laser cladding

2.2 疲劳试验方法

根据《GB/T 3075-2008 金属材料疲劳试验轴向力控制方法》加工成板材高周拉压疲劳试样。疲劳试样共分为三类：I类为基材 17-4PH 不锈钢；II类为基材 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层；III类为基材 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层后经 550 °C × 6 h 去应力退火的试样。其中 I类试样厚度为 6 mm，II类和 III类熔覆试样经机加工后保留涂层的厚度为 1.2 mm，总厚度也为 6 mm，如图 2 所示。为避免试样表面的机械加工划痕等对疲劳试验结果造成影响，采用 2000 # 砂纸对高周疲劳试样标距部分进行磨光，以去除试样表面的划痕。

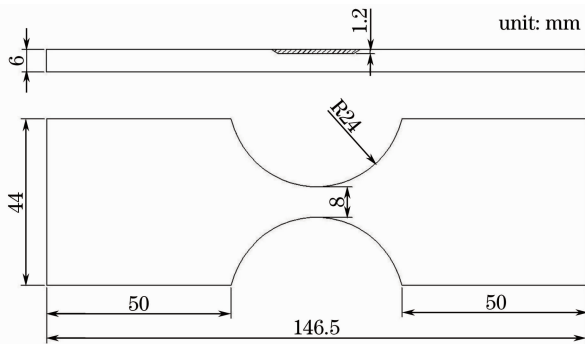


图 2 疲劳试样

Fig. 2 Fatigue testing specimen

疲劳试验在油压式高周疲劳拉伸试验机 MTS Landmark 100 kN 上进行，采用轴向拉-压外加应力控制模式，采用波形为正弦波，加载频率为 20 Hz，应力比为 $R = -1$ 。利用场发射扫描电镜 (JSM) 7600F 进行疲劳断口形貌分析。

3 结果与分析

3.1 疲劳寿命

图 3 是基材 17-4PH 不锈钢、基材 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层和基材 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层后经 550 °C × 6 h 去应力退火试样的应力幅与疲劳寿命曲线，即 $S-N$ 曲线，并采用 Basquin 方程式：

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1)$$

进行拟合，其中 σ'_f 是疲劳强度系数， b 是疲劳强度指数，即双对数坐标中 $S-N$ 曲线的斜率。

从图中可以看出，基材 17-4PH 不锈钢的疲劳性能最好， 10^7 循环周次下的疲劳极限可达到 470 MPa，而基材 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层后，其整体疲劳性能有所下降。但是，

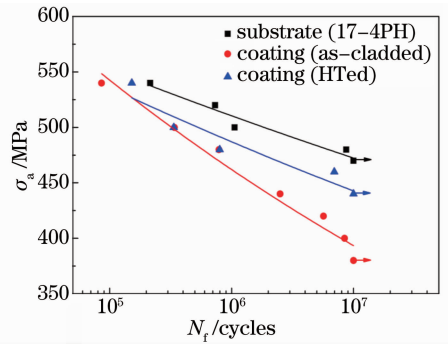


图 3 基材 17-4PH 不锈钢、基材 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层、基材 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层后经 550 °C × 6 h 热处理的试样的应力幅-疲劳寿命曲线

Fig. 3 Cycle stress amplitude versus fatigue life curves of substrate, as-cladded specimen and cladded specimen with heat treatment (550 °C for 6 h)

激光熔覆试样经 550 °C × 6 h 热处理后，消除了熔覆过程产生的残余应力，疲劳极限由原来的 380 MPa 提高到 440 MPa，相比基材仅下降了 6%。可见，经去应力退火后的熔覆试样在高周拉压循环加载条件下仍能保持良好的疲劳性能。

3.2 疲劳断口

图 4 为 17-4PH 不锈钢的疲劳断口。图 4(a) 为宏观疲劳断口形貌，可以看到明显的海滩条带，如箭头所示，并由三个区域组成：疲劳源区 (B 区)、疲劳裂纹扩展区 (B 至 C 区) 和瞬断区 (D 区) 组成。疲劳裂纹源位于试样水平面表面与圆弧垂直面的棱线交汇处，在形成裂纹萌生缺陷周围，存在半圆形的平整解理区^[8]，而且由于反复地张开与闭合，使得断口表面比较平整^[9]。图 4(b) 为疲劳源 B 区的放大图像，裂纹呈扇形向四周扩展，如箭头所示。图 4(c) 为裂纹扩展区 C 区的高倍放大图像，从图中可以看到明显的疲劳辉纹，而且在同一断块上的疲劳辉纹是连续而平行的，不同断块之间被二次裂纹隔开，如箭头所示，其深度远大于辉纹在断口上的深度，并伴随着一些大的二次性台阶，这种二次裂纹的形成可消耗能量，松弛裂纹尖端的应力集中，降低疲劳裂纹的扩展速率，提高材料的疲劳寿命^[10]。图 4(d) 为瞬断区的高倍放大图像，其断口形貌为韧窝断裂，表明基材的韧性较好。可见，17-4PH 不锈钢试样在循环拉压应力加载后，自表面产生裂纹后以河流状花纹向材料内侧扩展，在扩展区产生大量二次裂纹提高疲劳寿命，并于另一侧表面最终发生撕扯韧性断裂。

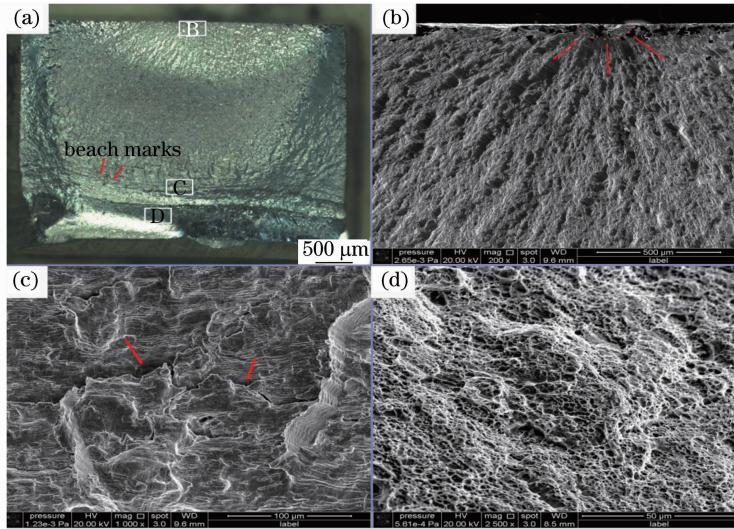


图 4 17-4PH 不锈钢的断口形貌 ($\sigma_a = 480 \text{ MPa}$, $N_f = 8.72 \times 10^6$)。(a) 宏观断口；(b) 疲劳源；(c) 疲劳扩展区(疲劳辉纹)；(d) 瞬断区(韧窝)

Fig. 4 Fracture surface of 17-4PH stainless steel after high-cycle fatigue test of $\sigma_a = 480 \text{ MPa}$ and $N_f = 8.72 \times 10^6$. (a) Macro-morphology; (b) fatigue initiation; (c) fatigue propagating region (fatigue striations); (d) final fracture region (dimple)

图 5 为 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层内部的缺陷,上面是 17-4PH 不锈钢基体,下面是 Stellite6 合金的熔覆层,箭头所示为激光熔覆涂层与基体的结合界面。图 5(b)为疲劳源区放大图像,可见鱼眼状裂纹源特征^[12],如箭头 A 所示鱼眼为气孔,在拉压应力作用下,激光熔覆 Stellite6 涂层产生塑性

层内部的缺陷,上面是 17-4PH 不锈钢基体,下面是 Stellite6 合金的熔覆层,箭头所示为激光熔覆涂层与基体的结合界面。图 5(b)为疲劳源区放大图像,可见鱼眼状裂纹源特征^[12],如箭头 A 所示鱼眼为气孔,在拉压应力作用下,激光熔覆 Stellite6 涂层产生塑性

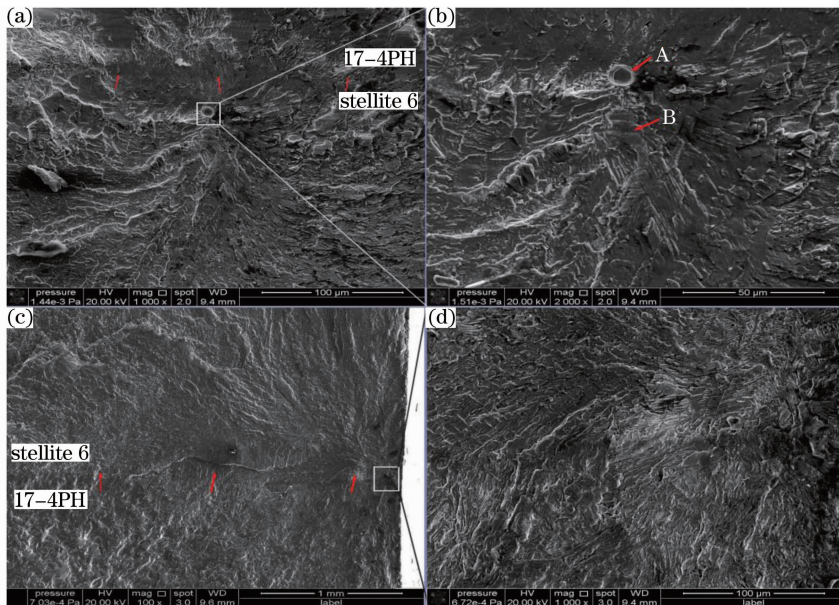


图 5 熔覆试样的疲劳源。(a) 热处理后熔覆试样熔覆层内部气孔 ($\sigma_a = 500 \text{ MPa}$, $N_f = 3.36 \times 10^5$)；(b) (a)中气孔的局部放大图；(c) 未热处理熔覆试样熔覆层与基体界面处的疲劳源 ($\sigma_a = 500 \text{ MPa}$, $N_f = 3.40 \times 10^5$)；(d) (c)的局部放大图

Fig. 5 Fatigue initiation of cladding specimen. (a) Porosity in the cladded specimen with heat treatment under the loading condition of $\sigma_a = 500 \text{ MPa}$ and $N_f = 3.36 \times 10^5$; (b) magnified views of region in (a); (c) fatigue initiation at the interface between the coating and substrate in the as-cladded specimen under the loading condition of $\sigma_a = 500 \text{ MPa}$ and $N_f = 3.4 \times 10^5$; (d) magnified views of region in (c)

变形而被往复挤入挤出,并形成驻留滑移带,如图中箭头 B 所示。在滑移带遭遇气孔缺陷便形成微小裂纹,从而形成疲劳裂纹源。图 5(c)为位于未热处理熔覆试样熔覆层与基体的界面结合处(箭头所示)并处于试样侧面的疲劳源,图 5(d)为其放大图像,由图中可以发现,熔覆层与基体结合处易产生疲劳源。这是由于熔覆层与基体二者的热膨胀系数不同,熔覆过程界面必然存在一定的应力,在循环外力的作用下,由于弹性模量的差别导致二者的塑性形变不同,长时间积累后界面处形成应力集中^[7],再加上外表面没有其他拘束,更易成为疲劳源。

图 6 为 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层试样的疲劳裂纹扩展区断口形貌。图 6(a)为

熔覆层和基体的熔合界面处形貌,上面为 17-4PH 不锈钢,下面为 Stellite6 熔覆层,两者的界面如箭头所示,可见在疲劳断裂过程中没有发生界面撕裂的现象,涂层与基体获得了良好的冶金结合,而且界面两侧的疲劳断口存在明显的差异。图 6(b)为熔覆试样 17-4PH 不锈钢基体侧的放大图像,从图中可以看到一系列互相平行的略带弯曲呈波浪形的疲劳辉纹,如箭头所示。图 6(c)为 Stellite6 熔覆层侧的放大图像,断口基本上呈脆性沿晶断裂,没有发现明显的疲劳辉纹^[6]。图 6(d)为熔覆试样 17-4PH 不锈钢基体侧的瞬断区,呈明显的韧窝断裂。可见激光熔覆试样基体侧仍保持原来的韧性疲劳断裂,而熔覆层侧为脆性沿晶断裂。

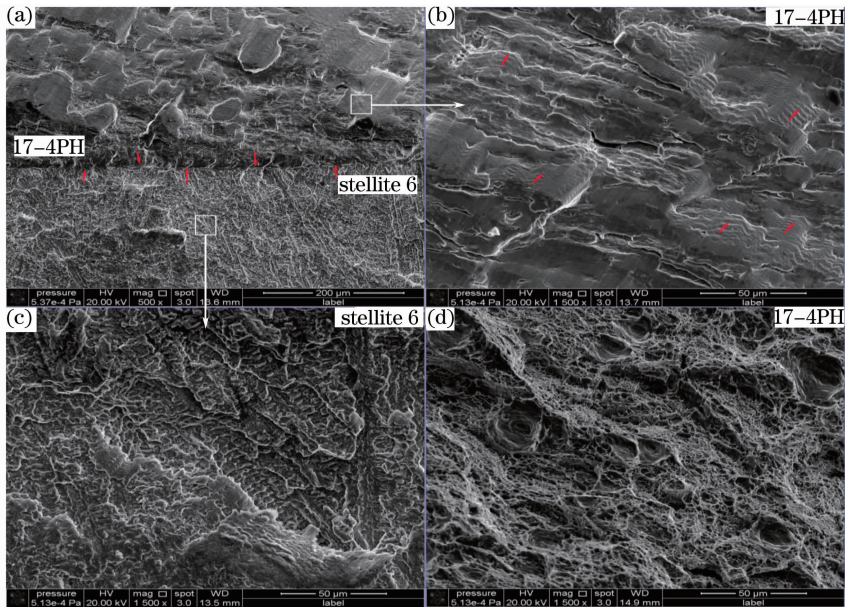


图 6 未热处理熔覆试样的疲劳裂纹扩展区($\sigma_a = 420 \text{ MPa}$, $N_f = 5.67 \times 10^6$)。(a) 熔覆层和基体的界面; (b) 基体侧的裂纹扩展; (c) 熔覆层侧的裂纹扩展; (d) 基体侧的最后断裂区(韧窝)

Fig. 6 Fatigue crack propagating region of as-cladded specimen under the loading condition of $\sigma_a = 420 \text{ MPa}$ and $N_f = 5.67 \times 10^6$. (a) Interface between the coating and substrate; (b) fatigue crack propagation in site of 17-4PH; (c) fatigue crack propagation in site of stellite6; (d) final fracture region of the substrate (dimple)

4 结 论

在 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层,拉压疲劳试验选择垂直熔覆方向的最容易失效的加载方式,即多层多道熔覆层的搭接区直接承受拉应力,获得以下结论:

1) 17-4PH 不锈钢基材表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层后,整体高周疲劳性能有所下降,但是经 $550 \text{ }^\circ\text{C} \times 6 \text{ h}$ 去应力退火后,其熔覆试样仍能保持良好的疲劳性能,相对于基材的疲劳极限仅下降了 6%。

2) 17-4PH 不锈钢基材的疲劳源一般起源于材料表面、近表面或内部缺陷处,而基材表面激光熔覆 Stellite6 涂层后,其疲劳源一般起源于 Stellite6 熔覆层侧的缺陷或熔覆层与基体的界面结合处。

3) 激光熔覆试样的疲劳断口上的熔覆层侧与基体侧的形貌存在较大的差异,在基体侧可以清楚的看到一系列平行的呈波浪形的疲劳辉纹,垂直于裂纹的扩展方向,并具有明显的韧窝断裂特征,而在熔覆层侧呈脆性沿晶断裂。

参 考 文 献

- 1 Qin Chengpeng, Zheng Yugui. Cavitation erosion behavior of a laser clad co-based alloy on 17-4PH stainless steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2011, 23(3): 209-213.
秦承鹏, 郑玉贵. 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆钴基合金涂层的空蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(3): 209-213.
- 2 Wang Jianghong, Qi Yan, Su Hui, *et al.*. A summary of fatigue fracture in turbine blades[J]. Turbine Technology, 1999, 41(6): 330-333.
王江洪, 齐 琰, 苏 辉, 等. 电站汽轮机叶片疲劳断裂失效综述[J]. 汽轮机技术, 1999, 41(6): 330-333.
- 3 Liu Qiang. Analysis of Water Erode Theory and Research on Replacement of Stellite Strip on Turbine Last Stage Blade[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. 33-34.
刘 强. 汽轮机低压缸末级叶片水蚀机理分析及司太立合金片更换研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. 33-34.
- 4 Ana Sofia C M D'Oliveira, Paulo Sergio CP da Silva, Rui M C Vilar. Microstructural features of consecutive layers of Stellite6 deposited by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 153(2): 203-209.
- 5 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Comparative research on cracking tendency in power 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.
- 6 P Ganesh, A Moitra, Pragma Tiwari, *et al.*. Fracture behavior of laser-clad joint of Stellite21 on AISI 316L stainless steel[J]. Material Science and Engineering: A, 2010, 527(16): 3748-3756.
- 7 H Koehler, K Partes, F Vollertsen, *et al.*. Residual stresses in steel specimens induced by laser cladding and their effect on fatigue strength[J]. Physics Procedia, 2012, 39(7): 354-361.
- 8 A Theriault, L Xue, J R Dryden. Fatigue behavior of laser consolidated IN-625 at room and elevated temperatures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 516(1): 217-225.
- 9 Kong Dejun, Zhang Lei, Song Renguo, *et al.*. Effect of laser quenching on fatigue properties and fracture morphologies of 40CrNiMo high strength steel[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103005.
孔德军, 张 垒, 宋仁国, 等. 激光淬火对 40CrNiMo 高强度钢疲劳性能与断口形貌的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103005.
- 10 K Shanmugam, A K Lakshminarayanan, V Balasubramanian. Effect of weld metal properties on fatigue crack growth behavior of gas tungsten arc welded AISI 409M grade ferritic stainless steel joints[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009, 86(8): 517-524.
- 11 H Koehler, K Partes, F Vollertsen, *et al.*. An approach to calculate fatigue properties of laser cladded components [J]. Production Engineering, 2012, 6(2): 137-148.
- 12 Sun Fujuan, Hu Fangyou, Huang Xuren, *et al.*. Fatigue performance of laser cladding on LY12CZ[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(7): 1073-1077.
孙福娟, 胡芳友, 黄旭仁, 等. LY12CZ 激光熔覆的疲劳性能[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1073-1077.

栏目编辑: 韩 峰