

17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层组织及耐水蚀性能

任 超¹, 李铸国¹, 疏 达¹, 赵文雨¹, 杨仁杰², 王 朋², 叶建水²

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

摘要 为提高 17-4PH 不锈钢的耐水蚀性能, 利用激光熔覆方法在其表面制备了 Stellite6 合金涂层。研究了涂层的微观组织形貌、相组成以及元素扩散行为, 分析了涂层的硬度分布和耐水蚀性能。结果表明, Stellite6 涂层微观组织由平面晶、胞状和柱状晶、树枝晶以及等轴晶组成, 物相组成包括面心立方 (FCC) 结构的 γ -Co 固溶体和 $M_{23}C_6$ 、 Cr_7C_3 、 CoC_x 等, Fe、Co 元素在基体和涂层间的扩散明显。Stellite6 涂层的最高硬度为 561 HV, 平均硬度约为基材的 1.4 倍。多道多层熔覆时, 搭接区存在软化现象, 横向硬度分布出现周期性波动。在压力为 80 MPa、温度为 80 °C、水流冲蚀时间为 30 h 的条件下, 基材表面发生了严重的材料破坏, 而 Stellite6 涂层表面基本保留了初始形貌, 涂层的耐水蚀性能相比基材的有了显著提高。

关键词 激光技术; Stellite6 涂层; 微观组织; 硬度; 耐水蚀性能

中图分类号 TG146.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0402010

Microstructure and Water Erosion Resistance Property of Stellite6 Coating by Laser Cladding on 17-4PH Stainless Steel Surface

Ren Chao¹, Li Zhuguo¹, Shu Da¹, Zhao Wenyu¹, Yang Renjie²,
Wang Peng², Ye Jianshui²

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

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

Abstract In order to improve the water erosion resistance property of the 17-4PH stainless steel, Stellite6 alloy coating is prepared on the surface of 17-4PH stainless steel by laser cladding. The coating microstructure, phase composition and element diffusion are studied and the hardness distribution and water erosion resistance property of the coating are analyzed. The results show that the microstructure of the Stellite6 coating is composed of plane crystal, cellular and columnar crystal, dendrite, and equiaxed crystal. The phase consists of γ -Co solid solution with face centered cubic (FCC) structure, $M_{23}C_6$, Cr_7C_3 , and CoC_x . Fe and Co elements diffuse between the substrate and the coating layer obviously. The highest hardness of the Stellite6 coating is 561 HV, and its average hardness is about 1.4 times of that of the substrate. In the multi-channel and multi-layer cladding, softening phenomenon occurs in the overlapped regions and the transverse hardness of Stellite6 coating fluctuates periodically. Under the conditions of pressure being 80 MPa, temperature being 80 °C and water erosion time being 30 h, the substrate surface is destroyed seriously. However, the Stellite6 coating surface basically retains the original appearance. It indicates that the water erosion resistance

收稿日期: 2016-11-15; **收到修改稿日期:** 2016-12-21

基金项目: 上海市教育委员会“曙光计划”(12SG15)

作者简介: 任 超(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光熔覆方面的研究。E-mail: wilson_rc@163.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方面的研究。

E-mail: lizg@sjtu.edu.cn (通信联系人)

property of the coating has been significantly improved than that of the substrate.

Key words laser technique; Stellite6 coating; microstructures; hardness; water erosion resistance property

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 180.5810; 350.3390

1 引 言

17-4PH 不锈钢是应用最为广泛的一种沉淀硬化不锈钢,常用于石油、天然气、航空航天等领域^[1-2],它是 300 MW 以上汽轮机末级叶片的常用材料。叶片在服役过程中长期处于高温潮湿的环境,受到湿蒸汽携带的水滴的冲蚀作用,极易在进汽边顶部及出汽边根部发生水蚀^[3-4]。此外,叶片在运转过程中受到离心力、蒸汽作用力以及气流扰动产生的激振力等载荷作用,容易发生疲劳断裂^[5]。因此,采取有效的防护措施对提高叶片的服役寿命以及减少后期的损伤修复具有重要意义。目前,应用较多的防护措施是在末级叶片进气侧边缘末端区域钎焊司太立合金片,但该方法存在钎焊质量不稳定、焊层与叶型吻合不好、合金片和基体结合不牢(非冶金结合)易脱落等问题^[6]。

激光熔覆具有加热和冷却速率快(10^5 K/s)、热影响区窄、变形小以及加工效率高等优点,已成为材料表面工程领域的研究热点^[7-9]。D'Oliveira 等^[10]研究了 304 不锈钢表面 CO₂ 激光熔覆 Stellite6 涂层的微观组织,结果表明熔覆层微观组织呈现柱状晶、树枝晶和等轴晶形态;多层多道熔覆时,柱状晶、树枝晶和等轴晶交替出现。段晓溪等^[11]研究激光熔覆 316L+SiC 的强化机制和摩擦磨损性能发现,316L+纳米 SiC 熔覆层的硬度和摩擦磨损性能均优于 316L 熔覆层的和微米 SiC 熔覆层的。徐金涛等^[12]研究了激光熔覆 Cr₃Si/ γ 多相涂层的耐蚀性,发现在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中,涂层表面会形成抗点蚀性能优异的钝化膜,涂层具有优异的耐蚀性能。秦承鹏等^[13]研究不锈钢表面激光熔覆钴基合金涂层的空蚀行为发现,熔覆层在蒸馏水和质量分数为 3% 的 NaCl 溶液中的抗空蚀性能相比于基材的分别提高了约 27 倍和 16 倍,这主要是因为熔覆层具有高硬度以及空蚀过程中奥氏体相转变为马氏体相。

本文采用半导体激光熔覆的方法,在 17-4PH 不锈钢表面制备了 Stellite6 合金涂层,通过微观分析、显微硬度测试、水流冲蚀试验,研究了熔覆涂层的组织形貌、相组成和元素分布,分析了多道多层熔覆涂层的显微硬度分布特点,测试了熔覆涂层的耐水蚀性能,评价了 17-4PH 不锈钢材料激光表面改性涂层的特性。

2 试验材料及方法

基体材料为 17-4PH 沉淀硬化不锈钢,尺寸为 160 mm×95 mm×15 mm,熔覆材料为 Stellite6 合金粉末,粒径尺寸为 80~120 μ m,两者化学成分见表 1。17-4PH 不锈钢为固溶+时效处理状态,主要为马氏体组织,如图 1 所示。图 2 是其 X 射线衍射仪(XRD)分析结果,物相组成包括 α -Fe、Fe-Cr 和 Fe₁₉Ni。

表 1 17-4PH 不锈钢和 Stellite6 合金粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 17-4PH stainless steel and Stellite6 alloy powder (mass fraction, %)

Element	C	Cr	Ni	Si	Mn	Cu	Nb	W	Mo	Fe	Co
17-4PH	0.055	15.66	4.57	0.70	0.50	3.92	0.25	—	—	Bal.	—
Stellite6	1.15	29.00	3.00	1.10	0.50	—	—	4.00	1.00	3.00	Bal.

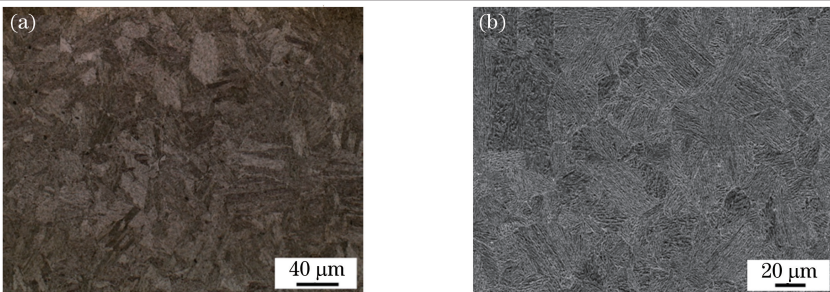


图 1 17-4PH 不锈钢微观组织。(a)光学显微镜(OM)照片;(b)扫描电子显微镜(SEM)照片

Fig. 1 Microstructures of 17-4PH stainless steel. (a) Optical microscope (OM) image;

(b) scanning electron microscope (SEM) image

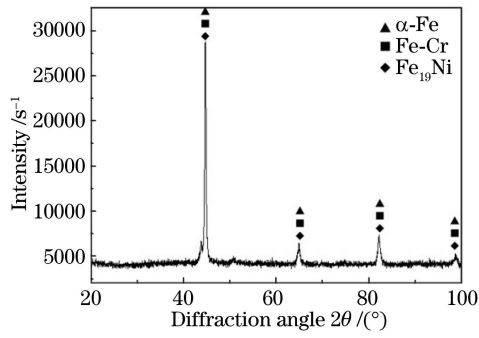


图 2 17-4PH 不锈钢 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of 17-4PH stainless steel

试验采用德国 Rofin 公司 DL-35 高功率半导体激光器(功率为 3.5 kW),结合同轴送粉的方式熔覆 Stellite6 合金粉末。激光焦距为 15 mm,光斑尺寸为 2.0 mm×3.3 mm,激光熔覆工艺参数见表 2,保护气和送粉气均为体积分数为 99.99%的氩气。

表 2 激光熔覆工艺参数

Table 2 Parameters in laser cladding process

Power /W	Cladding speed / (mm/s)	Feeding speed / (g/min)	Shielding gas flow rate / (L/min)	Makeup gas flow rate / (L/min)	Overlapping rate / %	Interlayer temperature / °C
2800	8	13.56	5	15	50	<300

熔覆前粗铣基材,依次用丙酮和无水乙醇清洗试板,去除表面油污。试验时分别采取单道和多道两层搭接方式进行熔覆。熔覆后对试样进行检验加工,采用德国 ZEISS 公司 Imager A 1 m 光学显微镜(OM)、日本理学株式会社 Ultima IV XRD、日本电子株式会社 JSM-7600F 场发射 SEM 分析熔覆层的微观组织、物相组成及元素分布;采用德国 Zwick/Roell 公司 Zwick/Roell Zhu 全自动硬度计测试显微硬度。水蚀试验平台由德国 KARCHER 公司 HDS6/14C 高压清洗机、HCA-15SP 小型冷水机、自吸水泵、200 L 水箱和试样夹持装置组成,如图 3 所示。试验时分别采用纯净水和质量分数为 3%的 NaCl 水溶液作为循环水,在水压为 8 MPa、温度为 80 °C、水流与试样表面成 45°的条件下连续冲蚀 30 h。试验后,利用 OM 和扫描电子显微镜(SEM)观察表面水蚀形貌,采用德国 ZEISS 公司 LSM710 激光共聚焦显微镜分析 3D 立体形貌。

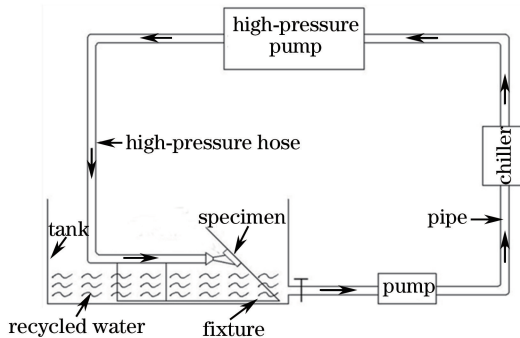


图 3 水蚀试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of water erosion experimental device

3 试验结果及分析

3.1 熔覆层微观组织

激光熔覆可以看成是一个定向凝固过程,根据凝固理论,熔覆层中温度梯度 G 和凝固速率 R 的比值即 G/R 是影响凝固组织形态的重要参数^[14]。图 4 所示为单道 Stellite6 熔覆涂层横截面的组织形貌,从涂层底部自下而上大致可以分为以下几个区域:平面晶区、胞状和柱状晶区、树枝晶区和等轴晶区。

在基体表面微熔区,一方面由于受到熔体尺寸的限制和动态凝固特征的影响,对流难以充分展开,不能

及时排走的凝固前沿溶质原子有利于界面的稳定;另一方面,熔池底部直接与冷的基体接触,温度梯度 G 很大,而界面处的冷却速率 R 几乎为零,因此 G/R 趋向于无穷大,凝固组织以平面晶方式生长。随着凝固界面由熔池底部逐渐向上推移,热量不断积累,温度梯度逐渐减小,并且凝固速率逐渐加快,即 G/R 值减小。界面前沿出现较窄的成分过冷区,平面生长方式遭到破坏,出现生长扰动凸起,与熔池最大散热方向一致的凸起生长得到促进,取向不利的凸起生长则受到抑制,因此凝固组织呈现胞状晶和外延生长的柱状晶^[15],如图 4(b)所示。随着结晶逐渐向熔覆层内部推进,界面前沿的温度梯度减小,凝固速率增大,即 G/R 进一步减小,凝固组织逐渐由粗大的柱状晶变成细小的树枝晶。此时,熔覆层中部的枝晶取向由热流方向和晶体学各向异性共同决定,枝晶生长方向与垂直于熔覆层界面方向有一定的角度,如图 4(c)所示。在熔覆层自由表面, G/R 很小,同时由于激光束的搅拌作用,自由表面形成紊乱枝晶,此时基体散热已不再起主导作用,枝晶取向主要由晶体学各向异性决定,组织呈现为方向各异的细小树枝晶和等轴晶,如图 4(d)所示。

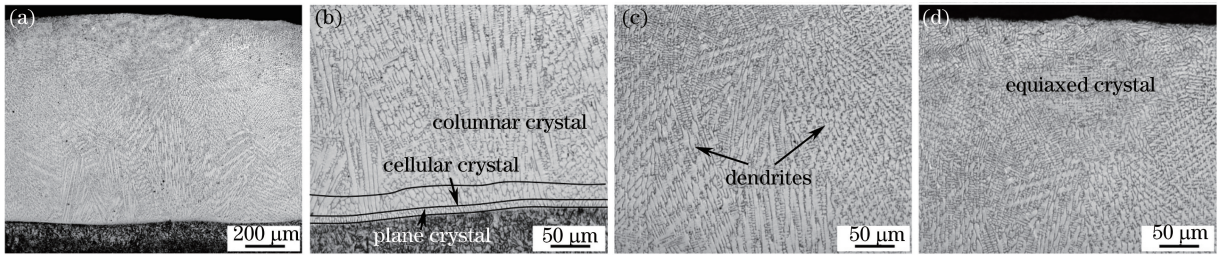


图 4 熔覆层微观组织形貌。(a)OM 照片;(b)熔覆层底部;(c)熔覆层中部;(d)熔覆层顶部

Fig. 4 Microstructures of cladding layer. (a) OM image; (b) bottom of cladding layer; (c) middle of cladding layer; (d) top of cladding layer

图 5 所示为 Co-C-30%Cr(30%为对应组分的质量分数)相图,Stellite6 合金位于亚共晶成分点(图中虚线处)。在激光熔覆冷却过程中, γ -Co 作为初生相首先析出,并固溶了一定的 Cr、Fe 等元素。随着凝固界面不断推进,Cr、W、C 等元素在枝晶间富集,引起成分偏析,使液相达到共晶成分点,从而形成共晶组织^[16]。图 6 所示为熔覆层的 XRD 分析结果,可以看出,Stellite6 涂层的物相包括面心立方(FCC)结构的 γ -Co 以及 $M_{23}C_6$ 、 Cr_7C_3 、 CoC_x 等碳化物。

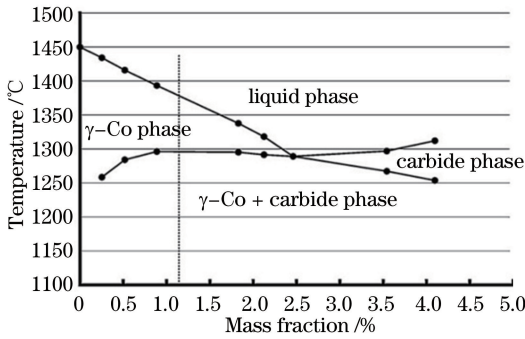


图 5 Co-C-30%Cr 相图

Fig. 5 Phase diagram of Co-C-30%Cr

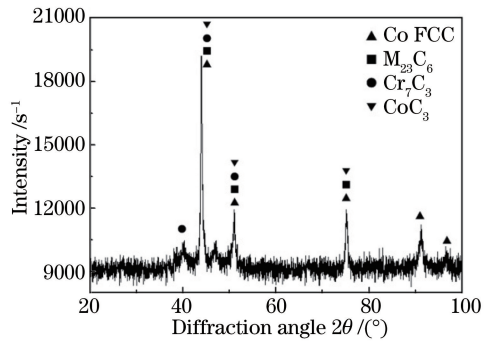


图 6 Stellite6 涂层物相组成

Fig. 6 Phases formed in Stellite6 coating

图 7 是图 4(c)中 Stellite6 涂层中部树枝晶组织的局部放大图,为分析该处不同组织之间的成分差异,分别在枝晶内(A 点)和枝晶间(B 点)利用能谱仪(EDS)进行成分分析,结果如图 8 所示。可以看出,A 点主要成分是 Co 元素以及一定含量的 Cr、Fe 元素;B 点主要成分是 Cr 元素以及一定含量的 Co 元素。结合相图和 XRD 分析结果可知,枝晶内是富集了 Cr、Fe 元素的 γ -Co 固溶体基底,枝晶间为 γ -Co 基底和 Cr、Co 等元素的碳化物形成的层片状共晶组织。

为了探究合金元素在基体和 Stellite6 涂层间的扩散情况,对多道两层熔覆层进行 EDS 线扫描分析,结果如图 9 所示。可以看出,基体中的 Fe 元素向熔覆层发生了明显的扩散,随着离界面距离的增大,稀释量逐渐减少。由于熔覆过程中部分基材被熔化,热影响区受到热作用,熔覆材料中少量 Co 元素扩散到基材中,Cr、Ni、W 元素分布则较为均匀。

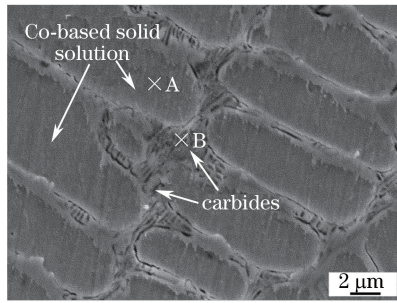


图 7 Stellite6 涂层中部树枝晶微观组织

Fig. 7 Microstructure of dendrites in the middle of Stellite6 coating

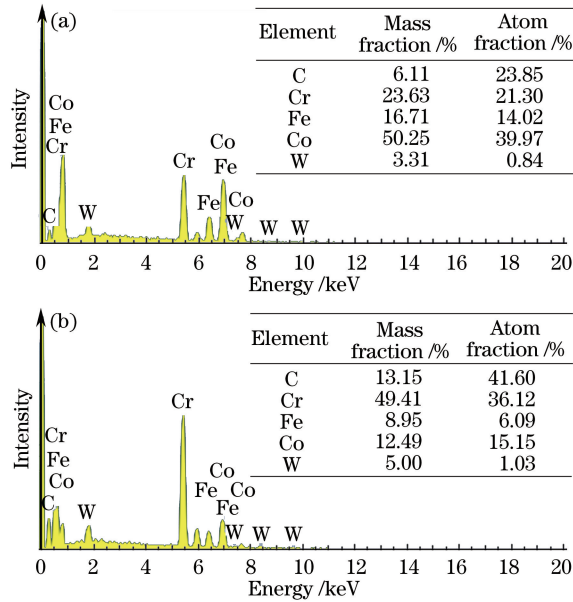


图 8 EDS 成分分析。(a) A 点;(b) B 点

Fig. 8 Results of EDS analysis. (a) Point A; (b) point B

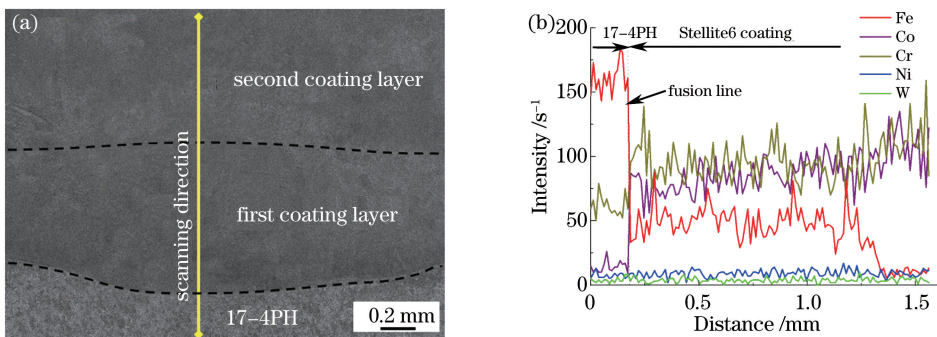


图 9 EDS 线扫描分析结果。(a)扫描方向;(b)元素扩散

Fig. 9 Analysis results of EDS line scanning. (a) Scanning direction; (b) element diffusion

3.2 熔覆层显微硬度

图 10 所示为多道两层 Stellite6 涂层横截面的硬度分布,其中 HAZ 表示热影响区。图 10(a)所示为从涂层表面到基材的纵向硬度,其平均硬度值(499.7 HV)约为基材平均硬度值(367.5 HV)的 1.4 倍,涂层的最高硬度值达到了 561 HV。从图 10(a)中可以看出,第二层涂层的硬度要高于第一层涂层的,并且层与层和道与道之间的搭接区域出现了软化现象。这是由于多道多层熔覆时,激光作用在已经凝固的涂层表面,导致上一道或上一层涂层一部分发生重熔,搭接区部分晶粒受热长大,导致硬度降低。此外,靠近基材的热影响区也出现软化现象,激光束对热影响区的热作用引起组织细化,该区域的马氏体组织经过回火后,硬度相

比基材的有所降低^[17]。

图 10(b)所示为涂层横截面顶部(距离涂层表面 0.2 mm)、中部(距离涂层表面 1.1 mm,位于两层搭接区)、底部(熔合线上方 0.2 mm)沿水平方向的横向硬度分布。三者平均硬度分别为 537.3,521.6,430.3 HV,涂层顶部和中部的硬度高于底部的。这主要是由于涂层底部多为粗大的柱状晶和胞状晶,晶粒尺寸比顶部与中部的树枝晶和等轴晶的尺寸大。此外,回火作用导致多道搭接区域的晶粒尺寸发生变化而引起硬度变化,因此沿激光沉积方向硬度值出现周期性波动。

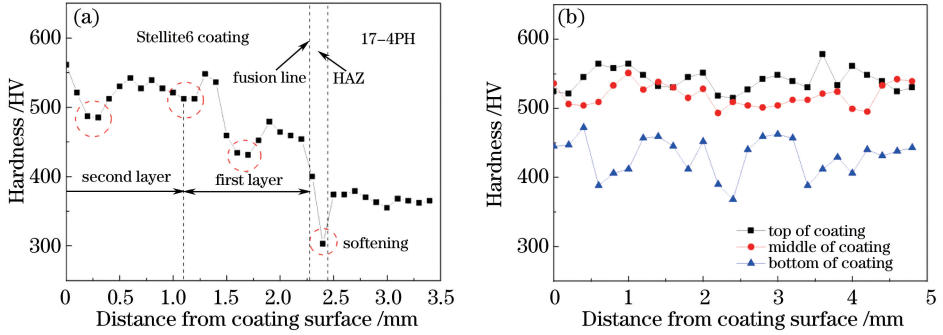


图 10 Stellite6 涂层的硬度分布。(a)纵向硬度;(b)横向硬度

Fig. 10 Hardness distributions of Stellite6 coating. (a) Longitudinal hardness; (b) transverse hardness

3.3 熔覆层耐水蚀性能

图 11 所示为基材 17-4PH 不锈钢和 Stellite6 涂层经过 30 h 水流冲蚀后的宏观表面形貌。可以看出,基材表面经水蚀后变得凹凸不平,有大量较深的划痕和水蚀坑,出现了较严重的材料剥落,而 Stellite6 涂层表面较为平整,仅有一些较浅的水蚀坑,出现了较少的材料剥落。

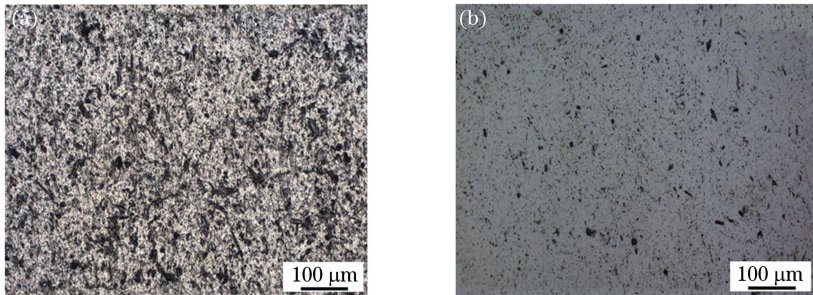


图 11 宏观表面水蚀形貌。(a)17-4PH 不锈钢;(b)Stellite6 涂层

Fig. 11 Macroscopic morphologies after water erosion. (a) 17-4PH stainless steel; (b) Stellite6 coating

图 12 所示为基材和 Stellite6 涂层表面的微观水蚀形貌,可以看出,经水流冲蚀后基材表面出现了明显的条带状划痕、微裂纹和水蚀坑。Stellite6 涂层表面仅有少量较浅的压痕和水蚀坑,且深度较浅,大部分保留了初始表面形貌。

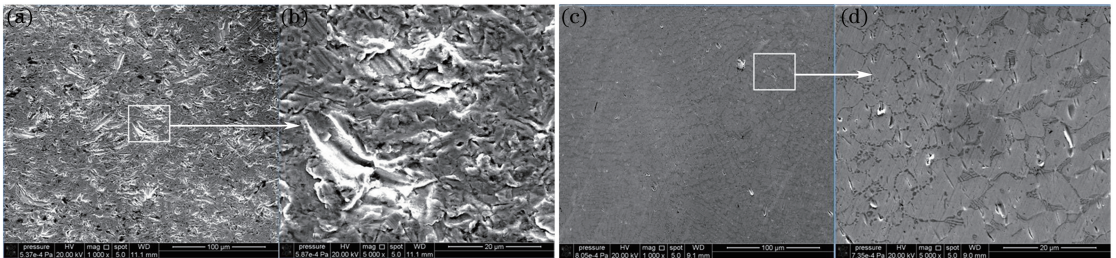


图 12 微观表面水蚀形貌。(a) 17-4PH 不锈钢;(b) 图 12(a)局部放大图;(c) Stellite6 涂层;(d) 图 12(c)局部放大图

Fig. 12 Microscopic morphologies after water erosion. (a) 17-4PH stainless steel; (b) partial enlarged view of Fig. 12(a); (c) Stellite6 coating; (d) partial enlarged view of Fig. 12(c)

图 13 所示为基材和 Stellite6 涂层经水蚀后在激光共聚焦下的 3D 立体表面形貌。表面粗糙度测量和水蚀坑深度标定结果显示,基材水蚀后的表面粗糙度为 $0.361 \mu\text{m}$,水蚀坑最大深度为 $2.44 \mu\text{m}$;而 Stellite6 涂层水蚀后的表面粗糙度仅为 $0.098 \mu\text{m}$,水蚀坑最大深度为 $1.19 \mu\text{m}$,表明 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层后,耐水蚀性能有了显著提高。有研究表明,钴基合金在空蚀过程中表面会发生相变,受到冲击时 FCC 结构的奥氏体相 $\gamma\text{-Co}$ 会转变为稳态的密排六方结构的马氏体相 $\epsilon\text{-Co}$,这一过程会吸收大部分冲击能量,从而减缓材料的破坏过程^[18]。

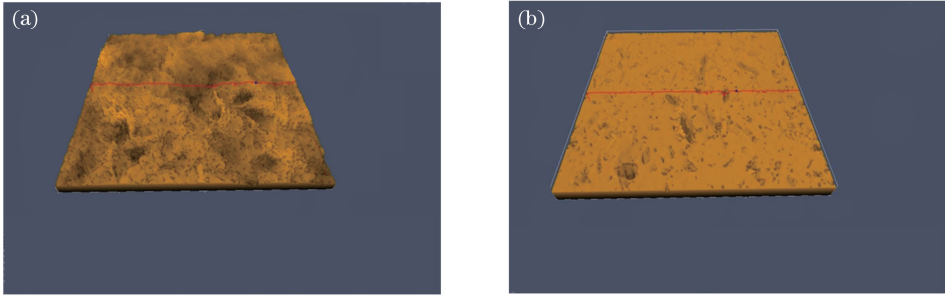


图 13 基材和 Stellite6 涂层水蚀后的 3D 立体表面形貌。(a) 17-4PH 不锈钢;(b) Stellite6 涂层

Fig. 13 3D morphologies of substrate and Stellite6 coating after water erosion. (a) 17-4PH stainless steel; (b) Stellite6 coating

4 结 论

主要研究了 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层的微观组织、硬度分布和耐水蚀性能,得到的结论如下。

1) Stellite6 涂层的微观组织从熔合线到涂层表面依次呈现平面晶、胞状和柱状晶、树枝晶区和等轴晶形貌,涂层底部粗大的柱状晶呈现外延生长的特性。涂层的物相包括 FCC 结构的 $\gamma\text{-Co}$ 固溶体和 M_{23}C_6 、 Cr_7C_3 、 CoC_x 等碳化物,Fe、Co 元素在基体和涂层间的扩散较为明显。

2) 多道两层熔覆时,Stellite6 涂层的最高硬度达到 561 HV,平均硬度值约为基材的 1.4 倍,第二层涂层的硬度高于第一层涂层的。激光回火作用引起晶粒尺寸的变化,导致层与层、道与道的搭接区域出现软化现象,横向硬度分布随着多道搭接出现周期性波动。

3) 相同水流冲蚀条件下,基材 17-4PH 不锈钢表面材料破坏严重,出现了大量较深的压痕和水蚀坑,表面粗糙度为 $0.361 \mu\text{m}$,水蚀坑最大深度为 $2.44 \mu\text{m}$ 。而 Stellite6 涂层表面基本保留了初始表面形貌,表面粗糙度仅为 $0.098 \mu\text{m}$,水蚀坑最大深度为 $1.19 \mu\text{m}$ 。Stellite6 涂层的耐水蚀性能相比基材有了显著提高。

参 考 文 献

- [1] Wang J, Zou H, Li C, *et al.* The effect of microstructural evolution on hardening behavior of type 17-4PH stainless steel in long-term aging at $350 \text{ }^\circ\text{C}$ [J]. *Materials Characterization*, 2006, 57(4): 274-280.
- [2] Raj S V, Ghosn L J, Lerch B A, *et al.* Mechanical properties of 17-4PH stainless steel foam panels [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 456(1): 305-316.
- [3] Liu Zhijiang, Liu Xiangmin, Li Lianxiang. Erosion damage of last stage long blade of large steam turbine in China in recent years [J]. *Power Engineering*, 2003, 23(1): 2201-2204.
刘志江, 刘向民, 李连相. 近年我国大型汽轮机末级长叶片的冲蚀损伤 [J]. *动力工程*, 2003, 23(1): 2201-2204.
- [4] Shepeleva L, Medres B, Kaplan W D, *et al.* Laser induced Cu/alumina bonding: Microstructure and bond mechanism [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 125(1): 40-44.
- [5] Oakley S Y, Nowell D. Prediction of the combined high-and low-cycle fatigue performance of gas turbine blades after foreign object damage [J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(1): 69-80.
- [6] Zhu Beidi, Zhang Zhidong. Study on laser cladding of last stage blades of steam turbine [J]. *Chinese J Lasers*, 1994, 21(6): 526-529.
朱蓓蒂, 张之栋. 汽轮机末级叶片的激光熔覆研究 [J]. *中国激光*, 1994, 21(6): 526-529.

- [7] Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida, *et al.* Research status and development of laser cladding technology[J]. *Application Laser*, 2012, 32(6): 538-544.
王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 激光熔覆技术研究现状及其发展[J]. *应用激光*, 2012, 32(6): 538-544.
- [8] Li Yangliang, Jin Haixia, Bai Xiaobo, *et al.* Research status and development trend of laser cladding technology[J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2009, 30(4): 1-5.
李养良, 金海霞, 白小波, 等. 激光熔覆技术的研究现状与发展趋势[J]. *热处理技术与装备*, 2009, 30(4): 1-5.
- [9] Qiao Y F, Fischer T E, Dent A. The effects of fuel chemistry and feedstock powder structure on the mechanical and tribological properties of HVOF thermal-sprayed WC-Co coatings with very fine structures[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 172(1): 24-41.
- [10] D'Oliveira A S C, da Silva P S C, Vilar R M. Microstructural features of consecutive layers of Stellite 6 deposited by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 153(2): 203-209.
- [11] Duan Xiaoxi, Gao Shiyong, Gu Yongfei, *et al.* Study on reinforcement mechanism and frictional wear properties of 316L-SiC mixed layer deposited by laser cladding[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(1): 0103004.
段晓溪, 高士友, 顾勇飞, 等. 激光熔覆 316L+SiC 的强化机制和摩擦磨损性能研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0103004.
- [12] Xu Jintao, Li An, Liu Dong, *et al.* Research on corrosion resistance and wear resistance of laser cladding Cr₃Si/ γ multi-phase coating[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0303006.
徐金涛, 李安, 刘栋, 等. 激光熔覆 Cr₃Si/ γ 多相涂层耐蚀性和耐磨性研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0303006.
- [13] 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.
- [14] Yang Yuling, Dong Danyang. Laser surface modification technology and application of Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 72-76.
杨玉玲, 董丹阳. 材料的激光表面改性技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 72-76.
- [15] Wang Zhihui, Wang Huaming, Liu Dong. Microstructure and mechanical properties of AF1410 ultra-high strength steel using laser additive manufacture technique[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0403001.
王志会, 王华明, 刘栋. 激光增材制造 AF1410 超高强度钢组织与力学性能研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403001.
- [16] Gholipour A, Shamanian M, Ashrafizadeh F. Microstructure and wear behavior of stellite6 cladding on 17-4PH stainless steel[J]. *Journal of Alloy and Compounds*, 2011, 509(14): 4905-4909.
- [17] Wang Mingyu. Study on the microstructure and fatigue properties of B2 mould steel laser cladding layer [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 25-26.
王明瑜. B2 模具钢激光熔覆层微观组织与疲劳性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 25-26.
- [18] Woodford D A. Cavitation-erosion-induced phase transformations in alloys[J]. *Metallurgical Transactions*, 1972, 3(5): 1137-1145.