

# 激光加工技术在汽轮机叶片制造中的应用

姚建华<sup>1</sup> 叶 钟<sup>2</sup> 沈红卫<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 浙江工业大学激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014  
<sup>2</sup> 杭州汽轮机股份有限公司, 浙江 杭州 310022; <sup>3</sup> 上海电气电站设备有限公司, 上海 200240)

**摘要** 选择不同的激光加工技术,如激光合金化、激光修复和激光固溶技术,实现了 2Cr13 和 17-4PH 两种常见叶片的强化与修复。对强化和修复前后汽轮机叶片的显微结构、硬度、残余应力、耐磨性、抗腐蚀、抗气蚀性能进行了测试分析。证明激光加工技术在汽轮机叶片的强化和修复方面具有良好的应用前景。

**关键词** 激光技术;汽轮机叶片;激光合金化;激光修复;激光固溶;抗气蚀

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.031403

## Application of Laser Processing Technologies on Turbine Blades

Yao Jianhua<sup>1</sup> Ye Zhong<sup>2</sup> Shen Hongwei<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Research Centre of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China  
<sup>2</sup> Hangzhou Steam Turbine Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310022, China  
<sup>3</sup> Shanghai Electric Power Generation Equipment Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

**Abstract** With different laser processing technologies such as laser alloying, laser repairing and laser solid solution strengthening, two kinds of steam turbine blades with 2Cr13 and 17-4PH are hardened and repaired. Before and after hardening or remanufacturing, the microstructures, microhardness, residual stress, wear resistance, anti-corrosion and anti-cavitations properties are measured. The results confirm that laser processing technologies could be applied to strengthen and repair turbine blades.

**Key words** laser technique; steam turbine blade; laser alloying; laser repairing; laser solid solution; anti-cavitation

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900

## 1 引言

工业汽轮机作为关键动力设备在诸如石油、化工、轻工等重要经济部门中发挥着越来越重要的作用,而叶片作为汽轮机关键的零件,对于汽轮机的安全运行至关重要。叶片的作用是将高速气流的动能转换成机械能,特别是末级叶片工作在湿蒸汽区<sup>[1]</sup>,蒸汽在运行中易凝结成小水滴,在高速运转中,小水滴由于离心运动被高速甩向叶片末端并发生爆破,长期受此冲击爆破力作用,在叶片末端将产生疲劳裂纹并进而发展成气蚀<sup>[2]</sup>。国内外统计资料表明,许多汽轮发电机组的事故均起因于叶片的失效<sup>[3,4]</sup>。据美国电力研究协会(EPRI)统计报道,1977~1981年之间,由于汽轮机叶片失效而导致的全美电厂停机所造成的直接经济损失在 15.5~18.4 亿美元之间。特别是近几年来受调峰降负荷运行影响,汽轮机运行工况较为恶劣,加剧了气蚀现象的发生与发展。因此,叶片抗气蚀能力的高低直接影响到汽轮机的工作效率及安全运行。

为提高汽轮机叶片的抗气蚀性能、保证汽轮机的安全运行并提高叶片的使用寿命<sup>[5]</sup>,对于可以淬硬化的马氏体不锈钢材料(1Cr13,2Cr13,2Cr13MoV 等),先后采用了火焰淬火、感应淬火、电镀、喷涂等方法强化进气边<sup>[6]</sup>;对于沉淀硬化类不锈钢材料(如 17-4PH),通常采用镶嵌 stellite 合金<sup>[7]</sup>等表面强化的方法。而这些方法存在的问题主要是容易产生变形、裂纹和合金片容易脱落等,故未能有效地抑制气蚀的产生。

激光加工技术能够利用瞬间产生的高能量,实现基体的强化,具有完成强化材料与基体的冶金结合、热

收稿日期: 2011-12-26; 收到修改稿日期: 2012-01-10; 网络出版日期: 2012-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(50971117)资助课题。

作者简介: 姚建华(1965-),男,博士,教授,主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: laseryao@googlemail.com

影响区小、变形小、自动化尺度高等特点,有望完全克服传统方法中的缺点,正得到越来越广泛的应用。

另外,激光技术对于失效的叶片修复也可以发挥重要作用,叶片的型线一般比较复杂,采用手工焊无法直接成形复杂形状,并且与基体的结合较差,不适合用来修复。而基于直接金属沉积(DMD)的激光修复技术能自由成形,结合强度高,热影响区小,非常合适用来进行零件修复。

## 2 2Cr13 汽轮机叶片激光合金化

激光合金化<sup>[8,9]</sup>是在高能激光束的辐照下,使基体材料表面一薄层与根据需要加入的合金元素同时快速熔化、混合,使材料表面仅在很短时间内就形成了以原基材为基体、具有要求的深度和化学成份的表面合金化层。本试验利用 6 轴 4 联动多功能连续 CO<sub>2</sub> 激光器系统实现激光合金化,将合金元素与吸光材料在高功率激光作用下,充分进入叶片表层,形成一定深度的表面合金化层。

### 2.1 合金化层的显微硬度及显微组织分析

图 1 为激光合金化叶片的层深-显微硬度分布曲线。在激光合金化处理后,表层的硬度明显增加,显微硬度在 650~800 HV<sub>0.2</sub>之间,平均显微硬度为 701.2 HV<sub>0.2</sub>。合金化层的厚度在 0.4 mm 左右,硬度从强化层至基体递减。对比基材的显微硬度为 200~250 HV<sub>0.2</sub>,激光合金化处理后基材表面的显微硬度提高了 1.8 倍左右。

基材是经过调质处理的 2Cr13,金相组织为铁素体和呈颗粒状的碳化物组成的回火索氏体组织,如图 2(a)所示。经过激光合金化处理后,产生组织致密的合金化层,无气孔,无裂纹,与基体形成冶金结合,如图 2(b)和图 3(a)所示。组织变化主要是因为:1)在合金化过程中,由于激光束的能量很高,基体表面在激光束的照射下发生熔化,形成熔池,合金粉末(主要是 W、Cr 等)在

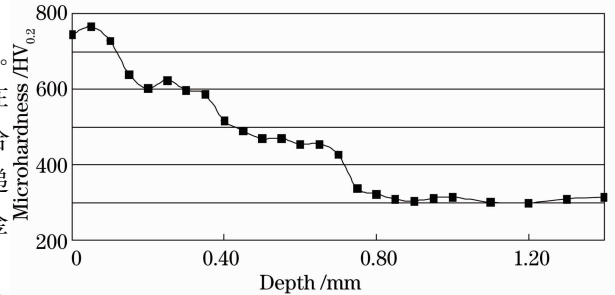


图 1 激光合金化叶片的层深-显微硬度曲线

Fig. 1 Depth-microhardness curve after laser alloying

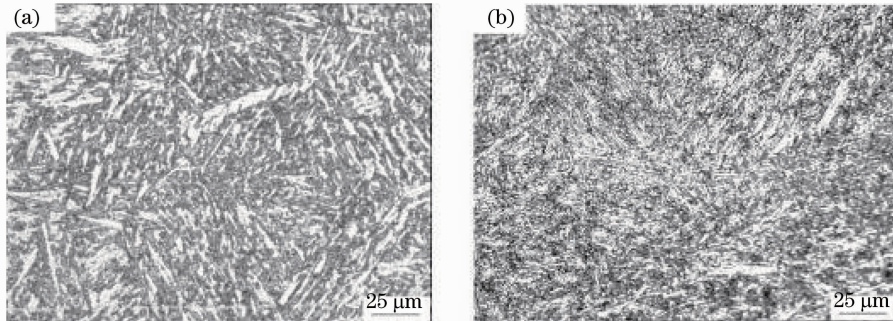


图 2 金相组织。(a)2Cr13 基材;(b)激光合金化层

Fig. 2 Metallurgy structure. (a) 2Cr13 base metal; (b)laser alloying layer

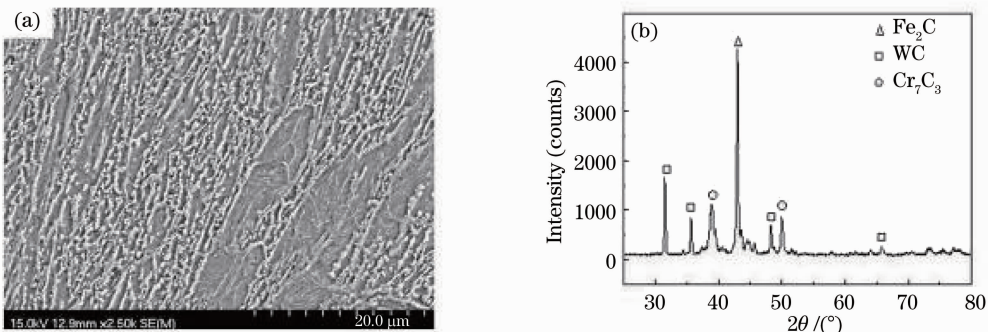


图 3 合金化层图片。(a) SEM; (b) XRD

Fig. 3 Laser alloying layer. (a) SEM; (b) XRD analysis

短时间内熔入基体表层中,并发生化学反应,形成碳化物[图 3(b)],而合金粉末中的 Ni 作为可以扩大奥氏体区域的元素,能够阻止第二相粒子的形成,同时还可以提高合金层组织的耐腐蚀性;2)因为激光的快速加热和快速冷却,使熔化层中的少量奥氏体来不及转化,而以残余奥氏体的形式存在于表层,使新的合金化层不但具有一定的硬度,而且还保留了一定的塑韧性。

## 2.2 合金化层的抗气蚀性能分析

图 4 为抗气蚀模拟试验的示意图。对基材和激光合金化试样进行模拟气蚀试验,得到失重量-时间曲线,如图 5 所示,基体的失重量明显高于合金化试样,说明在同样的条件下,激光合金化后,材料具有更好的抗气蚀性能。

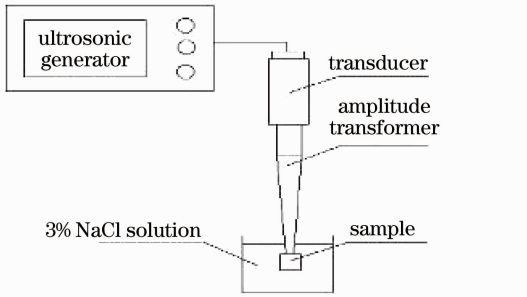


图 4 气蚀试验示意图

Fig. 4 Diagram of cavitation test

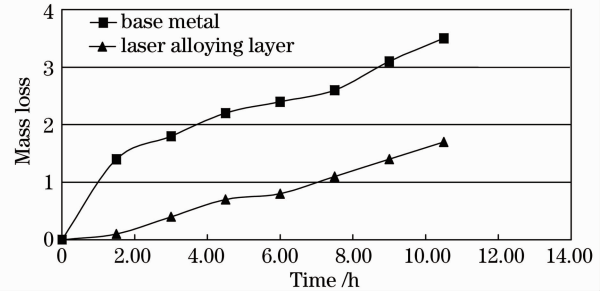


图 5 失重量-时间曲线图

Fig. 5 Time history of the mass loss

通过对气蚀面进行扫描电镜(SEM)观察发现:基材的气蚀面有很多很深的、分布较均匀的块状气蚀坑,形成较深的孔洞,如图 6(a)所示,从其气蚀坑的形貌上看,是由金属的剥离造成的。气蚀面上无裂纹,但在气蚀和非气蚀交界处局部存在着微裂纹。而从图 6(b)可以看出:在同样的气蚀试验条件下,合金化层表面的气蚀坑相对较浅,且分布相对更均匀,气蚀面和非气蚀面上均未发现裂纹。这主要是由于合金化层表面的硬度提高、组织细化,表面大量弥散分布的碳化物硬质相使裂纹的发生和扩展受到阻碍,不致造成大块的剥落,减少了其剥蚀速率,使其抗气蚀性能较基材提高一倍以上。

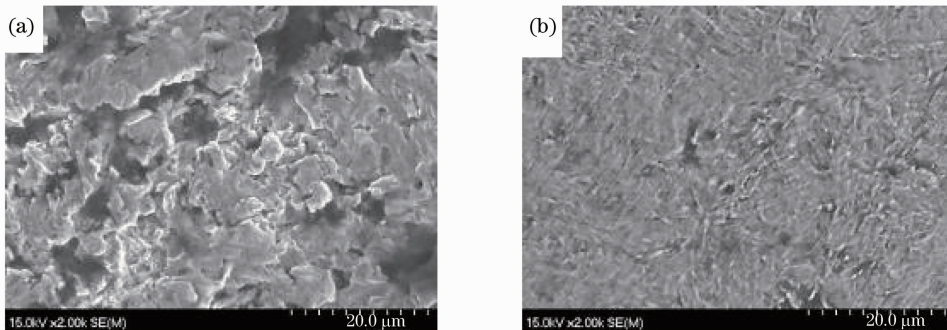


图 6 气蚀形貌。(a)基材;(b)激光合金化层

Fig. 6 Superficial morphology. (a) Base metal morphology; (b) after laser alloying

## 2.3 应用概况

从 2001 年开始,与杭州汽轮机股份公司联合进行了多年的研发与装机实测试验,目前,该技术已经在该公司首先得到大面积使用,在 600 MW 等级、NK63/7.1 和 NK71/3.2 等机组 SK28-90、HK28-80、HKB63-90、LK37、LKB37-46、ND399-578 等 42 个型号,共 40000 余片叶片装机 800 余台,经探伤检验合格率达到 100%,无变形,提高了叶片质量和安全系数。据用户装机反馈,装机寿命比原来未处理的提高 1 倍以上,安全可靠。并且,激光合金化技术完全替代了电镀、火焰淬火的传统工艺。同时,已应用于上海汽轮机厂的 690 mm 扭转叶片处理,并由杭州博华激光技术有限公司进行了专业化激光强化处理,替代感应淬火,大大减少了淬火应力造成的变形和断裂的风险。



### 3 17-4PH 叶片的激光固溶强化

激光固溶强化是特别针对沉淀硬化材料[0Cr17Ni4Cu4Nb(17-4PH)、X5CrNiCuNb16-4 等]提出的,是指在同一个激光加工过程中,利用温度在不同区域的差异,通过元素固溶扩散和析出实现固溶强化,达到整体复合强化的效果。

#### 3.1 显微结构与硬度

图 7 为固溶强化叶片头部试样,从图中清晰可见时效硬化层、热影响区、基体三个不同色差的区域。其硬化层宽度为 28~30 mm,强化层硬度分布如表 1 所示,基体的硬度为 301HV<sub>0.2</sub>;其硬化层深度约 1.8 mm,强化层硬度分布均匀。

由于 17-4PH 为典型的沉淀硬化不锈钢,通过一定时间的保温时效处理,原先通过激光加热过饱和过程存在于马氏体和铁素体中的溶质元素以一定形态析出,弥散分布在基体上,使此类材料的整体性能进一步提升。



图 7 叶片头部硬化层的宏观照片

Fig. 7 Hardening layer picture of blade head

表 1 实物叶片激光强化层硬度分布

Table 1 Hardness distribution of the blade after laser strengthening

Depth /mm	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
Microhardness /HV <sub>0.2</sub>	458	403	419	419	405	405	397	387	390	390

图 8(a), (b) 分别为时效处理后在铁素体基体上和马氏体基体上的析出相。可以发现在铁素体基体中析出的沉淀相大多分布于晶界或者晶界边缘,析出相的数量较多,但大小不一,直径多在 100~1000 nm 之间。而在马氏体基体上析出的相较为细小,且基本弥散分布在马氏体基体上,在其他组织上则分布较少,析出相直径都在 100 nm 左右。结合已有的研究成果和马氏体的能谱分析数据,可以推测出,此析出相即为 17-4PH 的沉淀硬化相, FCC 结构的  $\epsilon$ -Cu<sup>[10]</sup>。

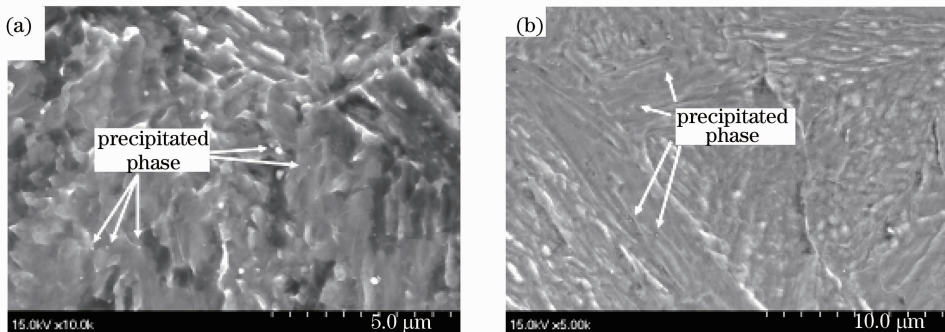


图 8 析出相。(a) 铁素体基体上; (b) 马氏体基体上

Fig. 8 Precipitated phase. (a) On the ferrite; (b) on the martensite

#### 3.2 抗气蚀性能分析

从图 9 可以看出激光强化处理后表面的耐气蚀性能较基材提高了 1 倍以上。气蚀试验完成后,观察了基材和激光强化层气蚀后的表面形貌,如图 10 所示。在同样的气蚀试验条件下,激光强化层表面的气蚀坑呈网状分布,坑的深度相对较浅,且分布相对均匀,气蚀面和非气蚀面上均未发现裂纹。这说明在激光强化过程中由于激光束的快速加热和冷却作用(非平衡快速凝固过程),表层硬度和强度较高,组织细化,颗粒间结合面较多,晶粒分

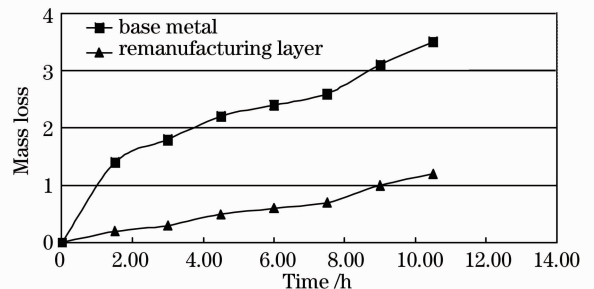


图 9 模拟气蚀试验失重量-时间曲线图

Fig. 9 Time history of the mass loss curve simulated in laboratory

布均匀,存在大量的细晶粒边界,起到缓冲应力的作用。疲劳裂纹不容易扩展,进而不会殃及其他晶粒,从而提高了韧性和塑性,故表现出优异的抗气蚀性能。

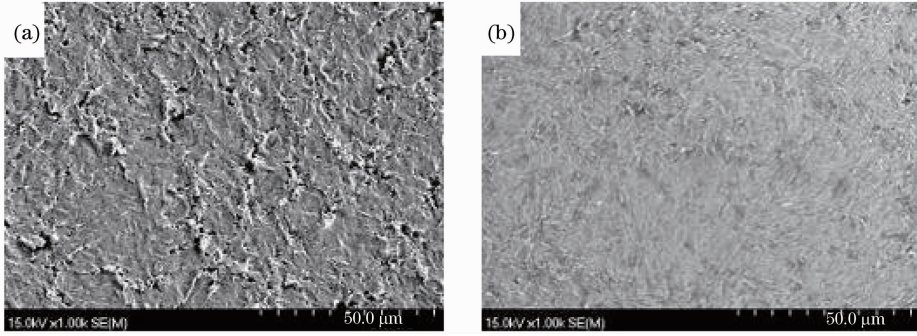


图 10 表面气蚀形貌。(a)基体;(b)激光强化

Fig. 10 Superficial cavitation morphology. (a) 17-4PH base metal; (b) after laser strengthening

### 3.3 应用概况

该技术和上海汽轮机厂联合开发,已经成功用于上海汽轮机厂 1000 MW 超超临界汽轮机低压末级动叶片中,并建立了专用激光处理生产线,实现国产化制造。

## 4 基于激光 DMD 的 2Cr13 叶片修复

试验所用的激光直接金属堆积成形系统如图 11 所示。采用同轴送粉技术,以氩气作为保护气体和粉末载气,将合金粉末通过同轴送粉器输送到熔池里,通过三维联动系统实现修复,修复后表面再实施合金化处理。

从图 12 所示的显微结构可以明显地看出组织为过饱和固溶体枝晶及枝晶间的碳化物、硼化物等多元共晶体组成,分布非常均匀并且没有裂纹和气孔等缺陷,形成了良好的冶金结合。

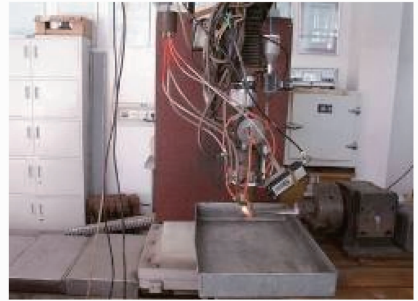


图 11 激光直接金属堆积成形系统

Fig. 11 Laser direct metal deposition system

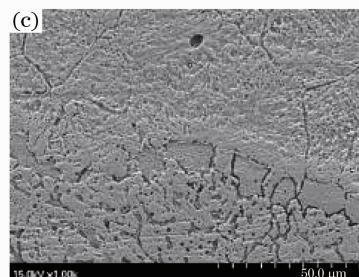
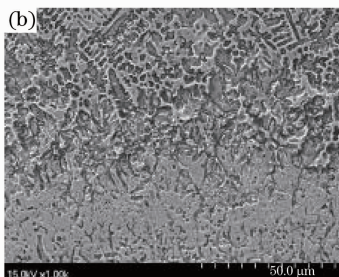
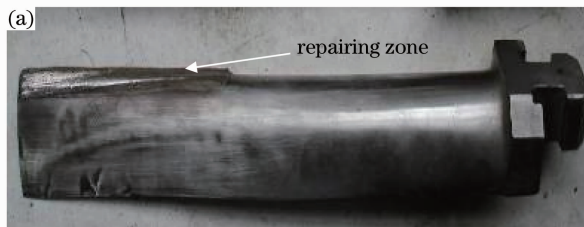


图 12 叶片经激光修复后并强化。(a) 叶片修复和强化后整体形貌;(b) 合金化层、过渡区和热影响区;

(c) 修复层与叶片基体结合处

Fig. 12 Blades remanufactured and strengthened by laser irradiation. (a) Overall morphology; (b) laser alloying zone;

(c) remanufacturing layer

图 13 是取样后的硬度测试曲线,从图中可看出合金化层的平均硬度在  $800 \text{ HV}_{0.2}$  以上,其下是非常狭窄的过渡层和热影响区,热影响区以下是熔覆层。由于修复层是多层堆积,新一层修复的时候存在一定的熔深,因此也在前一层存在一硬度较高的淬火区。

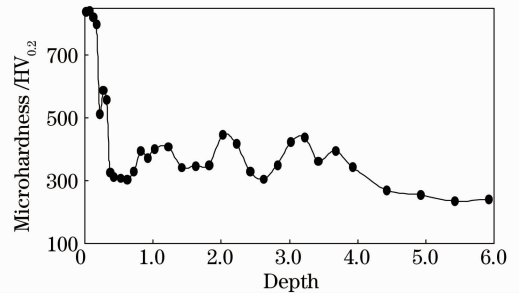


图 13 激光修复+强化叶片的层深-显微硬度曲线

Fig. 13 Depth-microhardness curve of laser remanufacturing and laser alloying layer

## 5 结 论

1) 激光合金化层明显区别于基材,其晶粒明显细化,通过添加的合金元素的作用,在基材表面形成弥散分布的硬质相及各种化合物,使表面硬度较基材提高 1.8 倍左右。合金化层较基材抗气蚀性能提高一倍以上。因此激光合金化由于加工容易、生产效率高、成本相对较低等优点,在提高气蚀性能和延长叶片使用寿命方面具有较好的应用前景。

2) 对于沉淀硬化类不锈钢结合时效处理,能够实现激光固溶强化,整个激光固溶强化层厚度大于  $1.8 \text{ mm}$ ,硬度大于  $400 \text{ HV}_{0.2}$ ,且强化层的硬度由表层到芯部呈梯度下降,激光强化处理后表面的耐气蚀性能较基材提高了 1 倍以上,晶界大量析出的 FCC 结构的  $\epsilon\text{-Cu}$  是固溶弥散强化的主因。

3) 激光修复后,元素分布均匀,无气孔、裂纹缺陷,比调质基体的硬度、耐磨损性等机械性能显著提高。这说明基于 DMD 技术的激光修复叶片技术适用于叶片,同时对修复层进一步实施合金化可以获得修复后的表面强化。

综上所述,该技术的初步应用展示了良好的前景:实践证明,激光强化技术替代传统技术安全可靠,性能提高显著;实现报废叶片的激光修复再制造为期不远,尤其是随着柔性光纤激光的发展,实现现场修复逐渐成为可能。

## 参 考 文 献

- 1 Yao Jianhua, Lai Haiming. Surface quench-hardening by laser of confined zones of steam turbine blades [J]. *Power Equipment*, 2005, (2): 101~103
- 姚建华,赖海鸣. 汽轮机叶片局部激光表面淬火[J]. 发电设备, 2005, (2): 101~103
- 2 孙建新,张忠文,盛 民等. 汽轮机末级叶片焊接修复[J]. 山东电力技术, 2001, (5): 42~43
- 3 Wang Yang, Chen Jie, Ni Yongjun *et al.*. Design and research of last stage long blade for nuclear half-speed steam turbine [J]. *Turbine Technology*, 2004, **46**(1): 12~15
- 汪 洋,陈 杰,倪永君等. 核电半转速汽轮机末级长叶片的设计研究[J]. 汽轮机技术, 2004, **46**(1): 12~15
- 4 Dai Liping, Yu Maozheng, Xu Yuping. Study of water-erosion characteristics and fatigue crack propagation of last stage moving blade trailing edge of a steam turbine [J]. *Turbine Technology*, 2004, **46**(6): 437~443
- 戴丽萍,俞茂铮,徐玉平. 汽轮机末级动叶片出口边水蚀特性及疲劳裂纹扩展的研究[J]. 汽轮机技术, 2004, **46**(6): 437~443
- 5 B. L. Lewis. A Unified Approach to Turbine Blade Life Predication [R]. SAE Techn. Paper Ser., No. 821439, 1982
- 6 丁得刚. 火焰表面淬火 [M]. 北京: 机械工业出版社. 1987. 81~133
- 7 Lu Jun. Local welding technology of stellite strip on the final-stage blade of imported-type 300 MW turbine [J]. *Central China Electric Power*, 2000, **13**(2): 28~30
- 陆 军. 300 MW 汽轮机末级叶片司太立合金片焊接工艺[J]. 华中电力, 2000, **13**(2): 28~30
- 8 李 智,马椿喻,才庆魁. 2024(LY12)的激光表面合金化[J]. 宇航材料工艺, 1999, (4): 20~24
- 9 Ju Yi, Guo Shaoyi, Li Zongquan. Status and development of laser surface alloying and laser cladding in China [J]. *Materials Science & Engineering*, 2002, **20**(1): 143~145
- 居 毅,郭绍义,李宗全. 金属表面激光合金化及熔覆处理的研究进展[J]. 材料科学与工程, 2002, **20**(1): 143~145
- 10 Bajguirani H. R. Habibi. The effect of aging upon the microstructure and mechanical properties of type 15-5 PH stainless steel [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2002, **338**(1-2): 142~159