磁痕显示对激光强化 17-4PH 叶片力学性能的影响

韩 亮,宫伟兴,冯天澍,王健泽

(哈尔滨汽轮机厂有限责任公司,黑龙江哈尔滨 150000)

[摘 要] 为增强 17-4PH 钢低压末级叶片的防水蚀性能,对 17-4PH 叶片进汽边进行激光固溶处理。经过激光 固溶处理的末级叶片在后续磁粉探伤过程中,往往会出现明显的磁痕现象。为此,利用光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪、电子探针等分析手段证明了在激光固溶区域边界处出现磁痕的原因为在边界出现的大量的奥氏体组 织,降低了激光固溶边界处的磁导率,从而产生磁痕。利用 XRD 测定激光固溶叶片的残余应力为压应力,三点弯 曲疲劳试验证明通过激光固溶可将 17-4PH 叶片的 R=0.1 疲劳极限由原 750 MPa 提高至 860 MPa。 [关键词] 17-4PH;激光强化;磁痕;线性显示;疲劳

[中图分类号] TG174.44 [文献标识码] B doi: 10.16577/j.issn.1001-1560.2023.0048

[文章编号] 1001-1560(2023)02-0170-05

Effects of Magnetic Mark Display on Mechanical Properties of Laser - Enhanced 17 - 4PH Blades

HAN Liang, GONG Wei-xing, FENG Tian-shu, WANG Jian-ze

(Harbin Steam Turbine Factory Co., Ltd., Harbin 150000, China)

Abstract: In order to enhance the corrosion resistance of the 17-4PH low-pressure last stage blades, the steam inlet side of the 17-4PH blades needs to be treated with laser-enhanced solid solution. The last stage blades treated with laser solution often show obvious magnetic marks in the subsequent magnetic particle inspection. Optical microscope, scanning electron microscope, X-ray diffractometer, electron probe and other analytical means were used to prove that the reason for the appearance of magnetic marks at the boundary of the laser solid solution region was a large number of austenite structures that appeared at the boundary, which reduced the permeability at the boundary of the laser solid solution region. Besides, the residual stress of laser solid solution blade was determined as compressive stress by XRD, and the three-point bending fatigue test showed that the R = 0.1 fatigue limit of 17-4PH blade could be increased from 750 MPa to 860 MPa by laser-enhanced solid solution. Key words: 17-4PH; laser enhancement; magnetic mark; linear display; fatigue

0 前 言

17-4PH(04Cr17Ni4Cu4Nb)不锈钢属于低碳马氏体沉淀硬化型不锈钢,广泛应用于燃气轮压气机叶片、汽轮机叶片、航空航天、海上平台等^[1]。作为汽轮机低 压末级、次末级使用的17-4PH 叶片,需具备优良的耐 水蚀性能。薛承感等^[2]通过多种手段研究了经激光固 溶强化后17-4PH 汽轮机叶片在 NaCl 溶液中进行超声 波汽蚀试验后的基体损失。叶诗豪等^[3]通过调整 CO₂ 激光光斑的形状、激光固溶密度与激光扫描速度研究 17-4PH 钢在不同参数下的汽蚀性,并通过试验证明了 在保证17-4PH 钢不熔化的情况下,功率密度越高,扫 描速率越低;功率密度越均匀,光斑形状为矩形,对固 溶深度、宽度、17-4PH 钢表面硬度及抗汽蚀性能有较 大提高。曹强等^[4]研究了 1Cr15Ni4Mo3N 钢螺栓在磁 粉探伤过程中发现的磁痕,结果表明磁痕为材料内呈 带状分布的残余奥氏体引起的。王树志等^[5]研究了 17-4PH零件在磁粉探伤过程中出现的磁痕,结果表明 磁痕为组织中存在一定量细针状δ-铁素体引起的。陈 波^[6]通过试验模拟了 17-4PH 不锈钢铁素体析出与奥 氏体晶粒长大热处理制度。生产过程中,对激光固溶 的 17-4PH 叶片进行磁粉检查后发现在激光固溶边界 出现与激光固溶区域长度完全吻合的磁痕。为明确激 光固溶后出现磁痕的原因及是否影响该叶片的使用, 本工作利用光学显微镜、扫描电镜、XRD、电子探针等 分析手段证明了 17-4PH 叶片激光固溶后磁痕显示的 原因,采用残余应力测试和三点弯曲疲劳测试明确了 磁痕显示对叶片的使用性能的影响。

[收稿日期] 2022-08-27

[[]通信作者] 韩 亮(1990-),硕士,主要研究方向为金属材料热处理,电话:13704812546,E-mail:hl15238650646@163.com

1 实 验

17-4PH 模锻叶片的化学成分见表 1。叶片经过模 锻成型后采用固溶+调整热处理+时效处理[固溶工艺: (1040±10) ℃,120 min;调整热处理工艺:(816±10) ℃,130 min;时效温度:(556±10) ℃,300 min]的热处 理工艺。经性能热处理的叶片激光固溶并经时效处理 后,在磁粉探伤检查过程中发现激光固溶区域边缘存 在明显的条带状磁痕显示,见图 1。

表 1 17-4PH(05Cr17Ni4Cu4Nb)叶片的化学成分 Table 1 Chemical composition of 17-4PH blade

元素	С	Si	Mn	Р	S	Ni
w/%	0.035 0	0.260 0	0.430 0	0.025 0	0.003 0	4.200 0
元素	Cr	Cu	Ti	Al	Ν	Nb+Ta
w/%	15.300 0	3.400 0	0.002 5	0.017 0	0.035 0	0.260 0



图 1 激光固溶叶片的宏观形貌 Fig. 1 Macro morphology of laser enhanced blade

将激光固溶边界用线切割的方式切割为金相试样。为进行金相组织观察,对试样表面进行抛光腐蚀,腐蚀试剂为 FeCl₃:盐酸:水=1:10:20(质量比),腐蚀前,对试样用 400,800,1 000 目砂纸依次打磨,每次打磨完成的评判标准为试样表面无划痕。采用Olympus GX51 型光学显微镜、ZEISS SUPRA 55 型扫描



(a)激光固溶区域



(b) 磁痕显示区域图 3 试样的金相组织Fig. 3 Metallographic structure of the sample

电镜、D8 Advance型X射线衍射仪与EPMA-1600型电子探针等设备对该金相试样进行分析,通过863-483型硬度计对该试样进行显微硬度测试。

为研究 17-4PH 叶片激光固溶后产生的条带状磁 痕对叶片的使用性能是否有影响,本工作在叶片激光 固溶边界利用 XRD 测试残余应力,并加工三点弯曲疲 劳试样进行激光固溶,测定激光固溶试样的磁痕特征, 利用该试样进行三点弯曲疲劳试验。激光固溶设备采 用 Laserline LDM4500-60 型激光器,并配备 Scansonic 智能自适应激光头。三点弯曲疲劳试验在 PQ-6 型 MTS 试验机上完成。

2 结果与讨论

2.1 金相组织分析

通过光学显微镜对磁痕显示位置、激光固溶区域、 模锻叶片基体(即未激光固溶区域)的组织进行观察。 图 2 为磁痕显示样品的宏观形貌,其中图 2b 中方框中 1、2、3 区域分别表示激光固溶区域、磁痕显示区域和未 激光固溶区域。图 3 为试样的金相组织。



(a) 原始样品



(b) 腐蚀样品

图 2 磁痕显示样品的宏观形貌





(c) 未激光固溶区域

观察图 3 发现,磁痕显示位置组织(图 3b)在光学 显微镜下呈现亮白色条带状,宽度约为 450 μm,而与磁 痕显示位置相邻的未激光固溶区域、激光固溶区域为 则呈现均匀的明暗相间的组织,说明磁痕显示位置组 织和正常组织之间存在明显差异。

2.2 扫描电镜分析

为进一步分析磁痕显示组织和正常组织(包括激 光固溶区域和未激光固溶区域)的差异性,采用扫描电 镜观察试样的不同区域,结果如图4所示。



(b) 磁痕显示区域
 图 4 试样的显微组织
 Fig. 4 Microstructure of the sample

由图 4 可知,激光固溶区域、磁痕显示区域和未激 光固溶区域均为回火马氏体组织,马氏体板条和晶界 处可见有亮白色的碳化物析出。经过对比分析,3 个区 域的组织差异性并不明显。 区域的奥氏体含量,通过微区 XRD 对该金相试样进行 分析,结果见图 5。通过比较 XRD 谱中奥氏体和马氏 体的强度,计算不同区域中奥氏体的体积分数,结果为 未激光固溶区域奥氏体的体积分数为 15.2%,磁痕显 示位置奥氏体的体积分数为32.4%,激光固溶区域奥氏 体的体积分数为11.1%。

2.3 微区 XRD 分析

为明确磁痕显示区域、激光固溶区域、未激光固溶





通过以上分析可以得出,17-4PH 叶片在激光固溶 过程中由于边界的热交换使激光固溶边界产生了大 量的奥氏体组织。奥氏体组织为非铁磁性组织,其含 量的增加使该位置的磁性减弱,在磁粉探伤过程中, 固溶边界磁导率的剧烈变化使激光固溶叶片上产生 磁痕。

2.4 EPMA 电子探针分析

通过电子探针进一步对 17-4PH 激光固溶叶片叶

片3个区域的元素分布特征进行分析,测试结果详见 表2。对比表2中数据发现,区域2处的奥氏体形成元 素Ni和Cu含量相对于区域1和区域3有明显的增加, 这说明激光固溶导致了不同区域在成分上的差异,这 可能与激光处理过程中的冷却速度、激光处理的高密 度能量特性有关。Ni和Cu元素的局部偏聚,造成样品 经过激光固溶后无法在冷却过程中转变为马氏体 组织。

表 2	激光固溶 17-4PH 叶片不同区域的	
	元素分布(质量分数)	

%

%

Table 2 Element distribution of different areas of

laser enhanced 17-4PH blade (mass fraction)

	Cr	Ni	Cu	Mn	Nb	
区域1,测试点1	16.051	4.043	4.105	0.608	0.205	
区域 1,测试点 2	15.966	4.080	4.010	0.480	0.288	
区域2,测试点1	15.469	4.567	4.286	0.509	0.253	
区域 2,测试点 2	15.880	4.214	4.011	0.469	0.261	
区域3,测试点1	15.808	4.126	3.727	0.460	0.198	
区域3,测试点2	15.750	4.101	3.965	0.499	0.172	

2.5 显微硬度分析

激光固溶处理的目的是提高17-4PH叶片的硬度, 进而增强其耐水蚀性。测量金相试样未激光固溶区 域、磁痕显示位置及激光固溶区域的硬度值,结果见表 3。表3表明磁痕显示区域的硬度明显低于相邻区域。

表 3 激光固溶 17-4PH 叶片不同区域的硬度

Table 3 Hardness of different areas of laser enhanced 17-4PH blade

位置	未激光固溶区域	磁痕显示区域	激光固溶区域
硬度/HV	306	374	465

表 3 表明,与未激光固溶区域相比,激光固溶区域 的硬度得到显著提高,磁痕显示区域的硬度同样得到 一定程度的增加。未激光固溶区域在激光快速加热、 冷却过程中形成高密度位错、空位等显微缺陷,有利于 时效过程中析出 ε-Cu 与 NbC 等硬质相,使硬度得到显 著提高^[7]。而在激光固溶边界由于加热、冷却条件的 差异虽然同样产生 ε-Cu 与 NbC 等硬质相,但由于 Cu 元素与 Nb 元素的聚集及奥氏体含量的大幅度增加,使 该区域硬度增加低于激光固溶区域。

2.5 残余应力测试

残余应力作为研究金属材料断裂性能的一个重要 指标,常作为关键零部件稳定性的一个重要衡量因素。 对 17-4PH 激光固溶叶片表面深度 1 mm 内进行沿叶 身方向与垂直于叶身方向残余应力的测试,测试结果 详见图 6。图 6 表明,在 17-4PH 激光固溶叶片的激光 固溶区域,沿叶身方向与垂直于叶身方向均为压应力。 压应力不作为表面裂纹产生的来源,故激光固溶处理 有利于提升叶片的疲劳性能。

2.6 三点弯曲疲劳测试

用同一只 17-4PH 模锻叶片基体加工三点弯曲疲



劳试样。试样分为2组,一组试样经过激光固溶处理, 并通过磁粉探伤确认有磁痕显示;另一组试样为模锻 叶片基体。以疲劳次数为10⁷次为考核值,2种试样的 三点弯曲疲劳试验结果见表4。表4中R为最小拉伸 力与最大拉伸应力的比值。

表 4 三点弯曲疲劳试验结果 Table 4 Test results of three-point bending fatigue

位置	疲劳极限(R=0.1)/MPa
模锻叶片基体试样	750
激光固溶试样	860

表 4 表明,激光固溶处理的 17-4PH 叶片 R=0.1 的疲劳极限得到了明显的提高,试样中由于激光固溶 产生的磁痕不影响整支叶片的疲劳极限。

3 结 论

(1)17-4PH 叶片在激光固溶过程中,在激光固溶 边界处产生大量的奥氏体组织,是导致激光固溶边界 在磁粉探伤检查过程中产生线性显示的根本原因。

(2)激光固溶过程中,由于奥氏体形成元素 Cu 与 Ni 的偏聚行为,造成了样品经过激光固溶后无法在冷 却过程中转变为马氏体组织,导致奥氏体残留,使 17-4PH叶片激光固溶边界处的硬度低于激光固溶 区域。

(3)激光固溶叶片残余应力为压应力,经过激光固溶处理后样品的 R=0.1 的疲劳极限由原始 750 MPa 提高至 860 MPa。试样中由于激光固溶产生的磁痕不影响叶片的使用。

[参考文献]

 [1] 路媛媛,肖 鱼,赖 境,等.激光固溶对 17-4PH 不锈钢 力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2019,44(2):

174 Vol.56 No.2 Feb. 2023

156-162.

LU Y Y, XIAO Y, LAI J, et al. Effect of laser solid solution treatment on mechanical properties of 17-4PH stainless steel[J].Heat Treatment of Metals,2019,44(2):156-162.

 [2] 薛承感,潘慧斌,丁银萍,等.17-4PH 汽轮机叶片激光固 溶强化抗汽蚀性能研究 [J].动力工程学报,2020,40 (1):82-88.

> XUE C G, PAN H B, DING Y P, et al. Cavitation Erosion Behavior of 17-4PH Steam Turbine Blades Treated by Laser Solid Solution[J].Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(1):82-88.

[3] 叶诗豪,姚建华,楼程华,等.17-4PH 不锈钢的激光表面 固溶工艺研究 [J].应用激光, 2010,30(6):465-469. YE S H, YAO J H, LOU C H, et al. Study of Laser Surface Solid Solution Experiment on 17-4PH Stainless Steel [J]. Applied Laser,2010,30(6):465-469.

[4] 曹 强,黄晓望,汪 盛.1Cr15Ni4Mo3N 沉淀硬化不锈钢 磁粉检测疑似裂纹原因分析 [J].失效分析与预防, 2014,9(2):121-125.

CAO Q, HUANG X W, WANG S. Analysis of Suspected Crack of 1Cr15Ni4Mo3N Precipitation - hardening Stainless Steel by Magnetic Part[J].Failure Analysis and Prevention, 2014,9(2):121-125.

[5] 王树志,乔海燕,葛子亮,等.17-4PH 马氏体沉淀硬化不
 锈钢磁粉检测磁痕分析[J].无损检测,2014,36(1):
 64-70.

WANG S Z, QIAO H Y, GE Z L, et al. The Indication Analysis of Magnetic Particle Testing on 17 - 4PH Martensitic Precipitation - hardening Stainless Steel [J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(1): 64–70.

- [6] 陈 波. 17-4PH 钢热变形特性与高温铁素体析出条件研究[D].上海:上海交通大学,2018.
 CHEN B. Study on the Thermal Defformation Characteristics of 17-4PH Steel and the Precipitation Conditions of δ-Ferrite[D].Shanghai; Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [7] 杜锦铮,路媛媛,陈 浩,等.17-4PH 不锈钢透平叶片激 光固溶时效强化的力学性能 [J].中国表面工程,2018, 31(3):9-16.

DU J Z, LU Y Y, CHEN H, et al. Mechanical Properties of 17-4PH Stainless Turbin Blades by Laser Solution and Aging[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(3):9-16.

[编校:宋 媛]

(上接第163页)

[26] 徐华天,杨 威,温玉芬,等.定向钻穿越管道阴极保护数 值模拟评价方法[J].装备环境工程,2020,17(11): 41-46.

> XU H T, YANG W, WEN Y F, et al. Numerical simulation method for cathodic protection evaluation of HDD pipeline [J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17 (11):41-46.

- [27] 蔡光义,张德平,赵苇杭,等.有机涂层防护性能与失效评价研究进展[J].腐蚀与防护,2017,38(9):657-664.
 CAI G Y, ZHANG D P, ZHAO W H, et al. Research advances of protective performance and failure evaluation for organic coatings[J]. Corrosion & Protection, 2017,38(9): 657-664.
- [28] CAI G, WANG H, JIANG D, et al. Impedance sensor for the early failure diagnosis of organic coatings [J]. Coat Technol Res, 2018,55(1): 1 259-1 272.
- [29] POPE R. Attenuation of Forced Drainage Effects on Long Uniform Structures[J].Corrosion, 1946, 2(6): 307-319.
- [30] ROGERS W F, DAVIS B H, SHEPPARD L. A Proposed Standard Method for Measuring the Electrical Resistance of Pipe Line Coatings[J]. Corrosion, 1951, 7(7):245-251.
- [31] HUDDLESTON W E. Tentative Standard Method for Measur-

ing Electrical Conductance of Coating On Buried Pipe Lines [J].Corrosion, 1955, 11(2):59-62.

- [32] PARKER M E. Methods for Measuring Leakage Conductance of Coating On Buried or Submerged Pipe Lines [J]. Corrosion, 1957, 13 (12): 37-39.
- [33] GUMMOW R A , SEGALL S M , WAKELIN R G. Coating Quality Testing of Directionally Drilled Pipe Sections: International Annual Conference & Exposition [C]. Orlando: NACE International, 2000
- [34] 窦宏强,马晓成,郭娟丽,等.水平定向钻穿越管道防腐蚀 层质量评价方法的研究现状[J].腐蚀与防护, 2020,41
 (8):56-60.
 DOU H Q, MAI X C, GUO J L, et al. Research Status of Evaluating Method for Anti - Corrosion Coating Quality of Horizontal Directional Drilling Through Pipeline[J]. Corrosion & Protection, 2020,41(8):56-60.
- [35] 张国虎,龚 敏,唐 强,等.用电化学方法研究 X80 管线 钢的阴极保护参数[J].腐蚀与防护,2011,32(11): 868-883.

ZHANG G H, GONG M, TANG Q, et al. Electrochemical study on cathodic protection parameters of X80 pipeline steels [J]. Corrosion & Protection, 2011, 32 (11): 868-883. [编校:宋 媛]