

文章编号: 0258-7025(2010)03-0887-04

# 激光修复 1Cr12Ni3MoVN 合金的组织性能研究

薛 蕾 卢鹏辉 陈 静 林 鑫 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 采用 1Cr11Ni2W2MoV 合金对 1Cr12Ni3MoVN 热强马氏体不锈钢铸件的槽缺陷进行了激光修复(LR)研究。激光修复区(LRZ)的组织主要为马氏体和回火马氏体,修复区与铸件基体实现了致密的冶金结合,热影响区(HAZ)内发生了不同程度的淬火。硬度值由修复区向基体区(SZ)逐渐减小,在熔合线近基体区出现硬度峰值。室温静载拉伸性能测试结果表明,激光修复区的抗拉强度为 1280~1380 MPa,激光修复试样的抗拉强度达到 965~980 MPa,断裂均发生在铸件基体。

**关键词** 激光技术; 激光修复; 1Cr12Ni3MoVN 合金; 1Cr11Ni2W2MoV 合金; 微观组织; 马氏体; 拉伸性能

**中图分类号** TN249; TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0887

## Study on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Repaired 1Cr12Ni3MoVN Alloy

Xue Lei Lu Penghui Chen Jing Lin Xin Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** In the present paper, 1Cr12Ni3MoVN alloy was repaired by laser repair (LR) with 1Cr11Ni2W2MoV. A very good metallurgical bond between the repaired zone and the substrate was achieved. The microstructure of the laser repaired zone (LRZ) is composed by martensite and tempered martensite, and a quenching phenomenon was observed in heat affected zone (HAZ). Micro-hardness values decreased from LRZ to substrate zone (SZ), the maximum value happened in the HAZ close to the melting line. The results of room temperature tensile tests show that the strength of LRZ is 1280~1380 MPa, while the strength of laser repaired sample is 965~980 MPa. Fractures were observed on casting substrate during tensile test.

**Key words** laser technique; laser repair; 1Cr12Ni3MoVN alloy; 1Cr11Ni2W2MoV alloy; microstructure; martensite; tensile properties

### 1 引 言

1Cr12Ni3MoVN 是马氏体型热强不锈钢,其室温拉伸强度、持久强度及蠕变极限均较高,并有良好的韧性和抗氧化性能,已经在多种航空发动机上用于制造压气机盘、压气机叶片、涡轮轴及压缩弹簧等零件<sup>[1]</sup>。由于其特殊的工作条件,容易在温度场、重力场、振动、冲击、磨损、腐蚀介质等服役环境作用下产生腐蚀、应力集中等进而导致零件的损坏。如果能对损伤零件进行高性能的修复再生将会非常有意义。激光修复(LR)是现有的对航空发动机零件一

种有效的修复方式<sup>[2,3]</sup>,具有自动化程度高、热应力小、无变形,能够维修可焊性差的材料等优点,可应用于具有较复杂形状、一定深度缺陷或损伤的零件的快速修复<sup>[4~8]</sup>。

本文对马氏体不锈钢 1Cr12Ni3MoVN 合金的激光修复进行了初步研究。分析了修复过程中基体区(SZ)、热影响区(HAZ)及激光修复区(LRZ)的组织形成及特征,并结合组织分布特点对修复后零件的性能进行了评价。

收稿日期:2009-12-14; 收到修改稿日期:2010-01-26

基金项目:凝固技术国家重点实验室自主研究课题(16-TZ-2007)和中国博士后科学基金(20090451394)资助课题。

作者简介:薛 蕾(1980-),男,博士后,主要从事金属零件的激光立体成形及修复等方面的研究。

E-mail: xuenwpu@gmail.com

## 2 实 验

激光修复实验是在西北工业大学凝固技术国家重点实验室自行建立的 LFR-M1 激光修复系统上完成的。该系统由 300 YAG 脉冲激光器,六轴机器人, JPSF-1 型高精度可调自动送粉器等几部分组成。激光加工参数为:电流 100 A,脉宽 5 ms,频率 35 Hz,光束扫描速度 4 mm/s,送粉率 1.5 g/min,加工点光斑直径 1.2 mm,层高  $\Delta z=0.3$  mm。

1Cr12Ni3MoVN 铸件经淬火和回火处理,热处理制度为 1050 °C,保温 2 h,空冷,然后升温到 650 °C,保温 3 h,空冷。制成板状试样,尺寸为 160 mm×32 mm×3 mm,在待修复试样上预置槽缺陷,槽深 2 mm,顶部宽 5 mm,底部宽 1 mm(如图 1 所示,图中单位为 mm)。实验前先用砂纸打磨待修复部位以去除表面的氧化膜,然后用丙酮进行清洗。

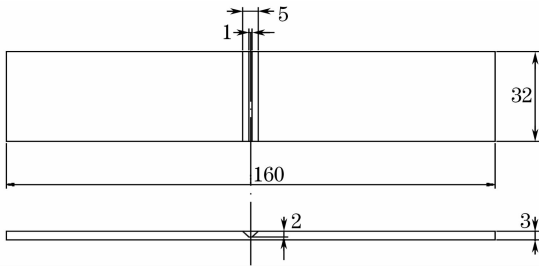


图 1 激光修复预置槽缺陷的待修复试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of the sample with preset groove defect used in the LR experiment

由于 1Cr12Ni3MoVN 合金的焊接性较差,在焊接过程中容易产生马氏体+铁素体的不良组织。根据 Pantone-Kent<sup>[9]</sup>修正的铁素体因子公式

$$FF = Cr + 6Si + 8Ti + 4Mo + 2Al + 4Nb - 2Mn - 4Ni - 40(C + N),$$

其中各元素前面的数值为质量分数。1Cr12Ni3MoVN 合金的铁素体因子  $FF$  为  $-2.7 \sim 7.9$ ,其最大值略大于 7.5 的铁素体-马氏体分界值,经过类焊接加工的激光修复过程后有可能在修复区存在马氏体+铁素体的不良组织。为了避免出现马氏体+铁素体的不良组织,根据马氏体不锈钢焊接填充金属与母材之间的近匹配原则<sup>[10]</sup>及现有实验条件的允许,实验中修复填充材料选用 1Cr11Ni2W2MoV 合金粉末,其主要合金元素的含量与 1Cr12Ni3MoVN 合金相当(见表 1),且铁素体因子  $FF$  为 1.1~6.8,其最大值低于 7.5 的铁素体-马氏体分界值,降低了激光修复过程中不良组织的形成几率。实验所采用的 1Cr11Ni2W2MoV 合金粉末为氩气雾化方法制备的球形粉,粒度为

$-100 \sim +200$  目( $75 \sim 150 \mu\text{m}$ )。

修复后试样经加工去除顶部高出基体部分的熔覆层,并沿试样截面进行切分,经镶嵌、打磨、抛光后,采用适合于马氏体不锈钢显微组织观察的腐蚀液(苦味酸 1 g,盐酸 5 mL,水 100 mL),制备出金相组织观察试样,然后在 OLYMPUS 光学显微镜上对金相组织进行观察。

在 HBV-30A 型数字显示式布维硬度计上进行硬度测试,加载载荷为 1000 g,加载时间为 20 s。在 INSTRON11-96 电子拉力实验机上对激光修复试样及同批铸件进行拉伸试验,最大载荷 15 t,加载速度为 2~5 mm/min,拉伸试样尺寸如图 2 所示(图中单位为 mm)。

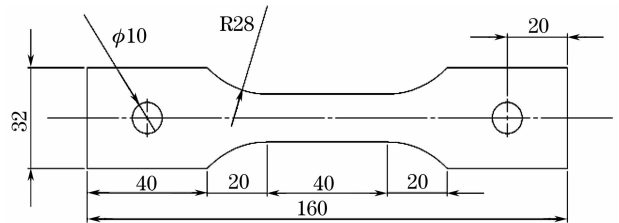


图 2 激光修复拉伸试样尺寸

Fig. 2 Dimensions of the tensile sample used in LR experiment

表 1 1Cr12Ni3MoVN 及其修复填充材料 1Cr11Ni2W2MoV 的化学成分表(质量分数)

Table 1 Chemical composition of LR substrate (1Cr12Ni3MoVN) and the filling material (1Cr11Ni2W2MoV) (mass fraction)%

Element	1Cr12Ni3MoVN	1Cr11Ni2W2MoV
C	0.08~0.15	0.10~0.16
Si	$\leq 0.25$	$\leq 0.6$
Mn	0.5~0.9	$\leq 0.6$
Cr	11.0~12.5	10.50~12.00
Ni	2.0~3.0	1.4~1.8
V	0.25~0.40	0.18~0.3
S	$\leq 0.03$	$\leq 0.02$
P	$\leq 0.03$	$\leq 0.03$
Mo	1.5~2.0	0.35~0.5
N	0.02~0.04	
W		1.5~2.0

## 3 组织分析

激光修复试样沿截面方向的组织分布如图 3 所示,可以分为明显的 3 个区域:激光修复区、热影响区和铸件基体区。激光修复区与铸件基体形成良好的冶金结合,并且修复区内宏观组织分布较均匀,熔覆层的层与层之间冶金结合良好。

激光修复过程是一个多层多道的快速熔凝过

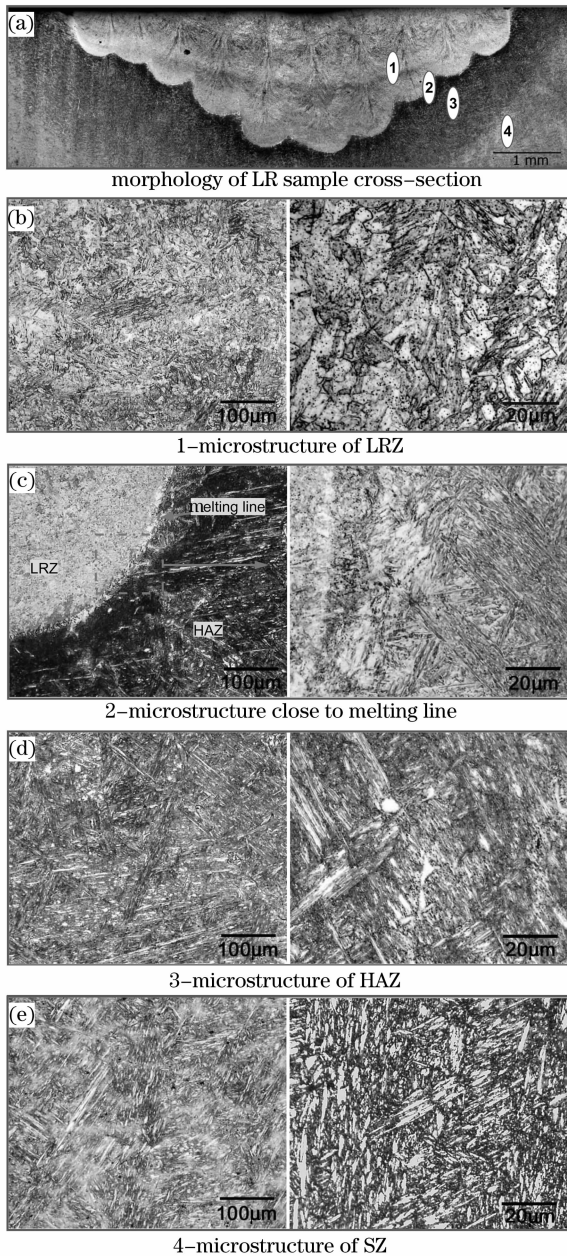


图 3 激光修复试样组织分布形貌

Fig. 3 Microstructural distribution of laser forming repaired sample

程,在不断的沉积过程中,对于修复区已沉积的部分,将经受反复加热和冷却的热循环作用。M. L. Griffith<sup>[11]</sup>对 H13 工具钢单道多层熔覆的激光熔覆层的温度场的研究表明,对已经沉积的某一点而言,随着沉积过程的层层进行,该处的温度因距离熔池的远进而呈周期性振荡衰减变化,而且,其峰值温度和残余温度都保持在一个比较高的水平,随着激光沉积过程的不断进行,该温度能够保持一个比较长的时间。这样一个温度场的作用相当于对激光修复区进行回火。而对于正在熔覆的那一道,由于激光

快速加热冷却,得到的组织主要为马氏体,而后续的一道则对该道进行了淬火和回火。因此,激光修复区[区域 1,图 3(b)]的组织应该为淬火和回火组织,主要是马氏体+回火马氏体。但是对于修复区不同的部位,由于经历循环加热冷却的时间长短不同以及修复区温度随热输入变化导致的温度梯度的不同,会使激光修复区马氏体的形成与回火并不均匀,马氏体与回火马氏体的相对数量也不一样。

熔合线[区域 2,图 3(c)]的两侧结合紧密,结合区无冶金缺陷,实现了致密的冶金连接。近修复区组织由马氏体+回火马氏体构成,与修复区组织基本一致。熔合线近基体区为完全淬火区,在高温时是全奥氏体组织,该区域在修复过程中温度较高,促使奥氏体晶粒长大粗化,导致该区域冷却后自奥氏体内部析出的马氏体板条长度较大。在进行第一层修复时,此区域的冷速较快,因此所形成的马氏体板条宽度较细。由于本文所涉及的两种合金的使用温度在 500~600 °C,抗回火性较好,由此可以推断该区域在后续的修复过程中温度不是很高,马氏体的过饱和度下降不多,回火不明显,这与硬度测试的结果一致。

距熔合线稍远的热影响区[区域 3,图 3(d)]在修复过程中也被加热到奥氏体区,但是温度低于区域 2,碳化物溶解不完全。由于加热温度的降低和未溶解碳化物的钉扎,该区的奥氏体粗化没有区域 2 显著,自奥氏体内析出的马氏体板条也相应较为短小。同样由于后续修复过程中温度不高,该区域回火不明显,因此该区为不完全淬火区,组织为马氏体+回火索氏体。

铸件基体区[区域 4,图 3(e)]由保持马氏体位相的回火索氏体组织构成。

## 4 力学性能

由第 3 节分析可知,修复区、热影响区和铸件基体区的组织存在一定的差异,组织不均匀性分布,会影响最终激光修复件的力学性能,因此需要考察修复后零件的综合力学性能指标。

### 4.1 硬度

图 4 给出了激光修复试样的硬度变化趋势,硬度峰值出现在熔合线近基体区,修复区的硬度显著高于基体区,从修复区向基体区硬度值整体呈递减趋势。

熔合线近基体区在高温时为全奥氏体组织,修复过程中此区域温度较高,基体中的碳化物溶解较

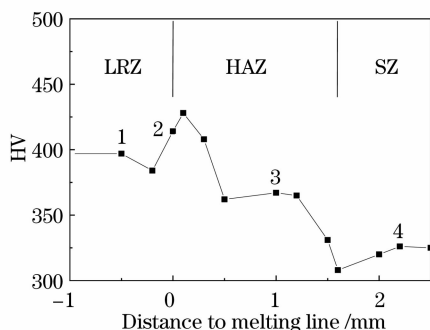


图4 激光修复试样显微硬度分布

Fig. 4 Micro-hardness distribution of LR sample

充分,形成的奥氏体碳含量较高,快速冷却后该区的马氏体硬度则相应较高,同时该区的马氏体板条宽度也较细,因此在该区出现硬度峰值。

热影响区(区域3)在修复过程中也被加热到奥氏体区,但是温度低于区域2,碳化物溶解不完全,冷却后该区的马氏体硬度也随之降低。

修复区及热影响区的硬度值均高于铸件基体。

#### 4.2 室温拉伸性能

表2给出了修复试样与同批铸件的室温拉伸性能,其中修复试样的抗拉强度为965~980 MPa,且断裂均发生在铸件基体。采用激光立体成形技术制备了1Cr11Ni2W2MoV合金的沉积态试样,即激光修复区,其强度高达1280~1380 MPa,远高于同批铸件的抗拉强度935~955 MPa。由此可见,采用1Cr11Ni2W2MoV合金粉末对1Cr12Ni3MoVN合金进行激光修复能满足技术指标的要求。

表2 修复试样及基体材料试样拉伸性能 $\sigma_b$

Table 2 Tensile strength  $\sigma_b$  comparison between LSF

Sample number	samples and substrate material samples				MPa
	1	2	3	4	
LR sample	965	965	975	975	980
Substrate metal sample	950	935	950	950	955
Technical standard					$\geq 925$

## 5 结 论

采用1Cr11Ni2W2MoV合金粉末激光修复1Cr12Ni3MoVN合金,其激光修复区组织主要为马

氏体+回火马氏体,热影响区内发生了不同程度的淬火,修复区与铸件基体实现了致密的冶金结合。修复区向铸件基体区的硬度值整体呈递减趋势,硬度峰值出现在熔合线近基体区,修复区的硬度高于铸件基体区。对修复试样进行了拉伸测试,断裂均发生在铸件基体,修复区的强度显著高于铸件基体。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Jiangfeng, Liu Jinsheng, Chen Minhua. Development of 1Cr12Ni3MoVN(S/SJ2) forgings[J]. *Shanghai Steel & Iron Research*, 2006, (4): 35~41
- 2 Rong Jiang, Liu Jinsheng, Chen Minhua. 1Cr12Ni3MoVN(S/SJ2)锻件试制开发[J]. *上海钢研*, 2006, (4): 35~41
- 3 Xue Lei, Huang Weidong, Chen Jing *et al.*. Application of laser forming repair technology on the aerial castings[J]. *Foundry Technology*, 2008, **29**(3): 391~394
- 4 Xue Lei, Huang Weidong, Chen Jing *et al.*. Laser forming repair technology in the aircraft castings repair[J]. *铸造技术*, 2008, **29**(3): 391~394
- 5 Guo Yongli, Liang Gongying, Li Lu. Laser cladding repair of aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 303~306
- 6 Guo Yongli, Liang Gongying, Li Lu. Laser cladding repair of aluminum alloy[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 303~306
- 7 D. M. Keicher, J. E. Smugeresky, J. A. Romero *et al.*. Using the laser engineered net shaping (LENS) process to produce complex components from a CAD solid model[C]. *SPIE*, 1995, **2293**: 91~97
- 8 M. Gaumann, S. Henry, F. Cleton *et al.*. Epitaxial laser metal forming: analysis of microstructure formation [J]. *Materials Science & Engineering A*, 1999, **A271**: 232~241
- 9 Xinhua Wu, Jing Liang, Junfa Mei *et al.*. Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. *Materials and Design*, 2004, (25): 137~144
- 10 Zhu Xiaofeng, Zhong Minlin, Liu Wenjin *et al.*. Laser cladding repairing of directionally solidified Ni-base superalloy and its tensile property[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 185~189
- 11 Zhu Xiaofeng, Zhong Minlin, Liu Wenjin *et al.*. Laser cladding repairing of directionally solidified Ni-base superalloy and its tensile property[J]. *中国激光*, 2007, **34**(s1): 185~189
- 12 Wang Xiaoyan, Chen Jing, Lin Xin *et al.*. Microstructures of laser forming repair 7050 aluminum alloy with AlSi12 powder[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1585~1590
- 13 Wang Xiaoyan, Chen Jing, Lin Xin *et al.*. Microstructures of laser forming repair 7050 aluminum alloy with AlSi12 powder[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1585~1590
- 14 Pantan-Kent. Phase balance in 9%Cr1%Mo steel welds[R]. Welding Institute Research Bulletin. 1991
- 15 John C-Lippold, Damian J-Kotecki. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels [M]. Chen Jianhong transl., Beijing: China Machine Press, 2008. 236~237
- 16 John C-Lippold, Damian J-Kotecki. 不锈钢焊接冶金学及焊接性 [M]. 陈剑虹译, 北京: 机械工业出版社, 2008. 236~237
- 17 M. L. Griffith. Understanding thermal behavior in the LENS process[J]. *Materials and Design*, 1999, **20**(2-3): 107~113