

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0185-05

# 激光熔覆修复定向凝固镍基高温合金及其拉伸性能

朱晓峰, 钟敏霖, 刘文今, 张红军

(清华大学机械系激光加工研究中心, 教育部先进成型重点实验室, 北京 100084)

**摘要** 高 Al、Ti 含量的定向凝固镍基高温合金在传统的修复过程中由于较大的热输入, 存在严重的热裂倾向。利用激光热量集中、能量输入小的特点, 可以有效控制修复过程中的热输入, 从而减小铸造基体的晶界液化和开裂倾向。在优选参数下, 可以获得无裂纹的修复组织, 并可实现定向凝固组织的连续生长。对修复组织进行热处理, 结果表明热处理过程不会促使裂纹产生, 也不会影响熔覆层组织的定向凝固特征, 但对于其内部  $\gamma'$  相的析出行为及形貌有较大影响, 从而影响了沉积层的力学性能。对沉积层的拉伸性能测试表明, 无论在常温还是高温 (900 °C) 下, 沉积层的拉伸性能都达到了铸造基体拉伸性能的 80% 以上, 而且均为塑性断裂, 一定程度上满足了实际修复需求。

**关键词** 激光技术; 定向凝固; 热裂纹; 镍基高温合金叶片; 激光修复; 拉伸性能

中图分类号 TN253 文献标识码 A

## Laser Cladding Repairing of Directionally Solidified Ni-Base Superalloy and Its Tensile Property

ZHU Xiao-feng, ZHONG Min-lin, LIU Wen-jin, ZHANG Hong-jun

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing, Ministry of Education, Laser Processing Research Centre, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Directionally solidified Ni-base superalloys with high volume content of Al, Ti are considered unrepairable by traditional welding methods due to its high crack susceptibility to heat input. By strictly controlling the laser parameters, however, sound deposition layers were achieved free of cracks. It was also characterized by directional solidification which was not affected by heat treatment process. Large amounts of secondary  $\gamma'$  particles were precipitated during heat treatment which greatly influenced the mechanical performance of the deposited layers. The tensile tests both of room temperature and 900 °C indicated that the tensile strength of the deposition layers after heat treatment can reach 80% of the base material and the fracture were ductile. The mechanical performance of the deposition layers can meet practical need of industrial use.

**Key words** laser technique; directional solidification; hot crack; Ni-base superalloy blade; laser repair; tensile performance

## 1 引言

与普通铸造镍基高温合金叶片相比, 定向凝固叶片由于消除了垂直于主应力轴的横向晶界, 具有更高的高温强度、抗蠕变和持久性能、热疲劳性能等, 因而在各国先进的军用及民用发动机上得到了普遍应用。但定向凝固叶片在铸造生产或服役过程中容易产生诸如裂纹等缺陷, 影响了使用寿命; 同时由于其造价昂贵, 叶片报废损失较大, 如果能通过合

适的手段有效修复缺陷部位、延长或恢复其使用寿命, 将具有重要意义。

尽管目前高温合金叶片的修复已有较多研究, 并形成相当规模的产业, 但很少见到有关定向凝固高温合金叶片修复的报道。一方面, 为提高定向凝固高温合金的高温强度, 其 Al、Ti 含量往往较高, 造成修复过程中热影响区以及修复组织中裂纹倾向较大<sup>[1]</sup>; 另一方面, 由于定向凝固高温合金的晶界平

**作者简介:** 朱晓峰(1981—), 男, 浙江嘉善人, 硕士研究生, 主要从事定向凝固镍基高温合金及常用零件激光沉积修复方面的研究。E-mail: zhuxiaofeng81@tsinghua.org.cn

**导师简介:** 钟敏霖(1961—), 男, 浙江玉环人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光强化、激光快速直接制造、激光制备新材料等方面的研究。E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn

直,在热循环过程中,一旦发生液化,在较小的应力作用下,裂纹就可沿着晶界轻易扩展,甚至引发修复区产生裂纹。此外,定向凝固高温合金修复区组织性能要求较高,目前广泛使用于普通铸造高温合金的修复材料都是延性较好的固溶强化合金材料(如IN-625),难以实现较高强度的修复需求<sup>[2]</sup>。

与传统修复方法不同,激光熔覆具有局部加热及热输入量低的特点,可以有效减小热影响区范围,降低热影响区液化及开裂倾向。此外,激光熔覆过程的外延生长特征,可进一步提高特定修复区的高温性能,因此激光熔覆修复技术受到了国内外学者的广泛重视<sup>[3,4]</sup>。W. Kurz 等<sup>[5~7]</sup>在单晶高温合金基体上进行激光熔覆得到了定向生长的单晶熔覆组织;Yoshihiro 等<sup>[8]</sup>利用计算机模拟研究了激光输入功率及熔池几何形态对定向凝固外延生长过程的影响;孙鸿卿等<sup>[9,10]</sup>在定向凝固镍基高温合金基体上熔覆 IN738 高温合金粉末,详细研究了五类界面裂纹的形成机制及相应特点,并通过合理控制激光工艺参数、减小热输入,降低了定向凝固基体及熔覆层的热裂纹倾向。本文研究了定向凝固高温合金叶片的修复工艺,并对热处理前后激光熔覆定向凝固试样进行组织及拉伸性能分析,论证了定向凝固高温合金叶片激光修复的可行性。

## 2 实验方法

实验采用 PRC3000 型 3 kW 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器进行激光熔覆,系统还包括一个自动正压送粉器和有保护气帘的同轴送粉喷嘴。主要工艺参数范围为:激光光束直径 2~3 mm,激光器输出功率 0.4~0.6 kW,扫描速度 0.2~0.3 m/min,送粉量 2~6 g/min,搭接率 1/3~1/2, N<sub>2</sub> 保护,保护气流量 300~500 L/h。

为降低裂纹敏感性,激光熔覆所用的高温合金粉末 Al、Ti 含量稍低,其 Al、Ti 质量分数总合约为 5%。基材为尺寸 30 mm×30 mm×4 mm 的定向凝固镍基高温合金,Al、Ti 含量较高,质量分数总合约为 6.7%。根据柱状晶生长特点,在平行于基体(100)晶面的平面上进行激光熔覆实验。对基体及沉积试样进行标准热处理,热处理规范为:

固溶处理:1120 °C, 2 h, 空冷;

时效处理:845 °C, 24 h, 空冷。

对热处理前后的试样利用线切割将其制备成拉伸试样,其尺寸见图 1,拉伸方向平行于定向凝固生长方向,利用 Gleeble1500 热模拟实验机研究常温

及高温(真空 900 °C)下基体试样及熔覆试样的拉伸性能,并利用扫描电镜进行断口分析。

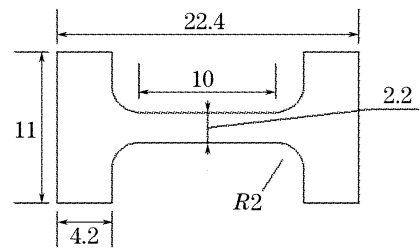


图 1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimension of tensile test samples

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 激光熔覆过程中的裂纹现象及消除

尽管激光熔覆热输入较小,但由于基体铸造材料的偏析严重,在激光熔覆过程中依然存在非常大的裂纹倾向,如图 2 所示。裂纹都出现在基体和熔覆层的交界面处,且都表现为沿晶裂纹。

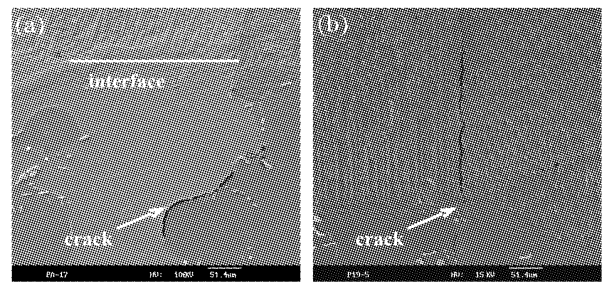


图 2 界面裂纹

Fig. 2 Interface cracks

对裂纹的显微分析和成分分析表明,裂纹的产生是由于基体在加热过程中晶界低熔点组元发生液化,形成包覆于晶界的液膜;在冷却过程产生的热应力与组织应力作用下,晶界发生相对移动,液膜无法抵抗产生的应力而被拉开,导致热影响区产生裂纹。同时,熔覆材料的 Al、Ti 含量也相对较高,凝固过程的偏析使其柱状晶晶界处的成分具有较低的熔点,热裂倾向也较高<sup>[9]</sup>。此外,激光熔覆层具有外延生长特性,表现出鲜明的定向凝固特征,这就使熔覆层内部的最大拉应力方向与液化晶界方向垂直,裂纹向熔覆层的扩展更为容易。

由分析可知,基体热影响区晶界发生液化是使基体发生开裂并引导裂纹向熔覆层扩展的主要原因,而基体和熔覆层的平行晶界又为层与层之间裂纹的扩展提供了贯通的渠道<sup>[11]</sup>。因此,第一层熔覆层质量在激光多层熔覆修复过程中具有重要作用。一方面,第一层在保证成形质量的情况下需要尽可能降低热输入,减少基体的开裂倾向,从而避免裂纹萌生;另一

方面,它隔绝了后续熔覆过程中基体与激光熔池的直接接触,即使基体萌生微裂纹也不会使裂纹扩展到熔覆层中,保证了沉积层的质量。通过大量实验研究,得到了激光熔覆无裂纹修复的优化工艺:激光功率  $P=400\text{ W}$ ,扫描速度  $v=0.25\text{ m/min}$ ,光斑大小  $D=2\text{ mm}$ ,送粉速度  $v_g=4\text{ g/min}$ 。图 3(a)所示为在优选工艺下单层熔覆的试样形貌。为改善表面成形,提高熔覆效率,在多层熔覆过程中可适当提高熔覆规范。图 3(b)为多层熔覆的试样形貌。可以看到,由于工艺的改善,试样成型良好,组织致密,且无裂纹产生。

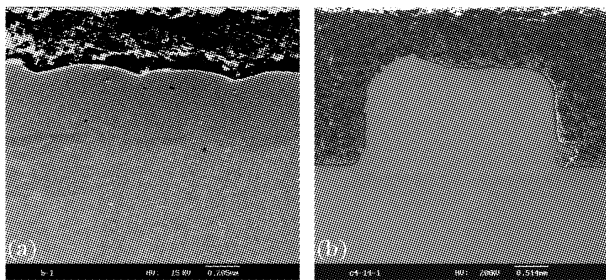


图 3 优化参数下无裂纹的单层熔覆(a)和多层熔覆(b)激光熔覆组织

Fig. 3 Sound cladding layers by optimized laser parameters

### 3.2 热处理前后熔覆层的组织特点

与单晶基体表面熔覆镍基高温合金获得单晶组织类似,通过合理控制激光参数,在定向凝固高温合金基体上也可以获得外延生长的定向凝固熔覆组织。

为了减轻熔覆层内的应力水平,稳定合金组织,提升其高温使用性能,对沉积层进行热处理。图 4 为热处理前后沉积层的组织形貌。

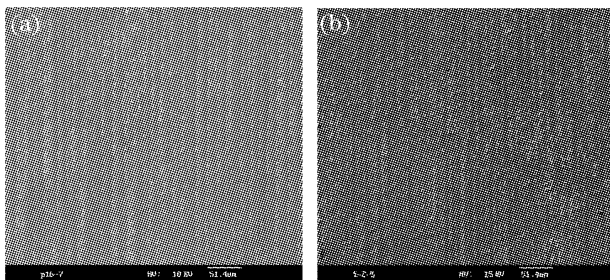


图 4 热处理前(a)和热处理后(b)的熔覆层组织

Fig. 4 Microstructure of the cladding layers before (a) and after (b) heat treatment

热处理前后的熔覆层组织都为定向凝固的细小柱状晶,一次枝晶间距在  $5\sim 10\ \mu\text{m}$  的范围内,枝晶间弥散分布大量细小的白色 MC 型碳化物,具有典型的快速凝固特征。激光熔覆定向凝固组织具有较好的组织稳定性,热处理过程并没有破坏其定向凝固特征,同时由于 MC 型碳化物固溶温度较高,热

处理过程对其形态和分布不造成影响。

图 5(a)为热处理后熔覆层的高倍扫描电子显微镜(SEM)形貌,从图中可以看出热处理后熔覆层内析出大量直径为  $100\sim 200\text{ nm}$  的沉淀颗粒,均匀弥散地分布在枝晶干及枝晶间。枝晶间除了存在大量析出颗粒外,还存在部分初生  $\gamma'$  立方体颗粒以及形状不规则的 MC 型碳化物。图 5(b)是对熔覆层内球形颗粒的透射电镜电子衍射花样,经过标定表明热处理后析出的颗粒为二次  $\gamma'$  相。而在热处理以前的激光熔覆层中却没有发现二次  $\gamma'$  相存在。

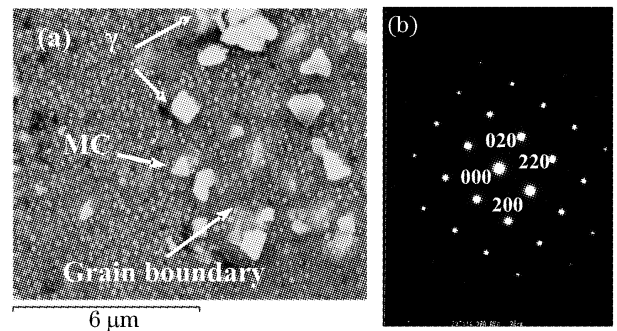


图 5 熔覆层热处理后的组织

Fig. 5 Microstructure of cladding layer after heat treatment

$\gamma'$  相和 MC 型碳化物的分布特征与激光熔覆过程的元素偏析有关。在柱状晶凝固过程中,Al、Ti、Ta、C 等强偏析元素在柱状晶晶界大量富集。C 元素与强碳化物形成元素 Ti、Ta 等形成细小的碳化物颗粒分布在晶界;而 Al、Ti 等  $\gamma'$  形成元素的偏析导致晶间过饱和度增大,增加了晶间  $\gamma'$  相形成的驱动力,在熔覆冷却过程中析出了立方体的一次  $\gamma'$  相,晶粒内部由于冷却速度过快, $\gamma'$  形成元素的含量相对较低,没有足够的驱动力形成  $\gamma'$  相,Al、Ti 元素大量固溶在  $\gamma$  基体中。热处理过程中  $\gamma'$  相得以充分析出,由于激光熔覆过程偏析相对较小,二次  $\gamma'$  相的分布弥散均匀,这对于改善高温合金蠕变性能、提高合金的蠕变持久强度具有重要的作用。

尽管热处理过程中大量  $\gamma'$  相析出将产生较大的组织应力,但由于激光熔覆层枝晶细小,因此产生的应力分布也比较分散均匀,避免了在热处理过程中产生裂纹。

### 3.3 定向凝固熔覆组织拉伸性能分析

表 1 给出了在常温及高温( $900\text{ }^\circ\text{C}$ )下基体和熔覆层的拉伸性能数据,其中 LC(Laser-cladding)为热处理以前的激光熔覆试样,LC\* 为热处理后的激光熔覆试样,铸造基体试样已经过标准热处理,拉伸方向平行于定向凝固方向。

表 1 熔覆层与基体拉伸性能数据

Table 1 Tensile test data of laser cladding layers and substrate

Experiment temperature	Samples	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa
Room temperature	LC	925	1145
	LC*	812	1147
	Substrate	967	1056
900 °C	LC		680
	LC*		550
	Substrate		680

在常温下,激光熔覆定向凝固高温合金试样与铸造试样相比,其屈服强度较低,热处理前和热处理后屈服强度分别为 925 MPa(为基体的 96%)和 812 MPa(为基体的 84%),这是因为激光熔覆的高温合金粉末中 Al、Ti 含量比铸造基体低,导致高温合金中强化相减少所致。尽管如此,熔覆试样的拉伸强度超过了铸造试样,塑性也有大幅度提高(如图 6 所示)。

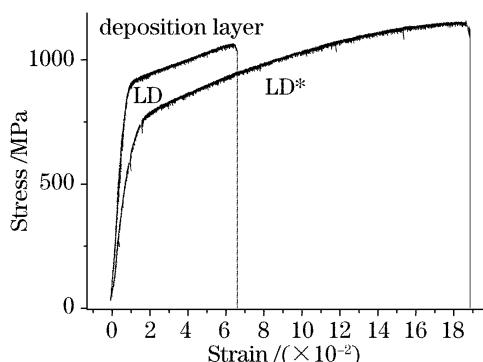


图 6 热处理后铸造试样和激光熔覆试样应力-应变曲线  
Fig. 6 Strain-stress curve of cast base and laser deposition samples both after heat treatment

塑性的改善一方面与 Al、Ti 含量降低、合金化程度减小有关,另一方面也与激光熔覆组织晶粒细化、碳化物弥散分布有关。由于拉伸过程中伴随着强烈的形变硬化现象,熔覆层的抗拉强度逐渐增强,最终超过了铸造基体的抗拉强度。热处理前后熔覆层屈服强度的降低与  $\gamma'$  形成元素的析出有关,在热处理前,由于激光的快速凝固熔覆组织过饱和固溶了大量合金元素,晶格显著畸变,强化效应明显。而热处理过程使激光熔覆试样内的固溶元素充分析出,虽然形成大量球形  $\gamma'$  相强化了基体,但不足以补偿由于合金元素析出造成的弱化效应。显微硬度分析表明,熔覆层平均硬度由热处理前的  $HV_{0.2} 397$  降低到了热处理后的  $HV_{0.2} 361$ ,也证实了热处理对激光熔覆层性能的影响趋势。

高温(900 °C)条件下拉伸时,未经热处理的激光熔覆试样达到了与基体相同的抗拉强度,热处理后熔覆试样抗拉强度为 550 MPa(为基体的 81%),与基体相比有所降低,但延伸率明显高于基体。在高温时, $\gamma'$  相对合金强度的影响更加显著,较多的  $\gamma'$  相析出对于提高合金的高温强度有明显作用,因此与基体相比,热处理后的激光熔覆试样抗拉强度较低。而未经热处理的试样仍由于其固溶度较高, $\gamma'$  相形成元素在高温短时拉伸过程中来不及析出,因此表现出较高的抗拉强度。

值得指出的是,尽管热处理后激光熔覆试样的抗拉强度降低,但由于  $\gamma'$  相的析出及组织的稳定化,可能对其高温持久、蠕变寿命有利。

热处理后熔覆层常温拉伸试样断口如图 7(a)所示,在断口上可以看到均匀分布的等轴小韧窝,说明试样破坏前受到最大正应力作用。在拉伸过程中,随着应变的增加,在第二相质点处产生显微空洞,空洞逐渐长大聚积、彼此相连导致试件承载截面减小,最终发生断裂。图 7(b)为断口的背散射(BSE)形貌,由于晶界碳化物中含有较多的 Ta 元素(元素比重较大),因此在背散射观察中表现为白色亮点。对比发现,这些碳化物都分布在韧窝底部中央,充当了形成空洞的第二相质点。此外,对比断口韧窝的尺寸,其与定向凝固试样横截面枝晶尺寸相当,进一步说明了晶界碳化物在断裂过程中的第二相质点作用。与常温拉伸断口相似,熔覆试样的高温拉伸断口亦为韧性断口,只是在高温下塑性进一步改善。因此,激光熔覆层修复组织具有相当的常温和高温强度,塑性性能优良,较好地满足了高温合金的使用要求。

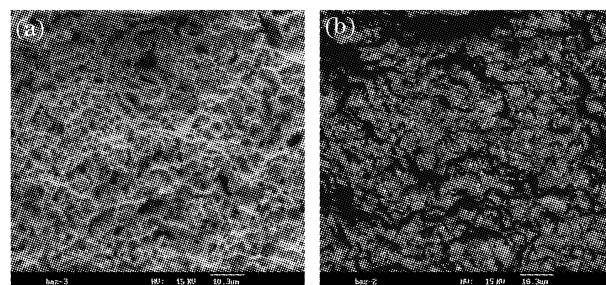


图 7 熔覆层拉伸断口(a)及其背散射形貌(b)  
Fig. 7 Fracture of laser cladding samples (a) and its BSE (b) morphology

## 4 结 论

1)高 Al、Ti 含量的定向凝固镍基高温合金在激光修复过程中表现出极高的裂纹敏感性,通过控制激光熔覆工艺参数,减小对基体的热输入可以获得

没有裂纹的修复组织。

2)在合适的工艺参数下,激光熔覆组织具有典型的定向凝固特征,枝晶细小,偏析减轻;热处理后其定向凝固特征不会改变,熔覆层内弥散析出大量二次 $\gamma'$ 球形颗粒。

3)常温拉伸条件下,热处理后熔覆层的屈服强度和抗拉强度分别为 812 MPa 和 1147 MPa,为基体的 84%和 109%,900 °C时抗拉强度为 550 MPa,为基体的 81%,但熔覆层的塑性较基体有大幅度改善。熔覆层的性能可以满足修复区组织性能要求。

4)熔覆层拉伸断口为塑性断口,晶界碳化物在拉伸断裂过程中作为第二相质点促使空洞产生。

### 参 考 文 献

- 1 M. H. Haafkens, J. H. G. Matthey. A new approach to the weldability of nickel-base as-cast and powder metallurgy superalloys [J]. *Welding Journal*, 1982, **61**(11): 25~30
- 2 Gandy D. W., Frederick G. J., Peterson A. J. *et al.*. Development of a laser based/high strength weld filler process to extend repair limits on IN 738 gas turbine blades [C]. *Fourth International EPRI Conference*, 2000. 7~9
- 3 Suman Das, Timothy P. Fuesting, Gregory Danyo. Direct laser fabrication of superalloy cermet abrasive turbine blade tips [J]. *Materials and Design*, 2000, **21**(2): 63~73
- 4 Xue L., Chen J. Y., Islam M. U. *et al.*. Laser consolidation of IN-738 alloy for repairing cast IN-738 gas turbine blades [C]. In: *ASM Proceedings: Heat Treating*, 2000, **2**: 1063~1071
- 5 W. Kurz, C. Bezencon, M. Gaumann. Columnar to equiaxed transition in solidification processing [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2001, **2**(1): 185~191
- 6 M. Gaumann, C. Bezencon, P. Canalis *et al.*. Single-crystal laser deposition of superalloys: processing-microstructure maps [J]. *Acta Materials*, 2001, **49**: 1051~1062
- 7 Feng Liping, Huang Weidong, Lin Xin *et al.*. FGH95 superalloy laser metal forming directional solidification [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, **13**(1): 181~186  
冯莉萍, 黄卫东, 林鑫等. FGH95 合金激光成形定向凝固显微组织与性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2003, **13**(1): 181~186
- 8 Yoshihiro Fujita, Kazuyoshi Saida, Kazutoshi Nishimoto. Crystalline controlled cladding of Ni-base single crystal superalloy by diode laser [C]. *Laser Materials Processing Conference*, 2005. 761~768
- 9 Sun Hongqing, Zhong Minlin, Liu Wenjin *et al.*. Cracking sensitivity on laser cladding inconel 738 on directionally solidified Ni-base superalloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2005, **25**(2): 26~31  
孙鸿卿, 钟敏霖, 刘文今等. 定向凝固镍基高温合金上激光熔覆 Inconel 738 的裂纹敏感性研究 [J]. *航空材料学报*, 2005, **25**(2): 26~31
- 10 Minlin Zhong, Hongqing Sun, Wenjin Liu *et al.*. Boundary liquation and interface cracking characterization in laser deposition of Inconel 738 on directionally solidified Ni-base superalloy [J]. *Scripta Materialia*, 2005, **53**(2): 159~164
- 11 Zhang Song, Chen Jiang, Wang Maocai *et al.*. Study of cracking sensitivity of clad layers induced by multi-irradiation of a YAG-pulsed laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(4): 362~366  
张松, 陈江, 王茂才等. 多次辐照条件下 YAG 脉冲激光熔覆层开裂敏感性研究 [J]. *中国激光*, 1999, **A26**(4): 362~366