

激光熔化沉积 GH163/Rene95 镍基双合金材料研究^{*}

Investigation on Laser Direct Deposited GH163/Rene95 Nickel Based Dual-Alloy

北京有色金属研究总院国家有色金属复合材料工程技术研究中心 金具涛 张永忠 黄 灿 石力开
燕 山 大 学 机 械 工 程 学 院 席明哲

[摘要] 为满足零件不同部位的不同性能要求,采用激光熔化沉积方法制备出 GH163/Rene95 镍基双合金材料薄壁,着重分析了所沉积材料的微观组织及双合金的界面特征。结果表明,激光熔化沉积镍基合金沿沉积高度方向呈外延生长的定向凝固组织;在双合金界面处,枝晶亦呈外延生长,没有明显的界面;显微硬度测试表明,在双合金界面处,过渡区硬度呈连续变化;GH163/Rene95 镍基双合金的界面结合强度高于 GH163 的强度,沉积态 GH163 合金的室温抗拉强度在 800 MPa 左右。

关键词: GH163/Rene95 镍基双合金 激光熔化沉积 微观组织 界面

[ABSTRACT] To meet the requirement of different properties at different location within one component, a thin wall from GH163/Rene95 nickel based dual-alloy is fabricated by laser direct deposition. Microstructure and the interface between these two alloys of the deposited materials are characterized in detail. The results indicates that, epitaxial directional solidification microstructure is obtained for both alloys along the building-up direction, which passes through the interface of the dual-alloy. And there is no clear interface between these two alloys. Microhardness tests show that there existes a transition region, with which hardness changed smoothly. The interface bonding strength of the dual-alloy is higher than that for as-deposited GH163 alloy, which is about 800 MPa.

Keywords: GH163/Rene95 nickel based dual-alloy
Laser direct deposition Microstructure Interface

为了提高航空发动机的推重比,发动机涡轮前端的燃气温度会不断提高,导致涡轮盘轮缘工作温度也随之升高,而在涡轮盘的心部,由于冷却通道的存在,其工作温度较低,为满足盘缘及盘心的不同使用环境及性能要求,出现了双性能的涡轮盘。目前,实现双性能的手段

主要有 2 种:(1)通过不同的热机械加工结合热处理工艺的控制,使得盘心具有细晶组织,而盘缘具有粗晶组织^[1];(2)将满足盘缘和盘心性能要求的 2 种合金通过粉末冶金和热等静压扩散连接进行复合,得到双合金零件^[2]。

激光熔化沉积是一种新型的数字化添加材料成形技术,可以很方便地通过对沉积材料输送的控制和工艺调整制备出梯度复合材料以及双合金材料^[3-5]。GH163 合金是一种中等强度的镍基高温合金,在 800℃ 以下具有较高的屈服强度和蠕变强度^[4]; Rene95 合金是一种高强度沉淀强化型的镍基高温合金,其沉淀相的体积分数高,具有良好的高温强度和蠕变性能。有研究表明, Rene95 合金在激光熔化沉积过程中成分偏析可能得到有效地抑制^[5],同时,所沉积的镍基高温合金具有沿外延生长的定向凝固的组织特征,这种组织有助于提高其抗蠕变性能^[6]。本课题采用激光熔化沉积成形的方法制备出 GH163/Rene95 镍基双合金材料,对成形材料的微观组织以及双合金的界面结合情况进行了分析。

1 试验材料及方法

激光熔化沉积成形试验在 5 kW 横流 CO₂ 激光加工系统上进行。试验用 GH163 和 Rene95 合金粉末为高压惰性气体雾化球形粉末,粒度分别为 100~300 目、200~300 目,粉末的成分如表 1 所示。

激光熔化沉积在惰性气体保护箱内进行,采用氩气保护,氧含量控制在 50×10^{-6} 以下。经工艺摸索后确定出合适的激光熔化沉积工艺参数,如表 2 所示,基体材料为 100mm × 50mm × 10mm 的 45# 钢,同轴方式送粉,送粉载气为氩气,流量为 2.5L/min,激光光斑直径约为 3mm。

为制备 GH163/Rene95 镍基双合金薄壁试样,首先在基板表面沉积 50 层 GH163 合金,然后再沉积 300 层 Rene95 合金。沉积结束后,在双合金界面附近沿沉积高度方向和水平方向切取样品,制成标准金相样品,用 Axiovert 200MAT 金相显微镜及 S-4800 扫描电镜观察内部组织,采用 HX-1 型显微硬度计沿沉积高度方向每隔 50 μm 测试显微硬度,载荷 100g,加载时间 15s。为

^{*} 国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB605206-1)和国家自然科学基金项目(50871022)。

表1 2种合金粉末的化学成分

w/%

元素	Cr	Co	Al	Ti	W	Mo	C	B	Nb	Ni
GH163合金	20	20	0.4	2	—	5.8	0.06	0.005	—	Bal
René95合金	14	8	3.5	2.5	3.5	3.5	0.15	0.01	3.5	Bal

表2 激光熔化沉积工艺参数

粉末	激光功率/kW	送粉速率/ (g·min ⁻¹)	扫描速度/ (mm·s ⁻¹)
René95合金	2.5	6.4	4
GH163合金	2	5.8	6

测试双合金的界面结合强度,将沉积材料加工成如图1所示的拉伸试样,使得双合金的界面位于拉伸试样的中部,在AG-25TA试验机上测试双合金界面处的结合强度。

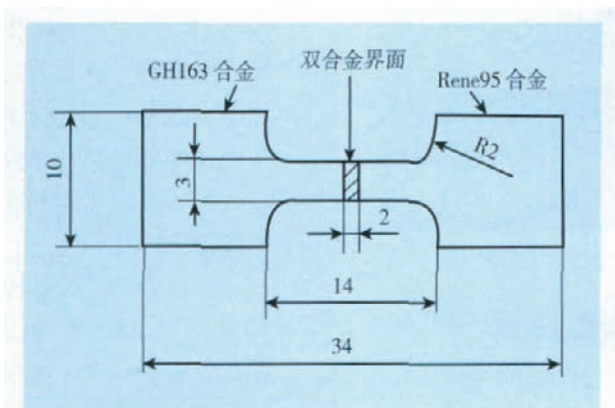


图1 GH163/René95镍基双合金界面力学性能试样
Fig.1 The specimen for interface bonding strength test of the deposited GH163/René95 nickel based dual-alloy

2 结果与分析

图2为激光熔化沉积制备的GH163/René95镍基双合金薄壁样件,其中与基体相连且颜色较深的为GH163合金,高度约20mm,其余为René95合金,薄壁的尺寸为4mm×40mm×120mm。

图3(a)和(b)分别为René95、GH163沿沉积高度方向截面的微观组织,可见,激光熔化沉积的镍基合金沿沉积高度方向为外延生长的定向凝固枝晶,枝晶穿过沉积层界面连续生长,层与层之间的界面很难分辨,每

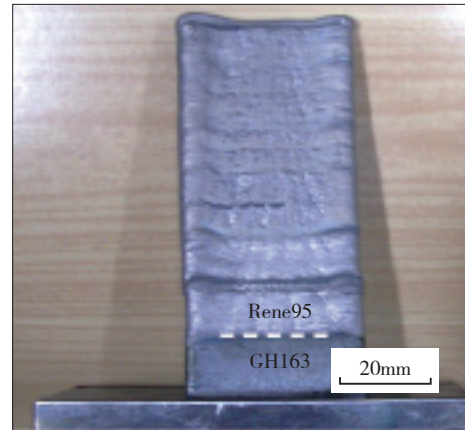


图2 激光熔化沉积制备的GH163/René95双合金薄壁样件
Fig.2 The thin wall of GH163/René95 nickel based dual-alloy fabricated by laser direct deposition

层沉积层高度约为0.35mm,与设定的高度基本一致,定向枝晶的一次枝晶间距约20μm。图3(c)为GH163/René95双合金界面处的组织,可以看出,René95合金在GH163合金定向枝晶的基础上外延生长,René95合金枝晶的一次枝晶间距更为细小,双合金界面不十分明显。图3(d)为René95合金在高倍下的显微组织,基体上弥散分布着细小的颗粒相,晶界、枝晶的亚晶界存在尺寸较大的颗粒相。表3为颗粒相的EDS分析结果,可知分布于晶内和晶界颗粒相的成分十分接近,颗粒相内C、B、Nb、Mo、W、Ti等含量较高,说明这些颗粒相极有可能是M(C、B)相,晶内的M(C、B)相直接从液相中析出,而存在于晶界和亚晶界的M(C、B)是在凝固后期通过共晶转变而来的,即 $L \rightarrow (\gamma + M(C、B))$ ^[7]。在GH163合金的晶界和亚晶界也出现了M(C、B),如图3(e)所示。

图4为沿镍基双合金界面过渡区60μm范围内的元素线扫描分析结果,可以看出,从GH163合金一侧到René95合金一侧,元素Ni、Al、W、Nb等的含量逐渐增多,而元素Co、Cr的含量逐渐减少,Ti、Mo、C的含量基本一致,在界面结合区合金元素平缓过渡。上述的元素变化规律与2种合金的成分差别相一致,激光熔化沉积时的元素互扩散和稀释作用导致各合金元素的连续平

稳过渡,这有利于保证良好的界面结合。

图5为镍基双合金薄壁样件从GH163合金到 Rene95合金的显微硬度分布情况, GH163和

Rene95合金的显微硬度分别为 $HV_{0.1}240$ 、 $HV_{0.1}500$, 2种合金的界面处存在一个 $200\mu m$ 左右过渡区, 过渡区内的显微硬度介于2种合金之间, 呈连续梯度过渡。

过渡区的形成与沉积时 GH63合金对 Rene95合金的稀释有关, 上述结果表明, 此稀释作用仅限于一层沉积层范围内(每层沉积层的厚度为 $0.35mm$)。GH163和 Rene95合金都是 $\gamma'(Ni_3(Al, Ti))$ 沉淀强化型的高温合金, 沉淀相形成元素 Al、Ti 的含量决定了合金沉淀相的体积分数, 从而决定了合金的性能。从图4中界面附近的元素线扫描可以看出, Al元素从 GH163合金到 Rene95合金逐渐增多, 其形成的沉淀相也逐渐增多, 同时, Nb、Mo等强碳化物形成元素的梯度分布亦是导致在界面过渡区显微硬度连续变化的原因。

双合金的拉伸试验结果表明, 断裂发生在 GH163合金一侧, 这说明双合金的界面结合强

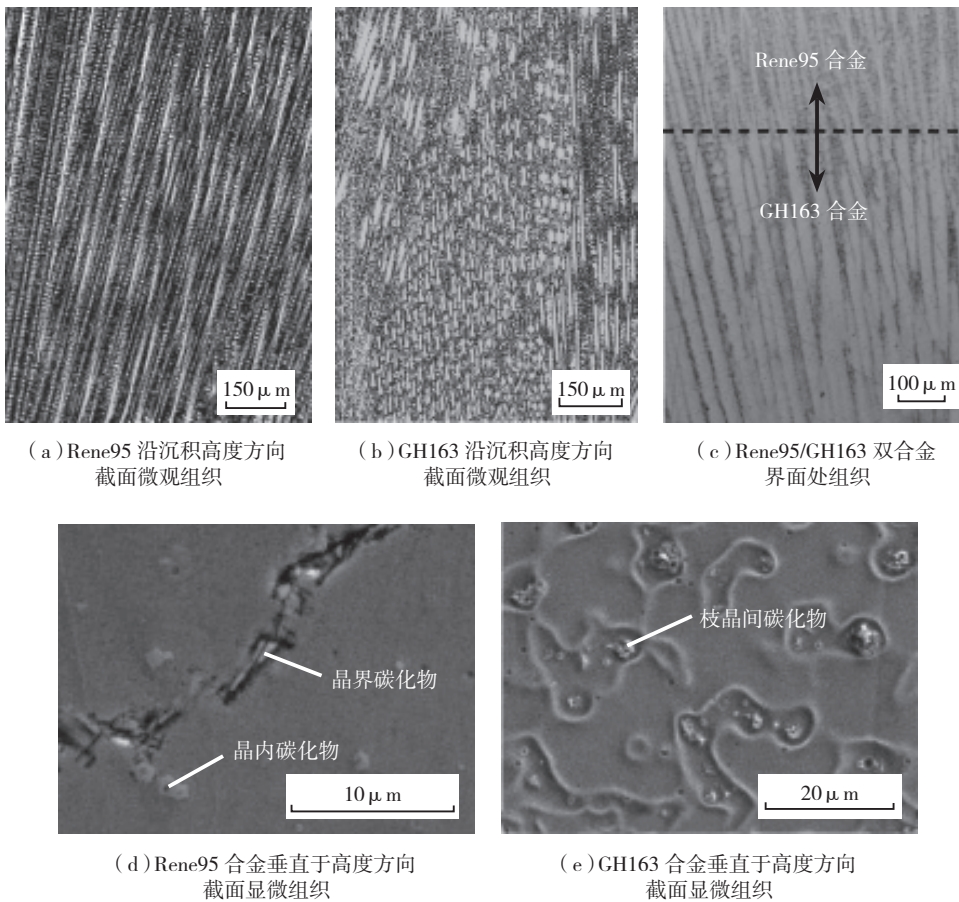


图3 激光熔化沉积GH163/Rene95镍基双合金的微观组织
Fig.3 Microstructure of laser direct deposited GH163/Rene95 nickel based dual-alloy

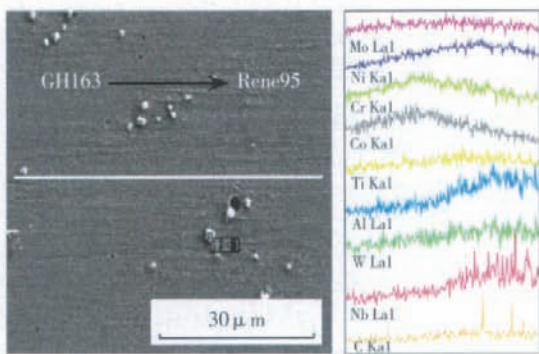


图4 激光熔化沉积GH163/Rene95镍基双合金界面附近元素分布情况
Fig.4 Elemental distribution near the interface of laser direct deposited GH163/Rene95 nickel based dual-alloy

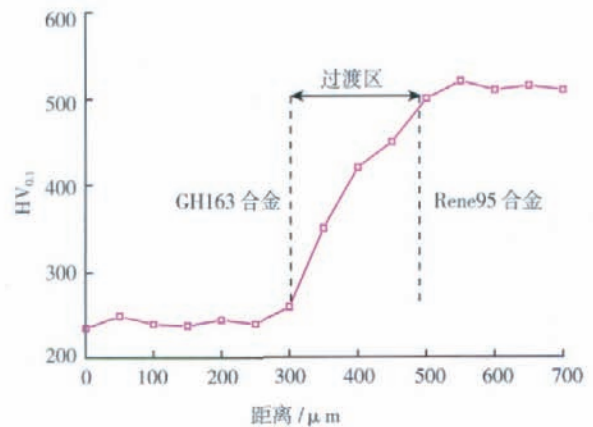


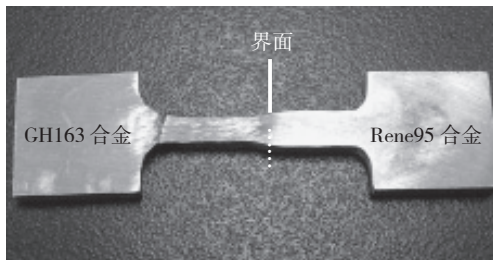
图5 镍基双合金界面附近的显微硬度分布
Fig.5 Micro-hardness distribution along the interface of the nickel based dual-alloy

表3 激光熔化沉积镍基合金中颗粒相的成分分析结果

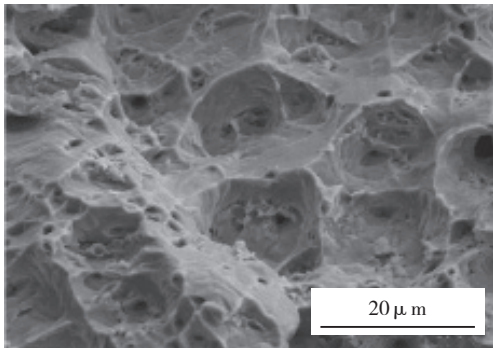
w/%

元素		Cr	Co	Al	Ti	Nb	Mo	W	C	B	Ni
Rene95	晶界颗粒相	4.16	2.39	0.60	5.91	10.6	7.65	2.09	17.43	14.27	34.9
	晶内颗粒相	4.22	2.01	0.57	9.10	9.11	7.01	2.21	15.43	12.71	36.63
GH163	晶界颗粒相	11.68	10.08	0.23	11.49	—	15.20	—	13.80	9.80	27.52

生塑性变形,双合金界面完好,断裂后的宏观照片见图6(a)。图6(b)为断口的SEM形貌,断口存在大量细小的韧窝,表明GH163合金具有良好的塑性。



(a) 断裂后宏观照片



(b) 断口 SEM 形貌

图6 激光熔化沉积GH163/Rene95
镍基双合金的拉伸断口Fig.6 Surface fracture morphologies of laser direct
deposited GH163/Rene95 nickel based dual-alloy

3 结论

(1) 利用激光熔化沉积方法制备出GH163/Rene95镍基双合金薄壁,合金层与层之间呈现外延生长的定向枝晶,双合金的界面处也呈现外延生长特征,双合金结合处观察不到明显的界面存在。

(2) 在2种合金的界面存在宽度约200 μm的过渡区,过渡区的显微硬度从GH163合金到Rene95合金逐渐升高。

(3) GH163/Rene95镍基双合金的界面结合强度高于沉积态GH163合金的强度,沉积态GH163合金的强度在800 MPa左右,呈现明显的韧性断裂特征。

参考文献

- [1] GAYDAJ, GABBT P, KANTZOSP T. The effect of dual microstructure heat treatment on an advanced nickel-based disk alloy. *Superalloy*, TMS, 2004:323-330.
- [2] 毛健,江武祥,呼和,等. 双合金热等静压复合工艺研究. *航空材料学报*, 1996, 16(4): 7-12.
- [3] Zhang Y Z, Wei Z M, Shi L K, et al. Characterization of laser powder deposited Ti-TiC composites and functional gradient materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 206: 438-444.
- [4] 《工程材料实用手册》编辑委员会. *工程材料使用手册*. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [5] 张亚玮,张述泉,王华明. 激光熔化沉积定向快速凝固高温合金组织及性能. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(1): 169-173.
- [6] 王华明,张凌云,李安,等. 高性能航空金属结构材料及特种涂层激光熔化沉积制备与成形研究进展. 2008, 33(1): 82-85.
- [7] 胡本芙,章守华. 镍基粉末高温合金FGH95涡轮盘材料研究. *金属热处理学报*, 1997, 18(3): 28-37.

(责编 玉龙)

(上接第93页)

(4) 由于热影响区材料较脆,且切口表面存在应力集中和微裂纹,使得试件的疲劳寿命降低;激光切割试件的疲劳寿命与水切割试件的疲劳寿命相当。

(5) 疲劳源产生于切口表面。由于切口表面存在应力集中和粗糙的沟槽以及微裂纹,因而易于产生裂纹。裂纹扩展区为解理状断口,是裂纹沿着脆化的晶界向材料内部不断扩展而产生的,体现出脆性沿晶断裂的特征。

参考文献

- [1] 陈可心. 仪表铝面板的激光切割. *应用激光*, 1998(2): 33-34.
- [2] Araujo D. Microstructural study of CO₂ laser machined heat affected zone of 2024 aluminum alloy. *Applied Surface Science*. 2003, 208-209: 210-217.
- [3] F J Carpio. Fatigue behaviour of laser machined 2024 T3 aeronautic aluminium alloy. *Applied Surface Science* 2003, 208-209: 194-198.
- [4] Engel L, Klingele K. 孟锡明译. *An atlas of metal damage*. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [5] 管征芳. 2A12合金金相组织与机械性能分析探讨. *电讯工程*. 2001, 1: 27-33.

(责编 依然)