

文章编号: 0258-7025(2005)04-0567-04

利用激光快速成形技术制造高温合金-不锈钢梯度材料

杨海欧, 林鑫, 陈静, 杨健, 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 在自制的激光快速成形(LRF)系统上,利用优化的激光快速成形工艺参量,制备了从 100% 316L 到 100% Rene 88DT 成分连续渐变的梯度材料(FGM)。所成形梯度材料的组织致密,成分、组织和硬度在 40 mm 梯度过渡层内连续渐变。在梯度过渡层内,随着 Rene 88DT 合金所含比例的逐渐提高,硬度和一次枝晶间距持续增大,硬度值从底部 100% 316L 的 186 Hv 连续渐变到顶端 100% Rene 88DT 的 458 Hv。平均一次枝晶间距由底部的 12.41 μm 逐渐增大到顶部的 16.99 μm 。

关键词 材料; 激光快速成形; 梯度材料; Rene 88 DT 高温合金; 微观组织; 硬度

中图分类号 TG142.71; TN249 **文献标识码** A

Functionally Gradient Materials Prepared with Laser Rapid Forming

YANG Hai-ou, LIN Xin, CHEN Jing, YANG Jian, HUANG Wei-dong

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

Abstract With the home-made laser rapid forming system and suitable processing parameter, functionally graded materials (FGMs) were prepared whose compositions continuously gradually changed from 100% 316L to 100% Rene 88 DT. The microstructure of prepared materials was full dense and very fine, its composition and hardness were continuously varied in the 40-mm transition layers. In the transition layers, with Rene 88DT's percentage composition increased, the degree of hardness and primary dendritic space were varied from 186 Hv, 12.41 μm with 100% 316L at the bottom to 458 Hv, 16.99 μm with 100% Rene 88DT in the top.

Key words materials; laser rapid forming; functionally gradient materials (FGMs); Rene 88 DT high temperature alloy; microstructure, hardness

1 引言

最近 10 多年来,物理、化学、机械、计算机等学科与材料学科的相互交叉渗透,使材料科学获得了突飞猛进的发展。既给材料科学引入了新的理论方法或实验手段,又对材料设计和制造提出了新的要求。梯度材料(又称功能梯度材料,FGM)就是最近国际先进材料研究的一个热点^[1,2]。

近年来发展起来的金属零件激光快速成形(LRF)技术为功能梯度材料的制备提供了一种更为高效便捷的途径。该技术将激光涂覆和快速原型技术相结合,在成形过程中采用同步送粉方式,因此理论上通过精确控制送粉器中粉末的成分和送粉量,

就可以在零件的任意部位获得所需要的成分和结构,从而实现在同一构件上进行功能梯度材料的制备和最终成形。

1995 年, J. H. Abboud 等^[3]通过双路送粉激光多层涂覆的办法在镍基基板和铁基基板上制造出 4 mm 厚的镍铝氧化物和铁铝氧化物功能梯度涂层, F. J. Kahlen 等^[4]采用多模 CO₂ 激光器进行多层涂覆制造了墙式结构的梯度材料零件, Sandia 国家实验室则通过激光成形制造技术实现了不锈钢-镍基高温合金梯度渐变材料的制造^[5]。另外,除了金属-金属之间可以进行功能梯度材料的激光快速立体成形制备外,对金属-非金属梯度材料的激光快速

收稿日期: 2004-03-18; 收到修改稿日期: 2004-05-08

基金项目: 国家 973 计划(G2000067205-3)及国家 863 计划(001AA703020)资助项目。

作者简介: 杨海欧(1976—),男,西北工业大学凝固技术国家重点实验室博士研究生,主要从事激光加工及成形研究。

E-mail: cgs@nwpu.edu.cn

成形制备,目前也有一些探索性研究。T. Seefeld 等^[6]同样是利用双路送粉激光多层涂覆的办法制备了 NiBSi-Cr₃C₂ 和 NiCrBSi-Cr₃C₂ 梯度复合材料。J. Th. M. De Hosson 等^[7]则在铸造铝合金基材上利用激光粉末涂覆实现了 Al-40Si 功能梯度涂层的制备。

需要指出的是,目前国际上所开展的功能梯度材料激光快速成形方面研究大部分针对的是涂层材料的制备,对制备块体功能梯度材料及零件的研究还进行得较少。在航空航天领域发动机中的某些部件并非工作在恒定温度下,同一部件不同部位承受的温度和要求使用的性能也不同。从目前来看,使用不锈钢-高温合金梯度材料可初步达到一定的减重和降低成本的目的,并正在热端部件的制造中进行尝试。为此本文针对不锈钢-Ni 基高温合金梯度材料,对块体梯度材料在激光快速成形过程中的梯度层成分、组织和硬度变化进行了研究。

2 实验方法

基材选用 1Cr18Ni9Ti,熔覆材料采用 Rene 88DT 高温合金粉末和 316L 不锈钢粉末。合金粉末的化学成分见表 1。实验在自制的激光快速成形系统上进行,系统装置如图 1 所示。系统包括 RS-850 型 5 kW CO₂ 激光器,LPM-408 四轴三联动数控工作台,JPSF-1 型送粉器,积分铜镜,自行研制的侧向送粉装置及惰性气体保护箱。为了防止在成形过程中高温氧化的干扰,成形过程在保护箱内进行,激光光束经过聚焦后照射到基材上并在基材表面形成熔池。在梯度材料成形过程中,以控制扫描速度为主,同步控制功率的匹配,以保证成形过程中熔池表面的温度在整个成形过程中基本一致。表 2 给出了相关的控制工艺范围。根据梯度区组份连续变化的要求,将 Rene 88DT 高温合金粉末和 316L 不锈

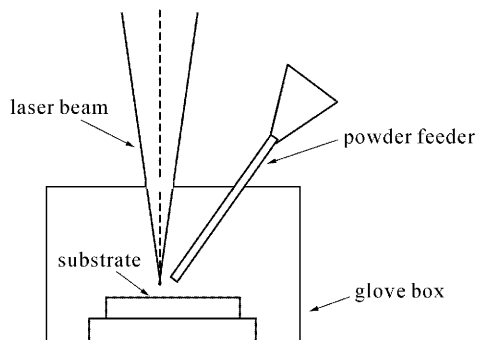


图 1 激光快速成形系统示意图

Fig. 1 Sketch of laser rapid forming system

钢粉末从不同的送粉器中分别连续调节,然后将混合粉末经侧向送粉喷嘴送入熔池,进行激光多层熔覆。载粉气体和激光熔池保护气体同为氩气。

表 1 实验用合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical components of alloy powders

Rene 88DT /%		316L /%	
Cr	17.0	Cr	17.17
Co	14.0	Co	0.11
W	4.2	Si	0.44
Mo	4.0	Mo	2.34
Ti	3.3	Ti	0.005
Al	2.2	Al	0.24
Nb	0.7	Mn	0.24
C	0.04	C	0.034
O	0.03	P	0.033
N	0.02	Fe	Bal
Ni	Bal.	Ni	14.31

表 2 梯度材料制备的工艺参量

Table 2 Processing parameters of FGMs

Laser power /kW	2.0~3.3
Scanning speed /(m/min)	0.3~0.6
Spot diameter /mm	φ3
Powder feeder /(g/min)	8~12
Shield gas /(L/min)	4~8

利用 Leica 公司的 Leitz LABORLUX 12 ME S/ST 定量金相分析仪及附带的 Quantimet 500 图像处理软件对试样的金相组织进行观察;利用扫描电镜拍摄显微结构照片及附带的能谱分析仪进行定性的元素分布分析,并利用 HB-1000 显微硬度仪测试梯度材料的硬度,硬度取值间隔为 2 mm,载荷 500 g。

3 结果与分析

图 2 所示为利用激光快速成形技术所制备的 316L 不锈钢和 Rene 88DT 镍基高温合金梯度渐变试样,尺寸为 80 mm×3.1 mm×60 mm,成形试样为墙式结构,其中底部为 100% 316L 不锈钢区,高 10 mm,梯度区厚度共 40 mm。组份由 316L 不锈钢:镍基高温合金=100:0 线性连续变化到 0:100,顶部为 10 mm 的 100% Rene 88DT 高温合金区。具体参量为:激光功率 2300~2500 W,扫描速度 10 mm/s,光斑直径 3 mm,保护气流量 8 L/min,做完一层后,Z 方向精确升高 0.4 mm,梯度过渡区共 100 层。因为成分是连续变化的,所以可以根据试

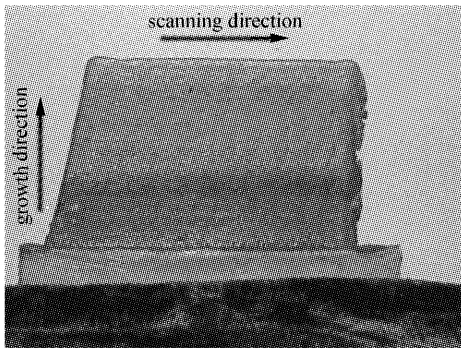


图2 梯度材料的激光快速成形件

Fig. 2 FGMs sample made by laser rapid forming

样的高度推算出成分的大概组成。从图中可以看出,试样表面光洁,基本没有粘粉现象。将试样垂直于生长方向切开,发现整个试样呈现定向外延生长的枝晶组织。并且枝晶组织在梯度过渡区内从100% 316L 不锈钢区到100% Rene 88DT 高温合金区连续外延生长,从试样底部到顶部不同部位的显微结构如图3所示。图中可以看出,试样最顶部的枝晶组织明显比其他枝晶发达,并且生长方向发生了偏转。这主要是由于在该处固液界面温度梯度的方向发生改变,由激光熔池底部的垂直方向变为基本水平。因此,沿该方向生长的枝晶组织在生长竞争中占据较为有利的地位,在底部外延组织还没有生长到表面时熔池尾部沿水平方向生长的枝晶就已经在该处凝固,因而使凝固组织呈现出生长方向改变的现象^[8]。至于在前面的熔覆层界面处观察不到顶部的转向枝晶组织,则是由于在涂覆下一层时

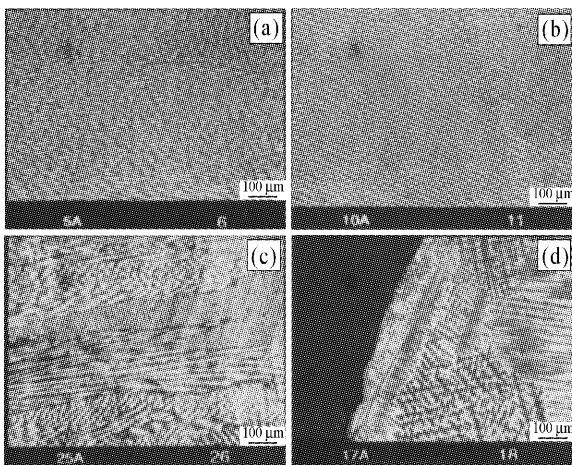


图3 激光快速成形梯度材料不同部位的显微形貌

Fig. 3 Microstructure of FGMs different part

(a) 100% 316L; (b) 75% 316L:25% Rene 88DT;

(c) 40% 316L:60% Rene 88DT; (d) 100% Rene 88DT

它被完全熔化掉,而仅仅在整个涂层的顶部才保留了最后的一薄层转向枝晶组织。这就使得成形试样的各层组织之间能够以冶金结合的方式结合在一起,没有明显的分层界面。这不仅保证了各层之间整体的结合强度,还保证了组织在生长方向上的连续性^[9,10]。激光快速成形是一个高温梯度、高速凝固的过程,成形件组织致密、均匀。在本文的工艺条件下,一次间距由底部的12.41 μm 逐渐增大到顶部的16.99 μm,二次分枝逐渐发达,但二者的变化速度较为平缓。出现这种现象一方面是因为随着涂覆的进行,激光束的能量不断在工件中累积,整个涂层的温度不断上升,因而涂覆后一层时熔池中的温度梯度相比前一层有所下降。而枝晶一次间距与扫描速度和温度梯度之间存在近似关系

$$\lambda_1 \propto V^{-a} G^{-b},$$

a, b 为与合金系相关的常数,从而导致一次间距逐渐增大。但由于温度梯度的变化范围在一个数量级以内,因而一次间距的变化幅度不大。另外,激光熔池中的凝固过程本身是一个从非稳态向稳态发展的过程,在达到稳态之前,其一次间距随着凝固过程的进行逐渐增大。激光涂覆过程凝固速度很快,因此达到稳定所需的时间和距离较短。同时,凝固组织胞枝晶一次间距的演化过程具有显著的历史相关性,而由于 Rene 88DT 和 316L 不锈钢的激光快速成形组织都是单相奥氏体,且晶格常数相近,这样在多层涂覆过层中能够保持整体连续外延生长,因此其变化过程较为平缓。这一点可以从图3中看出。这样保证了梯度材料激光快速成形件内部组织在特征尺度方面有较好的一致性。

图4是梯度材料从底部到顶部沿高度方向的能谱线扫描结果。由于316L和Rene 88DT两种材料

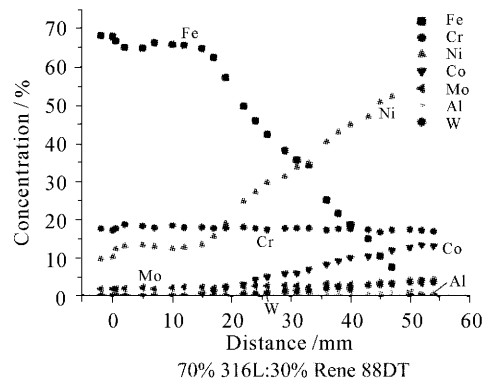
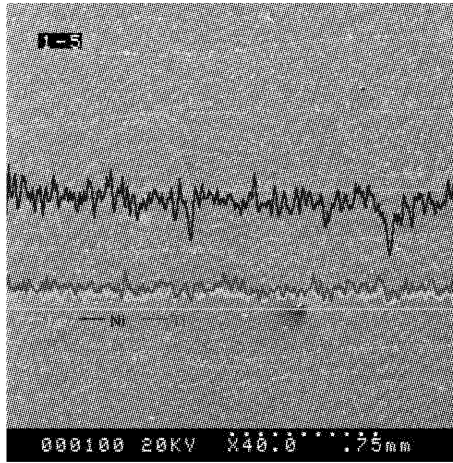


图4 梯度试样纵向能谱扫描结果

Fig. 4 Energy spectrum result of line scanning along the growth direction

Fe 元素和 Ni 元素的成分差别比较大,作为主要元素进行测试。从中可以看出,Fe, Ni 在过渡区的分布基本呈现线性变化,Cr 虽然有些波动,但整体起伏不大。图 5 是沿厚度方向的能谱线扫描结果,扫描距离为 2 mm。在同一层内的材料成分基本不变,这样就可以通过逐层改变混合粉末的成分得到整体成分可控的梯度材料。



20% 316L:80% Rene 88DT

图 5 梯度试样横向方向能谱扫描结果

Fig. 5 Energy spectrum result of line scanning along the scanning direction

图 6 显示了激光快速成形梯度材料沿纵向的硬度变化曲线。硬度由 100% 316L 不锈钢区的 186 Hv 经梯度过渡区逐渐增大到 100% Rene 88DT 高温合金区的 458 Hv。采用常规方法制造的 316L 不锈钢和 Rene 88 DT 合金的硬度分别为 200 Hv 和 377 Hv,中间过渡区有些地方的硬度值有所下降,可能是由于制备时工艺不稳定,在局部造成过多能量积累,使部分区域产生软化。另外一个可能的原因就是测试点落

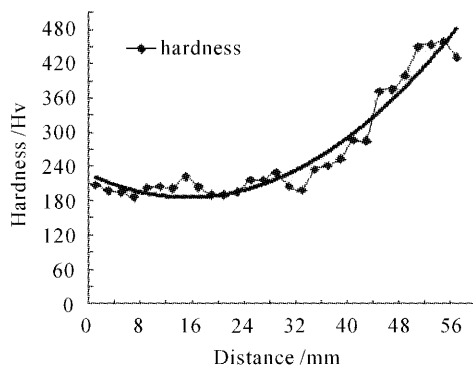


图 6 梯度试样硬度测试结果

Fig. 6 Hardness values versus distance from substrate

在了枝晶干和枝晶间,由于凝固过程产生的微观偏析造成了枝晶干和枝晶间的硬度差别^[11]。

4 结 论

1) 利用激光快速成形技术成功制备了 100% 316L 到 100% Rene 88DT 成分连续变化的梯度材料;

2) 所成形梯度材料的组织致密,成分及组织在 40 mm 内连续变化,组织的生长具有明显的取向性,硬度值从底部 316L 的 186 Hv 变化到顶端 Rene 88DT 的 458 Hv,平均一次枝晶间距由底部的 12.41 μm 逐渐增大到顶部的 16.99 μm 。

参 考 文 献

- 1 A. Mortensen, S. Suresh. Functionally graded metals and metal-ceramic composites. Part 1 Processing[J]. *International Materials Reviews*, 1995, **40**(6): 239~265
- 2 Wang Yu, Yao Kailun. State-of-the-art and future development of functionally graded materials[J]. *Physics*, 2000, **29**(4): 206~211
王 豫,姚凯伦. 功能梯度材料研究的现状与将来发展[J]. *物理*, 2000, **29**(4): 206~211
- 3 J. H. Abboud, R. D. Rawlings, D. R. F. West. Functionally graded nickel-aluminide and iron-aluminide coating sproduced via laser cladding[J]. *J. Mater. Sci.*, 1995, **30**: 5931~5938
- 4 F. J. Kahlen, A. Von Klitzing, H. Kar. Hardness chemical and microstructural studies for laser-fabricated metal parts of graded materials [J]. *Laser Institute of America, Laser Materials Processing*, 1999, **87** Part 2(USA): F129~F137
- 5 C. L. Atwood, M. L. Griffith, L. D. Harwell *et al.*. Laser spray fabrication for net-shape rapid product realization LDRD [R]. Sandia Report, 1999
- 6 T. Seefeld, C. Theiler, E. Schubert *et al.*. Laser generation of graded metal-carbide components [J]. *Materials Science Forum.*, 1999, **308~311**: 459~466
- 7 J. Th. M. De Hosson, Y. T. Pei. Functionally graded materials produced by laser cladding[J]. *Acta Mater.*, 2000, **48**: 2617~2624
- 8 Li Yanmin. Research on Technical Characters and Microstructure of Laser Solid Forming[D]. Xi'an: Dissertation for the degree of Ph. D. Northwestern Polytechnical University, 2001
李延民. 激光立体成形工艺特性与显微组织研究[D]. 西安: 西北工业大学博士论文, 2001
- 9 Feng Liping, Huang Weidong, Li Yanmin *et al.*. Influences of crystal orientation of substrate on microstructure of multi-layer laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10): 949~952
冯莉萍, 黄卫东, 李延民 等. 基材晶体取向对激光多层涂覆微观组织的影响[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(10): 949~952
- 10 Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and properties of the 316L SS fabricated by laser direct deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 1045~1048
席明哲, 张永忠, 章萍芝 等. 工艺参量对激光快速成型 316L 不锈钢组织性能的影响[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11): 1045~1048
- 11 M. L. Griffitha, M. E. Schlienger, L. D. Harwella *et al.*. Understanding thermal behavior in the LENS process [J]. *Materials and Design*, 1999, **20**: 107~113