

文章编号: 0258-7025(2009)11-3074-05

Fe314 合金粉末激光快速成形组织与力学性能分析

闫世兴 董世运 徐滨士 王志坚 张晓东 刘卫红

(装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要 利用 Fe314 合金粉末在 45# 钢基体上激光快速成形(LRF)出立体构件,揭示了快速成形的内部层间分布结构,观察了不同成形区域的金相组织,并分析了成形件的力学性能。结果显示,在组织方面,成形体内部各层呈梯子形交错叠加分布,晶体组织以细小致密的等轴晶为主,在底部分布着少量平面晶和粗大柱状晶;在力学性能方面,由于成形体组成相为奥氏体,故整体硬度较低,但塑性、韧性较好。在内部最大残余应力 690 MPa 情况下未出现微裂纹,表明利用 Fe314 合金粉末激光快速成形的构件具有良好的抗开裂性能。

关键词 激光技术;激光快速成形;金相组织;硬度;残余应力

中图分类号 TN249;TF124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.3074

Analysis of Mechanical Properties and Microstructures of Laser Rapid Forming Components with Fe314 Alloy Powders

Yan Shixing Dong Shiyun Xu Binshi Wang Zhijian Zhang Xiaodong Liu Weihong

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract A component is fabricated with Fe314 alloy powders on the substrate of 45# steels. The interlaminar distributing structures, the microstructure in different regions and mechanical properties of components are investigated. It is indicated that forming layers are stacked up like ladder shapes in aspect of microstructures which are mainly constituted of tiny compact equiaxed grains with distribution of some flat grains and columnar grains on the substrate. Furthermore, the hardness of components is low accompanied with high plasticity and ductility in aspect of mechanical properties because of the composing phases of austenite. There is no appearance of cracks under 690 MPa maximum residual stress, which has shown a high crack resistance is obtained through laser rapid forming (LRF) with Fe314 alloy powders.

Key words laser technique; laser rapid forming; metallurgical structure; hardness; residual stress

1 引 言

激光由于具有单色性、相干性、方向性,特别是高能量密度等特点使其在目前材料加工中已具有重要的应用价值,被广泛用于材料的表面改性和失效零件的再制造^[1~4]。由于激光加工材料的高效性及灵活性,围绕激光成形的研究已不再局限于在基体材料表面的单层熔覆,而是向多层堆积的快速成形方面拓展^[5,6],于是激光快速成形(LRF)技术随之发

展起来。激光快速成形技术兴起于 20 世纪 80 年代初期,由于技术条件的限制,LRF 还只是基于激光熔覆多层堆积成形三维实体件,进入 20 世纪 90 年代,随着计算机辅助设计的普遍应用,LRF 开始向以计算机三维建模及依据模型二维切片精确成形实际零件的方向发展^[7,8]。

在激光快速成形过程中,由于成形温度场的改变,激光快速成形的组织、性能与单层熔覆成形相比

收稿日期:2009-02-19;收到修改稿日期:2009-03-28

基金项目:十一五预研项目(513270102)资助课题。

作者简介:闫世兴(1984—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆再制造方面的研究。E-mail:ysxing1984neu@163.com

导师简介:董世运(1973—),男,博士,副教授,主要从事激光再制造及其质量控制方面的研究。

E-mail:syd422@vip.sohu.com(通信联系人)

存在很大差异;而成形件的内部组织分布又决定了性能优劣,因此分析激光快速成形构件的内部组织对于把握其性能规律从而应用到工程实际具有重要的意义。本文基于以上目的,利用适合激光立体成形的 Fe314 合金粉末在热膨胀系数相近的 45# 钢基体上快速成形出实体构件,综合分析内部属性,同时进行了力学性能的检测分析,进一步阐述快速成形过程中温度场的改变对组织性能的影响。

2 激光快速成形工艺

快速成形所用材料为 Fe314 合金粉末,成分如表 1 所示。该粉末特点是韧性好、硬度低、抗开裂性能好,适于恢复零件尺寸和成形结构件。实验采用侧向同步送粉方式,送粉量在线可调。激光单层扫描路线呈“弓”字形,单层扫描完毕后光线返回程序原点位置,当下一扫描道次开始时,直接在此点提升激光加工头,进行下一层的快速成形。激光快速成形的工艺参数为:激光功率恒定为 1000 W,扫描速度为 5~10 mm/s,送粉量 5.36 g/min,光斑直径 2.0 mm,单层搭接 20 道次,搭接率 40%,堆积 13 层,单层激光

加工头抬升高度 0.45 mm,载气流量 200 L/min,最终的成形尺寸为 25 mm×25 mm×5 mm。

表 1 Fe314 合金粉末成分

Table 1 Components of Fe314 powder

Element	C	Cr	Ni	B	Si	Fe
Mass fraction /%	0.1	15	10	1	1	Bal.

3 激光快速成形立方体组织特征

观察如图 1 所示的成形立方体的内部组织形态,激光快速成形体内部结构总体可分为底部区域(I 区)、中部区域(II 区)和顶部区域(III 区)。而由于基体的熔化、相邻熔覆线的搭接以及相邻熔覆层的叠加作用,成形体内部又存在不同的成形区域,主要有基体熔合区(1 区)、熔覆区(2 区)、一次重熔区(3 区,位于上下两层之间过渡区域)和二次重熔区(4 区,在层间搭接区域呈梯子形分布)。

在单道搭接和多层叠加条件下,在激光束的作用下,堆积过程中存在着对前道熔覆层的二次扫描,前道熔覆层有一部分熔化,一部分退火,一部分回火,即存在着二次熔化、二次热影响的现象,因此,组

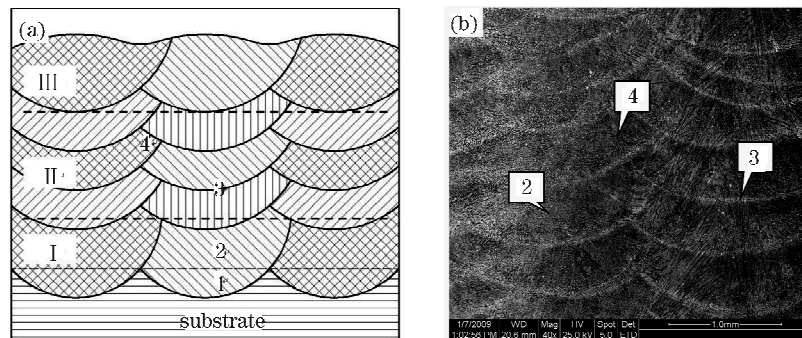


图 1 Fe314 粉末成形的立方体内部结构。(a) 分析模型;(b) 成形体内部实际结构

Fig. 1 Structure of components with laser rapid forming Fe314 powder

(a) analysis model; (b) practical structure of components

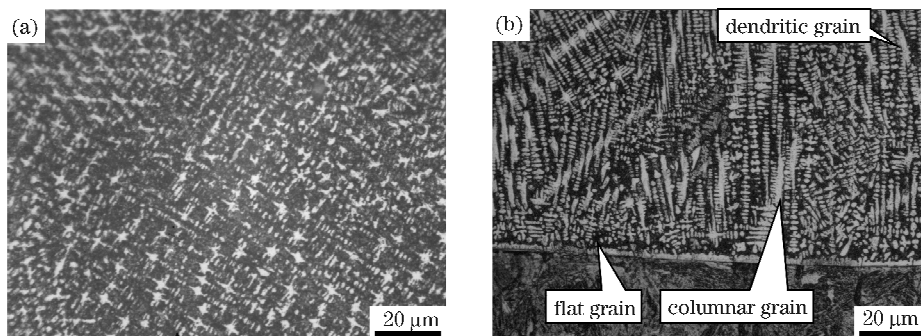


图 2 Fe314 粉末成形的立方体截面组织。(a) III 区组织;(b) I 区组织

Fig. 2 Microstructure of components with laser rapid forming Fe314 powder

(a) microstructure in section III; (b) microstructure in section I

变化更加复杂。以成形体中部区域为观察对象,在光镜下观察成形立方体从底部到顶部的显微组织,如图 2(a)所示。立方体顶部组织主要以细小致密的等轴晶为主,晶体组织随着距顶部距离的减小组织也越来越细化、致密。在底部主要由平面晶区、柱状晶和粗大树枝晶混合区组成。在熔覆层与基体结合界面处,由于存在较大的正温度梯度,随着熔池的凝固,最先出现了一层薄薄的平面晶,如图 2(b)所示。随后由于凝固时合金成分不一,导致一些熔点较高的溶质元素先凝固,而其他低熔点元素则富集在固液界面前沿,形成成分过冷,导致晶体生长向粗大的柱状晶转变。随着距凝固界面距离的增加,成分过冷继续增大,其结晶条件与纯金属在负的温度梯度下时的结晶条件相同,即出现粗大的树枝晶组织。

对于成形体中部组织,由于熔覆层搭接范围内的二次重熔区及其附近组织具有中部组织的典型特征,故以该区为观察对象。如图 3 所示,图 3(a)显

示了二次重熔区(4 区)及其附近的组织分布,图 3(b)为二次重熔区组织,该区域介于相邻两层的二次重熔区之间,组织主要是细小的等轴晶,结晶方向为沿着温度梯度方向垂直于搭接界面。图 3(c), (d)分别显示了二次重熔区左右两侧的熔覆层组织特征,左、右两侧熔覆层的组织都是以具有一定结晶方向的细小等轴晶为主,一次重熔区主要以较大的树枝晶为主,但右侧的一次重熔区明显比左侧宽,并且树枝晶粒度也较左侧粗大;其原因主要是右侧为先成形熔覆层,左侧为搭接熔覆层,受到左侧熔覆层的热量传递和以后熔覆道次热量积累的影响,已凝固组织发生低温回火,右侧一次重熔区晶体组织得以继续长大,导致粗大树枝晶区变宽。而左侧一次重熔区由于在凝固时固液界面前沿存在较大成分过冷,导致结晶形核率增多,细小的等轴晶区出现,阻碍粗大树枝晶向熔覆层内部长大。因此,左侧的一次重熔区宽度较窄。

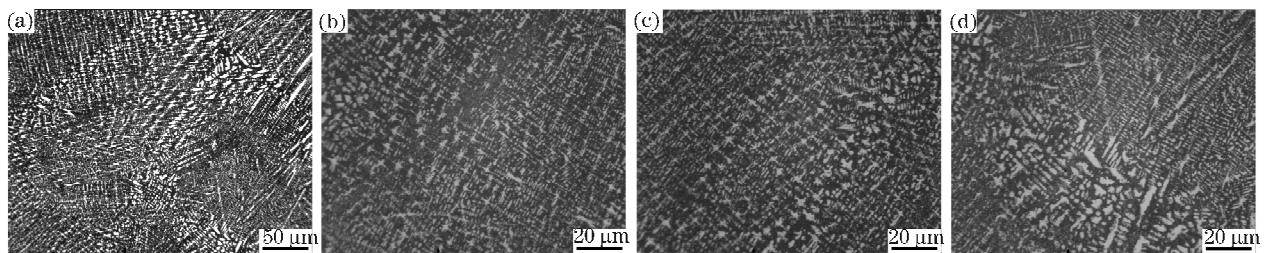


图 3 Fe314 粉末成形的立方体中部微观组织。(a) 二次重熔区及其附近区域;(b) 二次重熔区组织;(c) 二次重熔区左侧组织;(d) 二次重熔区右侧组织

Fig. 3 Microstructure in the intermediate components. (a) secondary remelting section and sections nearby; (b) microstructure of secondary remelting section; (c) microstructure in the left secondary remelting section; (d) microstructure in the right secondary remelting section

对比立方体底部平面晶组织特征,在中部两熔覆层间搭接区域则没有出现连续的平面晶组织,继之以分散的树枝晶组织,其原因在于在基体上开始堆积时熔覆层与基体存在很大的温度梯度,满足平面晶的结晶条件,形成平面晶组织;而在立方体中部,由于堆积是在已成形的熔覆层上进行,已成形熔覆层较基体具有较高的温度,相当于进行了预热处理。因此,其凝固时的温度梯度较小,故一次重熔区无平面晶组织,熔覆层内部无粗大柱状晶组织,而是出现了树枝晶组织。

4 激光快速成形力学性能

4.1 显微硬度分析

测量成形体的截面显微硬度分布如图 4 所示。其中 1 为基体,2 为结合界面处的基体,3 位于结合

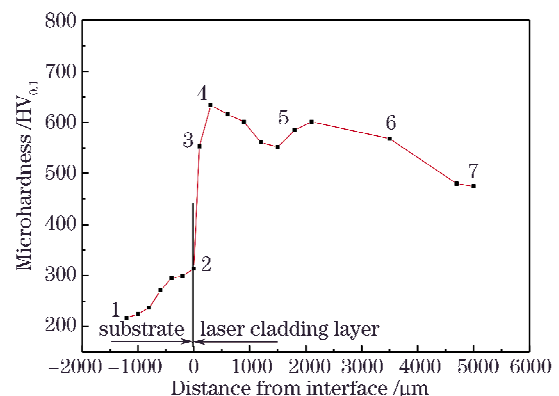


图 4 Fe314 粉末成形的立方体截面显微硬度分布

Fig. 4 Microhardness distribution of components

界面处,4 位于成形体底部,5 位于两熔覆层叠加处,6 位于成形体中部,7 位于成形体顶部。

由图 4 可知,基体的硬度受成形过程中传热作

用影响,从220 HV_{0.1}上升到320 HV_{0.1},而成形体平均硬度都在450~600 HV_{0.1}之间,高于基体硬度,且随着距结合界面处距离的增加,硬度在结合处附近达到峰值618 HV_{0.1},从结合界面到顶部的硬度分布趋于下降。其原因主要是在结合界面处开始成形时,温度梯度很大,在界面处形成粗大柱状晶组织,故硬度相对较低;向成形体内部延伸的组织为细小的等轴晶,导致该处的显微硬度达到峰值。而在成形体中部和顶部,显微硬度逐渐下降,主要是由于先前成形的激光熔覆层作为下一层的高温基体,残留于熔覆层中的热量来不及扩散出去,前一道熔覆层尚保持较高的温度,对下一熔覆层起着高温回火作用。先成形的熔覆层数越多,热量积累越多,试样的整体温度也越高,对后一熔覆层回火温度越高;同时,后一熔覆层冷却速度和凝固速度大幅度降低,因此,后一熔覆层的组织越接近平衡凝固组织,材料的塑性、韧性提高,而硬度降低,导致试样靠近基材的熔覆层硬度高于远离基材的熔覆层硬度。

另一方面,对比相同Fe基材料的单层熔覆层显微硬度(显微硬度值介于746~1283 HV_{0.2}之间^[9]),该立方体的平均显微硬度不高。主要原因是激光单层熔覆的温度梯度较大,导致冷却速度也随之变大,可以达到 $10^4 \sim 10^6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ ^[10],由材料连续冷却转变CCT曲线图可知^[11],在这个冷却速度范围内的凝固组织已避开了珠光体、贝氏体转变区,直接相变成马氏体和其他硬质相化合物,故强度、硬度较高。而由图5可知,成形体的相组成主要是固溶了Cr、Ni等合金元素的奥氏体相,并在枝晶间隙弥散分布着少量CrB化合物,由于奥氏体为软质相,并且Ni元素可大幅提高组织韧性、降低硬度,因此,成形体的显微硬度较之单层熔覆低。

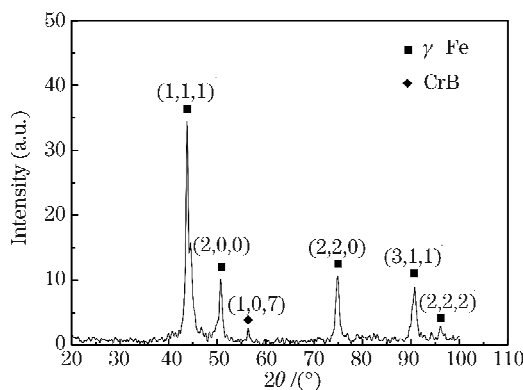


图5 Fe314粉末成形的立方体XRD图谱

Fig. 5 XRD of components

4.2 快速成形体残余应力分析

以电解液腐蚀成形体表面,一次腐蚀深度30 μm,采用侧倾固定Ψ法测量表面到内部的残余应力,如图6所示。

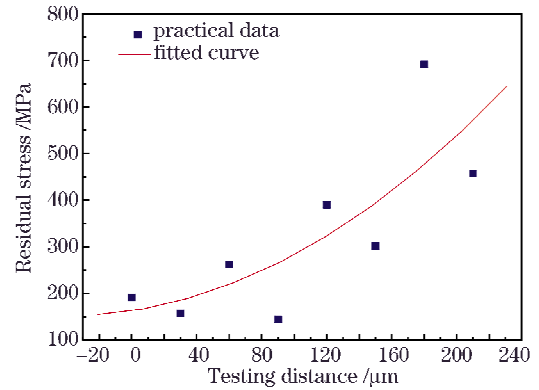


图6 成形立方体内部残余应力分布

Fig. 6 Residual stress inside of components

由图6可见,未经去应力热处理的成形件残余应力形式表现为拉应力,随着立方体表面到内部测量深度的增加,应力值总体走向是呈波动状增长,表面应力最小,值为157 MPa,内部180 μm处应力最大,值为691 MPa;距界面深度210 μm处为上下两层之间过渡区域,该处应力值开始减小。但无论是表层还是内部,成形立方体都没有出现微裂纹,证明利用Fe314粉末成形的实体构件具有良好的塑性、韧性和较低开裂敏感性。

5 结 论

1) 受成形温度场的影响,成形体内部结构分为基体熔合区、熔覆区、一次重熔区和二次重熔区,上下两层之间呈梯子形叠加分布。

2) 立方体顶部组织主要以细小致密的等轴晶为主;底部组织主要由平面晶、柱状晶、粗大树枝晶组成;中部组织具有独特一面:没有平面晶,在层间搭接与叠加位置,受成形温度场的影响,分布着不同粒度的树枝晶。

3) 成形体相组成主要是固溶有合金元素的奥氏体;从结合界面到内部显微硬度分布呈下降趋势。

4) 未经去应力热处理的成形件残余应力形式表现为拉应力,最大值为691 MPa,但内部未出现裂纹,证明利用Fe314粉末成形的实体件具有良好的塑性、韧性和较低的开裂敏感性。

因此,利用Fe314粉末激光快速成形的实体构件在组织分布、力学性能方面具有良好的综合表现,同时也进一步验证了Fe314粉末优异的激光立体

成形性能。

参 考 文 献

- 1 Xu Binshi, Liu Shican, Dong Shiyun *et al.*. Theory and Technology of Remanufactured Equipments Engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 294~300
徐滨士,刘世参,董世运等. 装备再制造工程的理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2007. 294~300
- 2 Dong Shiyun, Xu Binshi, Wang Zhijian *et al.*. Laser remanufacturing technology and its application [C]. *SPIE*, 2007, **6825**:68251N
- 3 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1653~1659
钟敏霖,刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. 中国激光, 2008, **35**(11):1653~1659
- 4 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Research development of nanostructured coatings prepared by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1698~1709
王东生,田宗军,沈理达等. 激光表面熔覆制备纳米结构涂层的研究进展[J]. 中国激光, 2008, **35**(11):1698~1709
- 5 Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Shi Likai *et al.*. Investigation on the fully dense metal part by laser rapid prototyping [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2002, **24**(4): 441~444
席明哲,张永忠,石力开等. 激光快速成型致密金属零件的研究[J]. 北京科技大学学报, 2002, **24**(4):441~444
- 6 Aditad Vasinonta, Jack L. Beuth, Michelle L. Griffith. A process map for consistent build conditions in the solid freeform fabrication of thin-walled structures [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, **123**(4): 615~616
- 7 Chen Jimin, Xu Xiangyang, Xiao Rongshi. Laser Modern Manufacturing Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 184~226
陈继民,徐向阳,肖荣诗. 激光现代制造技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2007. 184~226
- 8 Huang Weidong, Chen Jing, Li Yanming *et al.*. Laser rapid forming technology of high performance dense metal components with complex structure [C]. *SPIE*, 2005, **5629**:67~75
- 9 Zhang Qingmao, Liu Ximing, Sun Ning *et al.*. Investigation on microstructure and properties of broad-beam laser overlapping cladding F305 formed by powder feeding method [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, **26**(4):13~17
张庆茂,刘喜明,孙宁等. 送粉式宽带激光搭接熔覆 F305 粉组织和性能的研究[J]. 金属热处理, 2001, **26**(4):13~17
- 10 Li Zhensheng, Yang Ming'an, Qian Hancheng *et al.*. Modern Surface Engineering Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. 428~429
郇振声,杨明安,钱翰城等. 现代表面工程技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2000. 428~429
- 11 Cui Zhongqi. *Metallic and Heat Treatment* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 276~279
崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2007. 276~279