

激光快速成形 304 不锈钢试件组织与拉伸 断口特性分析

余金水 邱长军 周 炬 何 彬 樊湘芳

(南华大学机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要 用激光快速成形(LRF)技术制备 304 不锈钢拉伸试样,并对试样进行拉伸。利用光学显微镜观察了试样表面显微组织;利用扫描电镜(SEM)观察了试样断口的形貌特征,并用能谱仪(EDS)分析了取样点处的化学成分。结果表明,所制备试样显微组织晶粒细小,具有定向凝固的特征,在成形件内部存在微细观孔洞与裂纹。在拉伸断裂试样中,断口呈现韧性断裂的特征,断口部分区间氧、硅含量较高,形成金属化合物夹杂,使材料的力学性能变差。

关键词 激光技术;激光快速成形;304 不锈钢;显微组织;断口形貌

中图分类号 TG156.99;TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.011402

Analysis on Microstructure and Tensile Fracture Characteristic of 304 Stainless Steel Specimens Made by Laser Rapid Forming

Yu Jinshui Qiu Changjun Zhou Ju He Bin Fan Xiangfang

(Mechanical Engineering College, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract With the technique of laser rapid forming (LRF), tensile samples of 304 stainless steel are prepared, on which tensile test is done. The surface is observed by optical microscope, the fracture morphology of the specimens is observed by scanning electronic microscopy (SEM), and chemical compositions of sampling points are analyzed by energy dispersive spectrometer (EDS). The results show that the sample's microstructure contains small grains with unidirectional solidification characteristic, which form micro-holes and micro-cracks inside the formed parts. In specimens of tensile fracture, there are ductile fracture characteristics, and the contents of oxygen and silicon in some area of fracture surface are higher. These worsen the mechanical properties of the specimens.

Key words laser technique; laser rapid forming; 304 stainless steel; microstructure; fracture morphology

OCIS codes 140.3470; 140.3390; 160.3380

1 引言

激光快速成形(LRF)技术是近年来迅速发展的一项先进实体自由成形技术。该技术所成形的零件致密度高,具有快速凝固组织的特征,零件的力学性能达到或超过常规铸造或锻造零件的性能,能满足直接使用要求。该技术主要的研究方向有激光快速形成的基本理论、材料的成形特性和工艺、成形过程中的应力和温度场分布以及缺陷的解决方案等^[1~9]。文献[10~13]对 TC4、TC21、Ni60/WC 复合材料、316 L 不锈钢等材料的激光快速成形进行了研究。

考虑到 304 不锈钢粉末成形效果良好,力学性能优异,且国内以其作为快速成形粉末的研究不多,本文以 304 不锈钢合金粉末作为快速成形材料,着重研究了无保护气状态下的激光快速成形 304 不锈钢显微组织与拉伸断口特性。

收稿日期: 2011-09-02; **收到修改稿日期**: 2011-09-15; **网络出版日期**: 2010-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(50974075,50775106)资助课题。

作者简介: 余金水(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: yujinshui1234@126.com

导师简介: 邱长军(1965—),男,博士,教授,主要从事材料表面改性方面的研究。E-mail: qiuchangjun@hotmail.com

(通信联系人)

2 实验材料和方法

实验采用 5 kW 横流 CO₂ 激光器, 基材为 Q235 钢板, 尺寸为 240 mm×120 mm×12 mm, 合金粉末为 304 不锈钢粉末, 粒度为 -150~+300 目(48~106 μm), 其化学成分如表 1 所示。304 不锈钢粉末是如图 1 所示的球形粉末。实验前在 60 ℃ 的真空炉中烘干 12 h; 在基材上用连贯扫描法进行 XY 混合扫描, 送粉方式为侧向同步送粉。

表 1 304 不锈钢粉末化学成分

Table 1 Chemical compositions of the 304 stainless steel powder

Chemical compositions	Mass fraction /%
C	0.06
Si	0.55
Mn	0.9
S	0.017
P	0.028
Cr	18.46
Ni	8.06
Fe	Bal.

快速成形系统主要由自动控制系统、高功率激光器、工作台、粉末输送系统及各种成形过程控制系统组成。

在成形前对基材进行预热, 预热温度约为 300 ℃, 在加工过程中要使基体始终维持在该温度上下, 用电炉进行预热, 采用 Smart Sensor 非接触式红外线测温仪对基材进行测温(型号 AR872D)。预热温度达到要求后, 进行激光快速成形, 激光功率为 1.5 kW, 矩形光斑尺寸为 3.5 mm×4.5 mm, 扫描速度为 6 mm/s, 送粉速度为 7.05 g/min, 扫描区域的面积为 180 mm×15 mm, 单道间搭接系数为 0.5, 扫描层数为 4 层。用线切割将快速成形制成的试样沿长度方向切成多个拉伸试样, 如图 2 所示。用金相显微镜(型号 Olympus GX51)对组织进行观察; 用扫描电镜(SEM, 型号 JMS-6490A)观察断口的形貌特征, 并用能谱仪(型号 JED-2300 Analysis Station)分析取样点处的化学成分。

3 实验结果与分析

3.1 力学性能

把非标拉伸试样装夹在自制的夹具上在 WDW-20E 微机控制电子式万能试验机上进行拉伸实验, 实验在室温下进行, 拉伸速率为 0.5 mm/min, 测得快速成形 304 不锈钢试样的力学性能如表 2 所示。与本实验中所使用材料成分相同的常规 304 不锈钢力学性能参数如表 3 所示。

表 2 快速成形 304 不锈钢试样力学性能

Table 2 Mechanical properties of 304 stainless steel samples by LRF

Sample	1	2	3	4	5	6	Average
Tensile strength /MPa	715	661	801	537	624	722	705
Yielding Strength /MPa	485	520	490	515	565	450	504
Elongation /%	8.11	8.3	9.16	8.65	9.27	10.3	8.97

表 3 常规 304 不锈钢力学性能

Table 3 Mechanical properties of conventional 304 stainless steel

Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%
≥205	≥520	≥40

通过对快速成形 304 不锈钢和常规 304 不锈钢性能对比, 可以看出, 所制备的 304 不锈钢试样的屈服强

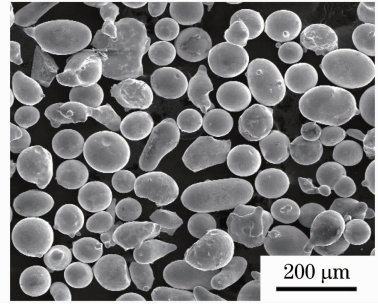


图 1 304 不锈钢粉末颗粒形貌

Fig. 1 Morphology of 304 stainless steel powder



图 2 拉伸试样

Fig. 2 Tensile samples

度和抗拉强度明显优于常规 304 不锈钢。同时可以看到,快速成形 304 不锈钢试样的抗拉强度在 537~801 MPa 之间波动,波动范围较大。

3.2 显微组织

激光快速成形 304 不锈钢试件截面组织是一种快速凝固的铸造形态,是非常明显而且规则的枝状结晶组织。图 3 为激光快速成形 304 不锈钢表面组织结构显微图。从图 3 可以看出,激光快速成形 304 不锈钢试件的组织具有明显的快速凝固特点,沿温度梯度方向生长的枝状晶排列规则,较常规 304 不锈钢组织晶粒更为细小、均匀、致密。

3.3 拉伸断口特性

激光快速成形技术利用激光作为能源,能量集中度高、热量输入高、温度梯度高。激光束与材料相互作用时能使材料快速熔化并迅速凝固,可以获得细小、均匀、致密的组织,使获得的成形件具有优良的机械性能。

图 4(a)为拉伸断面处的 SEM 图,图 4(b)为图 4(a)中拉伸断面 008 处微小区域的能谱分析谱线;图 4(c)为拉伸断面夹杂处的 SEM 图,图 4(d)为图 4(c)中 009 处微小区域的能谱分析谱线。

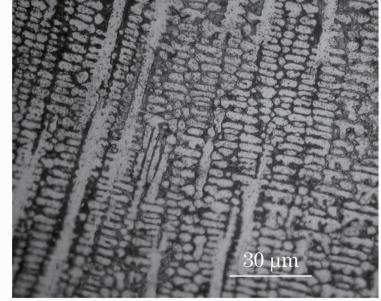


图 3 激光快速成形 304 不锈钢光学显微镜组织结构图

Fig. 3 Optical microscopic images of LRF 304 stainless steel

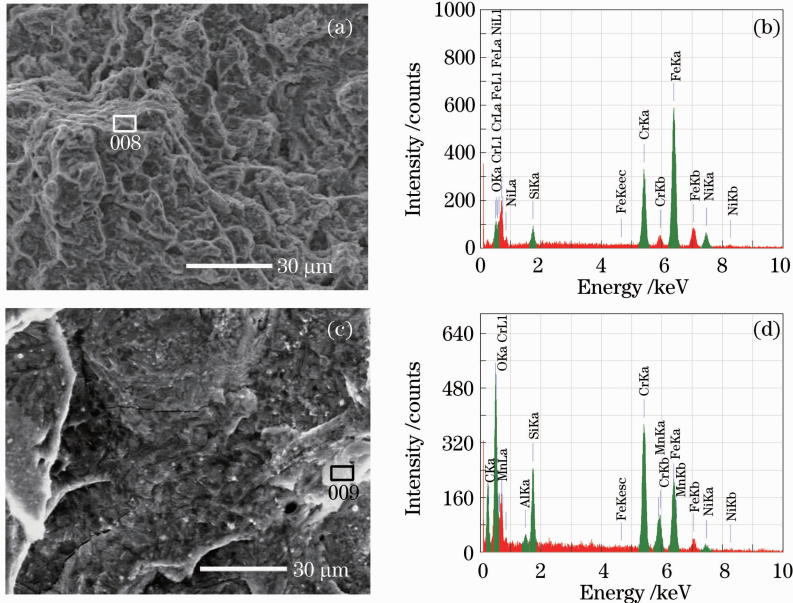


图 4 拉伸断面处 SEM 和能谱分析。(a)拉伸断面处 SEM; (b) 008 点处能谱分析线谱; (c)拉伸断面夹杂处 SEM; (d) 009 点处能谱分析线谱

Fig. 4 SEM and energy spectrum analysis on cross-section of tensile fracture. (a) SEM of tensile fracture; (b) line-spectrum energy spectrum analysis on point 008; (c) SEM of tensile fracture in inclusion; (d) line-spectrum energy spectrum analysis on point 009

从能谱分析中可以看出,激光快速成形 304 不锈钢试件中存在少量的氧化物,但是夹杂处的氧化物含量(SiO_2 及 Mn、Al 氧化物)大幅升高,形成金属化合物夹杂,如图 5 所示。夹杂往往使材料的力学性能变差。拉伸实验结果表明,由于气孔、夹杂和裂纹等缺陷的存在,并在该处产生了较大的应力集中,故试件往往在有缺陷的部位发生断裂。因此,要进一步提高材料的机械性能,需对现行的无保护气送粉系统做一定的改进,并适当调整加工工艺参数,通过熔后热处理以及其他特殊处理方法来消除气孔、夹杂等缺陷。

断口处的 SEM 形貌如图 6 所示。从图中可以看出,微锻后试样断口中有不规则分布的韧窝及撕裂岭,可推断试样在断裂前发生了一定程度的塑性形变,故其在拉伸过程中表现出较大的抗拉强度,这与拉伸实验结果(表 2)相吻合。这些韧窝的产生主要是由于存在于试样内部的气孔、夹杂等缺陷在拉伸过程中产生的

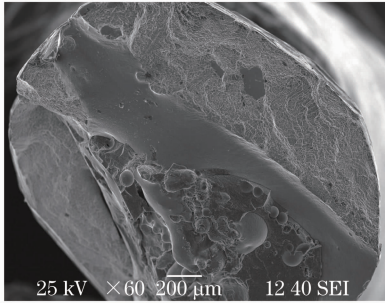


图5 拉伸断面处的夹杂 SEM 形貌

Fig. 5 SEM morphology of inclusions in fracture

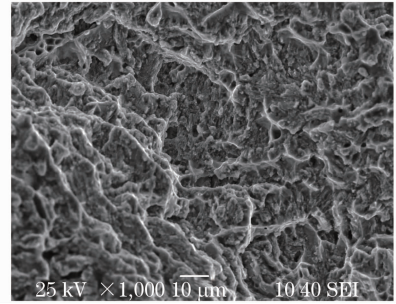


图6 断口 SEM 形貌图

Fig. 6 SEM morphology of fracture

应力集中,在加载达到材料的屈服极限时,材料开始发生塑性变形,在缺陷处形成裂纹源,并扩展形成韧窝状断裂形貌。

4 结 论

- 1) 激光快速成形 304 不锈钢试件是在基材上进行 XY 混合扫描法制备而成的,其截面显微组织呈树枝晶状,晶粒细小、致密,具有定向凝固的特征。
- 2) 激光快速成形 304 不锈钢试件中存在少量的氧化物,易于形成金属化合物夹杂,这使得试件力学性能变差。对目前无保护气送粉系统做一定的改进,并进一步优化工艺参数,有望获得更优的机械性能。
- 3) 激光快速成形 304 不锈钢试件断口中有沿晶断裂的痕迹,也有撕裂岭、韧窝的存在,可以判断其断裂前发生了一定程度的韧性变形。

参 考 文 献

- 1 Ji Shengqin, Li Peng, Zeng Xiaoyan. Microstructure and mechanical property analyses of the metal parts direct fabricated by laser cladding[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(2): 130~132
姬生钦,李鹏,曾晓雁. 激光熔覆直接制造金属零件的组织及力学性能分析[J]. 激光技术, 2006, **30**(2): 130~132
- 2 Xue Chunfang, Dai Yao, Tian Xinli. Laser engineered net shaping of Co-based superalloys[J]. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, **16**(23): s1982~s1985
- 3 M. Gaumann, C. Bezencon, P. Canalis *et al.*. Single-crystal laser deposition of superalloys: processing-microstructure map [J]. *Acta Mater.*, 2001, **49**(6): 1051~1062
- 4 Li Peng. Direct Laser Fabrication of 3-Dimensional Metal Parts Based on Laser Cladding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005
李鹏. 基于激光熔覆的三维金属零件激光直接制造技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005
- 5 Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Temperature/stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1308~1322
贾文鹏,林鑫,陈静等. 空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1308~1322
- 6 Wang Huaming, Zhang Lingyun, Li An *et al.*. Process on rapid solidification laser processing for advanced materials and components[J]. *World Sci-Tech R&D*, 2004, **26**(3): 27~31
王华明,张凌云,李安等. 先进材料与高性能零件快速凝固激光加工研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2004, **26**(3): 27~31
- 7 Yang Jian, Huang Weidong, Chen Jing *et al.*. Residual stress of laser rapid formed metal parts[J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(1): 5~8
杨健,黄卫东,陈静等. 激光快速成形金属零件的残余应力[J]. 应用激光, 2004, **24**(1): 5~8
- 8 A. Plati. Residual stress generation during laser cladding of steel with a particulate metal matrix composite[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2006, **8**(7): 619~623
- 9 U. de Oliveira. Microstresses and microstructure in thick cobalt-based laser deposited coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, **201**(14): 6363~7124

- 10 Zan Lin, Chen Jing, Lin Xin *et al.*. Research on microstructures of deposited TC21 titanium alloy by laser rapid forming [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(4): 612~616
咎 林, 陈 静, 林 鑫 等. 激光快速成形 TC21 钛合金沉积态组织研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, **36**(4): 612~616
- 11 X. H. Wu, J. Liang, J. Mei *et al.*. Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. *Materials and Design*, 2004, **25**(2): 137~144
- 12 Chen Jing, Lin Xin, Wang Tao *et al.*. Hot tearing mechanism of 316L stainless steel cladding layers in process of laser rapid forming [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2003, **32**(3): 183~186
陈 静, 林 鑫, 王 涛 等. 316L 不锈钢激光快速成形过程中熔覆层的热裂机理 [J]. 稀有金属材料与工程, 2003, **32**(3): 183~186
- 13 Song Jianli, Deng Qilin, Hu Dejin *et al.*. Organization characteristics and performance of 316L stainless steel by laser cladding forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1441~1444
宋建丽, 邓琦林, 胡德金 等. 激光熔覆成形 316L 不锈钢组织的特征与性能 [J]. 中国激光, 2005, **32**(10): 1441~1444