

文章编号: 1001-3806(2006)02-0130-03

激光熔覆直接制造金属零件的组织及力学性能分析

姬生钦, 李 鹏, 曾晓雁*

(华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 利用激光熔覆直接制造技术, 采用不同的路径填充模式制备了不锈钢拉伸试样, 对试样进行拉伸试验并对断口进行电镜扫描分析。结果表明, 所制备的金属拉伸试样结合强度高, 表现为韧性断裂, 其屈服强度与断裂强度高于相近成分下常规加工方式所加工试样的相应值。激光扫描方向对拉伸性能的高低没有显著影响。拉伸试样显微组织晶粒细小, 具有定向凝固特征。

关键词: 激光技术; 激光熔覆; 激光直接制造; 力学性能; 不锈钢; 金属粉末

中图分类号: TG 665 **文献标识码:** A

Microstructure and mechanical property analyses of the metal parts direct fabricated by laser cladding

Ji Sheng-qin, Li Peng, ZENG Xiao-yan

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan 430074 China)

Abstract Some tensile samples of stainless steel have been fabricated directly by laser cladding with three path-filling modes. The results show that the fracture character of tensile samples with high bond strength is ductile rupture, and the yielded strength and rupture strength are higher than the corresponding values of samples with the conventional processing methods. The orientation of laser scanning has no significant influence on tensile performance. Microstructure analyses of tensile samples by SEM show that crystalline grains are very fine and have the orientated solidification structures.

Key words laser technique; laser cladding; direct laser fabrication(DLF); mechanical property; stainless steel; metal powder

引 言

激光快速直接制造金属零件是近年发展起来的一种先进制造技术。该技术采用大功率激光束作为能源, 以金属合金粉末作为原料, 采用逐层添加材料的方式获得致密、无需加工或少量加工的金属零件, 它集计算机技术、CAD/CAM、激光技术、机械工程技术于一体, 在无需任何硬质工模具或模型的情况下, 能快速制备出不同材料的复杂形状零件, 缩短制造周期, 具有较大的柔性和灵活性, 不仅解决了复杂零件、单件、小批量生产成本过高的问题, 而且可以迅速将设计思想转化为具有一定结构和功能的原型或零件, 从而加快了对产品的评价和修改, 增强了产品的市场竞争力^[1~4]。

近年来, 科研人员对激光快速制造成型金属零件的力学性能进行了广泛的研究工作, 取得了优秀的成果。WU 等人对 Ti 合金的 DLF 工艺进行了研究, 制件的机械性能在 HIP 处理之后与锻件性能相当或略有

提高^[5,6]。XUE 等人在铸态 N-738 超合金上利用 DLF 技术堆积 N-738 合金, 经固溶和时效处理后, 堆积部分合金的室温抗拉强度为 1270MPa, 较铸态提高 15%, 结合处强度为 900MPa, 沉积方向的延伸率是铸态的 3 倍~4 倍, 水平方向延伸率高于铸态水平^[7]。在国内, ZHANG 等人对激光快速成形 316L 不锈钢薄壁墙的力学性能进行了研究, 认为拉伸试样为韧性断裂, 力学性能与铸造及锻造退火态相当^[8]。GAO 等人^[9]和 WANG 等人^[10]通过 DLF 技术成功制造出钛合金零件, 力学性能达到锻造钛合金水平。可以看出, 利用激光直接制造技术制造的金属零件具有较好的机械性能, 优于在相近成分下采用传统加工方式制造的零件。

路径填充模式是激光直接制造技术的一个重要研究方向, 优良的填充模式可以减少激光的空行程, 提高成型效率和零件精度。由于激光直接制造过程中存在金属填充路径之间的熔合现象, 因此, 不同的路径填充模式可能会导致金属零件的机械性能的差异, 但是, 有关不同路径填充模式对所制备金属零件的力学性能的影响, 还未发现有文献报道。

作者以不锈钢合金粉末为熔覆材料, 着重研究了

作者简介: 姬生钦(1977-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光快速原型制造方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: xyzen@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2005-02-25; 收到修改稿日期: 2005-03-22

激光熔覆直接制造中,不同填充模式对激光熔覆直接制造不锈钢金属零件的组织性能的影响规律。

1 实验装置与方法

实验采用 Rofine-Sinar 5kW 纵流 CO₂ 激光器,焦点激光束直径为 0.9mm。采用自行研制的 HGL-Φ 型激光熔覆自动送粉器及同轴送粉系统将合金金属粉末输送至成型零件上。基材材料为 10mm 厚 A3 钢板,合金粉末为不锈钢 (Fe-17Cr-4Ni-2Mo-0.1C (质量分数 w)), 粉末粒度为 -150 目/+360 目。激光快速制造过程中,所使用的激光功率为 650W,扫描速度为 10mm/s,搭接率为 33%,送粉量为 6g/min,送粉载气 Ar 流量为 10L/min。

为了研究成型零件的力学性能,按照相同的工艺参数,通过激光直接制造技术,采用 3 种不同的填充模式分别制造出实际拉伸试样,每种填充模式各制造 4 个样本。各样本经线切割加工和表面磨光制成满足 GB 6397-86 规定的片状金属拉伸试样。在 Zwick/Roell 050 型拉伸试验机上进行拉伸性能测试,测试后的试样利用 Quanta200 型环扫描电镜设备进行断口及微观组织观察。

实验采用的填充模式如图 1 所示,分别为:沿 x 方向的光栅扫描式填充、沿 y 方向的光栅扫描式填充、轮廓偏置式填充。



Fig 1 Patr filling models of direct laser fabrication

a— x direction raster filling b— y direction raster filling c—contour offset filling

2 实验结果与分析

2.1 显微组织特征

图 2 为 x 向光栅扫描式填充零件横截面的金相组



Fig 2 Microstructure of cross section of sample with x direction raster filling
a—macrograph of section b—middle region c—transition region

织。图 2a 是低倍形貌,可见其中有较多的疏松、夹杂等晶体缺陷。图 2b 是图 2a 的高倍形貌,可见熔覆层是由多层具有相同组织特点的组织组成,每层组织由彼此相互平行且与基板垂直方向的枝晶组成。这是因为在快速成型的层层堆积过程中,热流主要沿着垂直于基板的方向导出,导致熔覆层中部具有定向生长的特征。而在熔覆层的过渡区域,上一层的熔覆层受到高能激光束的加热作用而部分重熔,枝晶受到破坏,因此定向凝固特征被破坏(见图 2c)。

图 3 为 x 向光栅扫描式填充纵截面的金相组织。图 3a 是低倍形貌,搭接处存在一些夹渣和气孔缺陷。图 3b 为高倍形貌,每道熔覆层中部的组织均匀且非常细小,而在每道熔覆层过渡区,由于搭接而造成的重熔现象,致使晶粒较为粗大。

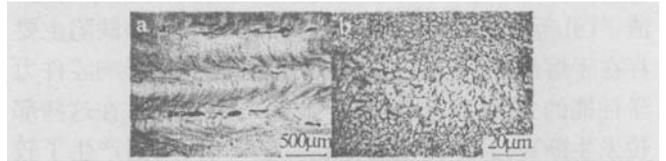


Fig 3 Microstructure of sample vertical section with x -direction raster filling
a—macrograph of section b—micrograph of section

2.2 力学性能分析

力学性能分析是评价零件使用寿命的一个重要手段。对不同填充模式下激光直接制造的拉伸试样进行拉伸实验,结果表明:不同填充模式对力学性能有一定的影响。由拉伸曲线计算所得屈服强度及抗拉强度分别列于表 1,同时将与本实验条件下相近合金成分的屈服强度及抗拉强度列于表 2。可以看出,采用激光熔覆

Table 1 Comparison of mechanical properties of laser cladding stainless steel with three patr fill models

patr filling methods	σ_{YS} / MPa	σ_{UTS} / MPa	δ / %
x -direction raster filling	569	771	60.8
y -direction raster filling	590	707	59.6
contour offset filling	742	754	60.9

Table 2 Mechanical properties of stainless steel with the conventional processing methods^[2]

condition	σ_{UTS} / MPa	δ / %
cast 316L(CF-3M)	552	55
hot finished & annealed 316L bar	480	40
cold finished & annealed 316L bar	620	30

直接制造技术制作的试样具有较高的屈服强度和抗拉强度,其性能优于传统方式制备的试样。金属零件显微组织晶粒在 x 向均匀细小,组织致密,使之具有较高的抗拉强度和屈服强度。 y 向在每道熔覆层之间由于搭接重熔现象,组织较大,机械性能稍有降低,如表 1 中 2 号试样所示,但从表 2 可以看出,其机械性能仍优于传统方法制备的试样。采用轮廓偏置式,其屈服强度高达 742MPa,延伸率为 61%,这充分表明,采用激光直接制造技术,选用合适的填充模式和工艺参数,可以大大提高零件的机械性能。

激光直接制造技术获得的金属零件具有优良的屈服强度及抗拉强度,这是与制备过程的特点有关。激光直接制造技术采用激光为能源,能量集中,热输入量高,金属粉末在瞬间熔化凝固,逐点逐面堆积形成金属零件,具有快速凝固特征,晶粒细小,组织结构致密,是其

具有优良机械性能的主要原因。

由于本实验是在大气环境下进行,熔覆层表面形成大量的氧化皮和氧化渣,在搭接和进行下一层堆积时,这些氧化物未能充分熔化,从而残留于零件内部。尽管进行了工艺优化,本实验中的拉伸零件中仍然存在夹渣、气孔等冶金缺陷,如图 2a 图 3a所示,这些缺陷主要存在于熔覆层的层交界处和每道搭接处,是影响零件力学性能的主要因素。拉伸实验表明,试样通常在这些部位发生断裂,其原因主要是在夹渣、气孔周围产生了较强的应力集中。因此,适当改善工艺参数和优化填充模式,消除夹渣和气孔缺陷,还可以进一步大幅度提高零件的力学性能。

2.3 断裂机理分析

通过环扫描电镜对拉伸试样断口进行分析,断口表面为均匀分布的韧窝,可以看出为韧性断裂。图 4 为 x 向光栅扫描填充拉伸试样所得等轴塑性孔洞,韧窝较深,且分布均匀,说明零件的塑性较好。这些韧窝的产生是由于在加载达到屈服强度时,材料开始塑性变形,这时在材料内部夹杂物、第 2 相、晶界和其它范性流变

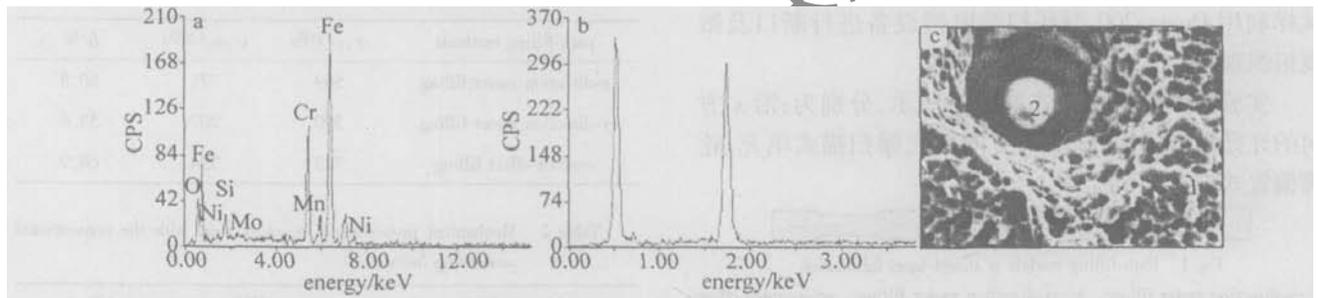


Fig 5 Composition analyses of the tensile fracture surface with x -direction raster filling a—base metal b—binder inclusion 2 c—SEM morphology

氧化物。因此,应适当控制 Si 的含量,并采用保护气氛,防止过多氧化物夹渣的形成。

3 结束语

(1)采用激光熔覆技术直接制造不锈钢拉伸试样,不同的填充路径会对机械性能产生一定的影响。但是,即使是最简单的光栅式扫描方式,且扫描方向垂直于拉伸方向,试样的抗拉强度也与扫描方向平行于拉伸方向时的基本相当,并优于常规加工方法下的性能,说明激光熔覆快速制造金属零件技术的确具有一定的优越性。

(2)本实验是在试样上或多或少存在一定冶金缺陷下完成的,激光直接制造的不锈钢金属拉伸试样仍具有较高的机械性能。适当改善工艺参数,减少或消除夹渣、氧化、气孔,有望获得更优的机械性能。

(3)由于样本还比较少,且拉伸试样中存在一些缺陷,所得实验结果比较相近,目前还不能断定哪一种路径填充模式更好,有待进一步验证。

(4)拉伸试验表明,激光直接制造不锈钢合金试样为韧性断裂,韧窝分布均匀。

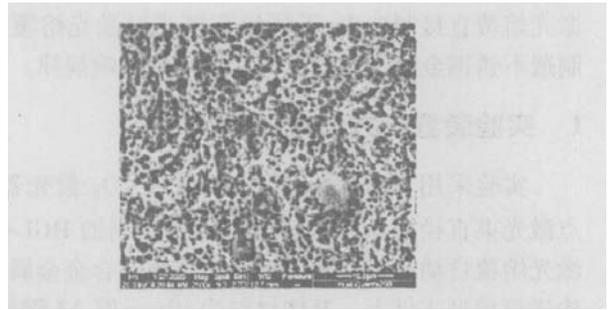


Fig 4 SEM morphology of the tensile fracture surface with x -direction raster filling

不连续的地方发生位错塞积,产生应力集中,进而形成微孔所致。

硅的存在能提高钢的抗氧化性,生成的 SiO_2 保护膜能够防止进一步氧化,可以替代部分 Ni;图 5a 为图 5c 中 1 点处微小区域的能谱分析谱线,可以看出,在基体中含有少量的 SiO_2 。但由于实验没有采用保护气氛,过多的氧化致使在试样内部存在许多氧化物夹渣,导致在该处应力集中,是位错的聚集处,易于裂纹的形核和生成。图 5b 为图 5c 中 2 点处微小区域的能谱分析结果,表明试样中的夹渣主要为 SiO_2 ,同时含有少量 Fe 的

参考文献

- [1] ZHONG M L, NING G Q, LIU W J Research and development on laser direct manufacturing metallic components [J]. Laser Technology, 2002, 26(5): 388~391 (in Chinese).
- [2] YANG S, ZHONG M L, ZHANG Q M *et al* New techniques to rapidly manufacture metal parts with laser [J]. Laser Technology, 2001, 25(4): 254~257 (in Chinese).
- [3] XIM Zh, ZHANG Y Zh, ZHANG P Zh *et al* Influence of processing parameter on the microstructure and properties of the 316L SS fabricated by laser direct deposition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(11): 1045~1048 (in Chinese).
- [4] ZHANG Y Zh, SHI L K, ZHANG P Zh *et al* The newest advance in laser rapid forming of metallic powders [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2000, 29(6): 361~365 (in Chinese).
- [5] WU X H, LIANG J MEI J F *et al* Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. Materials and Design, 2004, 25(2): 137~144.
- [6] WU X, SHARMAN R, MEI J F *et al* Direct laser fabrication and microstructure of a burn-resistant Ti alloy [J]. Materials and Design, 2002, 23(3): 239~247.
- [7] XUE L, CHEN J Y, BLAM M U. Laser consolidation of Ni-based Ni-738 superalloy for repairing gas turbine blades [A]. Proceedings of the Laser Materials Processing Conference [C]. Orlando Laser Institute of America, 2000. 31.

的典型值为 800fs 调制用的电脉冲的均方根抖动 σ_e 。典型值为 700fs 它将直接传递给增益开关激光器引起光脉冲的相关抖动。扣除掉相关抖动后可得到光脉冲的实际抖动 σ_s 。在外光注入前为 2.57ps 外光注入后降低至 1.06ps 。光脉冲的时间抖动是随机的, 它服从高斯分布。抖动的均方根定义为对样本平均值的标准偏差 σ 。光脉冲的时间抖动值位于 1σ 区间内的置信概率为 68.3% 。用取样示波器直接测量光脉冲的时间抖动, 适用于脉冲抖动大于 1ps 的测量。要精确测量小于 1ps 的脉冲抖动需要使用低噪声高分辨率的频谱仪, 否则会引入较大的测量误差。实验中通过改变DFB激光器的工作温度, 可实现波长从 1540nm 到 1560nm 的可调谐输出。图 6 为注入光功率与脉冲抖动测量值和边模抑制比的关系曲线。注入光功率超过 $40\mu\text{W}$ 后, 光脉冲形状恶化甚至产生双峰畸变。

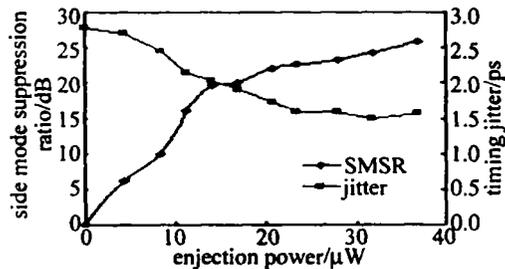


Fig 6 The dependence of SMSR and jitter on injection power

3 结 论

利用两个多量子阱 DFB 激光器作为外部种子源注入增益开关 F-P 激光器, 这一技术消除了自注入受限于外部反馈腔长度而重复频率不能任意可调的缺陷, 光脉冲的抖动从 2.57ps 降低至 1.06ps 。双波长的边模抑制比达到 25dB , 并利用温度控制器通过改变种子激光器的注入波长, 实现了 F-P 激光脉冲波长的可

调谐输出。

参 考 文 献

- [1] ZHU Zh, CHEN L Y, LIH *et al* Wavelength stabilization scheme for tunable laser diode based on temperature feedback [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 18~20(in Chinese).
- [2] HE Zh J, MA Y W. Tunable laser with high distinguish ability [J]. Laser Technology, 2002, 26(5): 338~343(in Chinese).
- [3] WANG D N, SHU C. Tunable dualwavelength picosecond pulse generation using multiple optical path self seeding approach [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(9): 1211~1213.
- [4] ANANDARAJAH P, MAGUIREP J, CLARKE A *et al* Self seeding of a gain switched integrated dual laser source for the generation of highly wavelength-tunable picosecond optical pulses [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(2): 629~631.
- [5] LI Sh P, CHAN K T, LIU Y *et al* Multiwavelength picosecond pulses generated from a self seeded Fabry-Pérot laser diode with a fiber external cavity using fiber Bragg gratings [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(12): 1712~1714.
- [6] PENG P Ch, TSENG H Y, CHEN S A tunable dualwavelength erbium-doped fiber ring laser using a self seeded Fabry-Pérot laser diode [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(5): 661~663.
- [7] ZHANG M, WANG D N, LIH *et al* Tunable dualwavelength picosecond pulse generation by the use of two Fabry-Pérot laser diodes in an external injection seeding scheme [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(1): 92~94.
- [8] XU L, YAO M Y, ZHANG J F *et al* A Novel technique of self seeding of GS-DFB laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(5): 427~430(in Chinese).
- [9] CALVANIR, CISTERNINO F, GARRARDIR *et al* All fiber self injection seeding for timing jitter reduction in a chip compensated gain-switched DFB laser [A]. ECOC 98[C]. Madrid: ECOC, 1998: 167~168.
- [10] WANG Y C. Experimental study on the timing jitter of gain switched laser diodes with photon injection [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(9): 2190~2193(in Chinese).
- [11] GUNNING P, LUCEK J K, MOODIE D G *et al* Gain switched DFB laser diode pulse source using continuous wave light injection for jitter suppression and an electroabsorption modulator for pedestal suppression [J]. Electron Lett, 1996, 32(11): 1010~1011.
- [12] TC₄ alloy fabricated by laser direct deposition [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 29~33(in Chinese).
- [10] WANG H M, ZHANG L Y, LIA *et al* Progress on rapid solidification laser processing for advanced materials and components [J]. World Science Technology R&D, 2004, 26(3): 27~31(in Chinese).

(上接第 132 页)

- [8] ZHANG Y Zh, XIM Zh, SHILK *et al* Research on laser direct deposition of 316L stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering, 2002(5): 22~25(in Chinese).
- [9] GAO Sh Y, ZHANG Y Zh, SHILK *et al* Mechanical properties of