

文章编号: 0258-7025(2007)12-1700-05

采用区域选择激光熔化法制造铝合金模型

张冬云

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 对采用区域选择激光熔化(SLM)技术制造铝合金(如 AlSi25, AlSi10Mg, AlMgSi0.5 和 AlMg3 粉末)模型进行了工艺研究。研究表明不同的铝合金粉末具有不同的加工阈值。当激光功率超过粉末的加工阈值时,粉末与基体之间形成致密的冶金结合,为获得致密度为 100% 的铝合金模型提供了可能性。不同铝合金模型的致密度随着激光功率和扫描速度的变化而变化,但是不同铝合金对孔洞以及裂纹形成的敏感性不同,这主要是由铝合金粉末的不同冶金特性导致的。经过工艺摸索,采用优化参数制造 AlSi10Mg 拉伸试样,经测试,其机械性能超过了该合金铸造后经时效的拉伸试样性能。表明区域选择激光熔化技术是金属模型和零件直接制造的有效方法之一。

关键词 激光技术;快速成型;模型制造;区域选择激光熔化

中图分类号 TF 124;TN 249 **文献标识码** A

Model Manufacturing Process from Aluminum Alloys Using Selective Laser Melting

ZHANG Dong-yun

(Laser Institute of Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract The paper focused on the technological research on model manufacturing using selective laser melting (SLM) process, materials under investigation were four kinds of aluminum alloys powder AlSi25, AlSi10Mg, AlMgSi0.5 and AlMg3. The results showed that different aluminum alloys have different laser process thresholds. When laser power was above this threshold, aluminum alloy powder melted and bonded with the under layer and fast metallurgical bonding formed, model with approx. 100% density can be achieved. Further research showed that the density of sample from all the four kinds of aluminum alloys varied with laser power and scanning velocity, at the same time they showed different sensitivity to the forming of holes and crack because of their different metallurgical properties. Tensile sample from AlSi10Mg was manufactured with optimized parameters. The tensile test showed that the sample of SLM possessed better mechanical properties than aged casting tensile sample. The research showed that SLM would be one of the effective methods of direct manufacturing for metallic models and parts.

Key words laser technique; rapid prototyping; model manufacture; selective laser melting

1 引言

在降低能耗的全球发展战略推动下,机械产品制造过程中轻合金的用量越来越多^[1,2]。传统铝合金零件生产方法有液体金属浇铸、固态金属锻造、压制、挤压和铝合金粉末烧结技术等。这些生产方式往往需要模型或者模具,生产过程费时、耗力、成本高、生产周期长,生产过程柔性差,不易于产品的更新换代^[3]。

自从 20 世纪 80 年代快速成型(RP)技术诞生以来,人们不断探索采用快速成型技术生产铝合金模型或者零件。美国 Optomec 公司采用激光近形制造(LENS)技术制造了 AlSi12 模型。模型制造是在一个封闭的过程室内进行的,为避免液态金属在高温下发生氧化、氮化从而影响液态金属的润湿能力,在过程室内通入氩气作为保护气体,氩气中氧气摩尔分数一般控制在低于 10^{-5} 。文献[4]给出了

收稿日期:2007-07-03;收到修改稿日期:2007-08-21

基金项目:德国联邦教研部(BMBF)和德国研究基金会(DFG)共同资助项目。

作者简介:张冬云(1969—),女,黑龙江人,副教授,目前从事激光焊接、快速成型等方面的研究。

E-mail:Zhangdy@bjut.edu.cn

建造的模型以及模型的微观组织,模型的机械性能没有给出,也没有该方面的进一步报道。Sercombe 等^[3]采用激光选区烧结技术(SLS)对铝、镁以及尼龙的混合粉末进行加工获得了“原型件”,随后该原型件被放置在高温的氮气炉中,在加热过程中尼龙被蒸发。然后向原型件中渗入 AlCu 或 AlSiMg 合金,获得了致密度较高的铝合金模型。该铝合金模型的强度较高(230 MPa),韧性较差。而且由于渗透过程处于高温状态,模型发生了较大的收缩,尺寸精度无法保证。

本文将讨论采用区域选择激光熔化(SLM)技术制造铝合金模型的工艺,探讨工艺参数和材料性能对模型制造的影响。并采用优化参数制造 AlSi10Mg 拉伸试样。

2 实验设备及手段

图 1 为区域选择激光熔化技术的设备。其主要组成部分为光源(Nd:YAG 激光器,左)、控制柜(中)和过程室(右)。激光通过光纤传导到过程室,过程室中具有光束转向功能的导光系统实现光束的运动,此外还有建模室、粉末储存器、供气系统、过剩粉末贮存器以及粉末分配系统。其中建模室为封闭系统,粉末储存器向工作台输送粉末,粉末分配系统实现铺粉过程。光束的运动/转向通过检流器-振镜完成。振镜的运动以及建模室粉末输送通过软件实现。激光完成一层扫描后,工作台向下运动一个层厚的距离(一般为 30~200 μm),然后进行铺粉过程。铺粉后再次进行激光扫描。激光扫描—工作台下降—铺粉这些过程循环进行,直到一个完整的模型制造完成。



图 1 区域选择激光熔化设备组成
Fig. 1 Equipment of SLM process

被加工的铝合金粉末分别为 AlSi25, AlSi10Mg, AlMg3 以及 AlMgSi0.5。模型样品尺寸为 10 mm

$\times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。采用光学显微镜 ZEISS(STEMI SV 8 und ZEISS AXIOPHOT)对区域选择激光熔化样件的外貌以及横断面的宏观、微观结构进行了观察,系统中配有致密度测试软件,完成致密度的测定^[2]。

3 结果与讨论

3.1 铝合金粉末的加工阈值

采用区域选择激光熔化技术加工铝合金粉末时发现:与加工铁基材料相比,熔化铝合金粉末需要较高的激光功率,而且加工不同的铝合金粉末,需要不同的激光功率。如果定义粉末发生完全熔化并与底板形成致密冶金结合的激光功率为加工阈值,那么四种铝合金粉末加工阈值从小到大的顺序为 AlSi25, AlSi10Mg, AlMgSi0.5 和 AlMg5。粉末在低于阈值下加工时会发生严重的球化结晶现象, AlSi25 的球化结晶现象如图 2 所示。形成的球体直径均在 300 μm 左右,远大于粉末层的厚度,有些球体已经从底板上脱落。由于区域选择激光熔化过程中粉末是通过推粉器铺在粉末床上的,所以出现球化结晶现象时无法实现下一层粉末的铺粉过程,造成铺粉过程困难甚至建模过程中断。因而在区域选择激光熔化模型制造过程中,要避免发生球化结晶现象。

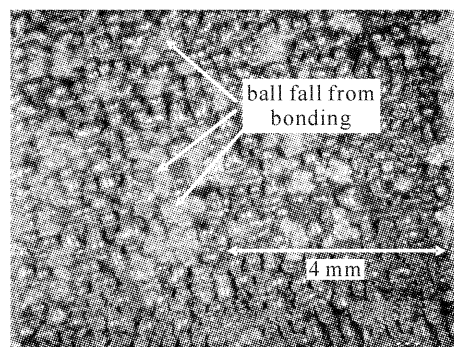


图 2 熔化铝合金粉末的球化结晶现象
Fig. 2 Balling occurs in SLM processing of aluminum alloy powder

采用激光加工铝合金粉末时,粉末吸收了激光的能量后,温度升高甚至发生熔化。如果激光功率低于加工阈值,熔化的粉末不能润湿底层固态金属而发生球化结晶。当激光功率超过加工阈值时,粉末发生完全熔化,形成的熔池具有足够的能量可以向底层和周围固化金属扩展,通过结晶过程与底板之间形成致密的冶金结合。这是区域选择激光熔化

模型的致密度达到 100% 的充分必要条件。在区域选择激光熔化过程中,材料热物理性能如吸收率和热传导率起到了关键的作用。表 1 给出了四种铝合金粉末的热物理性能^[5,6]。

表 1 不同铝合金粉末的热物理性能

Table 1 Thermal physical properties of various aluminum powder

Thermal properties	Absorption /%	Thermal conduct / (W/m · K)
AlSi25	73	107
AlSi10Mg	62	142
AlMgSi0.5	45	194
AlMg5	48	142

材料对激光的吸收率以及热传导率对区域选择激光熔化过程的影响可以通过有限元计算证明。当以能量密度为 $I = 3 \times 10^3 \text{ W/mm}^2$ 的激光,以扫描速度 $v = 100 \text{ mm/s}$ 加工层厚 $D = 0.2 \text{ mm}$ 的粉末层时,AlSi25, AlSi10Mg, AlMgSi0.5 三种铝合金在 x 和 z 平面的温度分布如图 3 所示。有限元计算证实,由于三种铝合金吸收率和热传导性能的不同造成了三种铝合金粉末在 x 和 z 平面温度分布的不

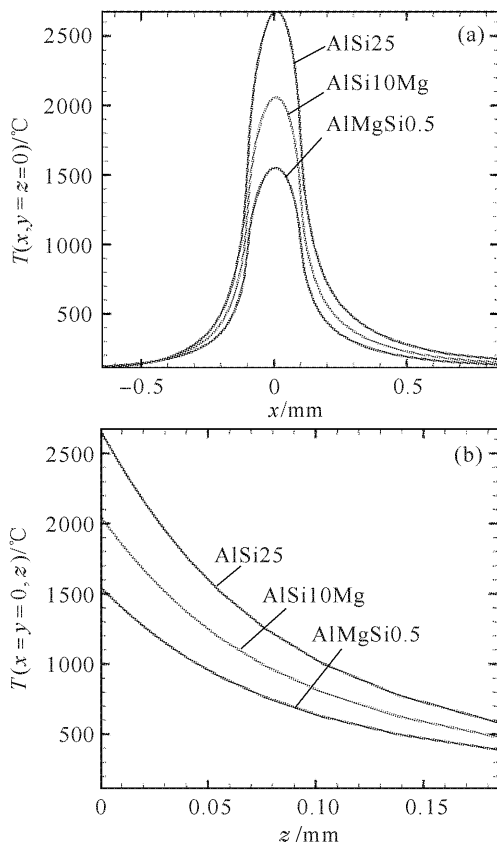


图 3 不同铝合金中的 x 和 z 面温度场
Fig. 3 x and z temperature distribution of different aluminum alloys

同。对激光吸收能力强,热传导能力较差的 AlSi25 粉末的熔池在 x 和 z 平面达到的温度最高。而对激光吸收能力差,热传导能力强的 AlMgSi0.5 粉末熔池在 x 和 z 平面达到的温度最低。这证实了 AlSi25 加工阈值相对较低。而 AlMgSi0.5 加工阈值相对较高的原因^[1,7]。

3.2 激光功率和扫描速度对模型致密度的影响

当采用给定的光束直径以及高于加工阈值的激光功率对相应的铝合金粉末进行加工时,铝合金模型的致密度随着扫描速度的变化而发生变化。图 4 为 AlSi25 模型致密度随激光功率和扫描速度的变化曲线。扫描速度越快,模型的致密度越低。当扫描速度提高到 350 mm/s 时,模型的致密度降低到 92%。图 4 中模型致密度关键点图片证实了模型致密度随扫描速度的变化。AlSi25 模型横断面的微观和宏观组织中不存在裂纹,孔洞为不规则形状。

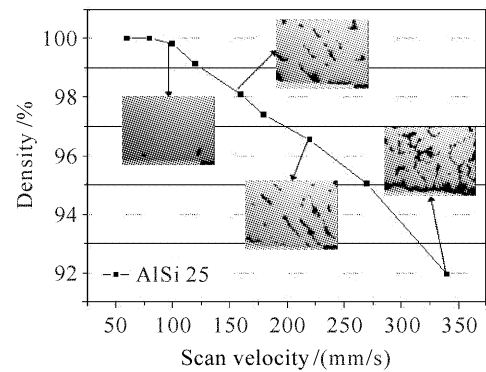


图 4 AlSi25 合金模型致密度随激光功率和扫描速度的变化曲线

Fig. 4 Density variation with laser power and scan velocity of AlSi25 model

图 5 为 AlSi10Mg 模型致密度随激光功率和扫描速度的变化曲线。激光功率为 180 W,即为加工阈值时,模型的致密度随着扫描速度的提高降低得很快。当激光功率为 250 W 或 300 W,即远远高于加工阈值时,虽然模型的致密度随着扫描速度的提高而降低,但是模型的致密度不再对扫描速度敏感。当激光功率为 250 W,扫描速度达到 800 mm/s 时,模型的致密度高于 90%。AlSi10Mg 模型横断面的微观和宏观组织中不存在裂纹,孔洞为不规则形状。

图 6 为 AlMg3 模型致密度随激光功率和扫描速度的变化曲线。其模型致密度随激光功率和扫描速度的变化趋势与 AlSi10Mg 合金粉末大致相当。但 AlMg3 模型致密度随激光功率和扫描速度的变化曲线不再是平滑的曲线,而是出现了拐点。当激

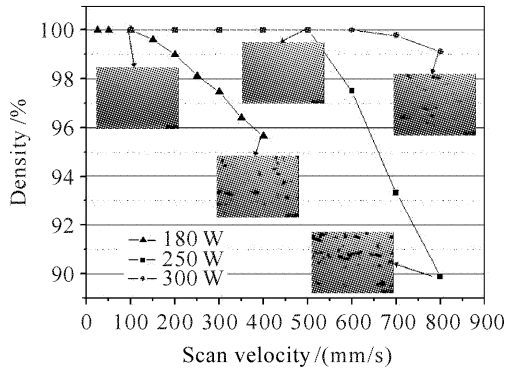


图 5 AlSi10Mg 合金模型致密度随激光功率和扫描速度的变化曲线

Fig. 5 Density variation with laser power and scan velocity of AlSi10Mg model

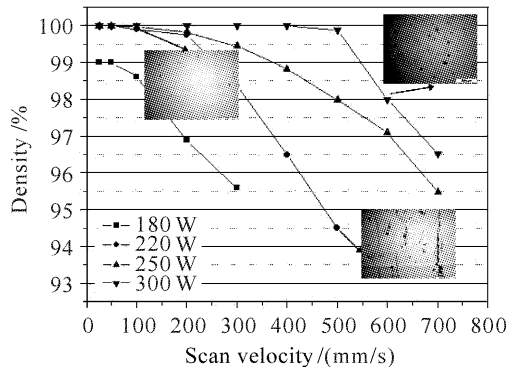


图 6 AlMg3 合金模型致密度随激光功率和扫描速度的变化曲线

Fig. 6 Density variation with laser power and scan velocity of AlMg3 model

光功率为 220 W, 扫描速度达到 700 mm/s 时, AlMg3 模型的微观组织出现裂纹。当激光功率为 300 W, 扫描速度达到 600 mm/s 时, AlMg3 模型的微观组织中不仅存在着不规则形状的孔洞, 还出现了圆形的孔洞。

图 7 为 AlMgSi0.5 模型致密度随激光功率和扫描速度的变化。其变化趋势也符合模型的致密度随着扫描速度的提高而降低的规律。当激光功率为 280 W, 扫描速度达到 100 mm/s 时, AlMgSi0.5 模型的微观组织出现裂纹以及圆形的孔洞。当激光功率为 280 W, 扫描速度达到 300 mm/s 时, AlMgSi0.5 模型的微观组织无裂纹, 但是存在圆形的孔洞。当激光功率为 330 W, 扫描速度达到 500 mm/s 时, AlMgSi0.5 模型的微观组织出现不规则以及圆形的孔洞。

从这几种合金模型致密度随激光功率和扫描速度的变化规律可以看出, 四种铝合金粉末表现出不

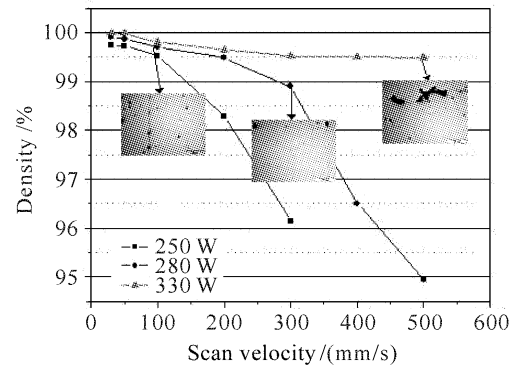


图 7 AlMgSi0.5 合金模型致密度随激光功率和扫描速度的变化曲线

Fig. 7 Density variation with laser power and scan velocity of AlMgSi0.5 model

同的加工特性, 这与其不同的冶金特性有关。AlSi25, AlSi10Mg 合金属于 AlSi 系, 具有良好的铸造性能和焊接性能, 采用区域选择激光熔化技术加工时表现为较好的可加工性。当激光扫描速度快时, 液态金属高温停留时间短, 冷却速度快, 液态金属不能完全润湿周围的金属, 在模型中“凝固”了一些孔洞。与 AlSi 系合金相比, AlMg 系合金的流动性较差, 铸造性能、焊接性能一般, 具有一定的热裂纹倾向。当扫描速度较快时, AlMg3 模型的微观组织出现热裂纹。AlMg3 模型微观组织中出现的圆形的孔洞是气孔所致。由于 AlMg 系合金中存在 Mg, 其蒸发温度较低, 在采用激光加工 AlMg 系合金时, 极易在微观组织中出现 Mg 蒸发而产生气孔。AlMgSi 系为变形铝合金, 一般用于轧制型材, 其铸造性能、焊接性能差, 具有严重的热裂纹倾向。在采用激光加工 AlMgSi 系合金时, 热裂纹和气孔同时出现。

4 拉伸实验

采用 3.2 节激光加工参数按照德国工业标准 EN ISO6871-2 制成了圆形的拉伸试样, 材料选择具有良好加工性能的 AlSi10Mg。其夹持部分和拉伸部分的直径分别为 6 mm 和 3 mm, 拉伸试样全长 50 mm, 其中细径部分长度为 18 mm。

对拉伸试样的表面进行车削加工后进行拉伸实验, 结果显示: 采用区域选择激光熔化技术制成的拉伸试样具有很好的综合机械性能, 其抗拉强度 (400 MPa)、屈服强度 (200 MPa) 和延伸率 (13%)^[1,6] 显著高于相应的铸造件 (180 MPa,

80 MPa, 4%) 和时效处理后的铸造件 (260 MPa, 215 MPa, 1%)^[2]。

5 结 论

1) 采用区域选择激光熔化技术加工铝合金粉末时, 熔化不同的铝合金粉末, 需要不同的加工阈值。AlSi25, AlSi10Mg, AlMg3 和 AlMgSi0.5 合金的加工阈值随着材料对激光吸收能力的增强以及热传导能力的降低逐次降低。

2) 当采用给定的光束直径以及高于加工阈值的激光功率对相应的铝合金粉末进行加工时, 铝合金模型的致密度随着扫描速度的变化而变化。变化规律是铝合金模型的致密度随着扫描速度的提高而降低。四种铝合金粉末冶金特性不同, 表现出不同的加工特性。

3) 采用优化参数制造的 AlSi10Mg 拉伸试样具有很好的综合机械性能, 其抗拉强度、屈服强度和延伸率显著高于相应的铸造件和时效处理后的铸造件。

致谢 感谢德国 Fraunhofer 激光技术研究所的同

事在作者攻读博士学位期间给予的支持。感谢德国学术交流中心给予的经济资助。

参 考 文 献

- 1 D. Y. Zhang. Entwicklung des Selective Laser Melting (SLM) fuer Aluminiumwerkstoffe [D]. Aachen, Deutschland; Shaker-Verlag, 2004. 4~8 (in German)
- 2 C. Kammer. Aluminium Taschenbuch [M]. 15 Auflage. Duesseldorf, Deutschland; Aluminium-Verlag, 1995. 74~759 (in German)
- 3 T. B. Sercombe, G. B. Schaffer. Rapid manufacturing of aluminium components [J]. *Science*, 2003, **301**(5637): 1225~1227
- 4 P. H. Gorman, D. Keicher, J. Bullen *et al.*. Add value to existing molds [C]. Society of Manufacturing Engineerings Conference, USA, 2001
- 5 E. A. Brandes. Smithells Metal Reference Book [M]. Sixth Edition. England, London; Butterworth & Co., 1983. 181~182
- 6 Zhang Dongyun. Direct manufacturing of aluminium parts by selective laser melting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34** (Suppl.): 141~145
张冬云. 采用区域选择激光熔化技术直接制造铝合金零件[J]. *中国激光*, 2007, **34**(增刊): 141~145
- 7 Zhang Dongyun. Research of properties of powder on manufacturing process (SLM) of metallic models [J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(1): 9~12
张冬云. 粉末材料性能对 SLM 模型制造过程影响的研究[J]. *应用激光*, 2007, **27**(1): 9~12