DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.06.011

铝合金气缸盖增材制造试验研究

岳　畅,王新节
(浙江大学城市学院,浙江 杭州 310015)

摘　要:采用选择性激光烧结成形增材制造技术制备 AlSi10Mg 发动机气缸盖,对比测试了气缸盖产品和拉伸试棒在 T6 热处理前后的硬度、抗拉强度和断后伸长率的变化。利用激光粒度仪对 AlSi10Mg 粉末的粒度尺寸分布特征和粒形形貌表征的检测分析,借助金相显微镜和扫描电子显微镜对气缸盖的微观组织特征、共晶硅晶粒和固溶体晶粒的大小进行研究,并对其组织形貌与力学性能之间的对应关系进行了分析探讨。结果表明,热处理前后 AlSi10Mg 增材制造产品的硬度、抗拉强度和伸长率分别为 126 HBW、445 MPa、6.5%和 85.8 HBW、335 MPa、11%。

关键词:铝合金气缸盖;增材制造;热处理;力学性能

中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)06-0559-04

Experiment & Research on Additive Manufacturing of Aluminium Alloy Cylinder Head

YUE Chang, WANG Xinjie
(City College of Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: The AlSi10Mg aluminium alloy engine cylinder head was prepared by selective laser sintering additive manufacturing process. The variation data of hardness, tensile strength and elongation after fracture of cylinder head and tensile bar before and after T6 heat treatment were compared and tested. The particle size distribution characteristics and particle shape characterization of AlSi10Mg powder were detected and analyzed by laser particle size analyzer. Microstructure characteristics, eutectic silicon grain size and solid solution grain size of cylinder head were studied by means of metallographic microscope and SEM. The corresponding relationship between the microstructure and mechanical properties was discussed. The results show that the hardness, tensile strength and elongation of AlSi10Mg additive products before and after heat treatment are 126 HBW, 445 MPa, 6.5% and 85.8 HBW, 335 MPa, 11%, respectively.

Key words: aluminium alloy cylinder head; additive manufacturing; heat treatment; mechanical properties

在金属材质的增材制造领域,SLM 技术利用高能激光将金属粉末逐层完全熔化、熔叠并快速冷却结晶成形,该技术熔化扫描速率通常为 500~2 000 mm/s,每层铺粉厚度可控制在 20~100 μm 之间,激光扫描选区熔化单层穿透深度可达到 170 μm 左右,为了获得产品内部组织致密的零件,激光扫描选区熔化穿透的单层距离应大于金属粉末的单层铺粉厚度,金属粉末熔化后的冷却速率在 105~106 K/s 之间[1]。为了将 SLM 成形技术能够在汽车零部件轻量化领域获得应用,作者在运用激光粒度仪对 AlSi10Mg 粉末的粒度尺寸分布特征和粒形形貌特征的检测分析的基础上,采用 SLM 技术成形了 AlSi10Mg 铝合金气缸盖产品,试验研究了 T6 热处理前后产品的力学性能变化趋势,借助金相显微镜、扫描电镜和能谱仪对产品的微观组织及其对应的力学性能的变化机理进行了应用型基础研究[2,3]。

1　增材制造试验

Al-Si-Mg 铸造合金包含少量加入的 Mg,能被自然时效和人工时效。Mg 的加入导致高强度的同时,提供铸件一定的延展性、可焊接性和良好的耐蚀性,Mg 的加入量控制在 0.3%~0.5%,并且随着 Si 含量的增加而降低。较普遍使用的合金有 5%、7%或 10%的 Si[4]。实验选用 AlSi10Mg 属于 10%含量的铝合金,其化学成分列于表 1。

用于铝合金气缸盖增材制造的原材料 AlSi10Mg 是以粉末的状态供应的,其标准密度为

收稿日期:2018-11-08
基金项目:杭州市先进设计与制造技术重点实验室铸造工程材料成形工艺方向资助项目(204000590502)
作者简介:岳　畅(1999-),女,浙江杭州人,本科生.研究方向:铸造工程材料成型相关研究.电话:0571-88284350,E-mail:2423107319@qq.com
通讯作者:王新节(1966-),浙江杭州人,教授.研究方向:铸造工程材料成型相关研究.电话:0571-88284350,E-mail: wangxinjie@zucc.edu.cn

表1 AlSi10Mg合金的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of AlSi10Mg alloy

Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Zn	Ni	Cu	Pb	Sn	Al
10	0.30	0.55	0.45	0.15	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	余量

2.67 g/cm^3。采用激光粒度分析仪对 AlSi10Mg 铝合金粉末的形貌、颗粒度尺寸的大小及其分布特征进行了分析。图 1 为粉末的频度分布特征曲线和累计分布特征曲线。表 2 为粉末颗粒的形貌特征。可以看出，AlSi10Mg 粉末的球形度为 0.793~0.945。粉末粒度尺寸的大小及其分布特征为：X_{10} = 21.53 μm（粒径小于 21.53 μm 的 AlSi10Mg 颗粒占粉末总体积的 10%），X_{50} = 35.90 μm（粒径小于 35.90 μm 的 AlSi10Mg 颗粒占粉末总体积的 50%），X_{90}= 55.44 μm（粒径小于 55.44 μm 的 AlSi10Mg 颗粒占粉末总体积的 90%），AlSi10Mg 粉末体积平均粒径 VMD = 37.22 μm，AlSi10Mg 粉末表面积平均粒径 SMD = 31.82 μm。

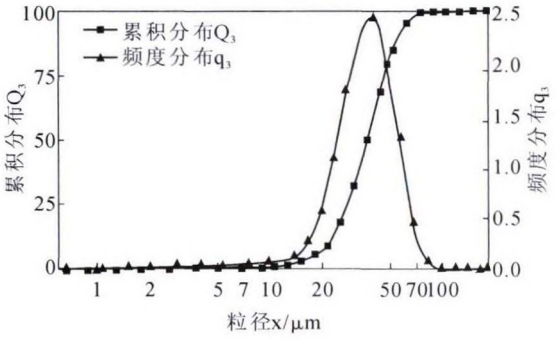
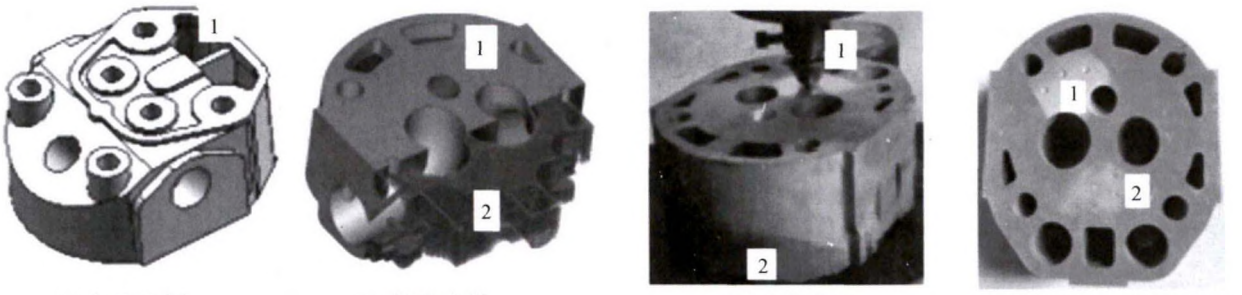


图 1 AlSi10Mg 粉末粒度尺寸大小的分布
Fig.1 Particle size distribution of AlSi10Mg powder

图 2 为气缸盖产品增材制造设计、成形和测试示意图。用于实验研究的气缸盖产品最大轮廓尺寸为 153 mm×128 mm×67 mm。其内部空腔分别由冷却水通道、进排气道、喷油器孔、螺栓连接孔和气门挺杆孔构成，其外部形状存在大面积倾斜表面。当产品的成形面倾斜角度大于 50°时，倾斜面在增材制造过程中容易发生塌陷变形，进行大角度倾斜面 SLM 成形时需要添加支撑结构体。为防止增材制造过程中具有薄壁、多空腔和外部存在大面积倾斜表面特征的气缸盖产品出现变形和塌陷，在产品内部空腔部分和产品外部有斜面的区域设计了镂空的支撑结构。在增材制造设备上进行激光选区烧结，历时 15 h 后获得 AlSi10Mg 铝合金气缸盖产品。图 2(b)中的 1 位置处代表产品底部结合面三维几何实体的外形，图 2(c)中 1 位置处代表硬度计测试压力头的测试区域。图 2(d)中 1 位置处和 2 位置处分别作为 T6 热处理后和热处理前气缸盖底面硬度的对比测试区域压痕印记。可以看出，T6 热处理后 1 位置处硬度计压头的压痕较深，说明此时该位置处的硬度较小；而 T6 热处理前 2 位置处

表2 AlSi10Mg粉末形貌特征
Tab.2 Particle morphology characteristics of AlSi10Mg powder

粒形粒貌	等效直径 /μm	最大直径 /μm	最小直径 /μm	球形度	长径比
	59.752	76.809	52.373	0.817	0.682
	62.868	81.087	58.103	0.793	0.717
	55.746	67.814	50.684	0.898	0.747
	53.293	63.233	52.863	0.808	0.836
	57.249	75.672	58.300	0.782	0.770
	103.964	107.168	104.082	0.935	0.971
	57.026	60.651	56.425	0.945	0.930
	52.450	65.296	45.178	0.848	0.692
	61.266	65.784	61.352	0.909	0.933
	59.681	76.801	47.476	0.853	0.618
	53.650	60.279	52.373	0.889	0.869
	58.022	69.441	54.212	0.813	0.781
	52.490	70.248	49.302	0.808	0.702
	53.013	59.712	52.873	0.823	0.885
	53.926	60.607	53.836	0.906	0.888
	52.125	65.327	48.061	0.869	0.736
	51.798	78.319	41.873	0.733	0.535
	67.240	98.820	53.938	0.778	0.546



(a)产品分析　(b)辅助支撑　(c)硬度测试　(d)热处理前后硬度对比

图 2 气缸盖产品增材制造设计、成形和测试示意图

Fig.2 Schematic diagram of cylinder head product additive manufacturing design, forming and testing

硬度计压头的压痕深度较浅，说明此时该位置处的硬度较大。

2 T6 热处理

将增材制造 AlSi10Mg 铝合金气缸盖进行固溶时效和淬火时效 T6 热处理。装炉时将气缸盖产品和同步增材制造的拉伸试棒放在同一个热处理炉内。具体的加热速度、加热温度、保温温度、淬水温度、时效时间和冷却速度如图 3 所示。在固溶时效阶段，从室温加热至 535±5 ℃所用时间控制在 120 min，在 535±5 ℃恒温保温 270 min 后，接着进行淬火操作。淬火水温控制在 60~80 ℃，淬火转移时间控制在 10~20 s，入水冷却时间控制在 6 min，淋水时间控制在 10 min。之后，再次淬火时效，从室温加热至 195±5 ℃所用时间控制在 60 min，在 195±5 ℃恒温保温 420 min 后出炉空冷。热处理完成后，进行增材制造 AlSi10Mg 铝合金气缸盖产品底面指定位置处的硬度、拉伸试棒抗拉强度、断后伸长率的测试。

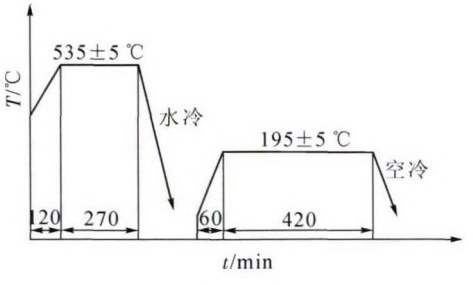


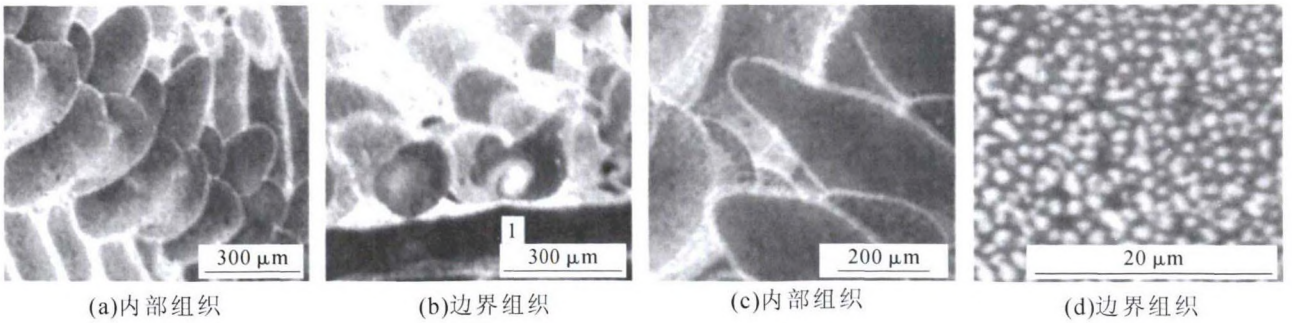
图 3 T6 热处理工艺曲线

Fig.3 Curve of T6 heat treatment process

3 测试结果与分析

3.1 微观组织的观测与分析

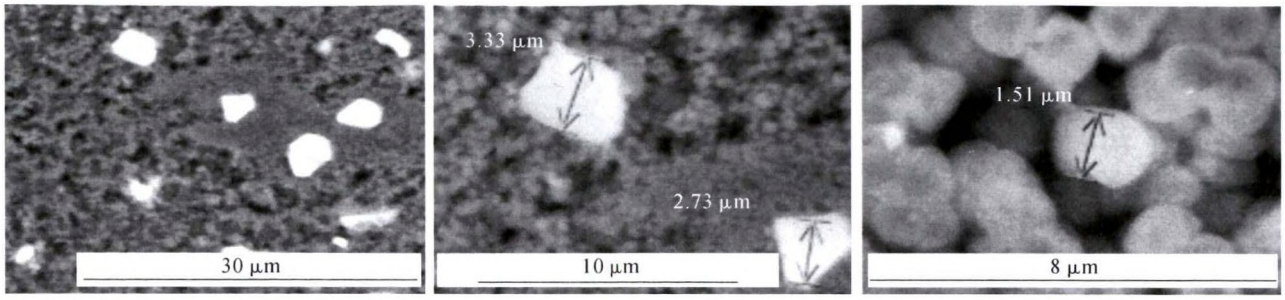
图 4 和图 5 分别为 AlSi10Mg 增材制造气缸盖产品的金相组织与扫描电镜组织。其中，用于观测的金相试样均取自图 2(a)中的 1 位置处，金相试样放入装有酚醛树脂粉末的镶嵌机内加热固化固定，经过磨抛和氢氟酸浸蚀后，分别采用金相显微镜和 SEM 对其微观组织结构进行了观测。可以看出，增材制造 AlSi10Mg 气缸盖的内部组织与金属焊接成形中的“堆焊”工艺相似，焊点的大小错落有致，这样有利于提高焊接组织的致密度，焊接区域材质的力学性能等于或高于被焊接金属母体自身(AlSi10Mg 铸造产品)的力学性能[5]。激光选区烧结构成产品边界的组织，属于“堆焊锁边”组织，其每一层激光焊接的路线都会重复“堆焊”一次(而产品内部的成形只需激光选区“堆焊焊接”一次即可)，起到类似缝制衣服时常用的“锁边”工艺技术，即实现金属粉末的二次重熔。二次重熔后成形面的表面变得平整，同时会减少氧化物杂质，有利于层与层之间的致密化结合[3]。这样做会对产品防止渗漏起到积极作用。每一个“焊点”呈现出“保龄球”状的胞晶，且大小间隔参差有



(a)内部组织　(b)边界组织　(c)内部组织　(d)边界组织

图 4 AlSi10Mg 增材制造产品的金相组织

Fig.4 Metallographic microstructure of AlSi10Mg



(a)共晶组织　(b)共晶硅颗粒测量　(c)固溶体晶粒测量

图 5 ALSi10Mg 的扫描电镜组织
Fig.5 SEM microstructure of AlSi10Mg

度。“保龄球状胞晶焊点”圆钝的形貌会优化基体组织的整体刚度，“参差有度”的组织结构使得“焊接组织”更为致密，对提高产品的强度和塑性有益。“保龄球胞晶”边界区域放大后，可观察到呈现出弥散分布细颗粒状圆钝化的共晶硅组织，其中白色的颗粒是共晶硅相，基体部分是铝基固溶体组织，这种组织特征有利于提高产品的综合力学性能。从电镜组织可以看出，铝基固溶体的微观组织内存在着大量的形状各异、大小不一的空隙，各个微区的致密度不尽相同，共晶硅颗粒的大小和形状也不尽相同，但都能较为均匀的分布在铝基固溶体基体上；共晶硅颗粒的大小为 2.73~3.33 μm；共晶组织中的铝基固溶体晶粒的大小为 1.51 μm 左右。

3.2 力学性能测试分析

表 3 为增材制造 AlSi10Mg 气缸盖产品 T6 热处理前后的力学性能测试结果。其中，硬度采用门式布氏硬度计（ϕ10 硬质合金压头，1 000 kgf 压力保压 30 s）测量；力学性能采用万能材料试验机测试。可以看出，AlSi10Mg 增材制造气缸盖产品的硬度、抗拉强度 R_m 和断后伸长率 A 各项力学性能指标均高于铝合金铸件，并接近锻铝 2A70(LD7)的力学性能指标，达到了在高温下工作的内燃机活塞对铝合金材料使用要求[6]。一方面，与激光选区烧结 AlSi10Mg 粉末时粉末颗粒的熔化速度和冷却凝固的速度均较快，所构成的参差有度的“保龄球”状“焊点”组织内部累积了大量的组织结构应力有关；另一方面，与共晶硅组织的结构特征有关，大量颗粒度较小的（2.73~3.33 μm）共晶硅弥散分布在晶粒度更小的（1.51 μm 左右）铝基固溶体基体上，有利于提高综合力学性能。T6 热处理后，AlSi10Mg 增材制造气缸盖产品的硬度降低可能与释放“焊接”应力和减轻“焊接”硬化效应有关。随着时间的延长或环境温度的升高，这些潜在的应力会释放出来，产生应力松弛现象。应力松弛过程的本质原因是热激活导致位错运动，使得增材制造产品的强度和硬度有所降低，同时也会提升其塑性指标，断后伸长率会有所增加。

表3 AlSi10Mg增材制造产品的力学性能
Tab.3 Mechanical properties of AlSi10Mg additive manufacturing product

项目名称	硬度 (HBW)	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A(%)
热处理前	126.0	445±20	6.5
热处理后	85.8	335±20	11.

4 结论

激光选区烧结 AlSi10Mg 粉末制造的铝合金气缸盖产品其力学性能优于经过 T6 热处理后的铸造铝合金并接近锻造铝合金；T6 热处理后，其抗拉强度和硬度均出现下降，而断后伸长率却大幅度增加。尽管如此，其 T6 热处理后的力学性能依然优于经过 T6 热处理后的铸造铝合金并接近锻造铝合金。采用激光选区烧结 AlSi10Mg 粉末生产制做汽车零部件铝合金产品是可行的，是汽车零部件轻量化成形工艺优先选择的一条有效途径。考虑到金属粉末增材制造自身技术的局限性和具有复杂内腔结构、且外形轮廓存在大量倾斜表面的工业产品自身的结构特征，仍然存在着辅助支撑的去除和综合制造成本较高的问题，有待进一步地研究探索解决方案，以期在批量化生产的应用方面取得新进展。

参考文献：

[1] 唐鹏钧，何晓磊，杨斌，等. 激光选区熔化用 AlSi10Mg 粉末显微组织与性能[J]. 航空材料学报, 2018,38(1): 47-53.
[2] 朱小刚，孙靖，王联凤，等. 激光选区熔化成形铝合金的组织、性能与倾斜面成形质量[J]. 机械工程材料, 2017, 41(2): 77-80.
[3] 刘锦辉，史金光，李亚. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金粉末的成形工艺[J]. 黑龙江科技大学学报, 2015, 25(5): 509-515.
[4] Catrin K. Aluminium Handbook [M]. Chemical Industry Press, 2008.
[5] Rao P N. Manufacturing Technology [M]. China Machine Press, 2010.
[6] 鞠鲁粤. 工程材料与成形技术基础（第三版）[M]. 北京：高等教育出版社，2015.