

2.4 成形缺陷

在M-SLM 成形316L不锈钢试样中观察到的微观缺陷主要为气孔 (Pore)和未熔合缺陷 (Lock of fusion, LOF), 如图8所示。

气孔缺陷呈现圆孔状, 主要分布在熔合线及其附近, 其尺寸在 $10\mu\text{m}$ 以下, 造成气孔缺陷的主要原因是M-SLM粉末粒度较小, 松装密度较低, 粉末堆积之间孔隙较多, 熔化后孔隙中的气体未完全上浮排出造成的。未熔合缺陷则表现为不规则形长条形, 缺陷尺寸相比于气孔缺陷明显增大, 尺度约在几十微米到几百微米之间, 部分缺陷跨越多个层道, 缺陷内可以观察到未熔化球形粉末和熔体球化现象。造成未熔合缺陷的主要原因是相比于常规SLM系统, M-SLM系统光斑尺寸更加细小, 在激光光斑冲击作用下, 部分熔化的金属液体会发生汽化、飞溅等现象, 熔滴飞溅颗粒较大, 粘附到下一层熔池中, 破坏了铺粉的平整性和基体的连续性, 抛光后飞溅颗粒脱落, 呈现为不规则的空洞; 同时M-SLM系统相比于常规SLM系统激光束体积能量降低, 部分粉末熔化不够充分, 金属熔体流动性差, 出现了不连续单道, 在当前平面遗留空隙, 下层粉末覆盖并熔化后形成了孔状缺陷。

2.5 拉伸力学性能

M-SLM制备316L不锈钢横向与立向拉伸力学性能试验如表4、图9所示。横向拉伸强度为692.1MPa, 比立向拉伸强度高7.8%; 立向拉伸表现出更优良的塑性, 延伸率可达54.6%, 比横向拉伸高22.6%。

M-SLM和SLM制备316L不锈钢的拉伸力学性能对比^[17-19]如图10所示。

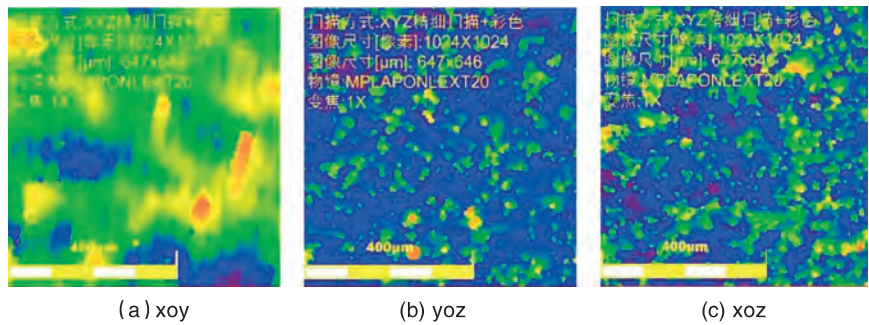


图7 微观选区激光熔化成形316L不锈钢三维表面形貌图

示。相比SLM, M-SLM制备的316L不锈钢, 横向抗拉强度提高约50MPa; 在立向拉伸抗拉强度与SLM相接近的情况下, 其延伸率提高33.2%, 具有更好的强度和塑性匹配。美国材料试验协会标准《ASTM F3184-16》规定了增材制造316L不锈钢的力学性能, M-SLM制备的316L不锈钢拉伸力学性能大幅度优于标准值。按照金属材料强韧化理论, 细化晶粒是可以同时提高材料强度和塑性的有效手段, 从图11所示的拉伸断口显微形貌可以看出, 断口整体呈现韧性断裂韧窝, 韧窝尺寸多小于 $1\mu\text{m}$, 晶粒内部的纳米化亚结构对316L不锈钢的强度有显著贡献, 纳米化胞状结构既保证了材料拉

伸过程的均匀变形, 也促进了拉伸过程的加工硬化, 使得拉伸强度与延伸率均显著提高。

2.7 显微硬度

分别在XOY平面和XOZ平面进行了维氏显微硬度测试, 如图12所示。相比于SLM金相组织在XOY

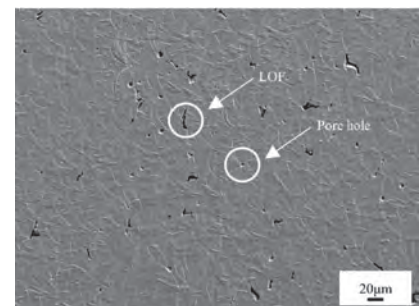


图8 微观选区激光熔化成形316L不锈钢微观缺陷

表4 选区激光熔化316L不锈钢不同增材方向的拉伸性能

Sample	R _m /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ %
Horizontally built	692.1	578.4	32.0
Vertically built	642.3	540.1	54.6

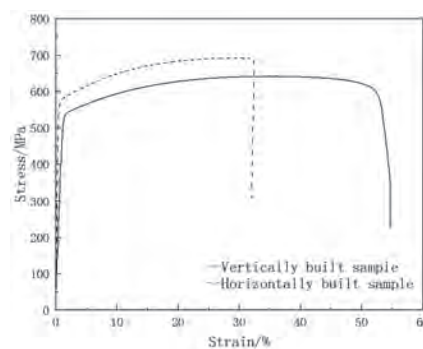


图9 微观选区激光熔化成形316L不锈钢拉伸曲线

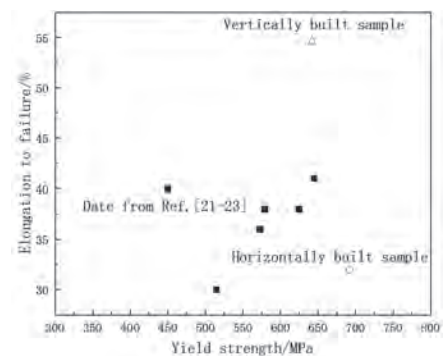


图10 微观选区激光熔化和选区激光熔化成形316L不锈钢拉伸力学性能比较

平面和XOZ平面呈现的各向异性，M-SLM成形试样硬度的各向异性不明显。4条测试线的硬度相接近，为250HV_{0.2}左右，XOY平面硬度值略高于XOZ平面。在M-SLM成形过程中，熔池更加细小，微小熔池在快速冷却条件下，晶粒尺寸相较于铸造、焊接成形更加细小，硬度提升。

3 结论

(1) 微观选区激光熔化成形316L不锈钢具有高强高塑力学性能，立向拉伸强度为642.3 MPa，延伸率为54.6%；水平方向拉伸强度为692.1 MPa，断后延伸率为32.0%。

(2) 微观选区激光熔化成形316L不锈钢为单相奥氏体组织，XOY平面为等轴晶，XOZ平面为柱状晶。

(3) 微观选区激光熔化成形316L不锈钢具有良好的表面粗糙度，上表面粗糙度为Ra 5.6 μm，侧表面粗糙度为Ra 3 μm，最优侧表面粗糙度可达Ra 1 μm。

(4) 微观选区激光熔化成形316L不锈钢主要缺陷类型为气孔和未熔合，气孔缺陷尺寸较小，未熔合缺陷尺寸较大。**7**

参考文献

[1] 兰红波, 李涤尘, 卢秉恒. 微纳尺度3D打印[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45(09): 919-940.

[2] Balasubramanian Nagarajan, Zhiheng Hu, Xu Song, Wei Zhai, Jun Wei. Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives[J]. Engineering, 2019, 5(4):

[3] Fischer J, Kniepkamp M, Abele E.

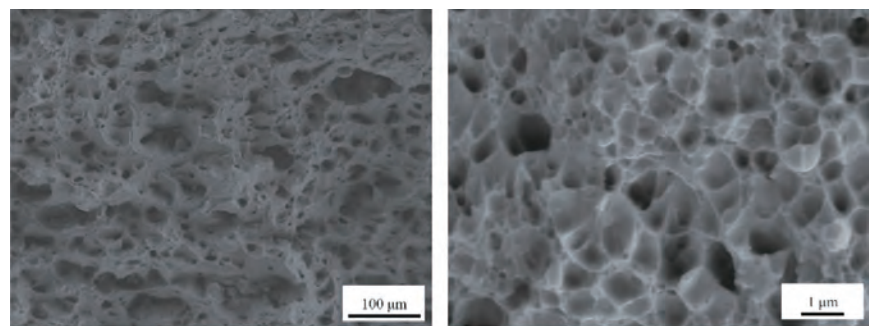


图11 微观选区激光熔化成形316L不锈钢拉伸断口形貌

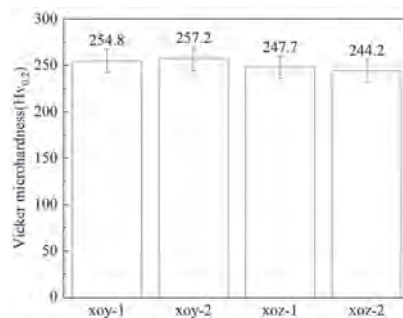


图12 微观选区激光熔化成形316L不锈钢硬度

Micro laser melting: analyses of current potentials and restrictions for the additive manufacturing of micro structures. In: Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium; 2014 Aug 4-6; Austin, TX, USA; 2014, p. 22-35.

[4] Bai Y, Fu F, Xiao Z, et al. Progress in selective laser melting equipment, related biomedical metallic materials and applications[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2018, 19(2): 122-136.

[5] IL Fé-Perdomo, Ramos-Grez J A, Beruvides G, et al. Selective laser melting: lessons from medical devices industry and other applications[J]. Rapid Prototyping Journal, 2021, ahead-of-print(ahead-of-print).

[6] Guo L, Xz A, Xc A, et al. Additive manufacturing of structural materials[J]. Materials Science and

Engineering: R: Reports, 2021.

[7] Larimian T, AlMangour B, Grzesiak D, et al. Effect of Laser Spot Size, Scanning Strategy, Scanning Speed, and Laser Power on Microstructure and Mechanical Behavior of 316L Stainless Steel Fabricated via Selective Laser Melting[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021: 1-20.

[8] Gao Z. Microstructure and Fatigue Damage of 316L Stainless Steel Manufactured by Selective Laser Melting (SLM)[J]. Materials, 2021, 14.

[9] Rttger A, Boes J, Theisen W, et al. Microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel processed by different SLM devices[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(5).

[10] Dryepondt S, Nandwana P, Fernandez-Zelaia P, et al. Microstructure and high temperature tensile properties of 316L fabricated by laser powder-bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37(643):101723.

[11] Yang X Q, Liu Y, Ye J W, et al. Enhanced mechanical properties and formability of 316L stainless steel materials 3D-printed using selective laser melting[J].

- International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2019, 26(11):1396-1404.
- [12] Kluczyński J, Śnieżek L, Grzelak K, et al. Influence of selective laser melting technological parameters on the mechanical properties of additively manufactured elements using 316L austenitic steel[J]. Materials, 2020, 13(6): 1449.
- [13] 张仁奇, 樊磊, 周宝刚, 等. 选区激光熔化316L不锈钢的各向组织与性能[J]. 金属热处理, 2020, 45(9):6.
- [14] Jiang H Z, Li Z Y, Feng T, et al. Effect of Annealing Temperature and Strain Rate on Mechanical Property of a Selective Laser Melted 316L Stainless Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021: 1-17.
- [15] Elmer J W, Allen S M, Eagar T W. Microstructural development during solidification of stainless steel alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20(10):2117-2131.
- [16] 宗学文, 高倩, 周宏志, 等. 体激光能量密度对选区激光熔化316L不锈钢各向异性的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(05): 344-350.
- Xuwen Zong, Qian Gao, Hongzhi Zhou, et al. Effects of Bulk Laser Energy Density on Anisotropy of Selective Laser Sintered 316L Stainless Steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(05): 344-350.
- [17] 祁斌, 刘玉德, 石文天, 等. 脉冲式激光选区熔化成形搭接率的研究[J]. 激光技术, 2018, 42(03): 311-317.
- QI Bin, LIU Yude, SHI Wentian, et al. Study on overlap ratio of pulse laser selective melting forming[J]. Laser Technology, 2018, 42(03): 311-317.
- [18] 马英怡, 刘玉德, 石文天, 等. 扫描速度对选区激光熔化316L不锈钢粉末成形缺陷及性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 210-219.
- [19] 石文天, 王朋, 刘玉德, 等. 选区激光熔化成形316L表面质量及工艺试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(03): 257-267. DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-6660.2019.03.035.

作者简介

张海武, 男, 1997年出生, 硕士研究生。主要研究方向为增材制造工艺。E-mail: zhanghaiwu@camtc.com.cn。

王淼辉(通信作者), 男, 1981年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为金属增材制造技术及科研工作。E-mail: wangmh0103@163.com。

玉柴K08荣获第三届“中国源动力”口碑先锋

来源: 玉柴官网 发布日期: 2022-02-10

近日,由《中国汽车报》社主办的第三届“中国源动力”榜单发布,国六产品的比拼是本届活动的一大亮点,玉柴K08荣获“口碑先锋”荣誉。

玉柴K08是中国首款率先拿到国六b阶段排放标准认证的机型,是国内同级别马力段柴油机中,重量最轻、体积最小、油耗更低的经典机型,上市以来便以轻量化、低油耗、高可靠、动力强劲以及高效服务得到了越来越多用户及市场的认可。如可靠性方面,玉柴K08发动机经过充分的研发试验、

市场验证,针对起重机、搅拌车、渣土车等细分用途的场景工况和用户痛点等进行规划、开发验证,能更好地适应工程车、专用车等恶劣的工况环境。2019年,K08开始投放市场,投放以来,K08产品可靠、油耗低、马力大等品质受到用户广泛认可。

2021年,K08已批量应用搭载在各主机厂众多车型上,如10月份20台搭载K08的福田欧辉客车交付山西潞安化工集团,三一重起搭载K08的汽车起重机自制底盘项目批量投产;11

月,200台搭载K08的三一渣土车交付上海鹏江建设,专业定制的84台搭载玉柴K08中联重科车辆批量交付顺德环卫。

去年12月,在广东惠州举行的搅拌车油耗横比长测中,搭载玉柴K08福田雷萨搅拌车与两款搭载竞品8升350马力国六发动机的主流整车品牌搅拌车,在基于实际的用户运营背景下,进行了23天测试后,单车累计行驶里程4000公里,其中搭载玉柴K08的福田雷萨搅拌车综合百公里油耗47.6L升,比其他两辆车分别低10.5%(5L)、15.7%(7.48L),测试周期内累计比其他两辆车分别省了200L、299L,当地油价6.68元/L,即分别省了1336元和1999元。K08以低油耗、高可靠和动力强成为当之无愧的8升机“省油王”。

电弧喷铜层在GIS应用中的电性能研究

徐 曦, 夏廷君, 刘 楠

西安西电开关电气有限公司, 西安, 710077

摘 要: GIS产品的电接触面通常使用镀银工艺, 通过在电接触面增加银单质镀层提升导电性能。金属银单质理化性能稳定, 电导率高, 在GIS实际生产、安装、运行中, 能保证电接触面的接触电阻和温升, 但是镀银工艺流程复杂, 成本较高。本文通过在GIS固定连接面应用电弧喷铜工艺, 并与原电镀银工艺进行电性能分析对比, 结果表明采用喷铜工艺可在GIS固定连接面替代镀银工艺, 且喷铜层电阻与镀银层电阻区别小于10%, 最终通过126kV GIS DS产品的温升试验, 确认工艺可满足GIS产品通流要求。

关键词: 喷铜; 镀银; 结合力; 电阻; 温升

GIS产品的电接触面通常使用镀银工艺, 通过在电接触面增加银单质镀层提升导电性能。金属银单质的理化性能稳定, 电导率高, 在GIS实际生产、安装和运行中, 能保证电接触面的接触电阻和温升^[1-3]。

银单质作为贵金属, 成本较高, 同时铝基材镀银需要使用锌、铜作为过渡层, 工艺流程长, 过程质量控制难度较大^[4-6]。

铜单质的电导率为 $5.9 \times 10^7 \text{S/m}$, 银单质的电导率为 $6.2 \times 10^7 \text{S/m}$, 铜单质与银单质的电导率相差约5%, 具备替代银作为电接触面涂层的条件。

本文选用6A02-T6铝型材零件, 进行电弧喷铜表面处理, 并对零件电性能进行了研究。

其中:

(1) 通过对比镀银层、电弧喷铜层的接触电阻, 验证电弧喷铜层的导电性能。

(2) 通过进行GIS温升试验, 验证电弧喷铜层对GIS温升的影响。

1 样件与工艺

1.1 工艺流程

铝材氰化镀银工艺流为:

弱腐蚀—出光—一次浸锌—褪锌—二次浸锌—预镀铜—镀银

铝材镀铜工艺流程为:

弱腐蚀—出光—一次浸锌—褪锌—二次浸锌—镀铜

铝材电弧喷铜工艺流程为:

零件清洗—烘干—工装保护—喷砂—喷铜(喷砂后4h内)—修正

1.2 原材料要求

氰化镀银使用99.99%银板作为阳极, 使用分析纯KCN作为络合剂。电弧喷铜原材料要求见表1。

1.3 工艺参数

氰化镀银使用普通高频直流电源电镀。电弧喷铜设备参数见表2。

2 试验研究

2.1 试验设备

接触电阻测试仪: ZD3C回路电阻测试仪

表1 电弧喷铜工艺原材料要求表

	材质	规格, mm	备注
铜丝	T2-R	Ø1.2、Ø1.6、Ø2.0	
喷砂用砂	棕钢玉	G16	无油

表2 电弧喷铜设备操作参数表

项目	参数
喷砂气压	$\geq 0.5 \text{MPa}$
喷涂电压	6V~7V
送丝电压	14~20V
喷涂电流	100~200A
进气压力(压缩空气)	$\geq 0.5 \text{MPa}$

温升试验台: GTM-3型通用温升测量装置、YSL240/12000大电流温升试验装置

126kvGIS隔离开关

2.2 接触电阻

由接触电阻定义可知:

$$R_c = K / (0.102F)^m \times 10^{-3} (\Omega)$$

F—接触压力, N;

K—(与电接触材料及表面状况有关的)常数, 对银-银, $k=0.06$;

m—(与接触形式有关的)指数, 对面接触, $m=0.8 \sim 0.95$

对于接触电阻测定, 在接触压力一定情况下, 影响变量主要为电接触材料与表面状态, 接触材料银的导电性优于铜, 接触形式上铜对铜粗糙度大, 接触点多, 因此接触面的导电应优于银对银面, 综合两者, 银对银、铜对铜的导电性应差异不大。

因此制备A零件6件, B零件6件, A、B可通过螺钉装配紧固, 形成固定点连接面, 紧固力矩为 $480N \cdot m$ 。

两种零件各制备喷铜零件3件、镀银零件3件。按“喷铜面—喷铜面”“喷铜面—镀银面”“镀银面—镀银面”进行装配并测量接触电阻。测量情况见表3。

由表3可知, 铜对铜、铜对银、银对银接触电阻差异不大, 偏差普遍在 $\pm 10\%$ 以内, 因此可以确定喷铜层可用于电接触表面处理。

2.3 GIS温升试验

为验证电弧喷铜层作为电接触面表面工艺的电性能, 通过接触电阻测量和温升试验进行了验证。

由于高压电气产品用零件电接触面主要采用镀银方式, 喷铜层由于表面粗糙度较大, 暂不考虑在滑动接触部位使用。大部分零件均存在两个(以上)接触面, 除绝缘嵌件等零件的

表3 接触电阻对比表

序号	接触面类型	接触电阻, $\mu\Omega$	平均电阻, $\mu\Omega$
1	Cu-Ag	6.046	5.884
	Cu-Ag	5.820	
	Cu-Ag	5.787	
2	Cu-Cu	5.636	5.530
	Cu-Cu	5.567	
	Cu-Cu	5.377	
原工艺	Ag-Ag	5.965	5.940
	Ag-Ag	6.346	
	Ag-Ag	5.519	

接触面全部为固定连接面(平面)外, 大部分零件至少有一个为滑动接触面。对大部分零件而言, 同时采用喷铜和镀银两种工艺的执行难度更高、质量控制更复杂。所以, 本次试验仅在嵌件上使用喷铜工艺, 其他零件仍使用镀银工艺(即重点考量铜对银接触面的温升情况)。

温升试验样机选用本公司126kV GIS(2000A)DS进行, 温升布点见图1。其中DS动侧盆子、三相短接盆子嵌件的两个电接触面进行电弧喷铜处理, 其余电接触面均使用镀银工艺。温升电流大小为2200A。

A、B、C三相4、5、7点处电接触面表面状态为“Cu-Ag接触”, 其余电接触面为“Ag-Ag接触”。温升样机外观见图2, 温升试验结果见表4, 温升试

验前后三相回路电阻变化见表5, 温升试验前后分段接触电阻变化见表6。

由以上结果可知:

(1) 温升试验结果与接触电阻测量结果趋势基本一致。

(2) 样机通过了1.1倍温升试验, “电弧喷铜层—银层”接触能满足产品温升要求。

(3) 样机三相回路电阻与分项接触电阻试验前、后满足GB/T 11022要求, 变化小于20%, 产品通过温升试验。

3 结果与讨论

电弧喷铜层在固定连接面一端为铜, 一端为银的电接触面, 通过了126kV GIS DS(2000A)1.1倍温升试验, 且温升前后电阻变化不超过20%。

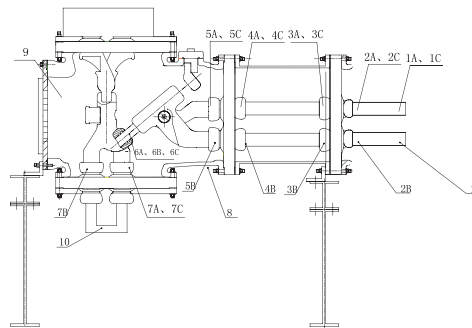


图1 温升布点图



图2 温升试验形态图