● 试验研究 Experimental Research ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5231

增材制造 AlSi10Mg 合金内流道表面化学光整时序演变研究

付中涛[1],王志军[1],杨旭东[2],李俊杰[1],王锦程[1]

(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室，陕西 西安 710072；2. 新昌天启航天航空科学技术研究院，浙江 绍兴 312500)

摘　要:增材制造 AlSi10Mg 合金因其高比强度、高导热性和良好的力学性能等综合优势,被广泛用于制造具有复杂内部流道结构的一体化散热器件。然而,该技术成形件内表面质量通常较差,往往需通过表面后处理以提升其使用性能。化学后处理不受内流道复杂形状和尺寸的限制,特别适用于内流道构件的表面后处理。本研究采用碱性化学抛光液,对内径和壁厚均为 1 mm 的 S 型流道进行不同时长的抛光处理,系统探究悬垂面粗糙度随抛光时间的变化规律,结合二维与三维形貌分析,确定最优抛光时间。结果表明,表面粗糙度随抛光时间延长呈先急剧下降后趋于稳定的趋势,平均线粗糙度 Ra 由未处理时的 8.8 μm 最低降至 1.6 μm,下降约 82%。在化学抛光初期,部分粘结粉末、未熔融粉末及松散颗粒的快速去除使表面质量显著提升;中期主要对“挂渣”缺陷进行溶解与整平,表面质量继续改善但提升幅度减缓;后期则主要对基体部分进行细节整平,表面质量提升进一步减小,最终趋于波动稳定状态。此外,通过对纵截面熔池形貌与腐蚀行为分析,进一步验证了上述表面形貌演变规律。

关键词:增材制造;AlSi10Mg 合金;表面后处理;化学抛光;腐蚀行为

中图分类号:TG175.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2026)10-1099-10

Evolution of Surface Finish in Additively Manufactured AlSi10Mg Internal Channels During Chemical Polishing

FU Zhongtao[1], WANG Zhijun[1], YANG Xudong[2], LI Junjie[1], WANG Jincheng[1]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Xinchang TianQi Institute of Astronautics and Aeronautics, Shaoxing 312500, China)

Abstract: Additively manufactured AlSi10Mg alloys are extensively utilized in integrated heat dissipation devices featuring complex internal flow channel geometries because of their comprehensive advantages, such as high thermal conductivity and favourable mechanical properties. However, the internal surface quality of as-built components is typically suboptimal, often necessitating postprocessing treatments to enhance their performance. Chemical posttreatment, unimpeded by the intricate geometry and dimensions of internal channels, is particularly suitable for the surface treatment of these components. Despite its potential, the alkaline chemical polishing process for AlSi10Mg alloy flow channels remains underdeveloped. To address this gap, we employed a self-developed room-temperature alkaline chemical polishing solution to treat S-shaped flow channels, each with an inner diameter and wall thickness of 1 mm, under varying polishing durations. The evolution of surface roughness on the overhang surface with respect to polishing time is systematically investigated through two-dimensional and three-dimensional morphological analyses to determine the optimal polishing time.The results reveal that the surface roughness initially decreases sharply butsubsequently stabilizes with increasingpolishing time. Specifically, the average Ra value decreases from 8.8 μm in the as-fabricated state to a minimum of 1.6 μm, corresponding to an approximate reduction of 82%. In the initial phase, the rapid removal of partially bonded

收稿日期: 2025-10-22

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3010902);凝固技术全国重点实验室基金(2025-TS-06);陕西省自然科学基础研究计划(2021JM-058)

作者简介: 付中涛,2002 年生,硕士生. 研究方向为增材制造 AlSi10Mg 合金后处理. Email: zhongtao_fu@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 王志军,1984 年生,博士,教授. 研究方向为先进金属结构材料及其凝固技术. Email: zhjwang@nwpu.edu.cn

引用格式: 付中涛,王志军,杨旭东,李俊杰,王锦程. 增材制造 AlSi10Mg 合金内流道表面化学光整时序演变研究[J]. 铸造技术,2026, 47(10): 1099-1108.

FU Z T, WANG Z J, YANG X D, LI J J, WANG J C. Evolution of surface finish in additively manufactured AlSi10Mg internal channels during chemical polishing[J]. Foundry Technology, 2026, 47(10): 1099-1108.

中国知网 https://www.cnki.net

powder, unmelted powder, and loose particles significantly enhances surface quality. During the intermediate phase, the dissolution and levelling of "slagging" defects further improve the surface quality, although at a slower rate. In the final phase, detailed smoothing of the substrate occurs, with diminishing improvements in surface quality, eventually reaching a fluctuating steady state. Furthermore, analysis of the cross-sectional melt pool morphology and corrosion behavior corroborates the observed surface morphology evolution.

Key words: additive manufacture; AlSi10Mg alloy; surface posttreatment; chemical polishing; corrosion behavior

增材制造 AlSi10Mg 合金具有耐腐蚀性、高比强度、较高的热导率和良好的力学性能[1-6]，被广泛应用于制造冷板、喷油嘴、热交换器等具有复杂内部流道的一体化散热器件，为该类构件的设计与生产带来了革命性突破[7-10]。然而，受阶梯效应、球化效应和粉末黏附效应等工艺特性的影响，成形制件表面质量极差，具有较高的表面粗糙度。使用过程中高表面粗糙度会增大流体的流动阻力并可能出现粉末脱粘堵塞管道，严重损害工件的服役性能与安全可靠性[11-17]。尽管目前通过优化工艺参数与设计支撑结构可在一定程度上缓解上述缺陷，但仍无法完全消除。因此，采用有效的表面后处理工艺提升成形件的流道表面质量，已成为确保其最终使用性能的关键环节[18-19]。

内流道制件的内表面后处理方法可分为磨粒流抛光、化学抛光和电化学抛光等几类[8,15,20-22]。其中磨粒流抛光方法和电化学抛光方法在结构简单的工件表面处理中表现良好，但在小直径或复杂内部流道中受形状和尺寸限制，难以实现均匀抛光[12, 23]。而化学抛光不受内流道复杂形状和尺寸的限制，抛光效果优异，特别适用于形状或结构复杂的增材制造工件内流道的后处理[15]。

铝合金是典型的两性金属，酸、碱性化学抛光均可用于该材质工件的表面光整。酸性化学抛光因抛光液中包含 HNO_3 成分，其在抛光过程中与铝反应生成氮氧化物，易对空气造成严重污染[24]。相比而言，碱性化学抛光更为环保[25-26]，但目前适用于 AlSi10Mg 合金内流道的碱性抛光液配方与工艺尚不成熟。另外，现有碱性体系对铝合金的腐蚀性仍较强，难以实现其对薄壁内流道制件的可控去除，因而限制了其在该类构件上的应用。

本研究采用自研碱性化学抛光液，对沉积态AlSi10Mg 合金增材制造内流道工件进行化学抛光工艺研究。通过分析表面粗糙度参数、纵截面腐蚀行为、内表面二维/三维形貌变化，系统评价沉积态 AlSi10Mg 合金内流道表面粗糙度随抛光时间的变化规律，确定长时效碱性化学抛光的最佳时间，以期为增材制造 AlSi10Mg 合金的后处理工艺设计提供理论依据与实践指导。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为通过选区激光熔化(selective laser melting, SLM) 成形的 AlSi10Mg 合金 S 形流道构件，其内径为 ϕ1 mm，外径为 ϕ3 mm。为评估化学抛光工艺对具有多角度结构及悬垂面"挂渣"特征的复杂构件的适用性，采用水平打印方式成形试样，以确保流道内部始终存在悬垂区域，并将其作为采样区域观察分析。

1.2 化学抛光方法

化学抛光液为碱性抛光液，主要成分为氢氧化钠、硝酸钠和其他添加剂。抛光时在室温下(25 ℃)将抛光液以流速 0.8 m/s 注入流道中，具体的抛光工艺流程为：试样除污、化学抛光、中和(浓度 10% HNO_3 通入流道 1~2 min)、去离子水超声清洗、清洗液清洗、去离子水超声清洗、干燥、成品、数据检测。

1.3 实验结果评价指标

评估抛光质量主要以表面形貌(二维和三维形貌)、表面线粗糙度 Ra、取样轮廓最大峰高与最大谷深之和 Rz、取样轮廓最大峰高 Rp、取样轮廓最大谷深 Rv 作为评价指标。其中表面二维形貌采用 TESCAN MIRA III 型场发射扫描电子显微镜(SEM)进行观察；表面三维形貌采用 Olympus OLS4500 型激光共聚焦显微镜(laser scanning confocal microscopy, LSCM)进行观察，统一采用 20×物镜进行采样，采样范围为 640 μm×640 μm。采样时于单个流道内部随机抽取 5 个区域进行采样，每个区域延流道轴向随机取五条直线获取线粗糙度数值。为确保实验数据的可靠性，每个抛光时间下均进行 2 次重复性实验验证。

2 实验结果及讨论

2.1 未抛光流道状况

AlSi10Mg 合金流道构件三维模型和成形实物如图 1a 和 c 所示，流道纵截面模型及对应实物图如图 1b 和 d 所示。从图 1b 和 d 可见，实际成形流道尺寸与设计尺寸存在明显偏差。在快速凝固过程中，因重力作用形成的棱状"挂渣"(红色圆圈所示)导致流

中国知网 https://www.cnki.net

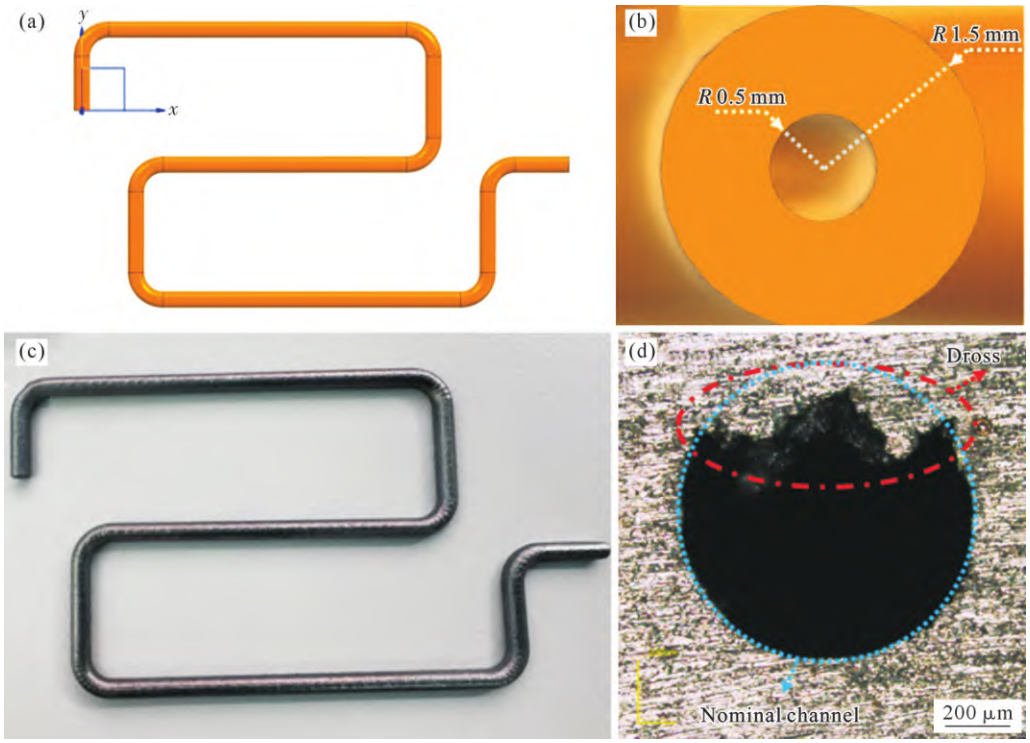


图 1　流道模型及实物图：(a) 流道三维模型；(b) 流道纵截面模型；(c) 流道样品；(d) 流道口纵截面

Fig.1　Model and physical images of the channel: (a) three-dimensional model of the channel; (b) longitudinal section model of the channel; (c) channel sample; (d) cross-sectional view of the flow channel orifice

道口圆度偏离预设值，实际管径出现收缩。

未进行碱性化学抛光时流道的纵截面熔池形貌如图 2 所示，其中图 2a~c 分别为流道纵截面的右下角、左上角及右上角区域。由图可见，相较于非悬垂区域，流道悬垂面附近区域的熔池尺寸不均匀。此外，图 2b 和 c 中红色虚线标示了靠近悬垂面的熔池边界，可清晰看出该区域熔池的纵深明显大于上层熔池。这是由于悬垂面在快速凝固过程中因缺乏下方已凝固材料的支撑，导致熔池在重力作用下发生沉降[27]。悬垂面附近熔池凝固后，其为上层熔池提供了有效支撑，从而保障后续熔池的正常凝固。图 2b 和 c 中黄色框选区域显示出悬垂面上高凸起物与悬垂面底部之间存在微裂纹特征。图 $2c_1$ 蓝色框选区域更清晰地展示了此类特征，如黄色箭头所示，球状凸起物与不规则凸起物之间存在贯穿底部的弧状微裂纹，不规则凸起物与悬垂面底部之间亦存在沿底部蔓延的弧状裂纹。裂纹的存在表明结合并不牢固，使用过程中具有脱落的风险。

图 $2a_1$ 展示了正常熔池边界与熔池内部的组织形貌。由图可见，熔池内部的硅相网络均匀致密，而熔池边界处由于在逐层堆叠的过程经历反复热循环，硅相粗化且较为疏松[1,28]。图 $2b_1$ 和 c_1 中粉色框选区域中所示的熔池内部硅相网络也表现出粗化迹象。这是由于该区域只能依靠粉末散热，热稳定性与散热条件较差，影响了硅相的扩散行为，进而引发粗化[27]。

图 3 为场发射扫描电子显微镜获取的未抛光状态下典型流道悬垂面二维形貌。如图所示，未抛光合金表面质量较差，流道内表面存在大量附着物。导致表面质量差的主要表面缺陷包括：绿色框区内因球化效应形成的部分粘结粉末；黄色箭头所指因粉末粘结效应形成的松散粉末；以及粉色框区内因凝固过程中飞溅粘结所形成的未熔融粉末。结合截面形貌可进一步看出，图 2 中的不规则凸起物即为部分粘结粉末，球状凸起物即为未熔融粉末。熔池的沉降及部分粘结粉末等缺陷的存在导致悬垂面实际形貌与设计轮廓存在显著偏差，原设计的圆弧顶区域实际成形为近似平面。由于各区域沉降速率不一致，成形表面起伏显著，沉降较快区域形成如图 $3d_1$ 黑色框区所示的“挂渣”结构。

图 3 为未抛光状态下典型悬垂面三维形貌。如图所示，悬垂面整体截面轮廓严重偏离设计的圆弧形状，表面起伏剧烈。局部放大图中可见大量红绿色凸起的峰区与紫色的谷区：图 $3e_1$ 中的红色与黄绿色凸起分别对应二维形貌中的部分粘结粉末与飞溅粘结的部分熔融粉末，而绿色大区域凸起及紫色谷区则由“挂渣”所引起的局部起伏所致；图 $3f_1$ 中绿色凸起同样为部分粘结及部分熔融粉末，紫色谷区则为熔池沉降较缓区域。图 $3e_1$ 与 f_1 在相同特征的颜色显示上存在差异，原因在于图 $3f_1$ 的采样范围包含

中国知网　https://www.cnki.net

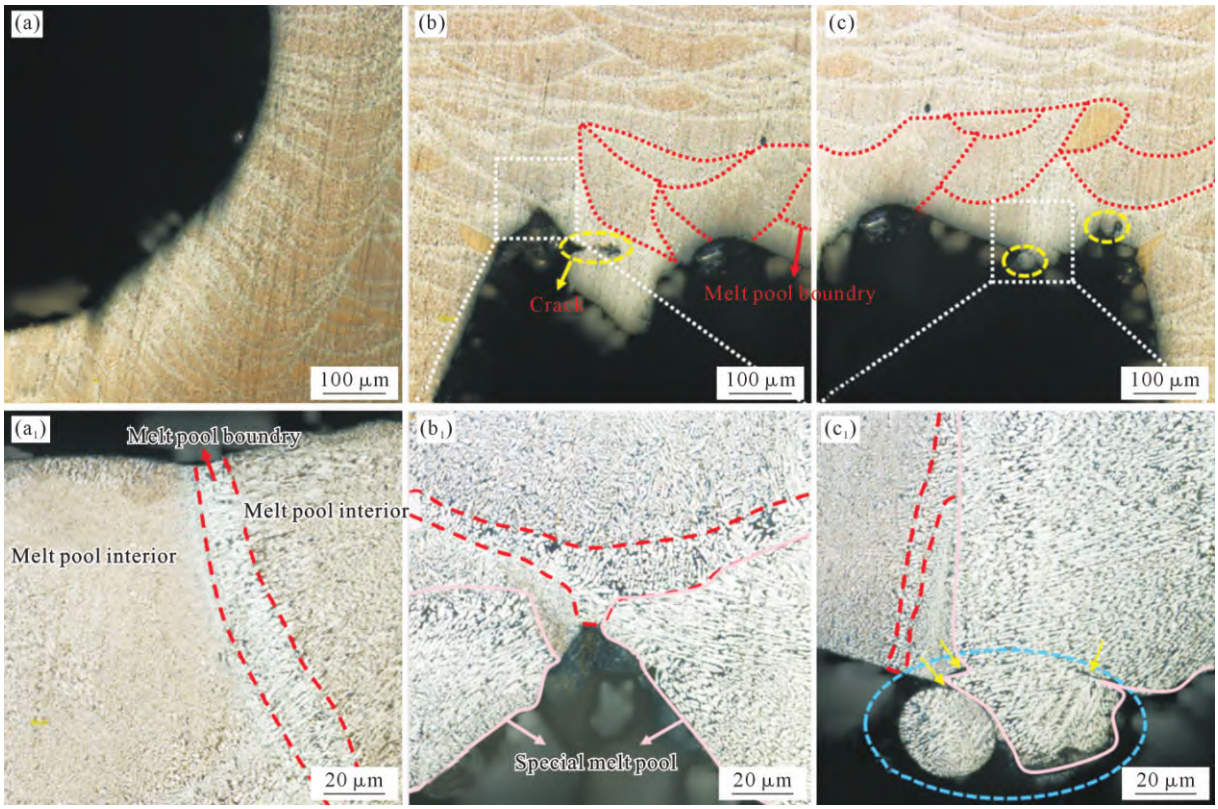


图 2 AlSi10Mg 合金流道图 1d 中的纵截面局部结构及微观组织：(a) 流道纵截面右下角；(b) 流道纵截面左上角；(c) 流道纵截面右上角；(a_1) 流道底部截面的局部放大图；(b_1) 图 b 中白色框选区域放大图；(c_1) 图 c 中白色框选区域放大图

Fig.2 Partialstructural details and microstructures of the AlSi10Mg flow channel cross-section in Fig. 1d: (a) lower-right region of the channel cross-section; (b) upper-left region of the channel cross-section; (c) upper-right region of the channel cross-section; (a_1) magnified view of the channel bottom section; (b_1) magnifiedview of the white box in (b); (c_1) magnified view of the white box in (c)

了被识别为高凸起(红黄色)的侧壁，而悬垂面底部整体对应于色差带的绿紫色部分。

2.2 悬垂面表面粗糙度随抛光时间的变化

图 4 为悬垂面表面粗糙度随化学抛光时间的变化曲线图。由图 4 可知，抛光前悬垂面表面质量差，平均线粗糙度值较大其值为 8.82 μm；Rz 为 59.45 μm，其中 Rp 与 Rv 的平均值分别为 34.02 和 25.43 μm。表明因部分粘结粉末、未熔融粉末、松散粉末及“挂渣”的影响，悬垂面表面起伏显著，导致悬垂面粗糙度参数 Ra、Rz、Rp 与 Rv 值均较高。从曲线变化趋势可以看出化学抛光 1 h 阶段的表面粗糙度数值下降最为显著：平均 Ra 降至 4.22 μm，降幅约 52%；平均 Rz 值降至 23.54 μm，降幅约 60.4%；Rp 值降至 11.83 μm，降幅约 65.2%；Rv 值降至 11.71 μm，降幅约 54%。Rz 的变化是由 Rp 与 Rv 共同体现的，这一阶段 Rz 的变化更多归因于 Rp 的下降。

抛光时间延长至 2 h 时，粗糙度下降幅度有所减缓：Ra 均值由 4.22 μm 下降至 3.51 μm，下降约17%；Rz 均值由 23.54 μm 下降至 19.09 μm，下降约18.9%；Rp 均值由 11.83 μm 下降至 10.03 μm，下降约15.2%；Rv 均值由 11.71 μm 下降至 9.06 μm，下降约 22.6%。相较于前一阶段，Rz 的下降比例明显减小，主要受 Rp 与 Rv 降幅均减弱的影响，其中 Rp 的降幅减弱更多。

在 3 h 抛光阶段，粗糙度下降幅度再次增大，Ra 和 Rz 降幅约 50 %，仍低于 0~1 h 阶段。其中 Rz 减小比例相较于 1~2 h 时显著增大，且主要由 Rp 的下降所驱动。抛光 3 h 后，粗糙度曲线表明数值已趋于稳定，后续时间点(4、5、7.5 和 9 h)时的数据仅在小范围内波动。表明表面粗糙度在初期快速下降后逐渐接近稳定阈值，不再随抛光时间持续降低，该现象与 Sandell 等[29]研究中的现象相符。

综上，经化学后处理 7.5 h 后，表现出优异的表面质量，SLM-AlSi10Mg 合金流道内表面中悬垂面 Ra 降至 1.59 μm，下降约 82%；平均 Rz 值由最初的的 59.45 μm 降至 9.81 μm，下降约 84%；平均 Rp 和平均 Rv 分别由最初的 34.02 和 25.43 μm 降至 5.28 和 4.53 μm，均下降约 85%。

2.3 流道悬垂面形貌随抛光时间的变化

图 5 展示了沉积态试样经不同时间化学抛光后的代表性二维表面形貌。观察发现，化学抛光 1 h 后，悬垂面上存在的部分粘结粉末、松散粉末及未完全熔融粉末已基本去除，表面出现如图 5a 绿色框选区域所示的絮状残留结构。结合未抛光状态的形貌

中国知网 https://www.cnki.net

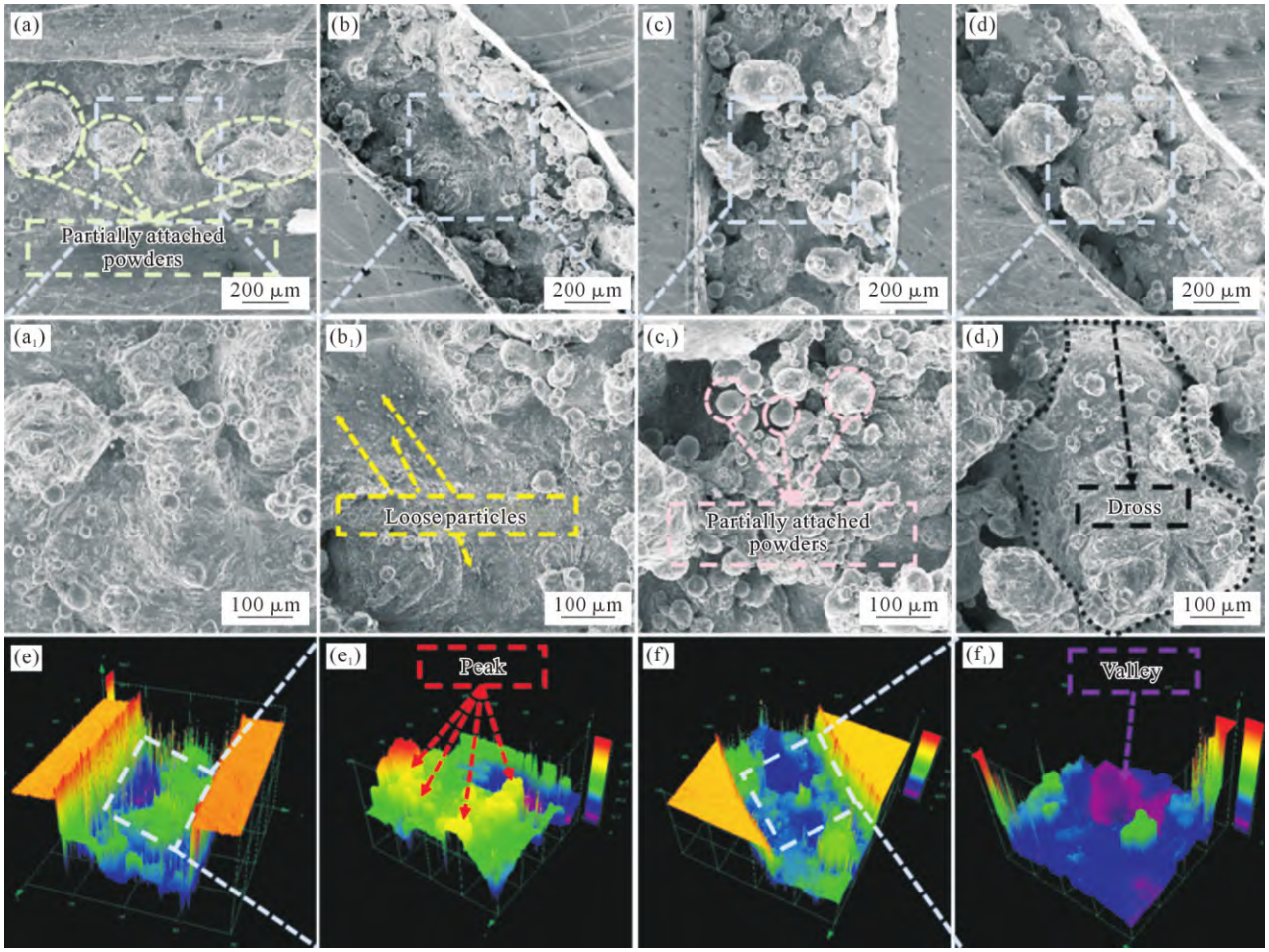


图 3　AlSi10Mg 合金流道悬垂面二维形貌和三维形貌：(a~d) 流道不同区域的二维形貌图；(a_1~d_1) 二维形貌局部区域放大图；(e, f) 流道不同区域的三维形貌图；(e_1, f_1) 三维形貌局部区域放大图

Fig.3　2D and 3D surface topography of the AlSi10Mg flow channel overhang: (a~d) 2D topography from different regions; (a_1~d_1) corresponding magnified 2D views; (e, f) 3D topography from different regions; (e_1, f_1) corresponding magnified 3D views

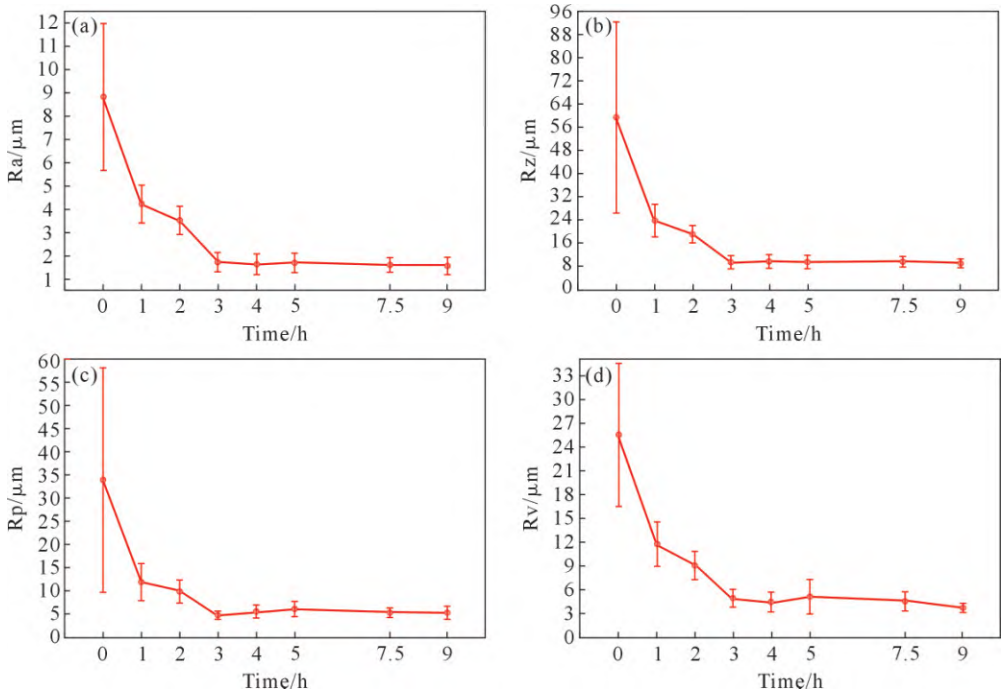


图 4　AlSi10Mg 合金流道悬垂面平均粗糙度数值变化曲线：(a) Ra; (b) Rz; (c) Rp; (d) Rv

Fig.4　Variationcurve of the average roughness value withrespect to the chemical polishing time for the overhanging surface of the as-built AlSi10Mg channel: (a) Ra; (b) Rz; (c) Rp; (d) Rv

中国知网　https://www.cnki.net

特征及絮状物分布位置判断，该残留物应为部分粘结粉末去除后遗留的底部残余。值得注意的是，其呈现为絮状形态而非典型腐蚀坑形貌，说明此类粉末的去除机制并非完全依赖于化学腐蚀作用。进一步观察发现，红色箭头所指的裂纹恰好分布于絮状物边缘，表明该类残留的去除是由化学腐蚀自粘结粉末的底部裂纹沿絮状纹理扩展，最终在抛光液流体作用下发生解理剥落。图 5 中黄色框选区域呈现典型的腐蚀坑形貌，该区域位于图 5a 所示形貌的最底部，应属于快速凝固过程中受重力影响较小的区域(贴近主体部分)，进一步表明粘结粉末与主体存在不同腐蚀行为响应。这种不同的腐蚀行为响应可能源于球化效应形成的部分粘结粉末与主体之间无法形成良好的冶金结合，同时形成的部分粘结粉末之间以及部分粘结粉末与主体之间会留下孔隙。图中黄色框选区域呈现典型腐蚀坑形貌，该区域位于形貌底部，属于快速凝固过程中受重力影响较小、贴近主体结构的区域，进一步表明粘结粉末与流道主体部分在化学抛光过程中具有不同的腐蚀行为响应。这种差异可能源于球化效应所形成的部分粘结粉末与基体之间未能形成良好冶金结合，且粘结粉末中的硅相粗大疏松，导致腐蚀穿透性增强。

由图 5b 可见，化学抛光 2 h 后流道表面仍存在较多分布不规则、覆盖范围较大的絮状残留物，表面质量仍然较差，判断其为“挂渣”去除后所遗留。当抛光时间延长至 3 h，絮状残留物明显减少(如绿色框选区域所示)，同时黄圈标示的典型腐蚀坑形貌逐渐增多，并出现零散分布的不规则小型腐蚀坑(如蓝色箭头所示)。4 h 抛光后，絮状残留物已完全消失，图 5c 中原有不规则小型腐蚀坑面积增大并伴有新坑形成，该区域形貌仍非典型腐蚀坑，推测为“挂渣”与主体结合不良的过渡区，对应挂渣的顶部结构。

当化学抛光时间延长至 5 h，表面二维形貌表现为大型腐蚀坑中嵌有小型腐蚀坑的典型化学腐蚀特征，说明此时表面已主要为流道主体区域。继续抛光至 7.5 h，局部凸起区域被进一步整平，呈现蚀坑合并与新蚀坑共存的形貌，进一步验证该形貌为基体区域的典型腐蚀响应。抛光 7.5 ~9 h，二维形貌变化趋于稳定，主要表现为旧蚀坑的进一步合并、整平以及新蚀坑的零星产生，表面形貌未见显著差异。

图 6 为 AlSi10Mg 合金流道悬垂面在不同时间抛光后的三维形貌。从图中可见，化学抛光 1 h 后，三维形貌中出现成片的红色与黄色高凸起区域(如红色箭头所示)，对应图 6a 二维形貌中所观察到的絮状残留结构；紫色低谷区则对应于二维形貌中的黄色框选区域，判断为流道主体部分。随着部分粘结粉末被去除至仅存底部残留，三维形貌中的凸起高度显著降低，整体高度差也相应减小。该变化在图 4 的粗糙度曲线中表现为 Rp 值大幅下降，Rv 值降低，且由于 Rp 下降更为显著，导致 Rz 值明显减小。此外，表面松散粉末和未熔融粉末的去除使得表面起伏减少，因此算术平均粗糙度 Ra 也显著下降。

化学抛光 2 h 后，如图 6b 所示，红色和黄色高凸起区域有所减少，同时整体的高度差相较于图 5a

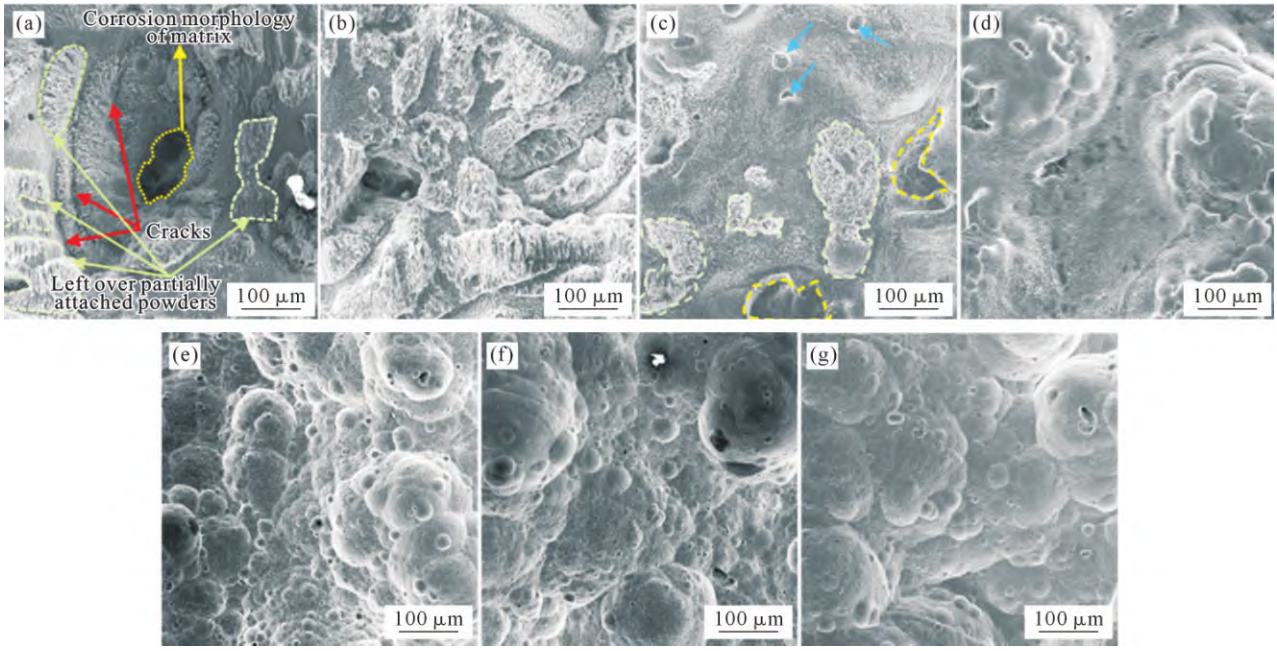


图 5 AlSi10Mg 合金化学抛光不同时间悬垂面的二维形貌：(a) 1 h; (b) 2 h; (c) 3 h; (d) 4 h; (e) 5 h; (f) 7.5 h; (g) 9 h

Fig.5 2D morphology of the overhang surface with different chemical polishing timesfor the AlSi10Mg alloy: (a) 1 h; (b) 2 h; (c) 3 h; (d) 4 h; (e) 5 h; (f) 7.5 h; (g) 9 h

中国知网 https://www.cnki.net

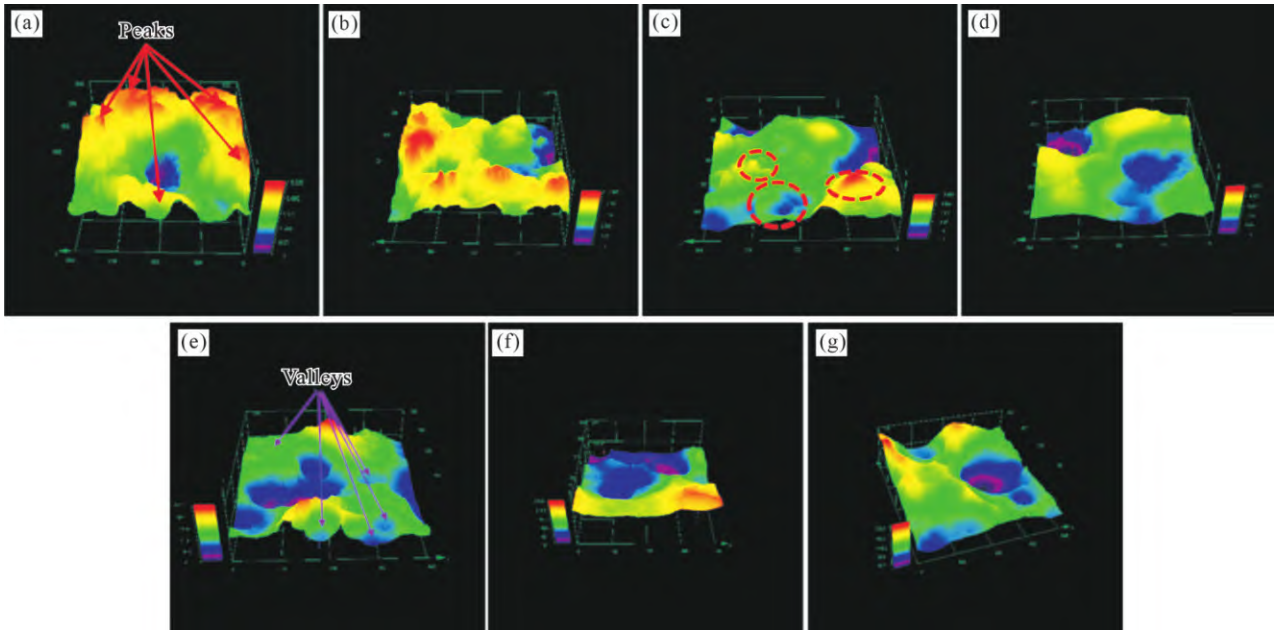


图 6　AlSi10Mg 合金化学抛光不同时间悬垂面的三维形貌：(a) 1 h; (b) 2 h; (c) 3 h; (d) 4 h; (e) 5 h; (f) 7.5 h; (g) 9 h

Fig.6　3D morphology of the overhang surface with respect to chemical polishing time for the AlSi10Mg alloy: (a) 1 h; (b) 2 h; (c) 3 h; (d) 4 h; (e) 5 h; (f) 7.5 h; (g) 9 h

中进一步降低。这与二维形貌变化中的推测基本一致，此时挂渣开始进一步腐蚀和剥离，与主体部分的高度差会缩小。但由于该阶段不会有未粘结粉末等缺陷的去除带来的 Rp 大幅下降，因此在图 2 粗糙度数值曲线中表现为 Rv 大幅降低，Rp 也相应降低，但整体 Rv 下降更为显著；导致 Rz 值降低但降低幅度较抛光 0~1 h 时有所减小，算术平均粗糙度 Ra 也呈现相同变化规律。

当化学抛光时间延长至 3 h，红色与黄色高凸起区域基本消失，仅存局部微小凸起(红圈标示)。结合二维形貌可知，此时絮状残留物已基本去除，典型腐蚀坑形貌增多，表明表面已逐渐为结合致密的主体区域。由于主体部分与“挂渣”区域在腐蚀速率上存在差异，“挂渣”的进一步去除促使 Rz 值继续下降，Ra 值也随之进一步降低，该阶段降幅仅次于 0~1 h 阶段。

抛光时间达到 4 h 后，高凸起结构被完全消除，尽管该采样尺度下的三维形貌未能清晰反映小型腐蚀坑所引入的微观高度差异，整体形貌仍表现为较为平滑的特征。至 5 h 时，出现如紫色箭头所示的小型谷区，结合二维形貌可辨识为小型腐蚀坑及其合并区域；至 7.5 h 时，该类小型谷区消失，推测是因蚀坑进一步合并所致，而新生蚀坑尺寸较小，未在三维形貌中明显体现；抛光 9 h 后的三维形貌与 7.5 h 时差异不大，两者粗糙度数值基本一致。在 4~9 h 的抛光区间内，三维形貌的整体高度差未发生显著变化，仅表现为形貌分布的局部差异，因此在粗糙度曲线中 Ra 与 Rz 值趋于稳定，Rp 与 Rv 值略有波动。

综合悬垂面的粗糙度与二维/三维形貌随抛光时间的变化规律，将最佳化学抛光时间确定为 5~7.5 h 是合理的，具体取值需根据流道的尺寸精度容差决定。在此时间窗口内，悬垂表面由结合致密的主体部分构成，且平整度良好，起伏平缓，粗糙度值也维持在较低水平。若进一步延长抛光时间至 9 h，表面平整度虽可能略有改善，但将导致流道尺寸过度增大。这种以显著牺牲尺寸精度来换取有限表面质量提升的做法，其弊大于利。

2.4　化学抛光腐蚀行为分析

为了深入探究上述形貌变化原因，对抛光过程中的腐蚀行为进行了观察与分析，发现了 3 种不同尺度下的腐蚀行为。图 $7a_1$ 和 a_2 分别为抛光时间 0 和 1 h 的纵截面宏观形貌，对比二者可以发现，抛光 1 h 后溶解的轮廓大致为图 $7a_1$ 中橙色虚线以下区域。抛光后，内壁附着的未熔融粉末及大块部分粘结粉末均被去除，且大块部分粘结粉末的去除量明显多于周边区域。从橙色轨迹线位置可判断，腐蚀起源于部分粘结粉末底部的裂缝，随后横向扩展并最终导致剥落，该现象进一步验证了前文分析。此类粉末剥落行为与抛光液的化学溶解共同作用，促使在抛光 1 h 阶段快速去除了导致 Rz 值偏高、表面起伏显著的粉末类缺陷，从而显著改善了表面质量。

图 $7b_1$ 和 b_2 分别为抛光 1 与 2 h 后流道纵截面右下角区域的介观形貌，该区域成形稳定、熔池生长正常，属于第 2.2 节所述的主体部分。可见图 $7b_1$ 中黄色轮廓所标示的起伏在图 $7b_2$ 中得以整平，但同时又有新区域发生局部溶解，其溶解深度与图 $7b_1$

中国知网　https://www.cnki.net

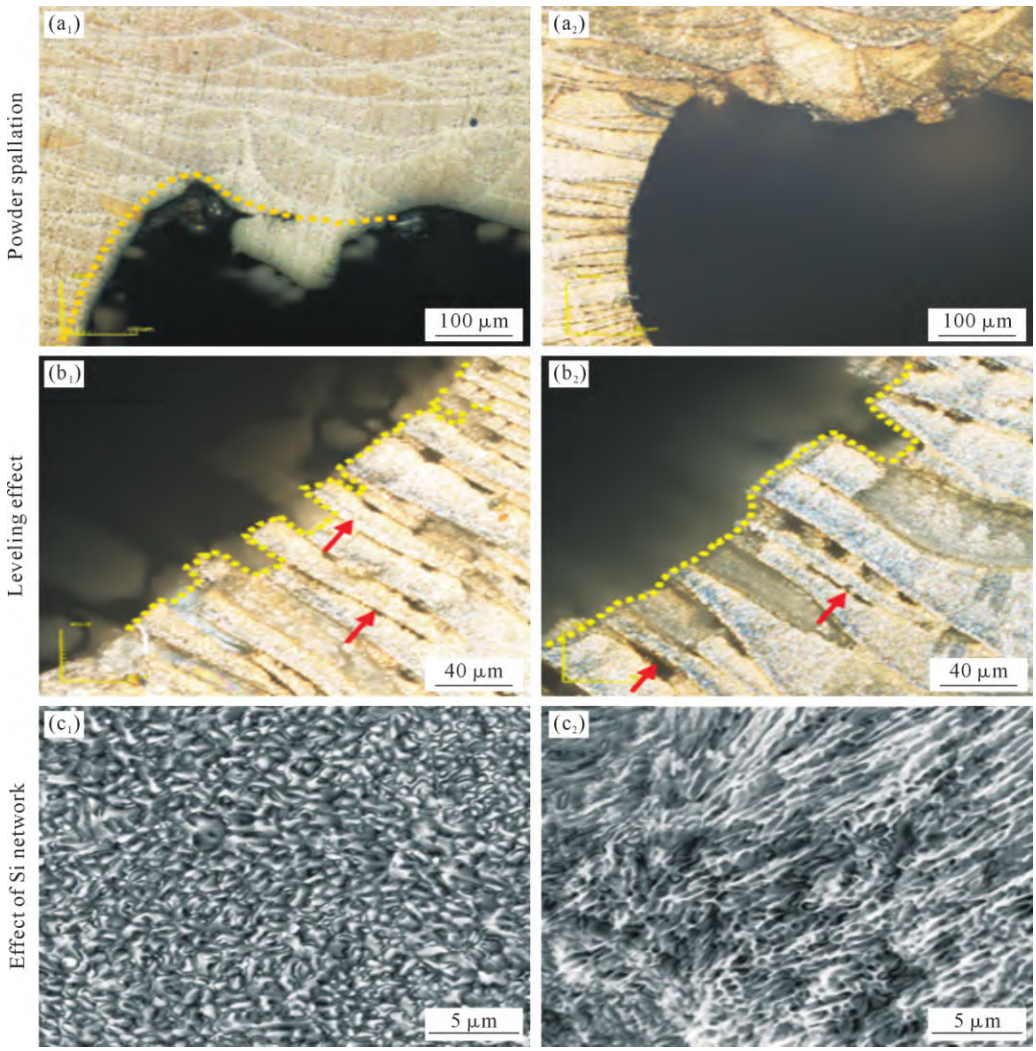


图 7 AlSi10Mg 流道化学抛光过程中的特殊腐蚀行为：(a_1) 未抛光时纵截面左上角形貌；(a_2) 抛光 1 h 后纵截面左上角形貌；(b_1) 抛光 1 h 后纵截面右下角形貌；(b_2) 抛光 2 h 后纵截面右下角形貌；(c_1) 抛光 2 h 时网状硅相区的腐蚀形貌；(c_2) 抛光 2 h 时粗化硅相区的腐蚀形貌

Fig.7 Characteristic corrosion features during chemical polishing of AlSi10Mg flow channels: (a_1) morphology of the upper-left region in the as-fabricated state; (a_2) morphology of the upper-left region after 1 h of polishing; (b_1) morphology of the lower-right region after 1 h of polishing; (b_2) morphology of the lower-right region after 2 h of polishing; (c_1) corrosion morphology of the network-like Si phase region after 2 h of polishing; (c_2) corrosion morphology of the coarsened Si phase region after 2 h of polishing

中原有凹坑基本相当。该循环起伏变化归因于抛光液与铝反应生成 $NaAlO_2$ 黏性层，该层附着于合金表面：凸起处黏性层较薄，凹陷处则较厚。由于黏性层阻碍离子扩散，凸起处离子迁移速率更高，化学反应更为迅速，因而优先发生溶解[30]。此机制也解释了当悬垂面抛光至主体部分后，表面粗糙度数值在小幅波动中保持基本稳定的现象。

此外，图 $7c_1$ 和 c_2 分别为熔池内部和熔池边界处的微观腐蚀形貌。可见熔池内部硅相呈连续细密的网状结构，而熔池边界处硅相明显粗化，网状结构遭到破坏。对比可知，硅相网络耐蚀性优于铝基体，熔池边界处腐蚀后基本仅残留粗化的硅相骨架。由于粗化硅相对铝基体的覆盖不完整，其对基体的保护作用显著减弱，导致该区域在腐蚀过程中出现局部纵向加深[31]。而网状硅相结构则有效保护了其所包裹的铝基体，使整体腐蚀更为均匀。由此推断，熔池边界处因硅相粗化破坏了连续网状结构，其腐蚀速率高于熔池内部。图 $7b_1$ 和 b_2 中的红色箭头所示即为熔池边界，由于流道口附近的纵表面被流出的抛光液浸没，熔池边界腐蚀速率快于熔池内部，于是形成边界先被向下溶解的现象。因此，宏观尺度的粉末剥落、介观尺度的整平作用与微观尺度的硅相网络保护效应协同主导了不同抛光时间下表面质量的演变过程。

3 结论

(1)悬垂面表面粗糙度随抛光时间的延长呈先急剧下降后逐渐趋于稳定的趋势，其最低值较初始状态降低了约 82%，表面质量得到大幅提升。

(2)在抛光初期(1 h 内)，由于部分粘结粉末、未

中国知网 https://www.cnki.net

熔融粉末和松散粉末等缺陷的去除使该阶段的表面粗糙度数值下降最为显著；随后在抛光 1~3 h 阶段，沉降熔池的持续溶解进一步大幅降低粗糙度数值；至 3~4 h 阶段，沉降熔池已基本溶解完全；此后继续延长抛光时间，仅表现为进一步的整平效果，表面粗糙度数值基本保持稳定。

(3)综合表面质量与尺寸精度对比，根据流道尺寸容差具体选定，最佳抛光时间为 5~7.5 h，可以避免因过度追求有限的表面质量提升而显著牺牲几何尺寸精度。

(4)AlSi10Mg 合金流道化学抛光过程中的腐蚀行为不是自上往下的均匀溶解，存在特殊的腐蚀行为。宏观尺度的粉末剥落、介观尺度的整平作用与微观尺度的硅相网络保护效应协同主导了不同抛光时间下表面质量的演变过程。

参考文献：

[1] THIJS L, KEMPEN K, KRUTH J P, VAN HUMBEECK J. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder[J]. Acta Materialia, 2013, 61(5): 1809-1819.

[2] 龚弟亮，卞华康，潘登，徐圣航，杨鑫，汤慧萍. 基于粉末床技术的增材制造 AlSi10Mg 合金研究进展[J]. 中国有色金属学报，2024, 34(4): 1091-1112.
GONG D L, BIAN H K, PAN D, XU S H, YANG X, TANG H P. Research advances in powder bed fusion additive manufacturing AlSi10Mg alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(4): 1091-1112.

[3] MINHAS N, SHARMA V, BHADAURIA S S. A review on weldability and corrosion behaviour of L-PBF printed AlSi10Mg alloy [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2023, 62(2): 262-294.

[4] 赵娟，邢蕊，李文瑛，李辰，仲莹莹，朱琳. 热处理工艺对增材制造 AlSi10Mg 合金组织与力学性能的影响 [J]. 铸造技术，2021, 42(2): 85-89.
ZHAO J, XING R, LI W Y, LI C, ZHONG Y Y, ZHU L. Effect of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of additive manufacturing AlSi10Mg[J]. Foundry Technology, 2021, 42(2): 85-89.

[5] 赵晓明，齐元昊，于全成，林鑫，巩维艳，祁俊峰. AlSi10Mg 铝合金 3D 打印组织与性能研究[J]. 铸造技术，2016, 37(11): 2402-2404.
ZHAO X M, QI Y H, YU Q C, LIN X, GONG W Y, QI J F. Study on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy produced by 3D printing[J]. Foundry Technology, 2016, 37(11): 2402-2404.

[6] 洛毅，汪志太，胡耀政，徐志锋，刘奋成，张守银，刘丰刚. B_4C/AlSi10Mg 复合材料激光选区熔化成形工艺及性能研究[J]. 铸造技术，2024, 45(8): 793-801.
LUO Y, WANG Z T, HU Y Z, XU Z F, LIU F C, ZHANG S Y, LIU F G. Study of the processes and properties of B_4C/AlSi10Mg composites formed via selective laser melting[J]. Foundry Technology, 2024, 45(8): 793-801.

[7] ZHANG C, WANG S, LI J, ZHU Y, PENG T, YANG H Y. Additive manufacturing of products with functional fluid channels: A review[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101490.

[8] 王磊，邬宇梁，赵纪元，卢秉恒. 增材制件内流道精整加工技术研究进展[J]. 中国机械工程，2023, 34(7): 757-769.
WANG L, WU Y L, ZHAO J Y, LU B H. Research progresses of finishing technology for inner channel of additive manufacturing parts[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(7): 757-769.

[9] 王硕，宋胜利. 增材制造技术及其应用现状分析[J]. 科学技术创新，2020(17): 170-171.

[10] LOUVIS E, FOX P, SUTCLIFFE C J. Selective laser melting of aluminium components [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(2): 275-284.

[11] 郭志. SLM 增材制造微流道内孔磨粒流抛光工艺研究[D]. 长春：长春理工大学，2021.
GUO Z. Study on abrasive flow polishing process of micro channel inner hole in SLM additive manufacturing[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.

[12] MEDYA S, YEO S H. Enhancement of acoustic cavitation streaming: A study on surface finishing of additively manufactured components[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2024, 53: 1-16.

[13] 高航，彭灿，王宣平. 航空增材制造复杂结构件表面光整加工技术研究及进展[J]. 航空制造技术，2019, 62(9): 14-22.
GAO H, PENG C, WANG X P. Research progress on surface finishing technology of aeronautical complex structural parts manufactured by additive manufacturing[J] Aerinautical Manufacturing Technology, 2019, 62(9): 14-22.

[14] FU J, LI H, SONG X, FU M W. Multi-scale defects in powder-based additively manufactured metals and alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 122: 165-199.

[15] 赵鑫. 3D 打印钛合金内流道复合抛光方法及机理研究[D]. 西安：西安理工大学，2021.
ZHAO X. Study on compound polishing method and mechanism of 3D printing titanium alloy inner channel[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.

[16] WILDGOOSE A J, THOLE K A, SANDERS P, WANG L. Impact of additive manufacturing on internal cooling channels with varying diameters and build directions[J]. Journal of Turbomachinery, 2021, 143(7): 071003.

[17] 张格，王建宏，张浩. 金属粉末选区激光熔化球化现象研究[J]. 铸造技术，2017, 38(2): 262-265.
ZHANG G, WANG J H, ZHANG H. Research progress of balling phenomena in selective laser melting [J]. Foundry Technology, 2017, 38(2): 262-265.

[18] DAVOODI F, TAGHIAN M, CARBONE G, SABOORI A, LULIANO L. An overview of the latest progress in internal surface finishing of the additively manufactured metallic components [J]. Materials, 2023, 16(10): 3867.

[19] BELLO K A, KANAKANA-KATUMBA M G, MALADZHI R W. A review of additive manufacturing post-treatment techniques for surface quality enhancement [J]. Procedia CIRP, 2023, 120: 404-

中国知网 https://www.cnki.net

409.

[20] 李惠,李微娜,祁俊峰,李敬洋,张建超,张建勋. SLM 增材制造铝合金和高温合金微流道磨粒流抛光工艺研究[J]. 材料开发与应用,2024, 39(2): 1-8, 16.
LI H, LI W N, QI J F, LI J Y, ZHANG J C, ZHANG J X. Study on abrasive flow polishing process of aluminum alloy and high temperature alloy microchannels by SLM additive manufacturing [J]. Development and Application of Materials, 2024, 39(2): 1-8, 16.

[21] 杜炳志,漆红兰. 电化学抛光技术新进展[J]. 表面技术,2007(2): 56-58.
DU B Z, QI H L. Development of electrochemical polishing technology[J]. Surface Technology, 2007(2): 56-58.

[22] MALEKI E, BAGHERIFARD S, BANDINI M, GUAGLIANO M. Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities [J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101619.

[23] HUANG C A, CHEN Y C, CHANG J H. The electrochemical polishing behavior of the Inconel 718 alloy in perchloric-acetic mixed acids[J]. Corrosion Science, 2008, 50(2): 480-489.

[24] 徐善坤. 铝合金表面碱性化学抛光的研究与应用[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2017.
XU S K. Research and application of alkaline chemical polishing on aluminum alloys surface [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2017.

[25] 郭美甜,张晓珊,孙甜,张云,曹经倩,邵志松. 6061 铝合金碱性抛光液及工艺的研究[J]. 科技与创新,2016(19): 75-76.

[26] 诸荣孙. 铝合金碱性抛光液及其工艺条件[J]. 中南工业大学学报(自然科学版),2001(2): 154-156.
ZHU R S. Alkali chemical polishing solutions for aluminum alloys and the technological conditions [J]. Journal of Central South Unicersity(Science and Technology), 2001(2): 154-156.

[27] 韩基泰. 面向表面成形质量的内置流道钛合金结构件 SLM 工艺优化研究[D]. 无锡:江南大学,2020.
HAN J T. A study on the surface quality of the SLMed titanium alloy inner structure part[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.

[28] 吴利芸. 选区激光熔化成形 GNPs/AlSi10Mg 复合材料组织性能研究[D]. 太原:中北大学,2021.
WU L Y. Study on microstructure and properties of GNPs/AlSi10Mg aluminum matrix composites using selective laser melting [D]. Taiyuan: North University of China, 2021.

[29] SANDELL V, NILSSON J, HANSSON T, ÅKERFELDT P, ANTTI M L. Effect of chemical post-processing on surfaces and sub-surface defects in electron beam melted Ti-6Al-4V [J]. Materials Characterization, 2022, 193: 112281.

[30] 彭泽清. 2A12 铝合金无烟化学抛光研究[D]. 北京:北京化工大学,2020.
PENG Z Q. Research on smokeless chemical polishing of 2A12 alluminum alloy [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.

[31] CHEN H W, ZHANG C Q, JIA D, WELLMANN D, LIU W. Corrosion behaviors of selective laser melted aluminum alloys: A review[J]. Metals, 2020, 10(1): 102.

(责任编辑:宫文婧)

中国知网 https://www.cnki.net