

航空航天装备

3D 打印铝合金液冷板在冷却液中的静态腐蚀

雷涛^{1*}, 刘秀利¹, 陈绍高², 郑兴文^{2,3}

(1.中国电子科技集团公司第十研究所, 成都 610036; 2.四川轻化工大学 化学与环境工程学院, 四川 自贡 643000; 3.材料腐蚀与防护四川省重点实验室, 四川 自贡 643000)

摘要: 目的 对比 3D 打印铝合金液冷板材料经不同表面处理后在冷却液中的静态腐蚀情况, 并预测静态腐蚀速率。方法 通过 pH 值测试、腐蚀表面形貌分析来监测冷却液和铝合金的变化, 通过电化学方法测试样件的腐蚀动力学参数, 通过质量损失试验测量材料的腐蚀速率和年腐蚀深度, 通过 EDS 分析腐蚀产物。结果 所有试验组冷却液 pH 均整体呈下降趋势。在试样表面可以观测到明显的腐蚀现象, 集中发生于试样表面的缺陷位置。不同表面处理的样件, 其腐蚀速率不同, 差异最大可达 16 倍。冷却液中的有效缓蚀成分参与了试样表面腐蚀产物膜的形成, 在表面沉积了 P、Ca 等元素。结论 3D 打印成形铝合金材料在冷却液中的年腐蚀深度整体较小, 其耐蚀性良好, 进行液态磨粒抛光或酸洗处理能降低研究材料在冷却液中的静态腐蚀速率。

关键词: 3D 打印; 铝合金; 液冷板; 表面处理; 静态腐蚀; 腐蚀速率

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)02-0065-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.02.009

Static Corrosion of Aluminum Alloy Liquid Cooling Plate Made by 3D Printing in Coolant

LEI Tao^{1*}, LIU Xiuli¹, CHEN Shaogao², ZHENG Xingwen^{2,3}

(1. The 10th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Sichuan Zigong 643000, China; 3. Key Laboratory of Material Corrosion and Protection of Sichuan Province, Sichuan Zigong 643000, China)

ABSTRACT: The work aims to compare the static corrosion behavior of 3D printed aluminum alloy liquid cooling plates subject to different surface treatments in the coolant, and predict their static corrosion rate. The changes in the coolant and aluminum alloy were respectively monitored through pH value testing and corrosion surface morphology analysis, the corrosion kinetics parameters of the samples were measured through electrochemical methods, the corrosion rate and annual corrosion depth of the materials were obtained through weight loss experiments, and the corrosion products were analyzed through EDS. The pH of the coolant in all experimental groups showed an overall downward trend and the corrosion was clearly observed on the sample surface and concentrated at the defect location of the surface of sample. The corrosion rate of samples with different surface treatments varied, with a maximum difference of 16 times. The effective corrosion inhibitive components in the coolant participated in the formation of corrosion product films on the sample sur-

收稿日期: 2023-09-24; 修订日期: 2023-11-20

Received: 2023-09-24; Revised: 2023-11-20

引文格式: 雷涛, 刘秀利, 陈绍高, 等. 3D 打印铝合金液冷板在冷却液中的静态腐蚀[J]. 装备环境工程, 2024, 21(2): 65-72.

LEI Tao, LIU Xiuli, CHEN Shaogao, et al. Static Corrosion of Aluminum Alloy Liquid Cooling Plate Made by 3D Printing in Coolant[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(2): 65-72.

*通信作者 (Corresponding author)

face, depositing elements such as P and Ca on the surface. It is concluded that the annual corrosion depth of 3D printed aluminum alloy material in the coolant is relatively low, and its corrosion resistance is good, and liquid abrasive polishing or acid washing treatment can reduce the static corrosion rate of the investigated material in the coolant.

KEY WORDS: 3D printing; aluminum alloy; liquid cooling plate; surface treatment; static corrosion; corrosion rate

液冷板是以水或其他有机冷却剂（如乙二醇溶液）为冷却介质，并使冷却介质在液冷板中流动来带走电子设备产生的热量的散热组件，能够满足较高热流密度的散热需求，在航空航天及通信等领域应用广泛^[1-3]。液冷板通常使用铝合金材料，因其具有密度低、比强度高、导热导电性能好等优点，近几年，国内外有部分研究学者开始尝试使用 3D 打印新工艺技术成形铝合金液冷板^[4-11]，并开展了相关测试（包括成形材料的力学性能、导热性能、液冷板流阻、耐压、高低温、温度冲击、湿热、盐雾、振动试验等），肯定了 3D 打印在成形微通道等复杂流道液冷板方面的制造优势，验证了 3D 打印铝合金液冷板的相关性能。

电子设备液冷板一般都采用 65 号冷却液（主要由乙二醇和蒸馏水组成，并添加了少量防腐、防氧化、防泡沫等综合添加剂）作为冷却介质^[12]，执行 GJB 6100—2007 的要求，具有比热容大、低温性能与防腐性能优异的特点。关于铝合金液冷板在乙二醇冷却液中的腐蚀研究，有研究学者研究了 6063、6061、3A21 等铝合金^[13-17]及 BAl86SiMg 钎料、铝硅镁 4004 钎料^[18-19]在乙二醇冷却液中的腐蚀行为。然而，3D 打印成形的铝合金液冷板采用了 AlSi10Mg 材料，该材料在液冷板上的应用属于新材料，关于 3D 打印 AlSi10Mg 铝合金材料在乙二醇冷却液中的腐蚀研究存在空白。此外，由于激光选区熔化 3D 打印成形 AlSi10Mg 材料过程中，存在着因金属粉末熔化不充分而形成的形状不规则的“不充分熔合”缺陷，以及因熔体卷入或析出的气体来不及逸出而形成的微气孔现象^[20]（如图 1 所示），致使成形的 AlSi10Mg 材料致密度降低（激光选区熔化成形 AlSi10Mg 材料的致密度受工艺参数影响，较好的致密度可达 99.9%^[21]），造成了样件中的微孔和裂纹等缺陷，这些缺陷可能是导致腐蚀产生与加剧的主要因素^[22]。因此，本文比较研究了不同表面处理方法对 3D 打印成形铝合金腐蚀行为的影响。

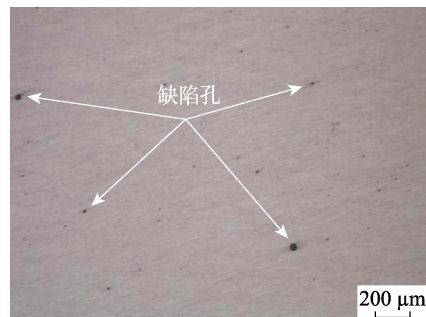


图 1 3D 打印成形 AlSi10Mg 材料的 OM 图片
Fig.1 OM image of 3D printing forming AlSi10Mg material

1 试验

1.1 材料和样件处理

3D 打印成形液冷板过程不同于真空钎焊等传统工艺，不需要焊料，不需要多零件组合焊接成形。因此，试样可通过激光选区熔化 3D 打印直接成形，尺寸为 40 mm×40 mm×3 mm，材料为 AlSi10Mg（成分见表 1），成形后使用线切割将试样与成形平台分离。对样件按照液冷板流道表面处理方式分别进行了 5 种表面处理：清洗——使用蒸馏水持续 3 min 冲洗样件各个表面；液态磨粒抛光——经磨粒流体抛光机 SMKS-XF608D 使用特殊改性磨料持续 10 min 抛光样件各个表面，再用蒸馏水清洗干净；酸洗——将样件在酸蚀处理溶液（质量分数分别为 40% 的氢氟酸溶液与 60% 的硝酸溶液，体积配比 1:2）中浸泡 2 min 后，取出用蒸馏水清洗干净；酸洗+电镀——将样件在酸蚀处理溶液中浸泡 2 min 后，取出用蒸馏水清洗干净，再将样件进行化学电镀处理；激光微纳处理+超润滑——使用纳秒激光诱导样件表面微纳复合结构形成^[23]，再将其浸泡在氟硅烷乙醇溶液中修饰，降低其表面自由能，使铝合金表面获得耐腐蚀超疏水膜层。试验前，所有的试验样件均使用蒸馏水进行了冲洗。

表 1 AlSi10Mg 材料成分（质量分数，%）
Tab.1 Material composition of AlSi10Mg (mass fraction, %)

Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Zn	Cu	Ni	O	Al
9.0~11.0	0.20~0.45	≤0.55	≤0.45	≤0.15	≤0.10	≤0.05	≤0.05	≤0.08	Bal.

1.2 方法

采用挂片法将不同表面处理的样件（每种 3 件）分别悬挂浸泡于长城 AF65 航空冷却液中，进行静态腐蚀试验。通过 SYP-II 型油浴装置恒温加热，温度

设定为 88 ℃，试验时间为 180 d，试验平台如图 2 所示。

腐蚀试验参照 SH/T 0085—1991《发动机冷却液腐蚀测定法（玻璃器皿法）》和 ASTM D1384-05e1《玻璃器皿中发动机冷却剂腐蚀试验的标准试验方法》执行，同时参考 JB/T 7901—2001《金属材料实验室均

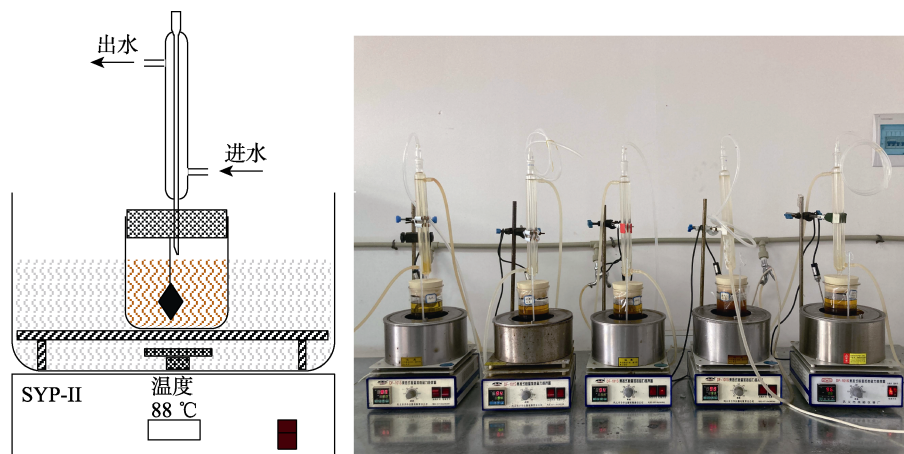


图 2 静态腐蚀试验平台

Fig.2 Test platform of static corrosion

匀腐蚀全浸试验方法》和 GB/T 25147—2010《工业设备化学清洗中金属腐蚀率及腐蚀总量的测试方法重量法》，测定介质中材料的腐蚀速率，对材料的耐腐蚀性能进行评价。

浸泡腐蚀试验的过程中，参照 SH/T 0069—1991 和 ASTM D1287—91，对冷却液的 pH 值进行测定，每 30 d 监测一次 pH 值。每 30 d 取每种状态的样件，采用金相显微镜和扫描电子显微镜 (SEM) 观测其表面腐蚀形貌，对试样的腐蚀类型进行分析。试验 180 d 后，对清除腐蚀产物前的试样依次进行 SEM-EDS 测定，确定腐蚀产物的成分。通过瑞士万通 ECO IC 离子色谱仪测定冷却液中的乙二醇氧化产物，以及铝离子、镍离子的浓度，进而对材料在介质中的腐蚀行为和腐蚀机理进行分析。

通过式 (1)、(2) 计算腐蚀速率 v 和年腐蚀深度 v_p ：

$$v = \frac{m_1 - m_2}{S \cdot t} \quad (1)$$

$$v_p = 8.76 \times \frac{v}{\rho} \quad (2)$$

式中： v 为腐蚀速率， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ； v_p 为年腐蚀深度， mm/a ； m_1 和 m_2 分别为试验前后试样的质量； S 为试样的表面积， m^2 ； t 为试验时间， h ； ρ 为试样的密度， g/cm^3 。

电化学试验采用上海辰华 CHI660E 电化学工作站进行，工作电极为试验试样，暴露面积为 1 cm^2 ，参比电极为饱和甘汞电极 (SCE)，辅助电极为铂片电极。先测试 30 min 开路电位后再进行极化曲线测试，扫描速率为 0.5 mV/s ，极化范围为相对于开路电位 $\pm 250 \text{ mV}$ 。

2 结果及分析

2.1 冷却液的 pH 值和氧化产物分析

冷却液的 pH 值随试验时间的变化曲线如图 3 所示。试验前 60 d，pH 值下降较缓慢，随着试验时间

的增加，所有试验组冷却液的 pH 值均整体呈明显下降趋势，最后在试验 180 d 时有所上升。初步推测，这可能是由 2 个方面的原因造成的。第一个是冷却液在持续的高温下，可能会发生氧化，生成乙醇酸、乙醛酸、乙二酸等酸性物质，致使冷却液的 pH 值降低；另外一个是由于腐蚀反应的发生，冷却液中控制溶液 pH 值的缓冲组分被消耗。图 3 也显示，不同制造工艺样块静态腐蚀试验对应冷却液 pH 值的下降幅度不同，清洗样块对应的冷却液 pH 下降最慢，其次是酸洗试样，而酸洗+镀镍和激光微纳处理+超润滑对应冷却液下降的速度最快。这种差异可能反映了不同表面处理的铝合金在冷却液中腐蚀行为的差异。从图 4 可以看出，试验后冷却液的颜色发生了明显变化。

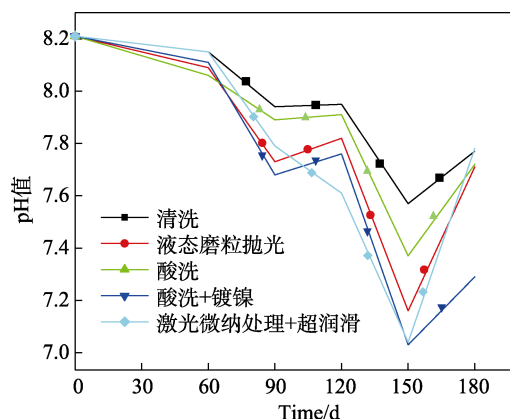


图 3 冷却液 pH 值变化曲线

Fig.3 pH value change curve of coolant

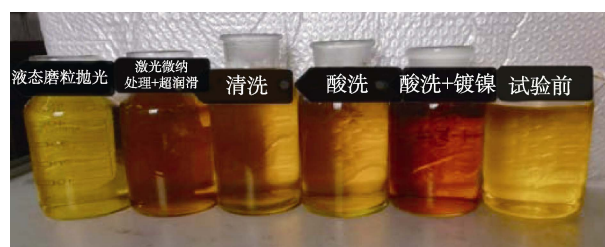


图 4 试验前后冷却液的颜色

Fig.4 Color of coolant before and after test

为了进一步说明乙二醇在持续加热的过程中是否发生氧化,表2给出了试验前和试验后乙二醇冷却液的离子色谱检测结果。表2显示,在88℃下,经过180 d的持续加热后,在各组冷却液中均检出了乙醇酸和乙二酸。不同试验组别中,酸的含量不同,这也反映了不同试样腐蚀行为的差异。可以发现,清洗样件对应的冷却液中,酸的浓度最低,酸洗+镀镍对应的冷却液中,酸的含量最高,这与pH值的变化规律相吻合。乙二醇氧化产物的生成,以及腐蚀反应过程中储备碱度的消耗,使得冷却液的pH值降低。

表2 冷却液氧化产物阴离子色谱分析结果

Tab.2 Anion chromatographic analysis results of oxidation products in coolant

冷却液	时间/d	乙醇酸质量 浓度/(mg·L ⁻¹)	乙二酸质量 浓度/(mg·L ⁻¹)
试验前	0	ND	ND
清洗	180	30.8	0.6
酸洗	180	44.1	0.8
液态磨粒抛光	180	45.6	1.2
激光微纳处理+ 超润滑	180	32.5	0.2
酸洗+镀镍	180	76.7	3.7

2.2 腐蚀形貌

试验前后试样表面的SEM形貌如图5所示。清洗样件存在明显的膜层以及大颗粒状物质,试样表面存在微孔和裂纹等缺陷,这些薄弱环节可能是腐蚀优先发生的区域;试验后,观测到明显的沉积现象,沉积的膜层并不完整,且存在许多裂纹。经液体磨粒抛光处理的试样,表面平整,但是仍然存在一些细微的微孔和裂纹。随着试验的进行,表面缺陷处发生了明显的腐蚀现象。经酸洗处理的样件,去除了表面易溶解的金属铝相,残留的难溶解异相粒子在铝合金表面呈一定方向排列,铝合金表面似沟壑纵横一般。随着试验的进行,表面缺陷处发生了明显的点蚀现象,异相粒子的边缘由于腐蚀而变得模糊。经激光微纳处理+超润滑处理的试样,表面形成了致密的多孔结构,但存在孔径大的圆孔缺陷,表面也有颗粒状物质存在。随着试验的进行,试样表面发生了腐蚀,特别是在孔缺陷处,形成了明显的点蚀坑。经酸洗+镀镍处理的样件,表面形成了致密的球状沉积物,沉积物之间存在明显的间隙,球状颗粒物的表面也存在一些非常小的微孔,而这些缺陷是腐蚀优先发生的部位。随着试验的进行,球状颗粒物表面的微孔和间隙不断被腐蚀,形成了明显的腐蚀坑,并导致了颗粒物的脱落。

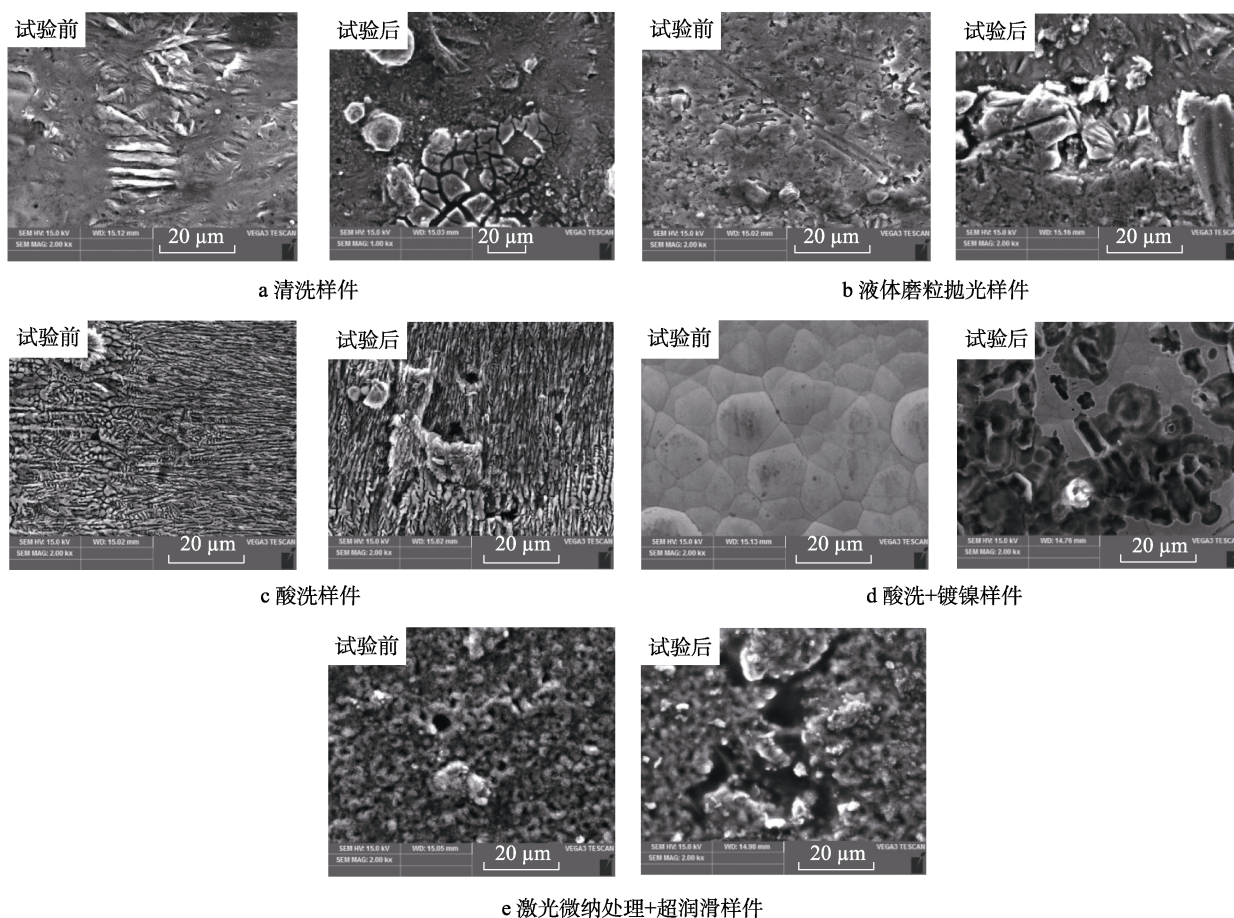


图5 试验后样件的SEM腐蚀形貌

Fig.5 SEM corrosion morphology of sample after test: a) cleaning sample; b) liquid abrasive polishing sample; c) acid pickling sample; d) acid pickling & nickel plating sample; e) laser micro-nano processing & superlubricated sample

随着试验时间的延长, 镀层破损面积逐渐增大, 部分区域暴露出试样基体。

2.3 腐蚀速率

试验 180 d 后, 清洗、酸洗、液态磨粒抛光和激光微纳处理+超润滑试样的质量增大, 意味着存在腐蚀质量增加。这是由于乙二醇冷却液呈弱碱性, 腐蚀反应的阴极反应仍然是吸氧反应, 生成的 OH⁻可以与阳极反应生成的 Al³⁺结合, 形成 Al(OH)₃ 及 Al₂O₃ 的水合物。这些腐蚀产物以及 Al³⁺与冷却液中的缓蚀成分形成的膜层可沉积和吸附在铝合金表面, 使试验后试样的质量增加。特别是在高温条件下, 会加速 Al(OH)₃ 腐蚀产物的凝聚和脱水, 有利于在试样表面形成致密的膜层。酸洗+镀镍试样在试验后的质量减小, 是由于试样的腐蚀主要发生在镀层, 腐蚀的发生而导致镀层阳极溶解或从基体脱落, 也可能两者兼有, 这也被图 5 的 SEM 测试结果所证实。因此, 用腐蚀质量增加速率并不能反映试样腐蚀速率的大小。

阴极反应: O₂+2H₂O+4e⁻=4OH⁻

阳极反应: Al-3e⁻=Al³⁺

腐蚀反应: 4Al+3O₂+6H₂O=4Al(OH)₃=Al₂O₃·xH₂O

为此, 按照 SH/T 0085—1991 发动机冷却液腐蚀测定法, 将试样浸泡在 80 ℃三氧化铬和磷酸的混合溶液中 5 min, 以清除试样表面的腐蚀产物, 计算试样的腐蚀质量损失速率, 结果见表 3。从表 3 可以看出, 经三氧化铬和磷酸的混合溶液处理后, 所有试样均表现为腐蚀质量损失。其中, 激光微纳处理+超润滑铝合金试样的腐蚀速率最大, 这可能有 2 个方面的原因。第一个是激光微纳处理使试样表面形成了微纳结构, 试样的表面积增大, 使得表面铝氧化产物的量增加, 而且文献[23-24]指出, 激光微纳处理后, 试样表面的碳元素含量增大; 第二个是超润滑表面一般由有机硅烷试剂修饰而成, 试样表面不可避免地存在易于氧化分解的有机物^[25], 这些均可能在三氧化铬和磷酸的混合溶液中被氧化分解, 导致其质量损失量较大。清洗、酸洗和液态磨粒抛光处理试样的腐蚀速率均较低, 其中酸洗处理的最低, 其次是液态磨粒抛光。

表 3 清除腐蚀产物后的静态腐蚀速率
Tab.3 Static corrosion rates after cleaning of corrosion product

处理工艺	质量损失量/g	腐蚀速率/(mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	年腐蚀深度/(μm·a ⁻¹)
清洗	0.004 4	0.279	0.906
液态磨粒抛光	0.002 9	0.184	0.596
酸洗	0.002 7	0.167	0.541
酸洗+镀镍	0.028 0	1.752	5.683
激光微纳处理+超润滑	0.043 3	2.720	8.824

2.4 极化曲线

不同表面处理的铝合金在冷却液中的 Tafel 曲线如图 6 所示, 由 Tafel 外推法拟合的电化学参数见表 4。由图 6 可知, 腐蚀电位受表面处理的影响较大, 相较于清洗和酸洗铝合金试样, 酸洗+镀镍和液态磨粒抛光处理后, 试样的腐蚀电位 (E_{corr}) 显著正移, 正移超过 100 mV。酸洗+镀镍试样的腐蚀电位正移是由于表面镍镀层的形成, 而液态磨粒抛光试样是由于抛光后试样表面更为均匀, 表面氧化膜缺陷更少, 耐蚀性能更好所致。激光微纳处理后, 腐蚀电位正移, 但并不明显。除了液态磨粒抛光试样相对于清洗试样的腐蚀电流密度明显减小外, 酸洗处理的影响较小, 而酸洗+镀镍和激光微纳处理+超润滑处理后, 试样的腐蚀电流密度反而增大, 这可能与试样表面存在缺陷有关。图 5 的 SEM 结果已证实处理后的试样表面并不完整, 存在明显的缺陷。另外, 商用的 AF65 航空冷却液含有缓蚀剂, 这也可能引起不同处理试样腐蚀行为的差异。同时可以发现, 极化曲线的测试结果与质量损失试验数据具有较好的一致性。

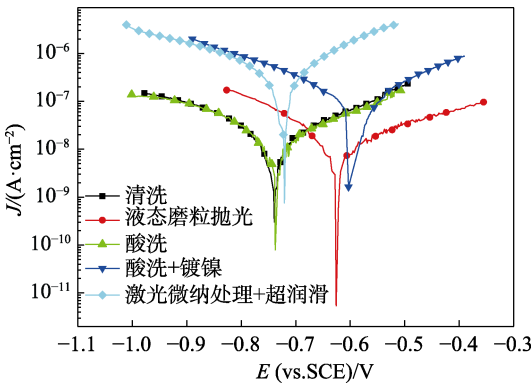


图 6 不同铝合金在冷却液中的 Tafel 曲线
Fig.6 Tafel curves of different aluminum alloys in coolant

表 4 Tafel 曲线拟合数据
Tab.4 Fitting results of Tafel curve

处理工艺	E _{corr} (vs.SCE)/V	J _{corr} / (μA·cm ⁻²)	β _a /mV	-β _c /mV
清洗	-0.739	0.009 83	132.1	138.93
液态磨粒抛光	-0.626	0.008 13	86.093	170.62
酸洗	-0.738	0.009 6	116.57	156.85
酸洗+镀镍	-0.603	0.050 1	72.866	152.39
激光微纳处理+超润滑	-0.721	0.222	132.16	149.89

2.5 腐蚀产物分析

以清洗样件为例, 随着试验时间的增加, P、Ca、Na 和 O 元素的含量先增大、后减小, 而 Al 元素的含量减小, C 元素的含量增大, 如图 7a、7b 所示, 这意味着铝合金表面腐蚀产物膜成分的变化。可以推

测, 在开始阶段, 由于乙二醇的氧化产物较少, 乙二醇冷却液中存在较充分的缓蚀剂和缓冲剂, 铝合金表面形成的膜层以铝的腐蚀产物和缓蚀沉淀膜为主。试验后期, 由于乙二醇氧化产物的增加, 以及冷却液中缓蚀剂和缓冲剂的消耗, 铝合金表面形成的膜层以乙二醇氧化产物-Al 及乙二醇-Al 为主。另外, 由于膜层厚度的增加, Al 元素的含量减少。液体磨粒抛光、酸洗和激光微纳处理+超润滑样件都如清洗样件一样, 随着试验进行, Al 元素的含量逐步减小, 并在试验后期稳定出现了 Na、P、Ca、C、O 等元素。有所区别的是, 液体磨粒抛光和激光微纳处理+超润滑样件在试验前的 O 含量较高, 其中激光微纳处理+超润滑样件的 O 含量最高。其原因应该是, 样件在液

态磨粒抛光和激光微纳处理过程中产生了较高比例的氧化物。酸洗样件在试验前的 Al 含量最高, 其原因是, 在氢氟酸溶液作用下, 样件表面的氧化物及难处理的 Si 元素都进行了溶解。

对于酸洗+镀镍的样件, 在试验前的试样表面检测到 Ni、P 和 C 元素, 没有检测到 Al 元素 (如图 7c、7d 所示), 说明试样表面形成了致密的 Ni-P 镀层。C 元素可能为镀层元素, 也可能为污染碳。在前 30 d, 试样表面元素的组成没有明显的变化, 意味着镀层仍然完整, 没有受到明显的腐蚀。经过 60 d 的试验后, 在试样表面检测到 O 元素, 意味着腐蚀的发生。此后, C 元素的含量增大, Ni 和 P 元素的含量减少, 以及 Na、Ca 元素的出现, 意味着腐蚀产物厚度的增加。

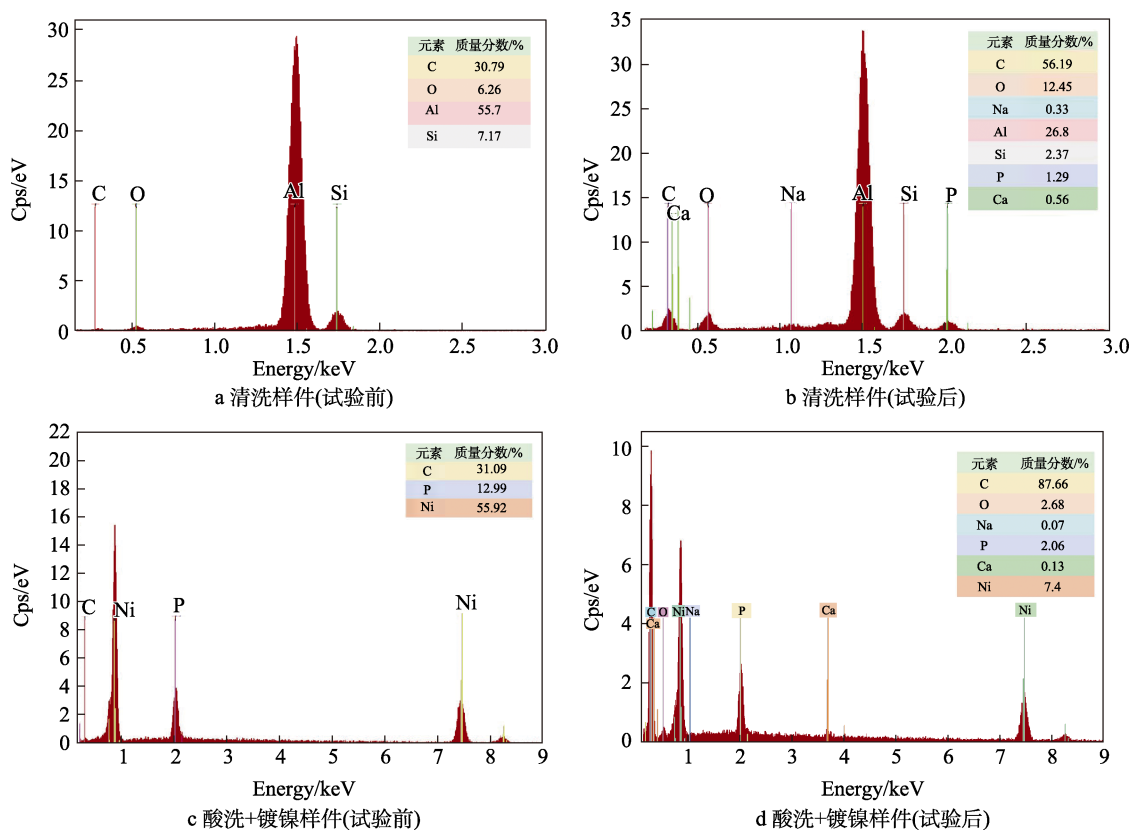


图 7 试验后试样表面的 EDS 图

Fig.7 EDS of sample after test: a) cleaning sample (before test); b) cleaning sample (after test); c) acid picking & nickeling sample (before test); d) acid picking & nickeling sample (after test)

进一步地, 利用离子色谱测定了冷却液中铝离子和镍离子的含量, 结果见表 5。表 5 显示, 试验后, 冷却液中铝离子的质量浓度低于 0.5 mg/L, 说明阳极反应生成的 Al^{3+} 主要以氧化物或氢氧化物存在^[26], 这与试样以腐蚀质量增加为主相对应。其中, 激光微纳处理+超润滑样件对应的冷却液中铝离子的浓度最高, 其次是清洗样件, 而酸洗+镀镍样件对应的冷却液中, 铝离子的浓度最小。但是, 在酸洗+镀镍样件对应冷却液中检测到了镍离子, 而且其浓度远高于 Al^{3+} 。这意味着酸洗+镀镍样件的腐蚀主要是镀层的腐蚀, 而基体腐蚀较少, 对铝合金的腐蚀起到了一定

表 5 冷却液中的铝离子、镍离子浓度
Tab.5 Concentration of aluminum ion and nickel ion in coolant

处理工艺	Al 离子质量浓度/(mg·L ⁻¹)	Ni 离子质量浓度/(mg·L ⁻¹)
清洗	0.29	\
液态磨粒抛光	0.14	\
酸洗	0.16	\
酸洗+镀镍	0.10	49.32
激光微纳处理+超润滑	0.42	\

的保护作用。除酸洗+镀镍样件对应的冷却液外, 溶液中铝离子浓度与表 3 中试样的腐蚀质量损失速率

具有很好的对应关系,说明可以通过冷却液中铝离子浓度的大小推测或判断铝合金试样腐蚀速率的大小。

3 结论

1) 表面处理方式对3D打印成形AlSi10Mg材料在乙二醇冷却液中的腐蚀行为产生了较明显的影响。

2) 对比几种表面处理方式,经清洗、液态磨粒抛光、酸洗处理的试样,其表面静态腐蚀速率较低。其中,由于液态磨粒抛光和酸洗处理降低了材料表面的差异性,其腐蚀速率低于清洗试样的。失重法测得的年腐蚀深度相对液冷板流道尺寸均较小,说明3D打印成形AlSi10Mg材料在调查的冷却液中具有较好的耐蚀性。

3) 酸洗+镀镍和对基材起到了一定的保护作用,但是在表面镀层沉积物之间的间隙及缺陷处产生了明显的腐蚀,随着镀层破损,腐蚀加剧。

参考文献:

- [1] 周海峰,邱颖霞,鞠金山,等. 电子设备液冷技术研究进展[J]. 电子机械工程, 2016, 32(4): 7-10.
ZHOU H F, QIU Y X, JU J S, et al. Research Development of Liquid Cooling Techniques for Electronic Equipment[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2016, 32(4): 7-10.
- [2] 赵三军,曹平,朱建龙,等. 综合模块化航空电子设备液冷散热研究进展[J]. 低温/制冷技术, 2022, 50(11): 93-98.
ZHAO S J, CAO P, ZHU J L, et al. Progress of Liquid Cooling Heat Dissipation for Integrated Modular Avionics[J]. Cryogenics/Refrigeration, 2022, 50(11): 93-98.
- [3] 谢春辉,赵毓毅. 液冷技术在通信行业中的应用及相关建议[J]. 通信电源技术, 2019, 36(S1): 158-161.
XIE C H, ZHAO Y Y. Application of Liquid Cooling Technology in Communication Industry and Related Suggestions[J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(S1): 158-161.
- [4] 雷涛,刘秀利,魏恺文. 基于3D打印的曲面共形天线液冷板设计与制造技术[J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(1): 42-47.
LEI T, LIU X L, WEI K W. Design and Manufacture Technology of Liquid Cooling Plate of Cambered Conformal Antenna Based on 3D Printing[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2022, 51(1): 42-47.
- [5] 周宇戈,陈加进,王明阳,等. 天线微小通道冷板金属3D打印成型工艺研究[J]. 电讯技术, 2017, 57(11): 1330-1334.
ZHOU Y G, CHEN J J, WANG M Y, et al. Research on Metal 3D Printing Process for Micro-Channel Cold Plate of Antenna[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(11): 1330-1334.
- [6] 翁夏. 两种工艺下某天线微通道冷板特性的实验研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 106-111.
WENG X. Experimental Study on a Certain Antenna's Microchannel Cold-Plates Machined by Two Techniques[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 106-111.
- [7] 赵亮,吴波,文雯,等. 3D打印微通道液冷板设计及实验研究[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(1): 104-106.
ZHAO L, WU B, WEN W, et al. Design and Experimental Study of 3D Printing Microchannel Liquid Cooling Plate[J]. Mechanical Research & Application, 2022, 35(1): 104-106.
- [8] 蔡艳召,黄胜利,李龙文. 3D打印铝合金液冷板性能研究[J]. 航空精密制造技术, 2019, 55(2): 44-46.
CAI Y Z, HUANG S L, LI L W. Research on Property of Al Alloy Liquid Cooling Plate Produced by 3D Printing Technologies[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2019, 55(2): 44-46.
- [9] 曹彦伟,姚达斌. 3D打印技术在水冷板加工中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(17): 107-109.
CAO Y W, YAO D B. Research and Application of 3D Printing Technology in Water Cold Plate Manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(17): 107-109.
- [10] HO J Y, LEONG K C. Cylindrical Porous Inserts for Enhancing the Thermal and Hydraulic Performance of Water-Cooled Cold Plates[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 863-878.
- [11] COVA P, SANTORO D, SPAGGIARI D, et al. CFD Modeling of Additive Manufacturing Liquid Cold Plates for more Reliable Power Press-Pack Assemblies[J]. Microelectronics Reliability, 2020, 114: 113734.
- [12] 吕洪涛. 电子设备散热技术探讨[J]. 电子机械工程, 2011, 27(5): 8-11.
LYU H T. Discussion on Cooling Techniques for Electronic Equipment[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2011, 27(5): 8-11.
- [13] 胡国高,杨俊,郑兴文. 铝制冷板在乙二醇冷却液中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(11): 871-876.
HU G G, YANG J, ZHENG X W. Corrosion Behavior of Aluminum Cold Plate in Ethylene Glycol Coolant[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(11): 871-876.
- [14] 王英芹,何卫平. 机载电子系统铝合金冷板-冷却液腐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 47-51.
WANG Y Q, HE W P. Corrosion Resistance of Aluminum Alloy Cold Plate-Cooling Liquid in Airborne Electronic System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 47-51.
- [15] 文陈,赵阔,白晶莹,等. 3A21铝合金焊接件在乙二醇-水基冷却液中的失效分析[J]. 金属热处理, 2019, 44(S1): 107-110.
WEN C, ZHAO K, BAI J Y, et al. Failure Analysis of 3A21 Aluminum Alloy Weldment in Ethylene Glycol-Water-Based Coolant[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(S1): 107-110.
- [16] LIU Y, CHENG Y F. Characterization of Passivity and

- Pitting Corrosion of 3003 Aluminum Alloy in Ethylene Glycol-Water Solutions[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2011, 41(2): 151-159.
- [17] 金星, 饶楚仪, 高立新, 等. 铝合金在乙二醇-水模拟冷却液中的腐蚀行为[J]. *材料保护*, 2011, 44(9): 15-17.
JIN X, RAO C Y, GAO L X, et al. Corrosion Behavior of Aluminum Alloy in Simulated Cooling Fluid Composed of Ethylene Glycol and Water[J]. *Materials Protection*, 2011, 44(9): 15-17.
- [18] 胡国高. 乙二醇冷却液中 $\text{BAI}_{86}\text{SiMg}$ 钎料的腐蚀行为研究[J]. *全面腐蚀控制*, 2015, 29(7): 62-65.
HU G G. Corrosion Behavior of $\text{BAI}_{86}\text{SiMg}$ Solder in Ethylene Glycol Coolant[J]. *Total Corrosion Control*, 2015, 29(7): 62-65.
- [19] 刘相, 高峰, 刘向阳, 等. 铝硅镁 4004 钎料对冷板与硅酸盐体系乙二醇冷却液腐蚀相容性的影响研究[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(5): 30-37.
LIU X, GAO F, LIU X Y, et al. Effects of 4004 Solder on Compatibility of Cold Plate and Silicate System Glycol Coolant[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(5): 30-37.
- [20] 刘梦娜, 魏恺文, 邓金凤, 等. 铝合金液冷板激光选区熔化快速成形工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1314002.
LIU M N, WEI K W, DENG J F, et al. Selective Laser Melting Rapid Forming Technology of Aluminum Alloy Liquid Cold Plate[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1314002.
- [21] 张文奇, 朱海红, 胡志恒, 等. AlSi10Mg 的激光选区熔化成形研究[J]. *金属学报*, 2017, 53(8): 918-926.
ZHANG W Q, ZHU H H, HU Z H, et al. Study on the Selective Laser Melting of AlSi10Mg [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(8): 918-926.
- [22] 魏立艳. 微观组织结构对铝及铝合金腐蚀行为的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
WEI L Y. The Effect of Microstructures on the Corrosion Behaviors of Aluminum and Aluminum Alloy[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [23] 刘少军. 纳秒激光诱导铝板表面微纳复合结构及浸润性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
LIU S J. Study on Micro-Nano Structures and Wettability of Aluminum Surfaces Induced by Nanosecond Laser[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017.
- [24] LI X H, YUAN C H, YANG H D, et al. Morphology and Composition on Al Surface Irradiated by Femtosecond Laser Pulses[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(13): 4344-4349.
- [25] 王亮. 7075 铝合金超润滑表面的制备与防覆冰性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
WANG L. Preparation of Super-Lubricated Surface of 7075 Aluminum Alloy and Study on Anti-Icing Performance[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [26] NIU L, CHENG Y F. Electrochemical Characterization of Metastable Pitting of 3003 Aluminum Alloy in Ethylene Glycol-Water Solution[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(20): 8613-8617.