

引文格式: 李紫杨, 吴松全, 杨义, 等. 激光选区熔化 TC4 合金在 HF-H₂O₂ 体系的化学抛光研究 [J]. 航空制造技术, 2023, 66(11): 84-89.

LI Ziyang, WU Songquan, YANG Yi, et al. Study on chemical polishing of selective laser melted TC4 alloy in HF-H₂O₂ [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(11): 84-89.

激光选区熔化 TC4 合金在 HF-H₂O₂ 体系的化学抛光研究*

李紫杨¹, 吴松全¹, 杨义¹, 王 皓¹, 黄爱军²

(1. 上海理工大学, 上海 200093;

2. Monash University, Clayton VIC 3800, Australia)

[摘要] 采用 HF-H₂O₂ 溶液对激光选区熔化 TC4 合金进行化学抛光。以抛光前、后试样表面的形貌、粗糙度、光泽度、失重和减薄率为指标, 探究抛光时间、H₂O₂ 浓度对样品表面抛光效果的影响。结果表明, 随抛光时间增加, 粗糙度逐渐降低, 光泽度、失重率和减薄率逐渐提高; 随 H₂O₂ 浓度增大, 粗糙度先降低后增大, 光泽度、失重率和减薄率则先提高后降低。其中, 在 HF/H₂O₂ 体积比 1:5、时间 8 min 时, 钛合金表面的抛光效果较好, 试样表面粘附的粉末完全去除, 表面粗糙度 R_a 达到 $(3.5 \pm 0.3) \mu\text{m}$ 、表面光泽度达到 $(80.3 \pm 0.7) \text{GU}$, 相对于打印态表面 (R_a $(13.3 \pm 0.8) \mu\text{m}$ 、光泽度 $(0.9 \pm 0.3) \text{GU}$) 显著提升。同时也探讨了钛合金在 HF-H₂O₂ 体系的化学抛光机理。

关键词: 钛合金; 激光选区熔化 (SLM); 化学抛光; 表面粗糙度; 光泽度

Study on Chemical Polishing of Selective Laser Melted TC4 Alloy in HF-H₂O₂

LI Ziyang¹, WU Songquan¹, YANG Yi¹, WANG Hao¹, HUANG Aijun²

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Monash University, Clayton VIC 3800, Australia)

[ABSTRACT] The selective laser melted TC4 alloy has been chemical polished in HF-H₂O₂ solutions. The effects of chemical polishing time and H₂O₂ concentration on the surface morphology, roughness, gloss, weight loss rate and thinning rate of the specimens during chemical polishing have been investigated. The result shows that the surface roughness of the specimen gradually decreases, while the gloss, the weight loss rate and the thinning rate of the specimen increase with the increase of chemical polishing time; and with the increase of H₂O₂ concentration, the surface roughness of the specimen firstly decreases and then increases, while the gloss, the weight loss rate and the thinning rate firstly increase and then decrease. In particular, the optimal chemical polished surface of the specimen has been obtained at the HF : H₂O₂ volume ratio of 1:5, the chemical polishing time of 8 min. After chemical polishing in the above optimal solution, the adhered powders of the specimen have been completely removed, with the surface roughness R_a of $(3.5 \pm 0.3) \mu\text{m}$, and the gloss of $(80.3 \pm 0.7) \text{GU}$, and the surface quality of the specimen has been significantly improved compared to that of the as-built specimen (surface roughness of $(13.3 \pm 0.8) \mu\text{m}$, and the gloss of $(0.9 \pm 0.3) \text{GU}$). Moreover, the chemical polishing mechanism of titanium alloy in HF-H₂O₂ system has been also discussed.

Keywords: Titanium alloy; Selective laser melting (SLM); Chemical polishing; Surface roughness; Gloss

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.11.084

* 基金项目: 国家自然科学基金(52271108); 上海高性能医疗器械材料工程技术研究中心项目(20DZ2255500); 上海市自然科学基金(21ZR1445100)。

钛合金具有密度低、强度高和耐腐蚀性好等众多优点,广泛用于航空航天、国防军工和生物医用等多个领域^[1-2]。对于具有复杂曲面、内嵌结构或薄壁等特征的钛合金构件制造,传统加工技术常常难以满足甚至无法达到设计和制造要求^[3-4],而能够满足多品种、小批量、净成形、设计灵活和快速响应等需求的激光选区熔化技术在钛合金复杂整体构件制备方面具有广阔应用前景^[5]。然而,采用激光选区熔化制造的金属构件表面较为粗糙,通常难以达到表面质量要求,严重影响构件的疲劳特性、耐磨特性和尺寸精度等^[6-8]。因此,如何提升激光选区熔化构件的表面质量,已成为当前增材制造金属领域的重点关注方向。

目前,常用的钛合金表面加工工艺主要有机械抛光^[9]、化学抛光^[10]和电化学抛光^[11]等。机械抛光主要适用于形状相对规则构件的表面加工,对于复杂内腔及薄壁构件,机械抛光常常难以达到加工需求^[12];电化学抛光需要对电极和工装进行设计,同样难以实现复杂结构及内腔结构构件的抛光^[13]。化学抛光(以下简称化抛)是一种将金属零部件置于化学溶液中,利用化学溶液腐蚀金属的原理去除表面毛刺和凸起等,从而整平表面的技术。化抛具有对零件形状及设备要求低、抛光效果好及可批量化生产等优点,能够实现复杂结构及内腔结构件的抛光^[14]。钛合金传统化抛主要以 HF-HNO₃^[15-17]体系为主,但其腐蚀过程产生的氮氧化物危害人体和生态环境。因此,本文利用 H₂O₂ 代替 HNO₃ 对激光选区熔化的 TC4 合金进行抛光,通过对表面形貌、粗糙度、光泽度、减薄及失重等指标的研究,获得 H₂O₂ 浓度与化抛时间对合金表面抛光质量的影响,同时对激光选区熔化钛合金在 HF-H₂O₂ 体系中的抛光机理进行了探讨,以期改善增材制造钛合金构件的表面质量与其应用拓展提供参考。

1 试验及方法

TC4 合金化抛试样(10 mm × 10 mm × 2 mm)采用激光选区熔化技术在 EOS M280 设备上制造,其中粉末粒径 15~53 μm、激光功率 280 W、扫描速率 1200 mm/s、扫描线间距 0.14 mm、粉末层厚 0.03 mm、基板预热温度 40 ℃。试样化抛前依次用丙酮、乙醇和去离子水进行清洗;其次利用场发射扫描电子显微镜(JSM-6700F)、精密天平(FA124L)、千分尺(ZY-6001)、表面粗糙度测试仪(Mar Surf TR200)和表面光泽度测试仪(NHG 60M)分别测试试样的原始表面形貌、质量、厚度、表面粗糙度和光泽度;最后在 HF-H₂O₂ 溶液中进行化抛,溶液配比及化抛时间如表 1 所示。试验使用的 HF、H₂O₂ 和去离子水来自国药集团化学试剂有限公司,

表 1 化学抛光工艺参数

Table 1 Chemical polishing process parameters

试验	HF/mL	H ₂ O ₂ /mL	H ₂ O/mL	化抛时间 t/ min
1	10	30	60	2
2	10	30	60	4
3	10	30	60	8
4	10	50	40	2
5	10	50	40	4
6	10	50	40	8
7	10	70	20	2
8	10	70	20	4
9	10	70	20	8

其中, HF 含量 ≥ 40.0%; H₂O₂ 含量 ≥ 30%。试样化抛后首先用去离子水充分清洗,再进行试样表面形貌、质量、厚度、粗糙度和光泽度测试。试样的失重率和减薄率分别可由式(1)和(2)进行计算。

$$\omega = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ω 为钛合金试样失重率; m_0 为钛合金试样原始质量, g; m_1 为化抛后钛合金试样质量, g。

$$\delta = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, δ 为钛合金试样减薄率; d_0 为钛合金试样原始厚度, mm; d_1 为化抛后钛合金试样厚度, mm。

2 结果与讨论

2.1 打印态试样表面的形态特征

图 1 为打印态 TC4 合金的表面形貌和沿成形堆积方向(Z 方向)的表面粗糙度曲线。从图 1(a)可见,打印表面凹凸不平,粘结大量粉末。其中沿 Z 方向可以清晰看出打印层间熔合界线。表面粘结粉末粒径约为 3~60 μm,粉末除直接熔合在基体表面外,部分粉末互相粘连熔合在一起。图 1(b)中,表面粗糙度测量轮廓线呈现一定规律的锯齿状起伏,齿峰齿谷之间呈现出一些微小锯齿起伏,与图 1(a)对照,可以判断齿峰齿谷间的起伏主要由层间熔覆的波纹和表面粘结的大粒径粉末所致,而齿峰齿谷之间微小锯齿起伏主要由熔合界线和小粒径粉末所致。经测量,打印态 TC4 合金的表面粗糙度为 $R_a(13.3 \pm 0.8) \mu\text{m}$,光泽度为 $(0.9 \pm 0.3) \text{GU}$ 。

2.2 化抛对试样表面粗糙度、光泽度、失重率及减薄率的影响

表 2 给出了不同比例(体积比 1:3~1:7)和时间

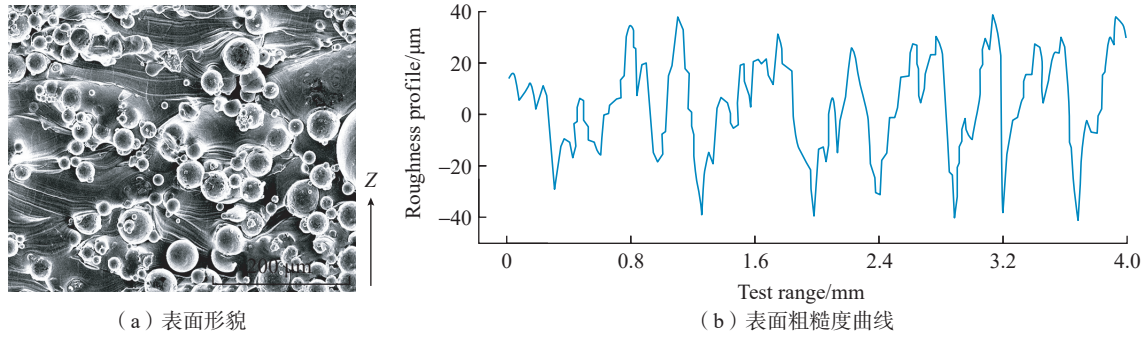


图1 打印态 TC4 合金表面形貌和沿 Z 方向的粗糙度曲线(Z 方向代表打印堆积方向)
 Fig.1 Surface morphology of TC4 alloy in as-built state and roughness profile along Z-direction (Z-direction represents building direction)

表2 化学抛光试验数据和拟合数据
 Table 2 Chemical polishing experimental data and fitted data

HF/H ₂ O ₂ 体积比	时间 /min	粗糙度 / μm	拟合粗糙度 / μm	光泽度 /GU	拟合光泽度 /GU	失重率 /%	拟合失重率 /%	减薄率 /%	拟合减薄率 /%
1:3	2	8.31	8.27	4.47	4.52	2.57	2.61	2.05	2.11
1:3	4	6.28	6.25	11.48	11.64	6.09	6.13	6.24	6.29
1:3	8	5.14	5.09	36.55	36.61	13.51	13.54	12.89	13.41
1:4	2	7.72	7.69	7.73	7.88	2.92	3.07	2.19	2.52
1:4	4	5.08	5.12	19.85	20.32	8.23	8.85	9.07	9.15
1:4	8	4.11	4.05	61.94	63.59	16.87	17.23	14.49	14.88
1:5	2	7.66	7.65	8.52	8.57	2.73	2.69	2.34	2.27
1:5	4	4.41	4.42	23.49	23.55	10.51	10.56	11.21	11.28
1:5	8	3.51	3.49	80.28	80.44	19.52	19.57	15.16	15.27
1:6	2	8.12	8.04	6.68	6.87	2.29	2.69	1.96	2.26
1:6	4	5.62	5.53	19.62	20.33	8.49	8.63	8.57	8.93
1:6	8	4.14	4.09	57.87	59.48	16.68	17.32	13.62	14.11
1:7	2	8.81	8.87	2.17	2.13	1.84	1.96	1.36	1.45
1:7	4	7.04	7.07	11.31	11.37	5.52	5.74	6.07	5.85
1:7	8	5.21	5.19	29.31	29.32	12.88	13.21	10.72	11.37

(2~8 min)下化抛后试样表面的粗糙度、光泽度、失重率和减薄率数据,利用该数据绘制并经过平滑处理的曲线如图2所示。由图2(a)可见,表面粗糙度 R_a 随化抛时间的延长而逐渐降低,随 HF/H₂O₂ 比例的降低先减小后增加,在 HF/H₂O₂ 体积比 1:5、化抛时间 8 min 时,试样的粗糙度最低,为 $R_a (3.5 \pm 0.3) \mu\text{m}$ 。由图2(b)可见,表面光泽度随化抛时间的延长而逐渐增大,随 HF/H₂O₂ 体积比的降低先增大后减小,即呈现出“暗-亮-暗”的变化趋势。此外,在 HF/H₂O₂ 体积比为 1:5,化抛时间为 8 min 时,试样最亮,光泽度达到 (80.3 ± 0.7)

GU。图2(c)和(d)为试样失重率、减薄率变化,结果表明,试样失重率和减薄率有着相同的变化趋势,即试样失重率、减薄率随化抛时间的延长而不断增大,随 HF/H₂O₂ 比例的降低先增大后减小。值得注意的是,在 HF/H₂O₂ 比例 1:5、化抛时间 8 min 时,失重率、减薄率达到最大,分别为 $(19.52 \pm 0.17)\%$ 和 $(15.16 \pm 0.13)\%$ 。上述结果表明,随化抛时间延长,表面粗糙度逐渐减小,光泽度、失重率及减薄率则逐渐增大;随 HF/H₂O₂ 体积比的降低,表面粗糙度先减小后增大,光泽度、失重率及减薄率则呈现出先增大后减小的趋势。

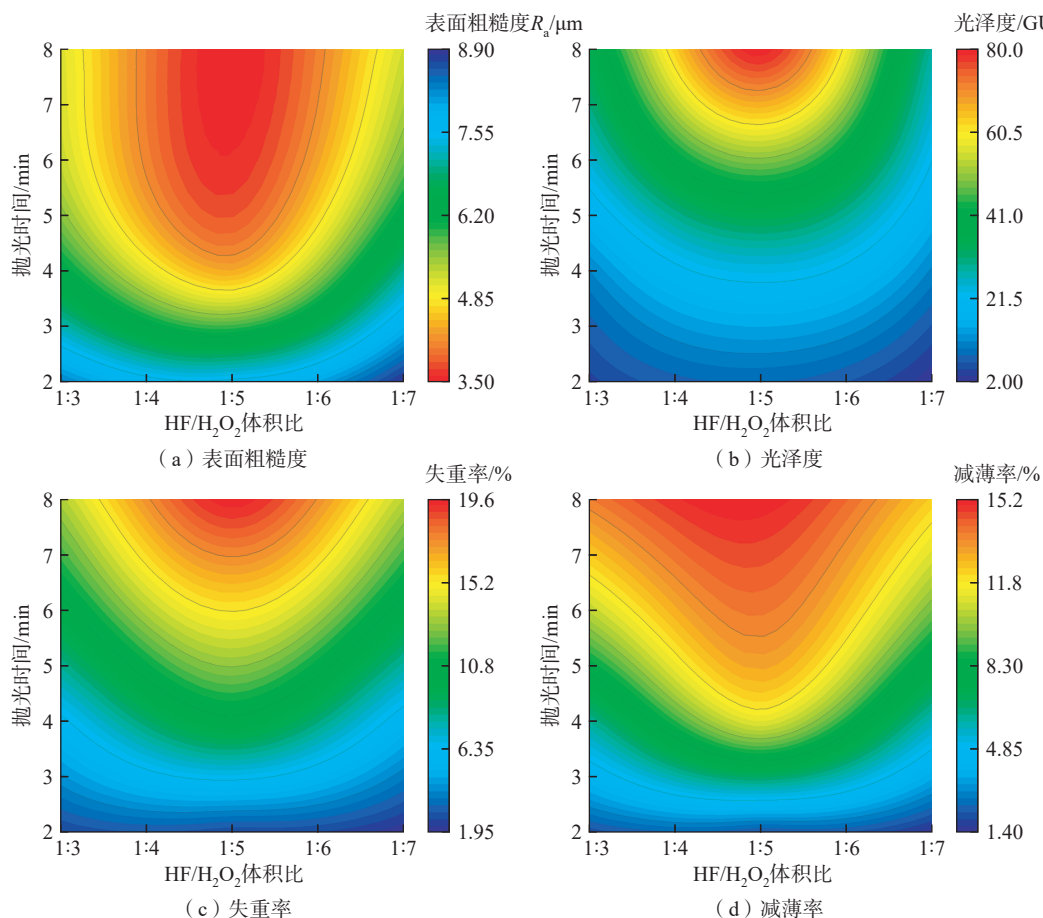


图2 化抛时间和 HF/H₂O₂ 比例对试样表面粗糙度 R_a 、光泽度、失重率和减薄率的影响

Fig.2 Effects of chemical polishing time and HF/H₂O₂ ratio on surface roughness R_a , gloss, weight loss rate and thinning rate of specimen

2.3 化抛对试样表面形态的影响

图3为 HF/H₂O₂ 体积比(1:3~1:7)和化抛时间(2~8 min)对打印试样表面形貌的影响。如图3(a)所示,在 HF/H₂O₂ 体积比为1:3,化抛时间为2 min时,试样表面仍然存在未完全抛掉的颗粒,但和打印态相比(图1(a)),颗粒的数量及粒径(最大粒径约为40 μm)均有大幅减少;如图3(b)所示,当化抛时间4 min时,表面粘附的颗粒已完全溶解去除,基体表面形态完全显露出来,但高低起伏的“峰-谷”形态仍然可见;如图3(c)所示,当化抛时间为8 min时,试样表面进一步平整。如图3(d)所示,在 HF/H₂O₂ 体积比1:5、化抛时间2 min时,基体表面仅有少量且粒径较小(最大粒径约为30 μm)的粉末未完全抛掉,但相比图3(a)中粉末的数量和粒径均减小;如图3(e)所示,当化抛时间为4 min时,粘附的粉末已经完全抛掉,表面明显平整;如图3(f)所示,当化抛时间为8 min时,试样表面平整度显著提高。如图3(g)~(i)所示,在 HF/H₂O₂ 体积比为1:7时,各化抛时间段的试样表面形貌与 HF/H₂O₂ 体积比为1:3时的形貌总体相近,仅在化抛2 min且 HF/H₂O₂ 体积比为1:7时试样表面残留的粉末颗粒较大(最大粒径约

为45 μm)。上述结果表明,随着化抛时间延长,经3种不同体积比的 HF/H₂O₂ 溶液抛光后的试样表面粘附的粉末颗粒数量逐渐减少,粒径逐渐减小,直至溶解消失,表面逐渐趋于平整。随溶液中 HF/H₂O₂ 体积比的降低,抛光后试样表面呈现出先逐渐平整后又粗糙的趋势,其中,试样在 HF/H₂O₂ 体积比1:5、化抛时间8 min时,化抛后表面最为平整,达到了最好的抛光效果,这与图2呈现的趋势是相同的。

2.4 钛合金在 HF-H₂O₂ 体系中的化抛机理分析

钛及其合金与氧具有高亲和力,表面会自然形成致密且可自愈的氧化膜,该氧化膜主要以 TiO₂ 为主^[17-18],对碱溶液、大多数有机酸溶液、无机盐溶液和浓氧化性酸等具有良好的抗腐蚀性^[18]。然而, HF 或 F⁻ 对该氧化膜具有破坏作用,主要表现为 F⁻ 诱发氧化膜点蚀,氧化膜破裂溶解,从而削弱钛的抗腐蚀能力^[19-20]。研究表明, HF 分子会从 TiO₂ 中挤出氧,留下氧空位,然后溶液中的 F⁻ 占据氧空位,与钛离子结合生成 [TiF₆]²⁻ 或其络合物 (TiF_nⁿ⁻⁴) 可溶性盐,导致氧化层溶解(式(3)和(4))^[15-17,20]。因此, HF 通常作为钛及其合金的腐蚀溶解剂。同时, HF 也可与裸露的钛基体反应形成可溶

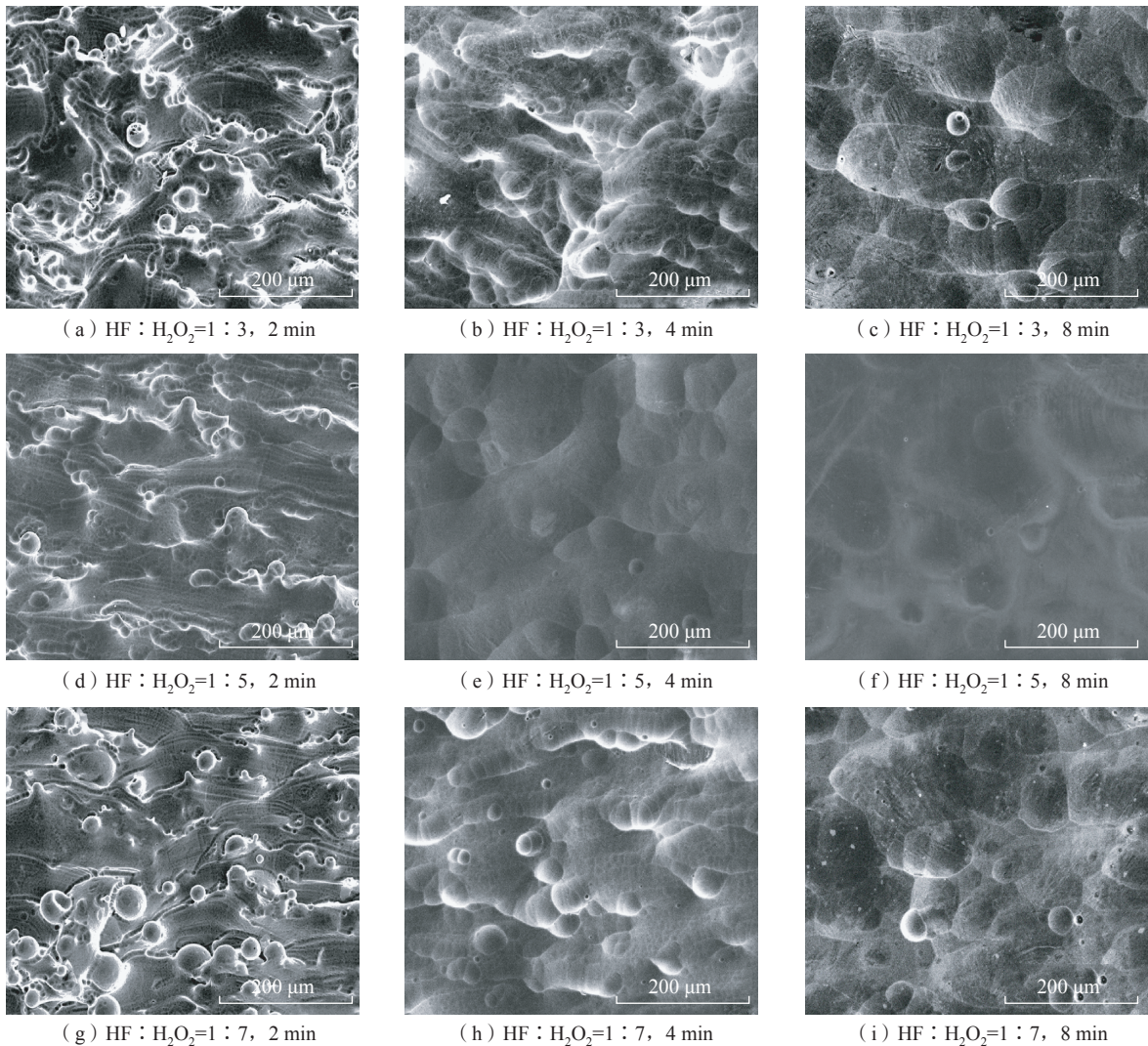
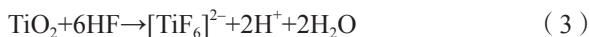


图3 HF/H₂O₂ 体积比和化抛时间对打印试样表面形貌的影响

Fig.3 Effects of HF/H₂O₂ ratio and chemical polishing time on surface morphology of specimens

性盐(式(4))^[21]。此外,表面因腐蚀裸露的钛基体在有氧或氧化剂的环境下会快速生成氧化膜,如在 H₂O 或 H₂O₂ 等氧化剂存在时,钛表面会被氧化,生成新氧化膜阻碍 HF 对基体的溶解(式(5)和(6))^[18-22]。



显微尺度下钛表面呈现出凹凸不平的状态,在化抛过程中,表面凹处化抛产物容易堆积(形成黏膜层或氧化层)^[23],造成凹处物质扩散速度下降,溶解速度下降;而凸处化抛产物相对容易扩散,“溶解-氧化-溶解”平稳进行,相对于凹处具有更高的去除速度,表面进而逐渐平整^[24]。在 HF-H₂O₂ 体系中, HF 一般作为钛的腐蚀剂使用(式(3)和(4)), H₂O₂ 作为氧化剂使用(式(6))。当 H₂O₂ 浓度较低时,溶液的氧化性较弱,“溶解-

氧化-溶解”平衡建立缓慢,造成表面去除速度降低;随着 H₂O₂ 浓度增加,溶液的氧化能力不断增强,氧化膜的生成速率不断加快,促进了“溶解-氧化-溶解”平衡的建立,同时反应速率增大也使基体表层金属溶解加快,表面整平速度提高;但当 H₂O₂ 浓度过高时,溶液的氧化能力过强,表面氧化膜的生成速率远高于其溶解速度,钛表面钝化严重,造成“溶解-氧化-溶解”平衡进一步被延缓,导致表面平整速度降低。值得注意的是, H₂O₂ 浓度较高时,钛表面也易被催化形成气泡,大量气泡作为屏障包裹表面也是材料去除速度下降的另一原因^[24]。

3 结论

(1) 在 HF-H₂O₂ 体系中, H₂O₂ 作为氧化剂,低浓度 H₂O₂ 可以提高钛合金在抛光过程中的材料去除率,促进表面平整化、光亮化;过量的 H₂O₂ 则会加速钛合金表面氧化速度,降低化抛速率。

(2) 当 HF/H₂O₂ 体积比一定时, 试样表面粗糙度随抛光时间的延长而逐渐降低, 失重率、减薄率及光泽度逐渐增大; 化抛时间一定时, 随 HF/H₂O₂ 体积比的减小, 粗糙度先减小后增大, 失重率、减薄率及光泽度呈现先增大后减小的趋势。

(3) 在 HF/H₂O₂ 体积比为 1:5, 化抛时间为 8 min 时, 试样表面粘附的金属球状粉末完全去除, 粗糙度 R_a 由打印态 (13.3 ± 0.8) μm 降至 (3.5 ± 0.3) μm , 光泽度由 (0.9 ± 0.3) GU 提升至 (80.3 ± 0.7) GU, 试样表面质量获得显著改善, 抛光效果较好。

(4) HF-H₂O₂ 体系及其工艺适合激光选区熔化钛合金构件的表面抛光, 尤其适用于具有随形流道、点阵结构、薄壁曲面等形状结构特征的零部件的表面加工, 对于形状结构特别复杂的增材制造航空用零部件等, 还需结合零件的自身特征和服役要求进一步优化抛光工艺来达到设计要求。

参 考 文 献

- [1] LUTJERING G, WILLIAMS J C. Titanium[M]. 2nd ed. Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [2] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 844–879.
- [3] HOURMAND M, SARHAN A A D, SAYUTI M, et al. A comprehensive review on machining of titanium alloys[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(8): 7087–7123.
- [4] 万能, 沈鹏, 常智勇, 等. 航空发动机难加工零件的机内测量技术与高品质数控加工[J]. 航空制造技术, 2022, 65(13): 26–34.
- WAN Neng, SHEN Peng, CHANG Zhiyong, et al. On-machine measurement technology and high quality CNC machining of aero-engine difficult machining parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 26–34.
- [5] STOLT R, ELGH F. Introducing design for selective laser melting in aerospace industry[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2020, 7(4): 489–497.
- [6] SUN W B, MA Y E, HUANG W, et al. Effects of build direction on tensile and fatigue performance of selective laser melting Ti6Al4V titanium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 130: 105260.
- [7] YAN X C, CHEN C Y, BOLOT R, et al. Improvement of tribological performance by micro-arc oxidation treatment on selective laser melting Ti6Al4V alloy[J]. Materials Research Express, 2019, 6(9): 096509.
- [8] CAO L C, LI J C, HU J X, et al. Optimization of surface roughness and dimensional accuracy in LPBF additive manufacturing[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142: 107246.
- [9] HACKEL L, RANKIN J R, RUBENCHIK A, et al. Laser peening: A tool for additive manufacturing post-processing[J]. Additive Manufacturing, 2018, 24: 67–75.
- [10] 李晓丹, 李建中, 倪家强, 等. 激光增材制造钛合金构件的化学抛光工艺研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(10): 66–71.
- LI Xiaodan, LI Jianzhong, NI Jiaqiang, et al. Chemical polishing of titanium alloy shaped by laser additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(10): 66–71.
- [11] KIM D, SON K, SUNG D, et al. Effect of added ethanol in ethylene glycol–NaCl electrolyte on titanium electropolishing[J]. Corrosion Science, 2015, 98: 494–499.
- [12] ZHAO C H, QU N S, TANG X C. Electrochemical mechanical polishing of internal holes created by selective laser melting[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 1544–1562.
- [13] ZHANG B C, LEE X H, BAI J M, et al. Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing[J]. Materials & Design, 2017, 116: 531–537.
- [14] LYCZKOWSKA E, SZYMCZYK P, DYBAŁA B, et al. Chemical polishing of scaffolds made of Ti–6Al–7Nb alloy by additive manufacturing[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(4): 586–594.
- [15] SUTTER E M M, GOETZ–GRANDMONT G J. The behaviour of titanium in nitric-hydrofluoric acid solutions[J]. Corrosion Science, 1990, 30(4–5): 461–476.
- [16] BALYAKIN A V, SHVETCOV A N, ZHUCHENKO E I. Chemical polishing of samples obtained by selective laser melting from titanium alloy Ti6Al4V[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 224: 01031.
- [17] ZHANG Y F, LI J Z, CHE S H, et al. Chemical leveling mechanism and oxide film properties of additively manufactured Ti–6Al–4V alloy[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(21): 13753–13766.
- [18] BABILAS D, URBAŃCZYK E, SOWA M, et al. On the electropolishing and anodic oxidation of Ti–15Mo alloy[J]. Electrochimica Acta, 2016, 205: 256–265.
- [19] LIU J H, WU G L, LI S M, et al. Surface analysis of chemical stripping titanium alloy oxide films[J]. Journal of Wuhan University of Technology–Mater Sci Ed, 2012, 27(3): 399–404.
- [20] SAY W C, TSAI Y Y. Surface characterization of cast Ti–6Al–4V in hydrofluoric-nitric pickling solutions[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 176(3): 337–343.
- [21] BEZUIDENHOUT M, TER HAAR G, BECKER T, et al. The effect of HF–HNO₃ chemical polishing on the surface roughness and fatigue life of laser powder bed fusion produced Ti6Al4V[J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101396.
- [22] KAUSHIK R M, BHANDAKKAR A B, PATRO T U. Solution of emulsifiable oil and hydrogen peroxide for chemical–mechanical polishing of Ti alloy—A green approach[J]. Materials Letters, 2014, 122: 252–255.
- [23] DOGADKINA E V, DONTSOV M G, PARFENYUK V I. The effect of diffusion processes on surface smoothing upon chemical polishing of titanium[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2016, 52(5): 947–953.
- [24] SCHERILLO F, MANCO E, EL HASSANIN A, et al. Chemical surface finishing of electron beam melted Ti6Al4V using HF–HNO₃ solutions[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60: 400–409.

通讯作者: 吴松全, 副研究员, 博士, 主要研究方向为金属增材制造及其表面改性。

(责编 晓月)