

引文格式: 王超群, 吴松全, 杨义, 等. 低共熔溶剂中乙醇添加对激光选区熔化GH4169合金电化学抛光行为的影响[J]. 航空制造技术, 2024, 67(12): 71-78.

WANG Chaoqun, WU Songquan, YANG Yi, et al. Effect of ethanol addition in eutectic solvent on electrochemical polishing behavior of GH4169 alloy by selective laser melting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(12): 71-78.

低共熔溶剂中乙醇添加对激光选区熔化GH4169合金 电化学抛光行为的影响*

王超群¹, 吴松全^{1,2}, 杨义¹, 王 峰¹, 黄爱军³

(1. 上海理工大学, 上海 200093;

2. 江西铜业技术研究院有限公司, 南昌 330096;

3. Monash University, Clayton VIC 3800, Australia)

[摘要] 激光选区熔化GH4169合金的高表面粗糙度是其应用过程中需要解决的一大难题, 为了替代传统电化学抛光(电抛)使用的酸基电解液, 本研究采用绿色安全的氯化胆碱-乙二醇体系作为低共熔溶剂(DES)对激光选区熔化GH4169合金进行电抛的研究。以电抛前后试样的表面形貌、粗糙度、光泽度、润湿角和电化学工作站测试的结果为指标, 探索在氯化胆碱-乙二醇中加入不同摩尔比例的乙醇对试样表面电抛效果的影响。结果表明, 电抛后的试样表面质量得到了显著的改善。其中, 在氯化胆碱: 乙二醇: 乙醇摩尔比1: 1.9: 0.1, 电抛参数为温度60℃、时间30 min、电压3 V、磁子转速240 r/min和电极间距13 mm时, 试样表面被整平抛亮, 抛光效果最好, 粗糙度 R_a 达到 $(0.403 \pm 0.010) \mu\text{m}$, 光泽度达到 $(357.9 \pm 2.2) \text{GU}$, 润湿角以及电化学行为也验证了电抛后的试样表面更有利于耐蚀性。同时, 探讨了合金在氯化胆碱-乙二醇体系中的电抛机理。

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

Effect of Ethanol Addition in Eutectic Solvent on Electrochemical Polishing Behavior of GH4169 Alloy by Selective Laser Melting

WANG Chaoqun¹, WU Songquan^{1,2}, YANG Yi¹, WANG Hao¹, HUANG Aijun³

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

2. Jiangxi Copper Technology Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China;

3. Monash University, Clayton VIC 3800, Australia)

[ABSTRACT] The high surface roughness of selective laser melting GH4169 alloy is a challenge that need to be resolved in its application. To replace the traditional acid based electrolyte, choline chloride-ethylene glycol system (Deep eutectic solvent, DES) was used for electrochemical polish GH4169 alloy fabricated by selective laser melting. In order to explore the ethanol addition effect on the electrochemical polishing behavior of the alloy, surface morphology, roughness, glossiness, wetting angle and electrochemical properties before and after electrochemical polishing have been investigated. The result indicates that the surface quality of the specimens after electrochemical polishing has been significantly improved. Among them, when the molar ratio of choline chloride : ethylene glycol : ethanol is of 1 : 1.9 : 0.1, and the processing parameters are of temperature 60 °C, time 30 min, voltage 3 V, magneton rotation speed 240 r/min and electrode spacing 13 mm, the surface of the specimen shows much more smooth and bright, and the roughness R_a is $(0.403 \pm 0.010) \mu\text{m}$, and the glossiness is $(357.9 \pm 2.2) \text{GU}$. The wetting angle and electrochemical properties have also verified that the

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52271108); 上海市自然科学基金面上项目(21ZR1445100); 上海高性能医疗器械材料工程技术研究中心项目(20DZ2255500); 西安市高性能钛合金材料重点实验室开放基金项目(NIN-HTL-2022-02)。

surface of the sample after electrochemical polishing is more beneficial to corrosion resistance. Meanwhile, the mechanism of the alloy electrochemical polishing in choline chloride-ethylene glycol system has also been discussed.

Keywords: Superalloy; Selective laser melting (SLM); Electrochemical polishing; Surface roughness; Surface glossiness

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.12.071

镍基高温合金由于在高温恶劣的应用环境下具有优异的强度、耐腐蚀性和抗疲劳性等突出性能而被广泛用于舰船、石油钻井和航空航天等众多领域^[1-2]。然而,传统熔融铸造技术不能灵活生产镍基高温合金会导致加工成本相当高;另一方面,镍基高温合金也被认为是最难以切割加工的材料之一^[3-4],因此,传统工艺在制造镍基高温合金部件方面不具备优势。激光选区熔化技术(Selective laser melting, SLM)是一项在计算机控制下利用激光束对粉末床进行逐层选区熔化和叠加堆积,最终冷却凝固形成组织致密的立体部件的快速近净成形技术^[5-6]。该技术为镍基合金部件提供了高效柔性的制备技术^[7-9],给镍基合金的应用和发展带来了变革性影响。但是,因为技术本身存在“粉末成形”和“分层制造”的本征属性,造成打印部件表面存在明显烧结、焊合粉末和层状/台阶状接痕^[10-11]。这种异常粗糙的表面状态往往造成部件的疲劳性能、耐蚀性、耐磨性和装配性能等都要低于其传统锻造和铸造部件^[12-13],导致打印件常难以直接使用。因此,对于一些要求部件具有高质量表面的应用,SLM部件通常需要进一步抛光处理来达到要求。

目前,镍基高温合金表面抛光工艺主要有机械抛光^[14]、化学抛光^[12]和电化学抛光^[9,15]等。其中,机械抛光易引入表面变形层,改变了表面理化性质,存在恶化表面性能的风险^[14]。化学抛光常使用强酸或强碱溶液,虽然不会引入表面变形层,但生成的有害气体对环境对人体极不友好^[12]。而电化学抛光(电抛)是在电场作用下,利用阳极溶解效应抛光表面的技术^[16]。该技术不引入表面变形层,常在酸醇体系中电抛,安全性和环保性显著提升。近年来发现,具有绿色环保等优点的低共熔溶剂(Deep eutectic solvents, DES)体系能够应用于金属材料的电抛,并且逐渐成为各类金属表面电抛的研究重点^[17]。在镍基高温合金领域,Jiang等^[12]在DES体系中,探究了电抛时间(1~5 min)对哈氏合金表面质量的影响,结果表明,电抛温度70℃、电流密度19.5 mA/cm²、电抛时长1 min时,试样表面黏附的小颗粒大部分被消除,大颗粒部分溶解;电抛2 min后大颗粒消除,随后表面质量随时间延长逐渐提高;电抛5 min后试样表面粗糙度从原始 R_a 10.3 μm降低至 R_a 1.2 μm。Karim等^[18]在

DES体系中,探究了电流密度(0~50 mA/cm²)对纯镍的表面质量的影响,结果表明,低电流密度(<10 mA/cm²)电抛试样表面无光泽,高电流密度(>50 mA/cm²)电抛阴极析氢显著,电流密度明显升高,试样表面一直处于活化状态,进而促进点蚀;最优工艺(电抛温度20℃、电流密度12 mA/cm²、时间30 min)电抛表面粗糙度达到 R_a 0.042 μm。Protsenko等^[19]在DES体系中,探究了电抛温度(20~50℃)和电压(1.5~2.0 V)对纯镍表面质量的影响,结果表明,当温度升高至40℃以上时,试样表面质量恶化,任何电极电位下都不能实现表面整平;当电解液温度相对较低(20℃)时,随着电压升高表面抛光效果显著提高,最优工艺组合为电抛温度20℃、电压2.0 V和时间30 min,表面粗糙度系数最低。

综上所述,相比于电抛工艺参数的影响,目前在添加剂方面的影响研究相对较少。为了进一步提高在DES体系下电抛镍基合金的表面质量和效率,本文基于典型的DES体系(氯化胆碱:乙二醇=1:2)和激光选区熔化GH4169合金,详细研究了乙醇添加对电抛镍基合金表面形貌、粗糙度、光泽度、润湿角和模拟海水耐蚀性的影响,同时也分析了乙醇添加的影响机制。

1 试验材料及方法

GH4169合金的电抛试样(10 mm×2 mm×10 mm)在EOS M280成形系统中制备(称为打印态),打印参数为激光功率280 W、扫描速率1000 mm/s、扫描间距0.11 mm、铺粉厚度0.04 mm,基板预热至80℃,打印全程氩气(纯度≥99.99%)保护。电抛表面采用打印试样的侧表面(10 mm×10 mm),由于打印试样原始表面轮廓不一致,为了更加准确地对比各参数抛光效果,电抛前先用SiC粗砂纸粗磨(称为打磨态)以统一试样表面粗糙度 R_a ,约为2.8 μm,然后用丙酮、酒精和去离子水依次超声清洗,再利用压缩空气吹干备用。试样的电抛在直流稳压电源eTM-1005上进行,利用磁力搅拌器HJ-4A控制电抛温度和电抛液中的磁子转速,电抛容器尺寸为Φ80 mm×100 mm,试样作为阳极,316L不锈钢作为阴极(20 mm×20 mm),电极间距13 mm,磁子(25 mm×7 mm)转速为240 r/min,电抛工艺参数是预试验所得到的,为温度60℃、电压3 V、时间30

min。电解液选择典型的氯化胆碱-乙二醇作为基液,添加乙醇调控电解液配方,电解液的成分和试样命名如表1所示。

试验使用的化学试剂氯化胆碱 $\geq 98.0\%$ 、乙二醇 $\geq 99.5\%$ 、乙醇 $\geq 99.7\%$ 、丙酮 $\geq 99.5\%$ (质量分数)和去离子水均来自国药集团化学试剂有限公司。打印态试样、打磨态试样和抛光态样品的表面形貌、粗糙度、光泽度、水润湿角和模拟海水中的抗蚀性测定分别在场发射扫描电子显微镜JSM-6700F、粗糙度测试仪Mar Sur TR200、光泽度检测仪NHG 60M、光学接触角测试仪ZJ-7000和电化学工作站CS 310H上进行。

表1 样品名称及电解液成分
Table 1 Name of specimens and electrolyte composition

样品	电解液配方(摩尔比)
打印态	—
打磨态	—
C_0	氯化胆碱:乙二醇=1:2
$C_{0.05}$	氯化胆碱:乙二醇:乙醇=1:1.95:0.05
$C_{0.1}$	氯化胆碱:乙二醇:乙醇=1:1.9:0.1
$C_{0.5}$	氯化胆碱:乙二醇:乙醇=1:1.5:0.5
C_1	氯化胆碱:乙二醇:乙醇=1:1:1

2 结果和讨论

2.1 乙醇对电抛试样表面形貌的影响

图1为打印态和打磨态试样的表面形貌。其中,打印态试样(图1(a)~(c))表面凹凸不平,黏结了大量尺寸不同且部分熔融颗粒,这些颗粒直径约为3~80 μm ,部分较小粒径的颗粒黏附于较大粒径的颗粒之上,颗粒之下波纹状起伏的熔凝结构也清晰可见。打磨态试样(图1(d)~(f))表面得到显著整平,打印态表面黏结的颗粒和波纹状起伏已完全去除,留下交叉平行的犁沟状划痕,这是典型的打磨痕迹。

图2为在电解液中添加不同含量乙醇电抛试样的表面形貌。在基液中电抛后, C_0 表面(图2(a)~(c))已经呈现出相对平整的状态,和打磨表面(图1(d)~(f))相比,犁沟状已完全整平,同时表面呈现出一定的打印纹理和组织结构特征,这是该合金典型的打印态金相腐蚀特征^[20];当加入0.05 mol乙醇电抛后, $C_{0.05}$ 表面(图2(d)~(f))呈现出更为平整的状态,相对于 C_0 试样,表面的金相腐蚀特征不显著,仅隐约可见;当加入0.1 mol乙醇电抛后, $C_{0.1}$ 表面(图2(g)~(i))呈现所有样品中最为平整的状态,金相腐蚀特征难再分辨。当加入0.5 mol乙醇电抛后, $C_{0.5}$ 表面(图2(j)~(l))重新出现金相腐蚀特征,同时部分区域出现点蚀凹坑,呈现出典型的点蚀形貌;当加入1 mol乙醇电抛后, C_1

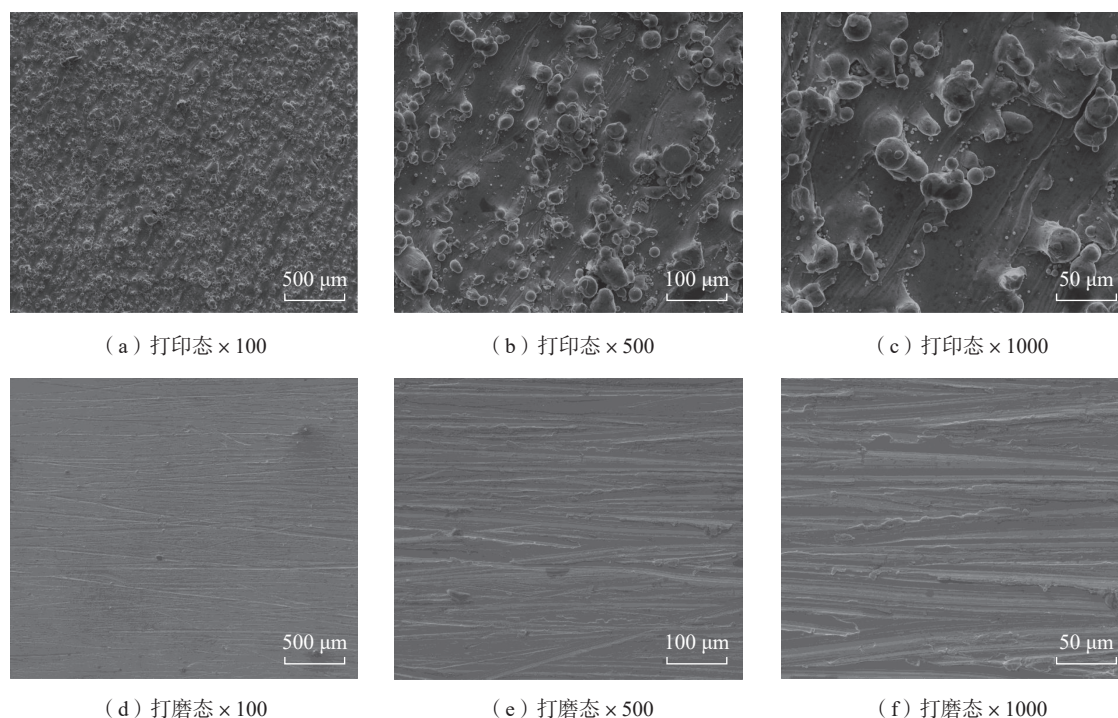


图1 电抛前试样的原始表面形貌

Fig.1 Surface morphologies of the specimen before electrochemical polishing

表面(图 2 (m)~(o))出现大量点蚀凹坑,点蚀严重。上述结果表明少量乙醇添加可以有效提升电抛表面的表面平整状态,过量添加乙醇导致电抛表面出现点蚀, $C_{0.1}$ 试样的表面抛光效果最好。

2.2 乙醇对电抛试样表面粗糙度和光泽度的影响

图 3 给出了乙醇对试样电抛表面粗糙度和光泽度的影响。如图 3 (a)所示,打印态的表面粗糙度最高,为 $R_a 9.597 \mu\text{m}$,打磨后降至 $R_a 2.846 \mu\text{m}$;经电抛后,试样

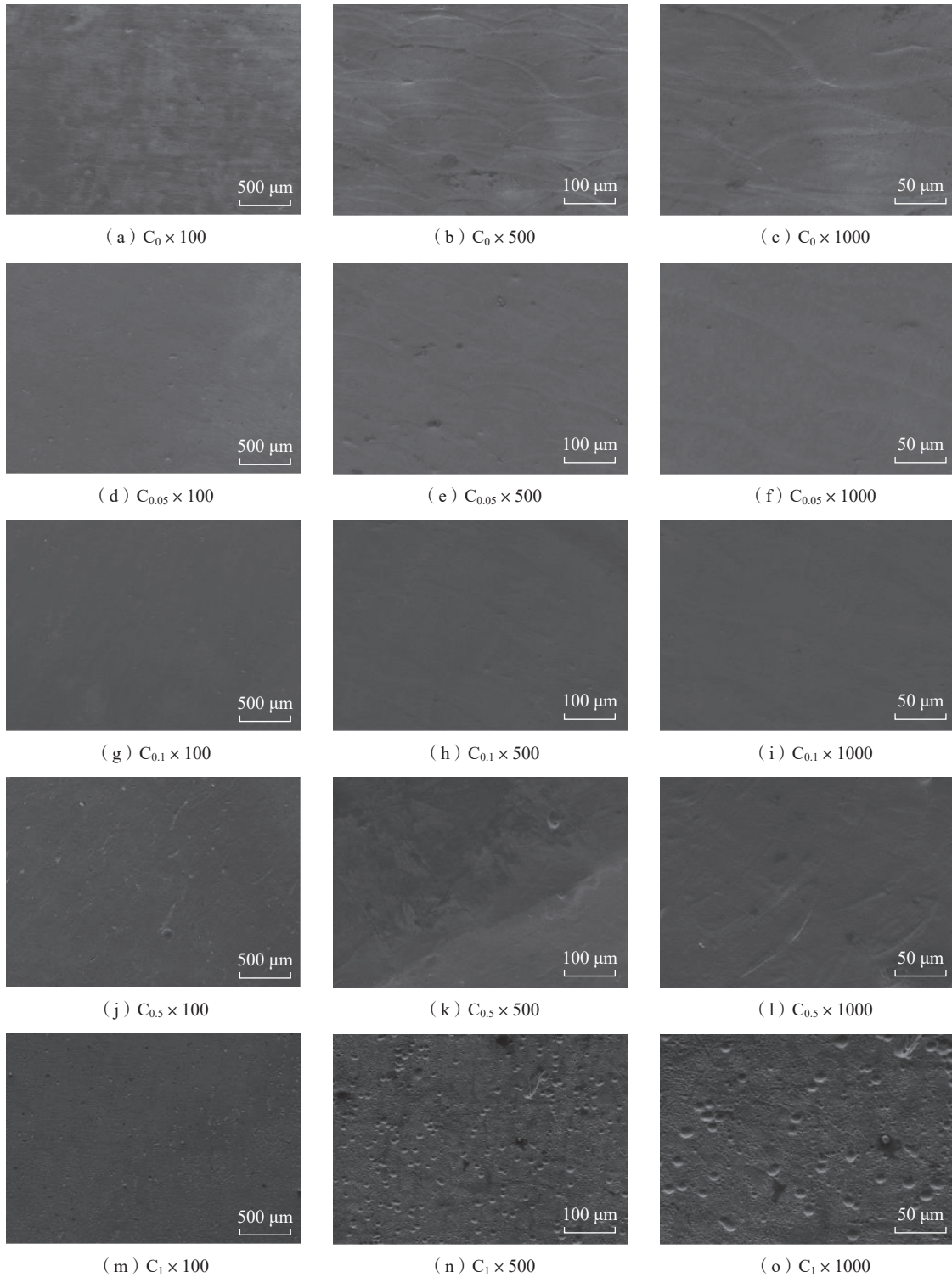


图 2 乙醇添加对试样电抛表面形貌的影响

Fig.2 Effect of ethanol addition on surface morphologies of specimens after electrochemical polishing

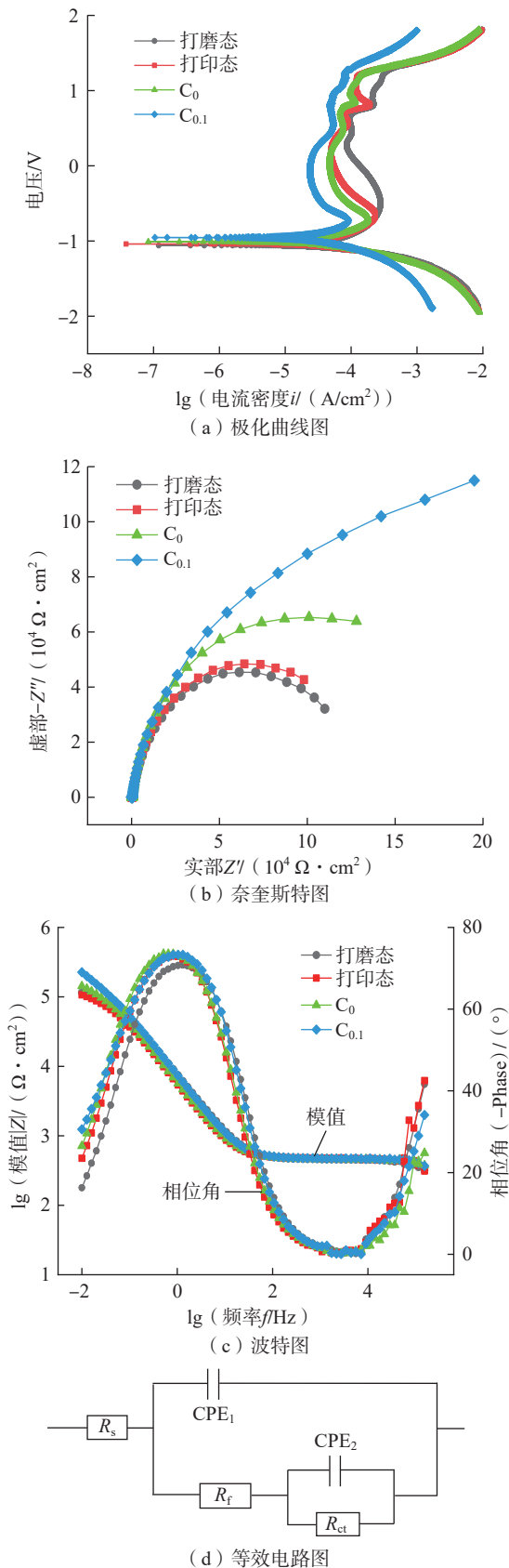


图6 试样电抛前后的电化学行为

Fig.6 Electrochemical behavior of the specimens before and after electrochemical polishing

表2 电抛前后的极化曲线的阳极极化曲线拟合值

Table 2 Fitting value of anode polarization curve before and after electrochemical polishing

组别	自腐蚀电位 $E_{corr}(V_{SCE})/V$	自腐蚀电流密度 $I_{corr}/(\times 10^{-5} A/cm^2)$	腐蚀速率 $CR/(mm/a)$
打磨态	-1.056	9.593	0.252
打印态	-1.038	7.548	0.205
C_0	-1.012	6.236	0.166
$C_{0.1}$	-0.954	4.389	0.137

从总体看,4种试样均表现出自发钝化行为,电抛后试样的动电位极化曲线向左上移动。根据Tafel拟合得到的各试样自腐蚀电位、自腐蚀电流和腐蚀速率如表2所示,结果显示 $C_{0.1}$ 试样的自腐蚀电位最高,自腐蚀电流最低,腐蚀速率最低,表现出最佳抗蚀性, C_0 试样的抗蚀性次之,打磨态试样最差,这与水接触角显示的腐蚀性规律具有相同的趋势。

进一步采用电化学阻抗谱测试上述合金的腐蚀行为,如图6(b)和(c)所示。由图6(b)的奈奎斯特图可以看出,4种试样曲线均为半圆的容抗弧, $C_{0.1}$ 的半径最大, C_0 次之,打磨态最小。容抗弧的半径与材料的耐蚀性呈正相关,即半径越大,阳极反应的阻力越大、电荷转移电阻越高,耐蚀性越好。因此在模拟海水中, $C_{0.1}$ 试样耐蚀性最好,打磨态最差,这也与上述试验的结果一致。由图6(c)的波特图可以看出, $C_{0.1}$ 试样的模值最大,恒相位角的最大值以及宽度也最大。而打磨态较低,也说明 $C_{0.1}$ 试样表面的耐腐蚀性能较好,打磨态试样较差。根据试样的阻抗谱图形特点,利用图6(d)的等效电路图拟合得到的4种试样表面膜电化学参数值,如表3所示。其中, R_s 为溶液电阻; R_f 为外膜层电阻; R_{ct} 为内膜层电阻;CPE代表钝化膜的常相位角元件(表明腐蚀区域面积的大小); η 值代表试样表面几何能量的不均匀性^[12]。很显然, $C_{0.1}$ 试样从溶液电阻 R_s 到内膜层电阻 R_{ct} 拟合参数值都要大于前3种试样,而 $C_{0.1}$ 试样的腐蚀区域的面积即CPE值要小于前3种试样,且其 η 值也最大,这充分说明 $C_{0.1}$ 腐蚀区面积减小,表面能量分布和均匀性有所提高,而打磨态则体现出了较小电阻值,这都说明 $C_{0.1}$ 试样的抗蚀性较好,而打磨态试样相应各值体现出的抗蚀性均较差。这也与上述试样结果一致。

2.5 乙醇对电抛试样表面质量的影响分析

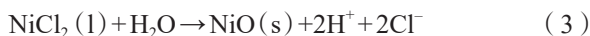
电抛实质上受控于阳极“溶解-氧化”平衡过程^[22]。在电抛初始阶段,试样表面氧化物层会被溶解;裸露的基体发生氧化开始溶解(式(1))^[18],即Ni失去电子形成 Ni^{2+} 进入溶液,为了使阳极保持电中性^[16,22], Ni^{2+} 易

表3 电抛前后的阻抗谱的等效电路参数

Table 3 Equivalent circuit parameters of the impedance spectrum before and after electrochemical polishing

组别	溶液电阻 $R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	常相位角元件 $\text{CPE}_1/(\times 10^{-5} \mu\text{F} \cdot \text{cm}^2)$	η_1	外膜层电阻 $R_f/(\times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2)$	常相位角元件 $\text{CPE}_2/(\times 10^{-5} \mu\text{F} \cdot \text{cm}^2)$	η_2	内膜层电阻 $R_{ct}/(\times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2)$
打磨态	455.71	2.58	0.88	9.50	2.64	0.83	12.46
打印态	473.73	3.47	0.90	9.76	3.25	0.79	13.65
C_0	465.15	3.34	0.89	13.54	3.23	0.83	17.59
$C_{0.1}$	471.93	2.56	0.90	14.16	2.55	0.86	26.12

与阳极附近的 Cl^- 结合生成 NiCl_2 黏性层(式(2))^[18] 附于基体表面(图7(a))。同时,电解液中不可避免地溶解水分子(乙二醇中水杂质和大气中溶解水^[23]),易与 NiCl_2 反应生成氧化膜 NiO (式(3))^[24],该反应将抑制阳极溶解的进一步进行。在电场作用下^[25],具有强烈钻穿作用的 Cl^- 和 H^+ 会与新生成的氧化膜进一步反应而溶解氧化膜(式(4))。上述阳极溶解-氧化交替作用,最终实现阳极的整平和抛光。



在电抛过程中,阳极表面形成的黏性膜和氧化膜对阳极表面整平和抛光起到了关键作用^[19],添加剂成分往往通过影响该层性质进而调控抛光的过程。在氯化胆碱-乙二醇体系,黏性膜是一种主要由 NiCl_2 和乙二醇组成的绿色液体^[18],需要强烈的搅拌力才能将其从阳

极表面去除。但实际应用中的搅拌器往往难以达到如此强烈的搅拌程度。当添加乙醇后,黏性膜层中将溶入乙醇,由于乙醇的极性低于乙二醇和 H_2O ,并且具有溶解能力和低黏度特征,粘附于阳极表面的 NiCl_2 将在乙醇中溶解^[24](图7(b)),进而促进 NiCl_2 向电解液中扩散,提高电抛效率和质量。但是,过量的乙醇会大幅改变黏性膜层的成分和性质,降低黏度,提高阳极溶解速率,容易发生局域过腐蚀(图7(c)),即发生点蚀。

3 结论

(1)在氯化胆碱-乙二醇体系中电抛 GH4169 合金,随着乙醇含量的增加,试样表面粗糙度呈现先降低后升高的趋势,光泽度呈现先升高后降低的趋势,适量乙醇添加可以有效提升试样表面电抛质量和效率。

(2)在氯化胆碱:乙二醇:乙醇摩尔比为 1:19:0.1,工艺参数为温度 60°C 、时间 30 min、电压 3 V、磁子转速 240 r/min 和电极间距 13 mm 时,电抛试样的表面质

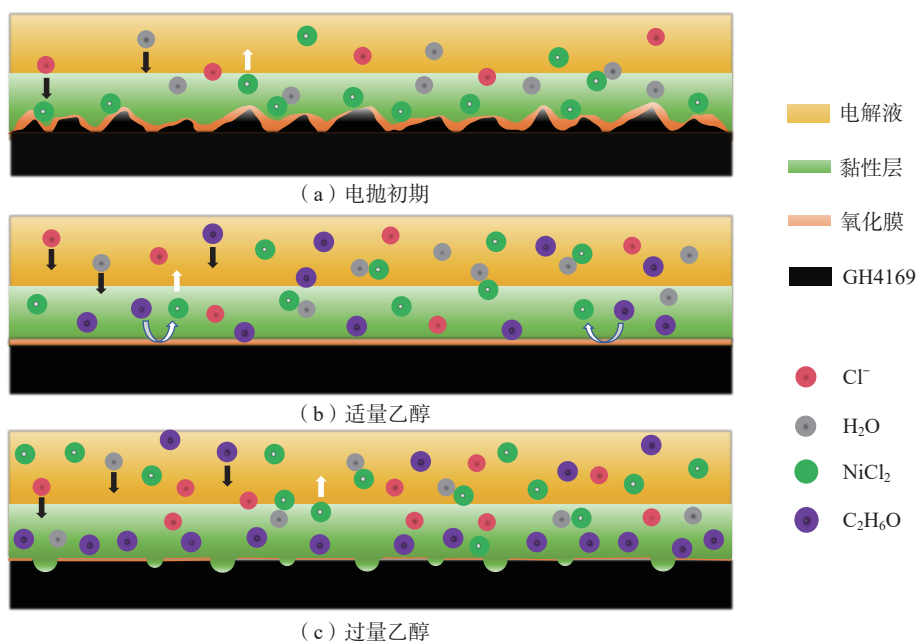


图7 乙醇添加对镍基金属试样电抛的影响

Fig.7 Effect of ethanol addition on the electrochemical polishing behavior of the nickel-based metal

量最好;粗糙度 R_a 由抛光前的打印态 (9.597 ± 0.044) μm 降至电抛后的 (0.403 ± 0.010) μm , 光泽度由 (18.5 ± 1.6) GU 升高至 (357.9 ± 2.2) GU, 并且水接触角和电化学反应的结果均证实了该试样表面耐蚀性能最好。

(3) 氯化胆碱因具有高生物降解性、相容性和低毒性被广泛应用到动物饲料中, 多元醇也是食品和制药工业的常用原料。氯化胆碱-乙二醇 DES 体系用于抛光高温合金绿色环保, 符合可持续发展战略目标。但相对于传统酸醇配方体系, 氯化胆碱-乙二醇 DES 体系的抛光效率仍待进一步提升, 另外对于复杂结构零部件等, 电抛的设备与工艺设计还需进一步优化以达到要求。

参考文献

[1] GAIN A K, LI Z, ZHANG L C. Wear mechanism, subsurface structure and nanomechanical properties of additive manufactured Inconel nickel (IN718) alloy[J]. *Wear*, 2023, 523: 204863.

[2] MONDRAGÓN-RODRÍGUEZ G C, TORRES-PADILLA N, CAMACHO N, et al. Surface modification and tribological behavior of plasma nitrided Inconel 718 manufactured via direct melting laser sintering method[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 387: 125526.

[3] 岳彩旭, 姜男, 黄翠. 镍基高温合金GH4169车削过程刀具磨损特性研究[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(19): 74-78, 83.

YUE Caixu, JIANG Nan, HUANG Cui. Research on tool wear characteristics of Ni-based superalloy GH4169 during turning[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(19): 74-78, 83.

[4] SUGIHARA T, ENOMOTO T. High speed machining of inconel 718 focusing on tool surface topography of CBN tool[J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 1: 675-682.

[5] SUBRAMANYAM B, VINEETA T V, GARRE P, et al. Comparative analysis of additive manufacturing over conventional manufacturing[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 455: 012102.

[6] TIAN Q W. The development status of selective laser melting technology (SLM)[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1798(1): 012045.

[7] TIAN Y J, TOMUS D, HUANG A, et al. Experimental and statistical analysis on process parameters and surface roughness relationship for selective laser melting of Hastelloy X[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, 25(7): 1309-1318.

[8] 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.

[9] YANG L, O'NEIL C, WU Y. The use of electropolishing surface treatment on IN718 parts fabricated by laser powder bed fusion process[C]// *Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International*. Montreal, 2017: 2493-2502.

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

[11] BHADURI D, PENCHEV P, BATAL A, et al. Laser polishing of 3D printed mesoscale components[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 405: 29-46.

[12] JIANG D R, TIAN Y, ZHU Y M, et al. Investigation of

surface roughness post-processing of additively manufactured nickel-based superalloy Hastelloy X using electropolishing[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 441: 128529.

[13] GOCKEL J, SHERIDAN L, KOERPER B, et al. The influence of additive manufacturing processing parameters on surface roughness and fatigue life[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 124: 380-388.

[14] BISHT A, GADDAM S, KUMAR L, et al. Precipitation behavior of IN718 after surface mechanical attrition treatment (SMAT) and its effect on wear properties[J]. *Journal of Metals*, 2018, 70(11): 2667-2676.

[15] JAIN S, CORLISS M, TAI B, et al. Electrochemical polishing of selective laser melted Inconel 718[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 34: 239-246.

[16] LANDOLT D. Fundamental aspects of electropolishing[J]. *Electrochimica Acta*, 1987, 32(1): 0013468687870019.

[17] 姚燕生, 周瑞根, 张成林, 等. 增材制造复杂金属构件表面抛光技术[J]. *航空学报*, 2022, 43(4): 237-249.

YAO Yansheng, ZHOU Ruigen, ZHANG Chenglin, et al. Surface polishing technology for additive manufacturing of complex metal components[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(4): 237-249.

[18] KARIM W O, ABBOTT A P, CIHANGIR S, et al. Electropolishing of nickel and cobalt in deep eutectic solvents[J]. *Transactions of the IMF*, 2018, 96(4): 200-205.

[19] PROTSSENKO V S, BUTYRINA T E, BOBROVA L S, et al. Enhancing corrosion resistance of nickel surface by electropolishing in a deep eutectic solvent[J]. *Materials Letters*, 2020, 270: 127719.

[20] 张雪峰, 李怀学, 胡全栋, 等. 热处理对激光选区熔化GH4169高温合金的组织与拉伸性能的影响[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(19): 78-85.

ZHANG Xuefeng, LI Huaixue, HU Quandong, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and tensile properties of GH4169 superalloy fabricated by selective laser melting[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(19): 78-85.

[21] TRIANTAFYLIDIS D, LI L, STOTT F H. The effects of laser-induced modification of surface roughness of Al_2O_3 -based ceramics on fluid contact angle[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 390(1-2): 271-277.

[22] HAN W, FANG F Z. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 139: 1-23.

[23] KIM D, SON K, SUNG D, et al. Effect of added ethanol in ethylene glycol-NaCl electrolyte on titanium electropolishing[J]. *Corrosion*, 2015, 98: 494-499.

[24] WANG Y Q, WEI X T, LI Z Y, et al. Electrolytic polishing of nitinol based cardiovascular stent in NaCl-ethylene glycol-ethanol-water electrolyte[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2020, 15(9): 8823-8836.

[25] OSOBA L O, OLADOYE A M, OGBONNA V E. Corrosion evaluation of superalloys Haynes 282 and Inconel 718 in Hydrochloric acid[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 804: 376-384.

通讯作者: 吴松全, 副教授, 博士, 研究方向为金属增材制造及其表面处理。
杨义, 副教授, 博士, 研究方向为航空航天金属材料及增材制造。
(责编 阳光)