

哈氏合金 C-276 电抛光中抛光液的失效分析

胡宗林, 陆玲, 庄维伟

(苏州新材料研究所有限公司, 江苏 苏州 215125)

摘要: **目的** 哈氏合金 C-276 带材被广泛用作第二代高温超导体 YBCO 的金属衬底, 其表面抛光质量 (粗糙度 Ra) 要求极为严格。为了保证抛光质量就要有效控制电化学抛光液, 对抛光液的变化及失效与否进行分析。**方法** 以哈氏合金 C-276 带材为研究对象, 采用非接触式电化学抛光方法, 使用扫描电镜、原子力显微镜、金相显微镜、微波等离子体原子发射光谱仪等仪器设备, 阐明了抛光液中 H_3PO_4 和 H_2SO_4 等主要成分的作用及工艺要求, 并测定单位体积抛光液在一定时间内通过电量 (Ah/L) 后, H_3PO_4 、 H_2SO_4 含量及 Ni、Cr、Mo 等金属离子浓度。**结果** 当 H_3PO_4 、 H_2SO_4 含量分别在 775~1013 g/L、318~451 g/L 范围内, Ni、Cr、Mo 三种金属离子质量浓度分别小于 7.3、2.7、3.4 g/L 时, C-276 带材表面的粗糙度才能满足工艺要求 $Ra < 1$ nm ($5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$)。**结论** 通过对电化学抛光液中的 H_3PO_4 、 H_2SO_4 、添加剂、金属离子浓度等有效控制, 采用非接触式电化学抛光, 实现了千米级哈氏合金第二代高温超导带材的连续生产, 并且表面粗糙度 $Ra < 1$ nm。

关键词: 哈氏合金; 电化学抛光; 抛光液; 粗糙度

中图分类号: TG175.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)05-0255-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.041

Failure Analysis of Electrolyte in E-polishing Process of Hastelloy Alloy C-276

HU Zong-lin, LU Ling, ZHUANG Wei-wei

(Suzhou Advanced Materials Research Institute, Suzhou 215125, China)

ABSTRACT: Hastelloy alloy C-276 strip has been widely used as metallic substrate of YBCO second generation high temperature superconductor. The alloy is subject to strict requirements regarding surface polishing quality (roughness Ra in the work). Electrochemical polishing agent shall be controlled effectively and analyzed for variation and failure to guarantee polishing quality. With C-276 strip as object of study, non-contact electrochemical polishing method as well as instruments including SEM, AFM, metallographic microscope and microwave plasma atomic emission spectrometer were used. Functions and process requirements of main components including H_3PO_4 and H_2SO_4 in polishing agent were elaborated. Content of H_3PO_4 and H_2SO_4 , and ionic concentration of Ni, Cr and Mo were measured after unit volume polishing agent passes through electric quantity in certain period (Ah/L). C-276 strip surface roughness will not meet the process requirements $Ra < 1$ nm ($5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$) unless content of phosphoric acid and sulfuric acid fell within 775~1013 g/L and 318~451 g/L, ionic concentration of Ni, Cr, Mo was < 7.3 g/L, 2.7 g/L, 3.4 g/L, respectively. Non-contact electrochemical po-

收稿日期: 2016-12-20; 修订日期: 2017-02-10

Received: 2016-12-20; Revised: 2017-02-10

作者简介: 江苏省科技成果转化专项资金招标项目 (BA2015029)

Biography: Supported by the Scientific and Technological Achievements into a Special Tender Project of Jiangsu Province (BA2015029)

通讯作者: 胡宗林 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为表面处理及电化学抛光。

Corresponding author: HU Zong-lin (1987—), Male, Master, Engineer, Research focus: surface treatment and electrochemical polishing.

lishing is used to achieve continuous production of the second-generation high-temperature superconducting tapes of kilometric Hastelloy based on effective control of sulfuric acid, phosphoric acid, additives and metal ion concentration in electrochemical polishing agent. The surface roughness Ra is < 1 nm.

KEY WORDS: Hastelloy alloy; electrochemical polishing; polishing agent; roughness

C-276 哈氏合金带材因其优异的耐高温和抗腐蚀性性能,被用来作为第二代高温超导材料的金属基底,在高温超导的领域得到了广泛应用。第二代高温超导线材是以 ReBCO (其中 $\text{Re}=\text{Y}$ 或稀土元素, $\text{B}=\text{Ba}$, $\text{C}=\text{Cu}$) 为基础的金属氧化物,具有临界电流温度高于液氮温度的特性。然而, ReBCO 具有高温超导特性的基本要求是 ReBCO 必须形成双轴定向生长的晶体结构,从而也就要求用于生长 ReBCO 高温超导材料的衬底必须具有相同的晶体结构。Iijima 等^[1]在 1992 年首先提出了采用 IBAD (Ion-beam assisted deposition, 离子辅助沉积) 方法制备具有双轴定向生长结构的 MgO 薄膜晶体。在此基础上,再采用 MOCVD (Metalorganic chemical vapor deposition, 金属有机化学气相沉积) 或 PLD (Pulsed laser deposition, 脉冲激光沉积) 工艺,就可以制备具有高临界电流特性的高温超导线材。然而,采用 IBAD 工艺制备具有双轴定向生长结构的 MgO 薄膜晶体的首要条件是必须采用表面极为平整的衬底材料。为了保证基带表面的平整度,并且实现产业化要求,目前国际上一致公认的最为有效的方法就是电化学抛光工艺。众所周知,在电化学抛光过程中,随着抛光的进行,抛光液主要成分会有所消耗或发生变化,同时抛光液中的金属离子浓度会逐渐增加,最后导致抛光效果下降,其表面平整度将不能达到制备超导薄膜要求。因此,对抛光液的控制极为重要。通过长期实践,目前已经建立了一套判断哈氏合金电化学抛光液失效与否的标准。

近年来,关于不锈钢电化学抛光^[2-7]及其抛光液^[8-10]的研究较多,但有关哈氏合金电化学抛光液配方、抛光工艺及影响因素分析等的文章^[11-14]屈指可数,而对哈氏合金抛光液失效指标的研究更是处于空白状态。本文将简要介绍哈氏合金 C-276 非接触式电化学抛光的抛光液配方、工艺及影响因素,并重点阐述哈氏合金 C-276 电化学抛光中抛光液失效问题的研究结果。

1 试验

1.1 工艺流程

C-276 电化学抛光工艺流程:碱洗→水洗→电化学抛光→水洗→酸洗→水洗→热水洗→干燥→检验→封装入库。

1.2 溶液配方及操作条件

酸洗配方及操作条件:常温下,硝酸质量分数为 3% ~ 10%。碱洗配方及操作条件如表 1 所示。

非接触式电化学抛光液配方及操作条件如表 2 所示。

表 1 碱洗配方及操作条件
Tab.1 Alkaline wash formula and operating conditions

配方及操作条件	数值
氢氧化钠/(g·L ⁻¹)	2 ~ 30
碳酸钠/(g·L ⁻¹)	5 ~ 50
葡萄糖酸钠/(g·L ⁻¹)	1 ~ 20
AES/(g·L ⁻¹)	0.1 ~ 2
OP-10/(g·L ⁻¹)	0.5 ~ 10
$\theta/^\circ\text{C}$	40 ~ 60
t/min	1 ~ 5

表 2 非接触式电化学抛光液配方及操作条件
Tab.2 Formula and operating conditions of non contact electrochemical polishing solution

配方及操作条件	数值
磷酸/(g·L ⁻¹)	900 ~ 1200
硫酸/(g·L ⁻¹)	300 ~ 600
聚乙二醇/(g·L ⁻¹)	10 ~ 50
光亮剂/(g·L ⁻¹)	1 ~ 10
去离子水/(g·L ⁻¹)	30 ~ 60
$\theta/^\circ\text{C}$	40 ~ 80
$J_A/(\text{A}\cdot\text{m}^{-2})$	1500 ~ 2500
$v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	0.5 ~ 1.8
阴极 (316)	不锈钢
阳极 (316)	不锈钢

1.3 抛光液中各成分测定方法

根据酸碱中和原理,采用氢氧化钠溶液滴定法测定 H_2SO_4 和 H_3PO_4 含量。 H_2SO_4 为强酸, H_3PO_4 为三元酸,酸碱中和时会出现两个滴定终点。第一个终点后加入 100 g/L 的亚铁氰化钾溶液,以防止溶液中的盐类水解。以玻璃电极为指示电极,饱和甘汞电极为参比电极,以 pH 值的突跃来指示终点。具体操作方法如下。

1.3.1 标准氢氧化钠溶液的标定

准确称取 $m=3.75\text{ g}$ (精确到 0.0001 g) 邻苯二甲酸氢钾 3 份, 溶解在 80 mL 去离子水中, 溶解缓慢可稍加热。准备一份空白的去离子水溶液 80 mL 作为对照。以酚酞为指示剂, 将氢氧化钠标准溶液滴定至上述 4 份溶液中, 记录到达滴定终点时所消耗的氢氧化钠标准溶液的体积, 分别记作 V 与 V_0 (单位 mL), 浓度计算公式为 (1)。取 3 份溶液浓度的平均值, 单位为 mol/L 。

$$c(\text{NaOH})=m\times 1000/(204.22\times (V-V_0))\tag{1}$$

1.3.2 酸浓度的测定

准确移取 10.00 mL 抛光液定容至 100 mL 容量瓶中。从容量瓶中准确移取 10.00 mL 待测液至 250 mL 烧杯中, 加入 70 mL 去离子水稀释, 将 pH 计的电极插入溶液中, 不断搅拌的情况下滴加氢氧化钠标准溶液。当 $\text{pH}=4.50$ ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时, 到达第一个滴定终点, 记录下消耗的氢氧化钠溶液的体积 V_1 , 向溶液中加入 $10\sim 12\text{ mL}$ 亚铁氰化钾溶液, 继续滴加 NaOH 溶液至 $\text{pH}=9.50$ ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$), 到达第二终点, 记录体积 V_2 。 H_3PO_4 和 H_2SO_4 的质量浓度计算公式分别为 (2) 和 (3), 单位为 g/L 。

$$c(\text{H}_3\text{PO}_4)=c(\text{NaOH})\times V_2\times 0.09799\times 1000/(10/100\times 10)\tag{2}$$

$$c(\text{H}_2\text{SO}_4)=c(\text{NaOH})\times V_1\times 0.04904\times 1000/(10/100\times 10)-c(\text{H}_3\text{PO}_4)\times 0.5005\tag{3}$$

1.3.3 各种金属离子浓度的测定

采用微波等离子体原子发射光谱仪对抛光液中的金属离子浓度进行测定。4100 MP-AES 微波等离子体-原子发射光谱仪参数: 泵速 15 r/min , 抽吸时间 15 s , 稳定时间 15 s , 读取时间 10 s , 重复次数 3 次, 背景自动校正, 检测分析波长如表 3。

表 3 各元素的分析波长选择
Tab.3 Analysis of each element wavelength selection

元素	Ni	Mn	Fe	Mo	Co	Cr
波长/nm	351.505	257.610	371.993	379.825	399.531	425.433

用 MP-AES 测试时, 样品必须进行稀释, 样品浓度需在标准溶液的线性范围内。一般情况下, 用上述容量瓶中取 5.00 mL 抛光液的稀释液, 定容至 100 mL 容量瓶中, 进样即可。

2 抛光液中各组分及工艺条件对抛光质量的影响

2.1 H_3PO_4 的影响

H_3PO_4 是形成电抛光黏液膜的主要成分之一^[15]。

H_3PO_4 的酸度低、黏度大, 在抛光过程中, 既能起到溶解作用, 又能在不锈钢表面形成磷酸盐保护膜, 可以阻止不锈钢表面发生过腐蚀。 H_3PO_4 含量高于 1200 g/L 时, 抛光液黏度高、电阻较大, 需要在较高的电压下才能抛光, 且整平速度较慢、光亮度差。 H_3PO_4 含量低于 900 g/L 时, 难以形成黏液膜, 金属离子扩散速度快, 钝化倾向小于活化倾向, 金属溶解快, 导致零件溶解不均匀, 粗糙度增大, 抛光质量下降。故 H_3PO_4 含量应控制在 $900\sim 1200\text{ g/L}$ 。

2.2 H_2SO_4 的影响

H_2SO_4 是强电解质, 在溶液中能完全电离, 有助于提高抛光液的电导率。 H_2SO_4 还具有良好的分散性, 可提高溶液的分散能力和阳极电流效率, 使不锈钢表面抛光均匀。但由于 H_2SO_4 有较强腐蚀作用, 当含量高于 600 g/L 时, 带材表面易出现过腐蚀的密集麻点, 表面粗糙度增加。而当 H_2SO_4 含量低于 300 g/L 时, 钝化倾向小于活化倾向, 加剧了不均匀腐蚀, 表面粗糙度和光亮度均下降。故 H_2SO_4 含量应控制在 $300\sim 600\text{ g/L}$ 。

2.3 聚乙二醇的影响

聚乙二醇是大分子化合物, 具有很好的电流分散性, 既可以调配抛光液的黏度, 又可以增加紧密层厚度, 促进微观整平, 便于获得光亮而细致的表面。实践证明, 聚乙二醇的含量应该控制在 $10\sim 50\text{ g/L}$ 。

2.4 光亮剂的影响

光亮剂在抛光液中的主要作用是提高抛光液的微观整平作用。它可以强烈地吸附在金属表面, 迅速降低金属的溶解量, 只溶解表面的微观凸出部分, 进而得到光亮度高、表面粗糙度小于 1 nm 的平整表面。其含量控制在 $1\sim 10\text{ g/L}$ 。

2.5 水的影响

抛光液配制过程中添加剂等组分, 都需要先用去离子水溶解, 然后才能与磷酸、硫酸混合。但是过高的水含量会降低抛光液的黏度, 使得抛光液难以形成黏液膜, 导致表面光亮度下降。而水含量太低时, 金属表面的腐蚀太快, 也难获得好的抛光质量。一般来说, 水含量控制在 $30\sim 60\text{ g/L}$ 为宜。

2.6 阳极电流密度的影响

电抛光通常在高电流密度下进行。在低阳极电流密度下, 带材处于活化状态, 表面发生侵蚀, 整平效果差。而当阳极电流密度过大时, 有氧气剧烈析出, 易造成局部过热, 产生局部腐蚀, 甚至出现点蚀密集区域, 从而影响带材表面粗糙度。此外, 在较大的阳极电流密度下

抛光,有时容易造成阳极薄膜的迅速溶解,缩短阳极寿命。综合考虑抛光质量及成本因素,选择阳极电流密度为 $1705 \sim 2046 \text{ A/m}^2$ 。

2.7 温度的影响

电化学抛光过程是在电解液中进行的,电解液的温度是影响抛光质量的重要因素。温度太低时,抛光液黏度提高,抛光效果较弱,表面不光亮。温度过高时,抛光液黏度降低,加速了溶解产物的扩散,同样影响表面光亮度,且高温对电化学抛光液影响较大,会缩短抛光液寿命。实践证明,温度维持在 $50 \sim 70^\circ\text{C}$ 的抛光效果最佳。

2.8 速度的影响

运行速度决定了 C-276 带材单位长度的抛光时间。走带速度较慢时,抛光时间过长,粗糙度虽有所降低,但导致基带机械性能下降,不利于继续加工。走带速度较快时,抛光时间过短,表面光亮度差,粗糙度达不到要求。故速度维持在 $0.5 \sim 1.8 \text{ m/min}$ 时的抛光质量最好。

3 抛光液失效分析

哈氏合金 C-276 是一种镍基合金,主要成分及含量(质量分数)为: Ni 57%, Cr 14.5%~16.5%, Mo 15.0%~17.0%,其余为 Fe、W、Mn、Co、Si、C 等,含量均在 5%以下。故在考察其抛光过程中金属离子浓度的影响时,只考虑 Ni、Cr、Mo 三种离子,其余忽略不计。

为了保证基带的表面平整度达到制备超导层的质量要求,要求基带的表面粗糙度 $Ra < 1 \text{ nm}$ (采用 AFM 测定,测定范围是 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$)。在标准抛光工艺下能够制备出达到表面粗糙度要求的基带时,所采用的抛光液为有效抛光液,反之为失效抛光液。

3.1 金属离子浓度与电量的关系

通过测定 Ni、Cr、Mo 三种金属离子浓度与电量的关系数据,绘出曲线如图 1 所示。由图可知,随着电解抛光的进行,即抛光液中通电量的增大, Ni、Cr、Mo 三种金属离子的浓度逐渐升高,抛光液中金属离子的累计浓度随之增大,这是因为抛光过程中,电解后的 Ni、Cr、Mo 全部留在了抛光液中。而且,随着通电量的增大, Ni 离子浓度几乎呈线性上升,且上升速率最快。Cr、Mo 离子浓度上升速率较慢,其平缓上升至电量为 56 Ah/L 时,开始骤然上升,原因可能是抛光液中的某种添加剂被消耗,导致 Cr、Mo 被过度溶解。

结合理论分析和实验结果,显示 Ni、Cr、Mo 金

属离子在抛光液中累积到一定值时,会析出大量沉淀和硫酸盐晶体,使溶液的抛光质量下降,进而粗糙度增大,最终失去抛光能力。

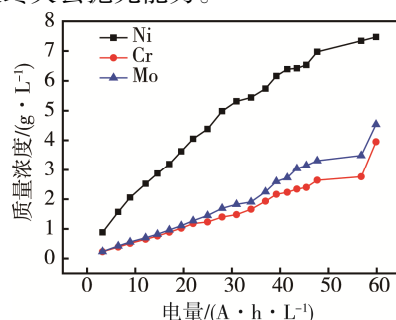


图 1 Ni、Cr、Mo 三种金属离子浓度与电量的关系
Fig.1 Change of concentration of Ni, Cr and Mo versus current density

3.2 表面粗糙度与电量的关系

哈氏合金 C-276 作为第二代高温超导体的金属基底,其工艺要求是表面粗糙度 $Ra < 1 \text{ nm}$ ($5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$)。由 C-276 带材表面的粗糙度是否达到 $Ra < 1 \text{ nm}$ 来判断抛光液的失效与否。通过金相显微镜和原子力显微镜测得 C-276 表面的微观形状轮廓和表面粗糙度 Ra ,将其与抛光工艺对应,可表征带材表面粗糙度与抛光液通电量之间的关系。

图 2 是带材表面粗糙度 Ra 与抛光液通电量之间的关系曲线图。如图所示,随着抛光液累计通电量的增加,带材表面粗糙度 Ra 缓慢增加,直到通电量为 56 Ah/L 时,粗糙度 Ra 逼近 1 nm 。当通电量达到 56 Ah/L 以上时,粗糙度 $Ra > 1 \text{ nm}$,带材表面状况不符合工艺要求,此时通电量下的抛光液为失效状态。

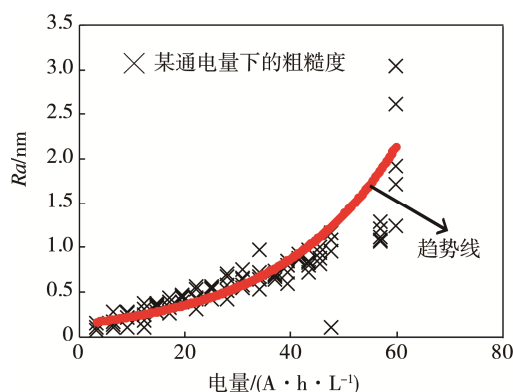


图 2 粗糙度与抛光液通电量之间的关系
Fig.2 Change of Ra versus current density

图 3 是哈氏合金 C-276 带材抛光前、后及采用失效抛光液抛光后的金相显微镜图片、原子力显微镜图片和扫描电镜图片。结果表明,未抛光的带材表面有冷轧过程中产生的沟槽效应,表面十分粗糙,轧制方向上具有较为明显的辊印和划痕,如图 3a 所示。同

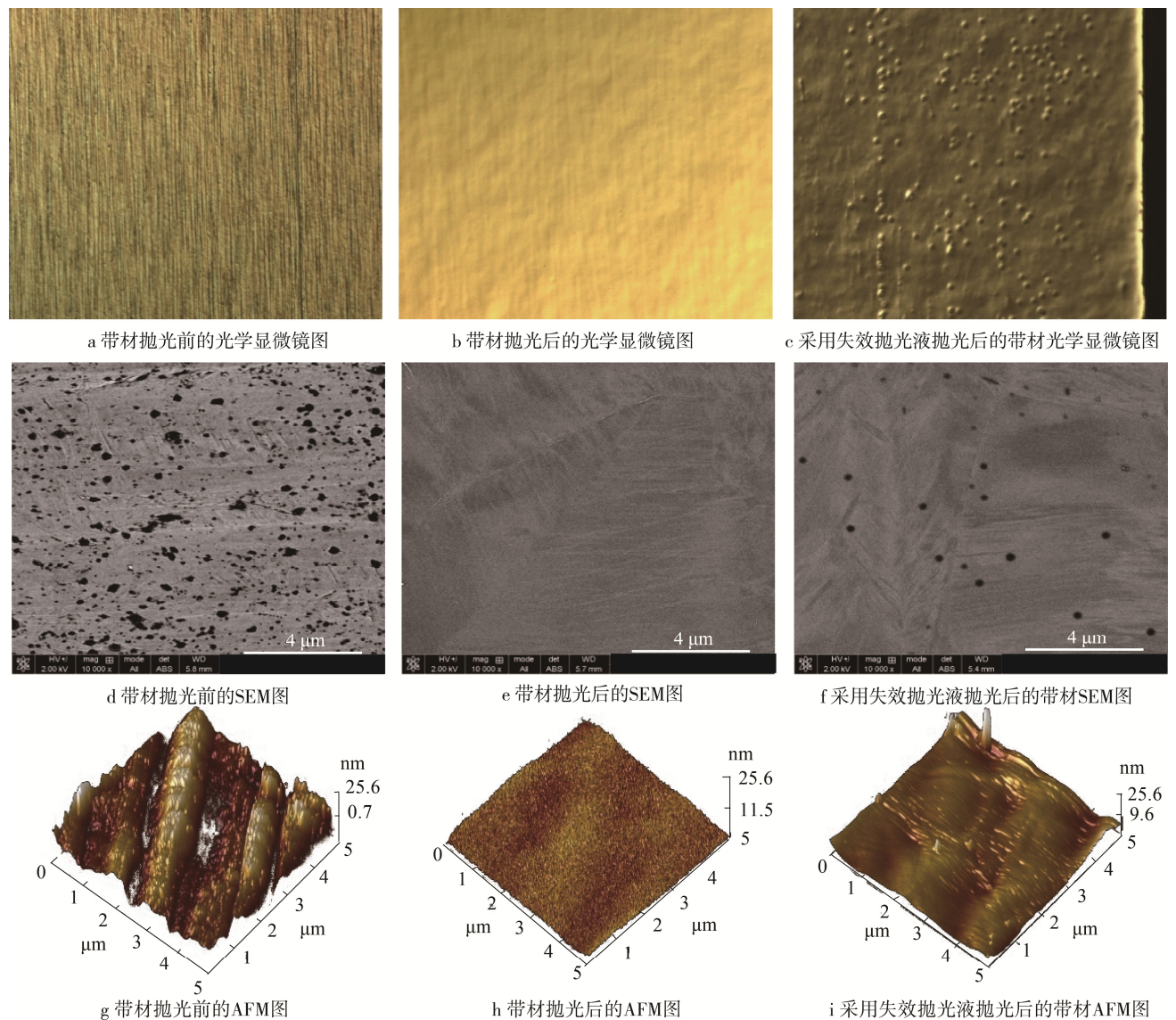


图 3 C-276 带材抛光前、后及采用失效抛光液抛光后的金相显微镜图、SEM 图和 AFM 图
Fig.3 Comparison of before and after polishing with failure polishing solution: a), b), c) metallographic microscope pictures;d), e), f)SEM pictures; g), h), i) AFM pictures

时，在其扫描电镜图（3d）上可以清楚看到，带材表面黑色油污、颗粒较多，凸起及纹路明显，采用原子力显微镜测试其表面粗糙度， Ra 达到了 11.329 nm（图 3g）。图 3b 为抛光后带材的光学显微镜图，该图显示抛光后的带材表面光滑、平整，冷轧过程中产生的沟槽效应也已基本消失，其扫描电镜图（3e）也显示出其表面光滑均匀，无明显突起及颗粒，图 3h 为其原子力显微镜图，测试其 Ra 为 0.609 nm。图 3c、3f、3i 分别是采用失效抛光液抛光后的带材的对比图，图 3c 显示带材表面有较多 1~5 μm 大小的点蚀，其扫描电镜图（3f）表面出现了较多的黑色颗粒物，同时原子力显微镜图（3i）显示表面有较高的突刺物，导致粗糙度增大为 1.49 nm，不满足 $Ra<1\text{ nm}$ 的工艺要求。

3.3 H_2SO_4 、 H_3PO_4 含量与电量的关系

抛光液的抛光能力主要由 H_2SO_4 和 H_3PO_4 的含

量决定。通过图 4 可以看出，随着通电量的增加， H_2SO_4 和 H_3PO_4 的浓度逐渐下降，在通电量为 56 Ah/L 时， H_2SO_4 和 H_3PO_4 含量陡然下降，表明抛光

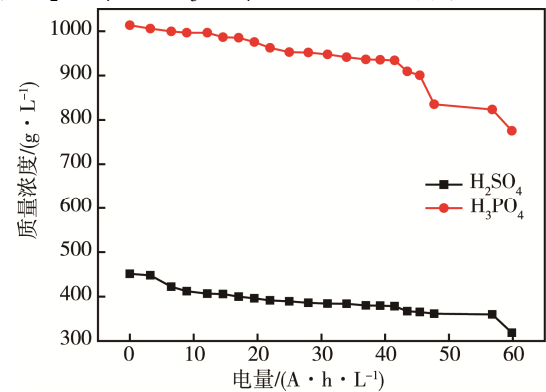


图 4 磷酸、硫酸浓度与通电量之间的关系曲线
Fig.4 Change concentration of phosphoric acid, sulfuric acid vesus current density

液中的添加剂(如缓蚀剂等)已被消耗殆尽,造成带材表面过腐蚀,进而 H_2SO_4 和 H_3PO_4 被大量消耗,这与图 1 中金属离子浓度陡然升高的现象相符合。由于通电量大于 56 Ah/L 时,抛光液将失去抛光能力,因此,相对应的 H_3PO_4 、 H_2SO_4 的含量在 775 ~ 1013 g/L、318 ~ 451 g/L 范围内是有效的。

3.4 抛光液失效指标

根据以上分析,当抛光液中通电量 < 56 Ah/L 时,抛光后 C-276 带材表面的粗糙度才能满足工艺要求 $Ra < 1 \text{ nm}$ ($5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$),抛光液有效。此时, H_3PO_4 、 H_2SO_4 含量在 775 ~ 1013 g/L、318 ~ 451 g/L 范围内, Ni、Cr、Mo 三种金属离子质量浓度分别小于 7.3、2.7、3.4 g/L。否则,判定该抛光液失效。

4 结论

1) 在其他工艺条件稳定的条件下, H_3PO_4 、 H_2SO_4 的含量是影响抛光质量的重要因素。为了保证生产工艺连续性和抛光质量 $Ra < 1 \text{ nm}$ ($5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$), H_3PO_4 、 H_2SO_4 的含量应控制在 775 ~ 1013 g/L、318 ~ 451 g/L 范围内,并过滤抛光液,补加添加剂。

2) 采用以 H_3PO_4 、 H_2SO_4 为主要成分的抛光液对哈氏合金 C-276 进行电解抛光时,抛光液中 Ni、Cr、Mo 等金属离子的浓度影响了抛光液的失效与否,当 Ni、Cr、Mo 三种金属离子质量浓度分别大于 7.3、2.7、3.4 g/L 时,抛光液失效,此时抛光液的累计通电量可作为抛光液使用寿命的衡量标准。

参考文献:

- [1] IJIMA Y, TANABE N, KOHNO O, et al. In-phase Aligned $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Thin Film Deposited on Polycrystalline Metallic Substrate[J]. Applied Physics Letters, 1992, 60(6): 769—771.
- [2] CHEN S C, TU G C, HUANG C A. The Electrochemical Polishing Behavior of Porous Austenitic Stainless Steel (AISI316L) in Phosphoric-Sulfuric Mixed Acids[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(7): 2065—2071.
- [3] 杨建文, 廖玉成, 张学健. 不锈钢电化学抛光及着金黄色工艺[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(12): 921—923.
YANG Jian-wen, LIAO Yu-cheng, ZHANG Xue-jian. Process of Electrochemical Polishing and Golden Coloring of Stainless steel[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(12): 921—923.
- [4] 肖鑫, 郭贤烙, 钟萍, 等. 不锈钢化学着色的低温工艺研究[J]. 材料保护, 2001, 34(11): 25—27.
XIAO Xin, GUO Xian-luo, ZHONG Ping, et al. Study on Low Temperature Process of Chemical Staining of Stainless Steel[J]. Materials Protection, 2001, 34(11): 25—27.
- [5] 姚颖悟, 邱立, 赵春梅. 不锈钢化学抛光工艺的研究[J]. 电镀与精饰, 2010, 32(9): 5—7.
YAO Ying-wu, QIU Li, ZHAO Chun-mei. Study on Chemical Polishing Process of Stainless Steel[J]. Plating and Finishing, 2010, 32(9): 5—7.
- [6] 张述林, 王晓波, 陈世波. 不锈钢抛光[J]. 电镀与环保, 2006, 26(3): 34—35.
ZHANG Shu-lin, WANG Xiao-bo, CHEN Shi-bo. Stainless Steel Polishing[J]. Electroplating & Pollution Control, 2006, 26(3): 34—35.
- [7] 姚颖悟, 贺亮, 张鑫, 等. 不锈钢电抛光技术[J]. 电镀与精饰, 2010, 32(5): 16—18.
YAO Ying-wu, HE Liang, ZHANG Xin, et al. Electropolishing Technology of Stainless Steel[J]. Plating and Finishing, 2010, 32(5): 16—18.
- [8] 刘恒全, 季士委, 潘长江, 等. 电化学抛光中电解液的失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 27(2): 151—153.
LIU Heng-quan, JI Shi-wei, PAN Chang-jiang, et al. An Analysis on Inefficacy of Electrolyte for Electrochemical Polishing[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 27(2): 151—153.
- [9] KLOCKE F, SPARRER M. Electrochemical Finishing—The Faster Way to Finished Dies and Moulds[J]. Journal for Manufacturing Science & Production, 1998, 1(4): 247—256.
- [10] MASUZAWA T. Quick Finishing of WEDM Products by ECM Using a Mate-electrode[J]. Annals of CIRP, 1997, 46(1): 123.
- [11] 朱海, 吴向阳, 彭东辉, 等. YBCO 涂层导体用哈氏合金 C-276 基带电化学抛光[J]. 化工机械, 2014, 41(4): 423—426.
ZHU Hai, WU Xiang-yang, PENG Dong-hui, et al. Electrochemical Polishing of Hastelloy C-276 Substrate for YBCO Coated Conductor[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2014, 41(4): 423—426.
- [12] 高永超, 程好, 杨淑平, 等. 金属基带的连续非接触式电化学抛光[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 105—108.
GAO Yong-chao, CHENG Hao, YANG Shu-ping, et al. Non-contact and Continuous Electrochemical Polishing of the Metal Strip[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 105—108.
- [13] 马淑雅, 吴松林. 室温固化 RT-III 防热涂层及其应用[J]. 航天制造技术, 2002(4): 22—25.
MA Shu-ya, WU Song-lin. RT-III Heat-resistant Coatings Cured at Room Temperature and Its Application[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2002(4): 22—25.
- [14] 钱逢麟, 笠玉书. 涂料助剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
QIAN Feng-lin, LI Yu-shu. Paint Additives[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [15] 方景礼. 金属材料抛光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
FANG Jing-li. Metal Materials Polishing Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.