

电解质等离子体抛光 316LVM 表面形貌及电化学特性

段海栋^a, 孙桓五^{a,b}, 纪刚强^a, 张东光^a, 孙金言^a, 杨冬亮^a

(太原理工大学 a.机械与运载工程学院

b.煤炭资源开采利用与装备工程国家级实验教学示范中心, 太原 030024)

摘要:目的 研究电解质等离子体抛光对 316LVM 植入物不锈钢表面形貌及其在磷酸缓冲盐溶液中的电化学特性的影响, 解决复杂形状植入物表面抛光难题。方法 原材料经线切割及表面预处理, 制成 20 mm×15 mm×3 mm 的试验样件。对试样分别进行机械抛光及电解质等离子体抛光。机械抛光在砂带抛光机上进行, 使用 600、800、1200、2000、5000 目的砂带逐级磨抛。电解质等离子体抛光中, 电压为 300 V, 电解液为 3% (质量分数) (NH₄)₂SO₄ 水溶液, 温度为 85~90 °C, 抛光时间为 15 min。通过粗糙度仪、扫描电镜, 对试样表面粗糙度、微观形貌进行测试表征。通过能谱仪、X 射线衍射仪, 对试样表面元素含量、物相组成进行测试表征。通过电化学工作站, 对磷酸缓冲盐溶液中的试样, 进行电化学测试。结果 电解质等离子体抛光后, 试样表面粗糙度由初始的 0.5 μm 降至 0.089 μm, 试样表面机械加工痕迹被去除, 平整光亮。机械抛光后, 试样表面化学元素未发生明显变化, 而电解质等离子体抛光后, 试样表面的 Fe、Cr 含量升高。机械抛光表面的 X 射线衍射峰位置和强度未发生明显变化, 电解质等离子体抛光后, 在衍射角为 43.5° 处, 衍射峰强度明显降低, 在 74.5° 处, 衍射峰强度明显升高, 同时各峰的半高宽明显减小。在磷酸缓冲盐溶液中, 机械抛光试样的自腐蚀电位由 -0.252 V 升高至 -0.232 V, 腐蚀电流密度由 1.611 μA/cm² 降低至 0.5867 μA/cm², 极化电阻由 28.876 kΩ 升高至 64.682 kΩ。电解质等离子体抛光试样的自腐蚀电位由 -0.252 V 升高至 -0.214 V, 腐蚀电流密度由 1.611 μA/cm² 降低至 0.1582 μA/cm², 极化电阻由 28.876 kΩ 升高到 251.262 kΩ。结论 电解质等离子体抛光可有效降低 316LVM 表面的粗糙度, 提高表面平整度。电解质等离子体抛光后, 表面 Fe、Cr 元素的含量升高, 晶粒尺寸增大, 呈(220)晶面择优取向。电解质等离子体抛光可提高 316LVM 在磷酸缓冲盐溶液中的耐腐蚀性能。

关键词: 316LVM; 电解质等离子体抛光; 表面形貌; 磷酸缓冲盐溶液; 晶粒尺寸; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG175 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)08-0396-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.040

Surface Morphology and Electrochemical Characteristics of 316LVM Polished by Electrolytic Plasma

收稿日期: 2020-09-14; 修订日期: 2020-11-24

Received: 2020-09-14; Revised: 2020-11-24

基金项目: 山西省重点研发计划项目 (201903D121091)

Fund: Supported by the Key R&D Projects in Shanxi Province (201903D121091)

作者简介: 段海栋 (1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为精密与超精密加工。

Biography: DUAN Hai-dong (1987—), Male, Doctor, Research focus: precision and ultra precision machining.

通讯作者: 孙桓五 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密与超精密加工。

Corresponding author: SUN Huan-wu (1966—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and ultra precision machining.

引文格式: 段海栋, 孙桓五, 纪刚强, 等. 电解质等离子体抛光 316LVM 表面形貌及电化学特性[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 396-403.

DUAN Hai-dong, SUN Huan-wu, JI Gang-qiang, et al. Surface morphology and electrochemical characteristics of 316LVM polished by electrolytic plasma[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 396-403.

**DUAN Hai-dong^a, SUN Huan-wu^{a,b}, JI Gang-qiang^a, ZHANG Dong-guang^a,
SUN Jin-yan^a, YANG Dong-liang^a**

(a.College of Mechanical and Vehicle Engineering, b.National Demonstration Center for Experimental Coal Resource and Mining Equipment Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: The aims of this study is to obtain the influence of electrolytic plasma polishing on the surface morphology of 316LVM implant stainless steel and its electrochemical characteristics in phosphate buffer solution and solve the surface polishing problem of complex shaped implants. After wire cutting and surface preprocessing, the raw materials were made into 20 mm×15 mm×3 mm test samples. The samples were polished by mechanical polishing and electrolytic plasma polishing respectively. Mechanical polishing was carried out on an abrasive belt polishing machine by using 600 mesh, 800 mesh, 1200 mesh, 2000 mesh, and 5000 mesh abrasive belts and polished step by step. In the electrolytic plasma polishing, the voltage was 300 V, the electrolyte was 3wt.% (NH₄)₂SO₄ aqueous solution, the temperature was 85~90 °C, and the polishing time was 15 min. The surface roughness and micro morphology of the samples were tested by roughness meter and scanning electron microscope, the element composition and phase of samples were tested by energy dispersive spectrometer and X-ray diffractometer, and the electrochemical test in phosphate buffer solution was carried out by electrochemical workstation. The results showed that electrolytic plasma polishing reduced the surface roughness of the sample from 0.5 μm to 0.089 μm, the mechanical processing traces of the sample was removed, and the sample was smooth and bright. After mechanical polished, the chemical elements of the sample did not changed significantly, and the contents of Fe and Cr of the sample polished by electrolytic plasma polishing increased. The position and intensity of the X-ray diffraction peaks of mechanical polished samples did not changed significantly. After electrolytic plasma polishing, the intensity of the diffraction peak at the diffraction angle of 43.5° was significantly reduced and at the diffraction angle of 74.5° was significantly increased. At the same time, the FWHM of each peak was significantly reduced. The self-corrosion potential of mechanically polished and electrolytic plasma polished samples in phosphate buffer solution increased from -0.252 V to -0.232 V and -0.214 V, and the corrosion current density decreased from 1.611 μA/cm² to 0.5867 μA/cm² and 0.1582 μA/cm², the polarization resistance increased from 28.876 kΩ to 64.682 kΩ and 251.262 kΩ. It can be concluded that electrolytic plasma polishing can effectively reduce the surface roughness of 316LVM and improve the surface flatness. After electrolytic plasma polishing, the Fe and Cr element content increases, the grain size increases, and manifests the (220) crystal plane preferential orientation. Electrolytic plasma polishing can improve the corrosion resistance of 316LVM in PBS.

KEY WORDS: 316LVM; electrolytic plasma polishing; surface morphology; phosphate buffer solution; grain size; corrosion resistance

不锈钢具有良好的耐腐蚀性能和综合力学性能,且加工工艺简便,是生物医用金属材料中应用最多、最广的一类材料^[1-2]。316LVM 不锈钢具有化学性能稳定、空隙及污染物含量极低的特性,广泛应用于骨科、牙科和心血管植入物^[3],如人工关节^[4-5]、冠状动脉支架^[6]等。金属植入物的表面质量对产品的成品率及生物相容性有重要影响,如冠状动脉支架是治疗心血管狭窄引起的冠心病的有效手段之一,支架表面的粗糙度是血栓形成和组织反应的重要决定因素之一。光滑的表面有助于防止血小板的活化和聚集,降低血栓形成^[7],同时有助于提高植入物的耐腐蚀性能^[8],降低摩擦系数^[9],减少金属碎屑的产生。

抛光作为金属植入物加工的重要环节,是降低植入物表面粗糙度的关键,对产品的成品率及性能有重要的影响。目前,金属植入物的抛光难题主要是植入物的形状复杂,虽然激光抛光^[10]、磁流变抛光^[11]等方法可

以对植入物金属材料进行抛光,但难以实现对复杂形状植入物的抛光。电化学抛光^[12]技术可实现对部分复杂形状产品的抛光,但电化学抛光过程中,多使用浓度较高的无机酸溶液,对环境会造成一定的危害^[13-15]。

本文提出采用电解质等离子体抛光的技术对植入物不锈钢 316LVM 进行抛光。电解质等离子体抛光技术(Electrolytic Plasma Polishing, EPP)是结合等离子体技术和电解加工技术的新技术。加工装置如图 1 所示,被加工的工件作为阳极浸入电解液中,并施加直流高压,随着电压的升高,形成一个完全包围工件的气层,并在高电压的作用下进入等离子态,凸起部分在电解液及等离子体的作用下被去除,从而实现对工件表面的抛光^[16-18]。该技术可实现对导电材料复杂形状表面的高效抛光,同时抛光液为低浓度无机盐水溶液,抛光过程绿色环保^[19],可实现金属植入物或其他生物医用金属及合金产品的高效、无污染抛光^[20]。

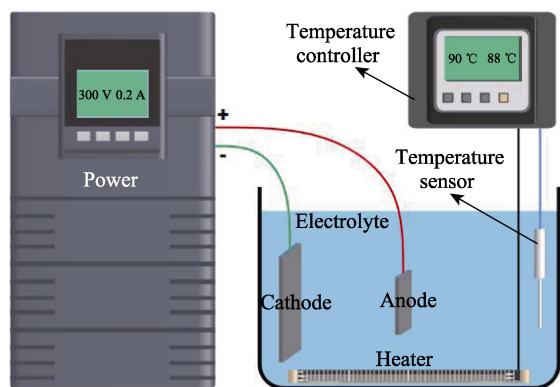


图 1 电解质等离子体抛光系统
Fig.1 Electrolyte plasma polishing system

目前,电解质等离子体抛光的相关研究主要集中于工艺参数、材料扩展及机理探索,对金属植入物材料抛光及抛光后耐腐蚀性的研究较少。本文采用电解质等离子体抛光技术对 316LVM 进行抛光,获得了较好的抛光效果,在此基础上,通过表面粗糙度测试、SEM、EDS、XRD 等测试分析技术,研究了电解质

等离子体抛光对 316LVM 表面粗糙度、微观形貌、元素、相组成的影响规律,并通过电化学测试分析,探讨了电解质等离子体抛光对 316LVM 表面在 PBS 模拟体液中耐腐蚀性能的强化机制。

1 试验

1.1 试样制备

电解质等离子体抛光在复杂形状零部件的抛光中有较大优势,为测试方便,本试验的原材料选择厚度为 3 mm 的 316LVM 冷轧不锈钢板,由苏州埃文特种合金有限公司提供。通过线切割机床将原材料加工成 20 mm×15 mm×3 mm 的试样,使用砂带磨抛机对试样表面进行预处理,去除试样表面的氧化层,并使各试样表面粗糙度 Ra 一致 ($0.5\ \mu\text{m}$ 左右)。用无水乙醇和去离子水先后在超声波清洗机中清洗 20 min,在干燥箱中干燥备用。预处理试样记为 PP (Pre-Processing)。预处理试样表面粗糙度参数如表 1 所示。

表 1 预处理试样表面粗糙度参数

Tab.1 Surface roughness parameters of pre-processing samples

	$Ra_1/\mu\text{m}$	$Ra_2/\mu\text{m}$	$Ra_3/\mu\text{m}$	$Rq_1/\mu\text{m}$	$Rq_2/\mu\text{m}$	$Rq_3/\mu\text{m}$	$Rz_1/\mu\text{m}$	$Rz_2/\mu\text{m}$	$Rz_3/\mu\text{m}$
1	0.551	0.560	0.501	0.707	0.788	0.621	4.65	6.83	3.54
2	0.530	0.513	0.537	0.695	0.692	0.738	5.187	5.725	6.153
3	0.559	0.556	0.537	0.744	0.700	0.690	6.494	4.392	5.529

3 号试样在预处理的基础上再进行电解质等离子体抛光,试验在 3% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 水溶液中进行,温度为 85~90 °C,电压为 300 V,时间为 15 min,加工后的试样依次在无水乙醇和去离子水中超声清洗 20 min,之后在干燥箱中干燥,记为 EPP (Electrolytic Plasma Polishing)。为了验证电解质等离子体抛光试样表面耐腐蚀性的提高不仅是加工后表面粗糙度降低引起的,将 2 号预处理试样在砂带磨抛机上依次用 600、800、1200、2000、5000 目的砂带,进行逐级磨削,加工至粗糙度值与电解质等离子体抛光试样相近,作为对照组。加工后的试样依次在无水乙醇和去离子水中超声清洗 20 min 后,在干燥箱中干燥,机械加工后试样记为 MP (Mechanical Processing)。

1.2 检测分析

通过粗糙度仪 (Mahr M400) 测量加工前后试样表面的粗糙度值。通过带能谱的扫描电子显微镜 (JSM-IT500) 观察加工前后试样的表面形貌并检测试样表面元素成分。通过 X 射线衍射仪 (DX2700B) 分析加工前后试样表面的相组成。通过电化学工作站 (Chi660E),在磷酸缓冲盐溶液 (PBS) 中,采用三电极体系测试加工前后试样的动电位极化曲线。试样为工作电极,饱和甘汞电极为参比电极,铂电极为辅助电极,暴露面积为 $1\ \text{cm}^2$,扫描速度为 $1\ \text{mV/s}$ 。磷

酸缓冲盐溶液成分如表 2 所示。

表 2 磷酸缓冲盐溶液成分

Tab.2 Composition of phosphate buffer solution

g/L			
KH_2PO_4	Na_2HPO_4	NaCl	KCl
0.24	1.44	8.0	0.2

2 结果与讨论

2.1 表面粗糙度及形貌分析

表 3 为加工后试样表面粗糙度,图 2 为加工前后试样表面的粗糙度变化。经机械抛光及电解质等离子体抛光后,试样表面粗糙度都明显降低,抛光效果明显。机械加工试样表面的 Ra 和 Rq 都比电解质等离子体抛光表面小,但 Rz 较大。由图 3 可知,机械磨削是通过一定粒度的磨料将试样表面材料在一定深度上进行切削去除,相对轮廓基准线,轮廓各峰顶的高度基本相同,轮廓谷底深度基本相同,轮廓峰谷间距较均匀。电解质等离子体抛光过程中,位于轮廓基准线以上的表面凸起被去除,轮廓峰变的平滑, Rz 较小。同时,位于轮廓基准线以下的峰也被去除,峰顶对应点与基准线的距离增大, Ra 和 Rq 较大。

表 3 加工后试样表面粗糙度
Tab.3 Surface roughness of processed samples

	$Ra_1/\mu\text{m}$	$Ra_2/\mu\text{m}$	$Ra_3/\mu\text{m}$	$Rq_1/\mu\text{m}$	$Rq_2/\mu\text{m}$	$Rq_3/\mu\text{m}$	$Rz_1/\mu\text{m}$	$Rz_2/\mu\text{m}$	$Rz_3/\mu\text{m}$
PP	0.551	0.560	0.501	0.707	0.788	0.621	4.65	6.83	3.54
MP	0.069	0.071	0.075	0.091	0.090	0.109	0.61	0.59	1.27
EPP	0.089	0.087	0.090	0.118	0.112	0.122	0.52	0.53	0.64

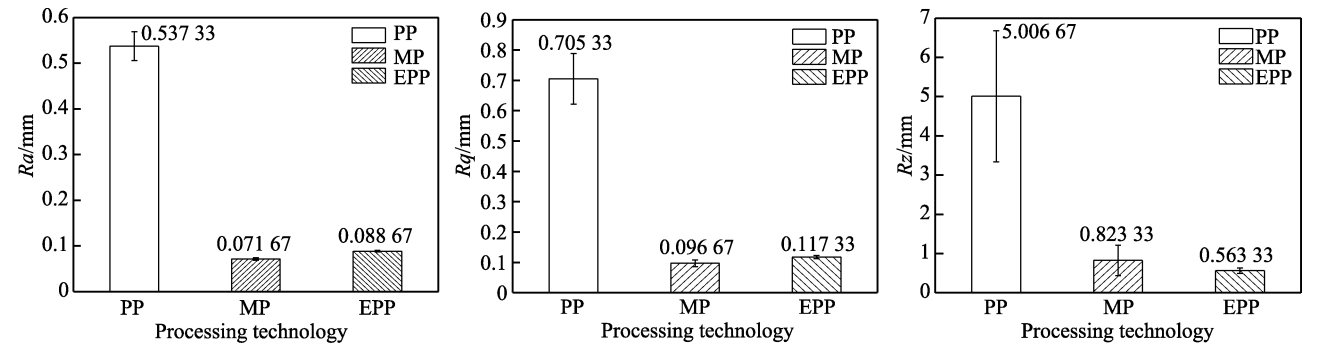


图 2 加工前后试样表面粗糙度参数变化
Fig.2 Variation of surface roughness parameters before and after machining

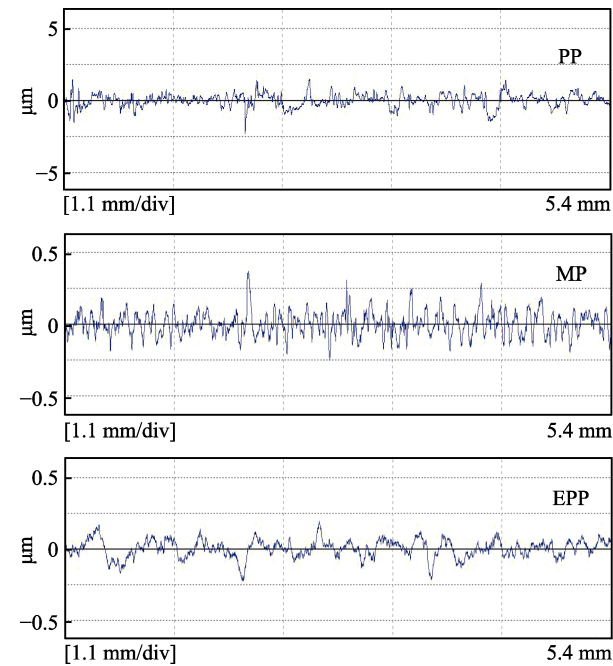


图 3 试样表面轮廓
Fig.3 Surface profile curve of samples

图 4 为试样表面的微观形貌。预处理试样表面具有较宽、较深的磨痕及未脱落的层状碎屑。这是由于在法向载荷的作用下，大尺寸磨料颗粒压入试样表面，磨料颗粒在试样表面滑动时产生摩擦力，使表面被磨料颗粒剪切、犁皱和切削，产生槽状磨痕。同时，由于材料的塑性较强，在载荷作用下，磨料颗粒将试样表面挤压出层状及鳞片状碎屑，附着于磨痕两侧^[21]。机械抛光试样表面是在微小尺寸的磨料颗粒加工下获得的，磨料的颗粒大小与磨损量成正比，加工后表面仍可见轻微磨痕，但磨痕的宽度、深度及粘着碎屑的尺寸较预处理试样明显减小。

电解质等离子体抛光在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液中进行。加工过程中，随着电解液温度的升高，在试样表面产生高浓度的蒸汽气层，试样表面气层中包含来自电解液的 H^+ 、 OH^- 、 SO_4^{2-} 、 O^{2-} ，气层在高电压的作用下，发生击穿而形成大量 O_3 、 H_2O_2 、 $-\text{OH}$ 等氧化性物质及基团，试样表面金属元素被氧化，生成氧化物，并在气泡空化剥离及等离子体冲击的作用下被去除^[22]。试样表面凸起部位的电场分布集中，电流密度较大，

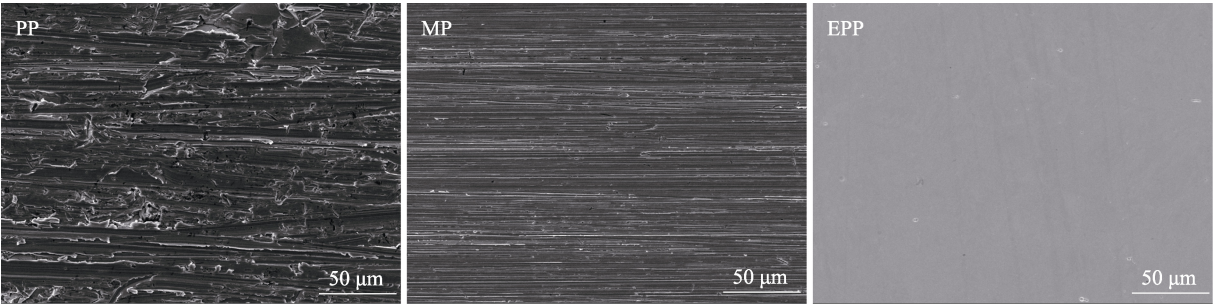


图 4 试样表面 SEM
Fig.4 SEM image of sample surface

等离子体能量较高,材料更容易去除,从而使试样表面平整。加工后试样表面只存在少量机械加工痕迹,表面平整光滑。结合图3分析可知,由于基准线以上轮廓峰的去除,使电解质等离子体抛光试样表面较机械加工表面更加平整光滑。基准线以下轮廓峰的去除,峰顶对应点与基准线的距离增大,使其粗糙度与机械加工表面相差不大。

2.2 表面元素成分及相组成分析

图5为试样表面的EDS能谱,在磨抛过程中,

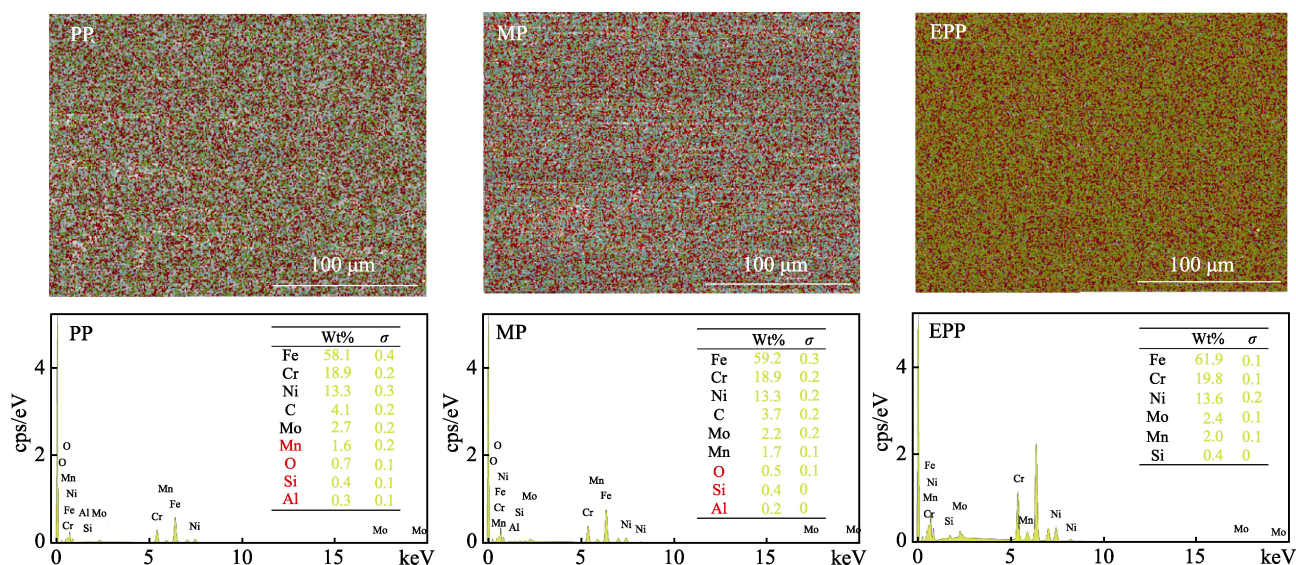


图5 试样表面 EDS 图谱
Fig.5 EDS spectrum of sample surface

图6为试样表面的XRD图谱。各试样在衍射角为 43.5° 、 50.5° 、 74.5° 、 90.4° 、 95.8° 处出现了不同强度的衍射峰。通过与标准PDF卡片对比分析可知,3种试样表面的物相均为奥氏体相,其晶体为面心立方结构,衍射峰分别对应(111)、(200)、(220)、(311)、(222)晶面。由图7可知,在衍射峰强度上,与预处理试样相比,机械抛光试样的衍射峰强度无明显变化,电解质等离子体抛光试样在(111)晶面所对应的衍射峰强度大幅降低,(220)晶面所对应的衍射峰强度大幅升高,试样晶面择优取向由(111)晶面变为(220)晶面。电解质等离子体抛光过程中,试样表面形成的气层在高电压的作用下产生高能等离子体通道,通道由于内部存在高压,形成巨大的压力梯度和等离子体边界上的温度梯度,膨胀势能和热辐射压力能的叠加,使等离子体急速向外膨胀,再由于水介质的弱压缩性,实现了电能到机械能的高速转化,使其以波的形式传播出去,形成冲击压力波^[23]。试样表面在热及冲击力的共同作用下,发生了晶体结构的变化。

由图7可知,电解质等离子体抛光试样各衍射峰的宽度明显变窄。通过对衍射谱的拟合,测得各衍射峰的半高宽如图8所示。与预处理试样相比,机械抛

预处理试样及机械抛光试样表面都有 Al_2O_3 及C污染物的残留,试样中检测到C、O、Al元素。电解质等离子体抛光可有效地去除试样表面在预处理加工中混入的杂质,不含上述元素。机械抛光试样表面各主要元素的相对含量与预处理试样相比基本保持不变。由EDS能谱可知,电解质等离子体抛光后,试样表面的Fe、Cr元素相对含量升高,Fe/Cr未发生明显变化,这主要是由于电解质等离子体抛光将试样表面杂质去除,使更多的Fe和Cr暴露于材料表层。

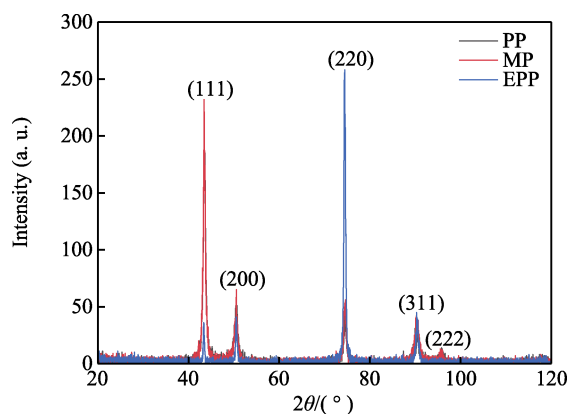


图6 试样表面 XRD 图谱
Fig.6 XRD spectrum of samples

光试样各衍射峰的半高宽变化较小,电解质等离子体抛光后,各试样衍射峰的半高宽大幅度减小。通过JADE软件计算得出,预处理试样的平均晶粒尺寸为 $17.8\ \mu\text{m}$,机械抛光试样的平均晶粒尺寸为 $20.1\ \mu\text{m}$,电解质等离子体抛光试样的平均晶粒尺寸为 $28.5\ \mu\text{m}$,电解质等离子体抛光使试样表面的晶粒尺寸增大。奥氏体晶粒的长大是一种热激活、扩散与界面反应控制的物理过程,主要表现为晶界迁移。在电解质等离

子体抛光过程中,存在电流热效应、等离子体热效应,使试样温度升高,当温度升高到一定值后,在奥氏体晶界净驱动力的作用下发生晶界迁移,导致晶粒长大^[24]。

2.3 电化学测试分析

图 9 为不同加工方式获得的试样在磷酸缓冲盐溶液中的动电位极化曲线。表 4 是由动电位极化曲线

求得的极化参数,其中, E_{corr} 为自腐蚀电位, J_{corr} 为自腐蚀电流密度, 阴极 Tafel 斜率 b_a , 阳极 Tafel 斜率 b_c , R_p 为极化电阻。由表 4 可知, 自腐蚀电位排序为 $\text{EPP}>\text{MP}>\text{PP}$, 自腐蚀电流密度排序为 $\text{PP}>\text{MP}>\text{EPP}$, 极化电阻排序为 $\text{EPP}>\text{MP}>\text{PP}$ 。自腐蚀电位越高, 自腐蚀电流密度越小, 极化电阻越大, 材料的耐腐蚀性越强^[25], 电解质等离子体抛光可以有效提高 316LVM 在磷酸缓冲盐溶液中的耐腐蚀性能。

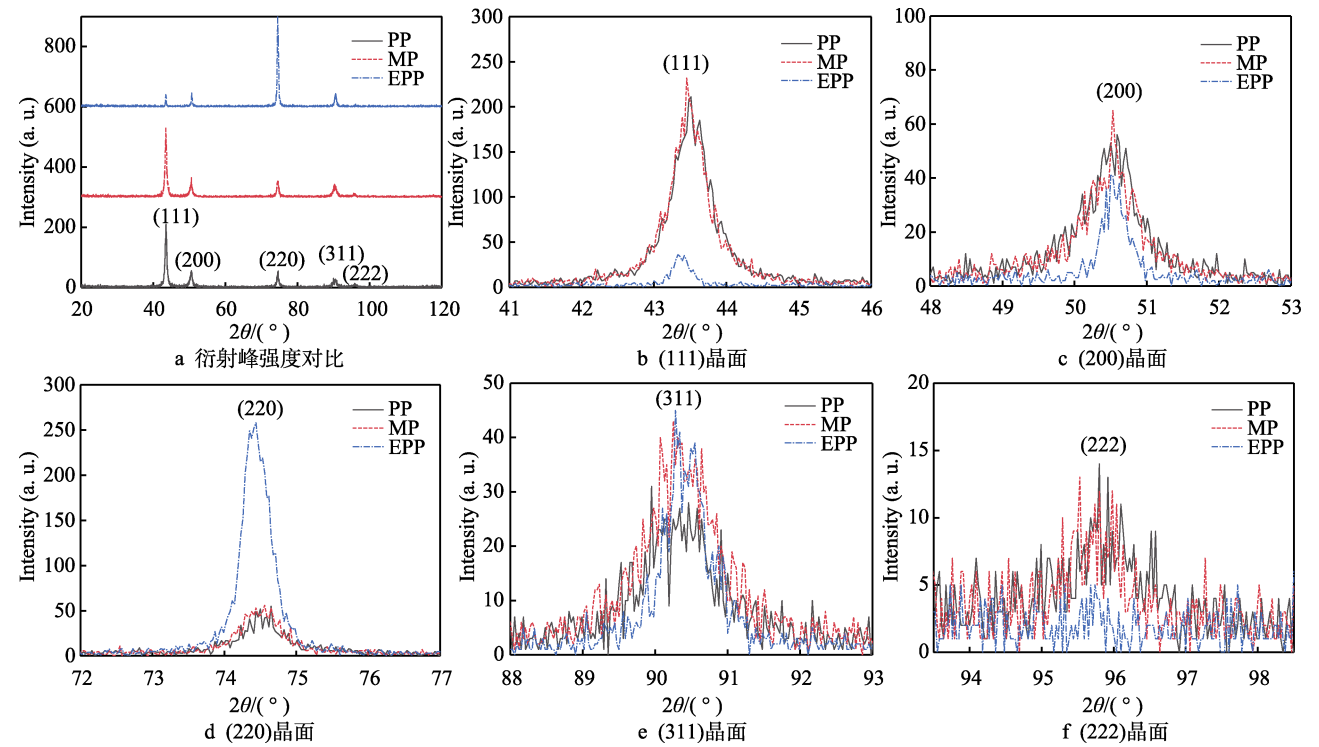


图 7 试样衍射峰放大图

Fig.7 Enlarged diffraction peak of samples: a) comparison of diffraction peak intensity; b) (111) crystal plane; c) (200) crystal plane; d) (220) crystal plane; e) (311) crystal plane; f) (222) crystal plane

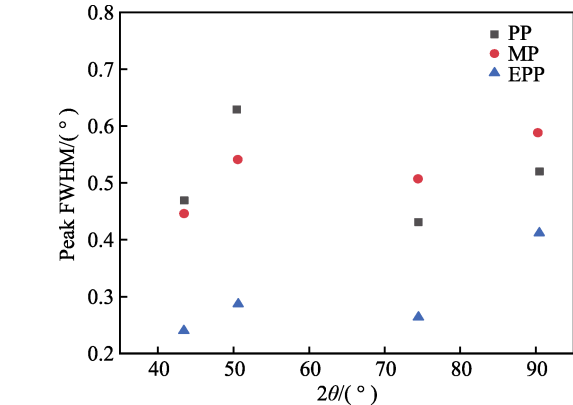


图 8 试样衍射峰半高宽图谱
Fig.8 Peak FWHM of samples

降低材料表面粗糙度、提高表面平整度可以提高材料表面的耐腐蚀性,这主要是由于较低的表面粗糙度,有利于降低材料表面与磷酸缓冲盐溶液的接触面积,从而减缓材料表面与磷酸缓冲盐溶液之间的化学反应^[26]。电解质等离子体抛光试样与机械抛光试样相

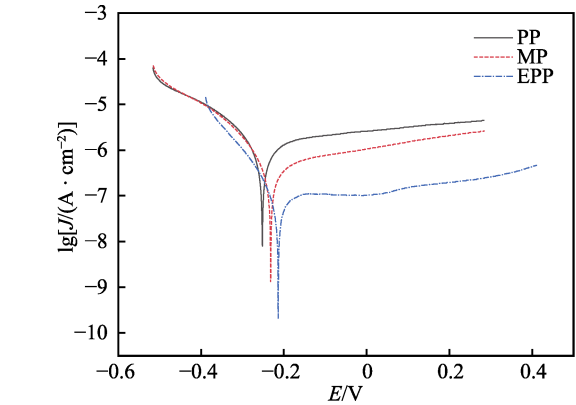


图 9 试样表面动电位极化曲线
Fig.9 Potentiodynamic polarization curve of samples

表 4 试样表面动电位极化参数
Tab.4 Potentiodynamic polarization parameters of samples

	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	b_a/V^{-1}	b_c/V^{-1}	$R_p/\text{k}\Omega$
PP	-0.252	1.611	7.206	2.139	28.876
MP	-0.232	0.5867	8.985	2.473	64.682
EPP	-0.214	0.1582	10.918	0.023	251.262

比,粗糙度虽然较大,但耐腐蚀性能进一步提高。这是因为,不锈钢中 Cr 含量的升高有助于提高其耐氧化性介质、耐酸性氯化物介质以及耐局部腐蚀的性能,如晶间腐蚀、点腐蚀、缝隙腐蚀以及某些条件下应力腐蚀的性能^[27]。电解质等离子体抛光表面较机械抛光表面的 Cr 元素含量升高,在磷酸缓冲盐溶液中,更容易形成完整、致密的钝化膜,阻止反应的进行,提高其耐腐蚀性能。此外,晶粒尺寸越小,表面电子结构分布越不稳定,越易失去电子,腐蚀电流密度越大,耐腐蚀性越弱^[28],较机械抛光试样,电解质等离子体抛光表面的晶粒尺寸增大,表面电子结构分布稳定,不易失去电子,耐腐蚀性能增强。

3 结论

1) 电解质等离子体抛光可有效降低 316LVM 的表面粗糙度,提高表面平整度及光泽度,可使表面粗糙度由 0.5 μm 降至 0.089 μm ,符合标准 YY0502—2005 中全膝关节假体对金属表面粗糙度的要求。

2) 电解质等离子体抛光后,316LVM 表面的 Fe、Cr 元素相对含量升高,物相仍为奥氏体相,晶体为面心立方结构,呈(220)晶面择优取向,同时晶粒尺寸增大。

3) 由于电解质等离子体抛光后的试样表面粗糙度降低,Cr 含量相对升高,晶粒尺寸增大,使试样在磷酸缓冲盐溶液中的耐腐蚀性能提高。

参考文献:

- [1] 胡盛寿. 医用材料概论[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2017.
HU Sheng-shou. Introduction to medical materials[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2017.
- [2] SIVAPRAKASAM P, ELIAS G, MAHEANDERA PRABU P, et al. Experimental investigations on wear properties of AlTiN coated 316LVM stainless steel[J]. Materials today: Proceedings, 2020, 33: 3470-3474.
- [3] MAVER U, XHANARI K, ŽIŽEK M, et al. Carboxymethyl cellulose/diclofenac bioactive coatings on AISI 316LVM for controlled drug delivery, and improved osteogenic potential[J]. Carbohydrate polymers, 2020, 230: 115612.
- [4] ŁĘPICKA M, GRĄDZKA-DAHLKE M, PIENIAK D, et al. Effect of mechanical properties of substrate and coating on wear performance of TiN- or DLC-coated 316LVM stainless steel[J]. Wear, 2017, 382-383: 62-70.
- [5] CHETCUTI R, DEARNLEY P A, MAZZONELLO A, et al. Tribocorrosion response of duplex layered CoCrMoC/CrN and CrN/CoCrMoC coatings on implant grade 316LVM stainless steel[J]. Surface and coatings technology, 2020, 384: 125313.
- [6] LIU Yang-ping, ZHU Dong-kai, PIERRE D, et al. Fretting initiated crevice corrosion of 316LVM stainless steel in

- physiological phosphate buffered saline: Potential and cycles to initiation[J]. Acta biomaterialia, 2019, 97: 565-577.
- [7] KAO J Y, LIN S Y, CHEN Y S. Surface processing technology for 316LVM stainless steel stents[J]. Journal of applied science and engineering, 2018, 21(3): 343-350.
- [8] SHAHRYARI A, KAMAL W, OMANOVIC S. The effect of surface roughness on the efficiency of the cyclic potentiodynamic passivation (CPP) method in the improvement of general and pitting corrosion resistance of 316LVM stainless steel[J]. Materials letters, 2008, 62(23): 3906-3909.
- [9] BACHCHHAV B, BAGCHI H. Effect of surface roughness on friction and lubrication regimes[J]. Materials today: proceedings, 2021, 38: 169-173.
- [10] CHEN Lan, RICHTER B, ZHANG Xin-zhou, et al. Modification of surface characteristics and electrochemical corrosion behavior of laser powder bed fused stainless-steel 316L after laser polishing[J]. Additive manufacturing, 2020, 32: 101013.
- [11] BARMAN A, DAS M. Nano-finishing of bio-titanium alloy to generate different surface morphologies by changing magnetorheological polishing fluid compositions[J]. Precision engineering, 2018, 51: 145-152.
- [12] TYAGI P, GOULET T, RISO C, et al. Reducing the roughness of internal surface of an additive manufacturing produced 316 steel component by chempolishing and electropolishing[J]. Additive manufacturing, 2019, 25: 32-38.
- [13] LOPEZ-RUIZ P, GARCIA-BLANCO M B, VARA G, et al. Obtaining tailored surface characteristics by combining shot peening and electropolishing on 316L stainless steel[J]. Applied surface science, 2019, 492: 1-7.
- [14] RAVAL A, CHOUBEY A, ENGINEER C, et al. Development and assessment of 316LVM cardiovascular stents[J]. Materials science and engineering: A, 2004, 386(1-2): 331-343.
- [15] 刘坤坤, 孙伶俐, 何声馨, 等. 316 不锈钢电解抛光最佳参数试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 288-294.
LIU Kun-kun, SUN Ling-li, HE Sheng-xin, et al. Optimal parameters of electro-polishing for 316 stainless steel[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 288-294.
- [16] 索来春, 赵锦芝, 刘远韬. 电解质等离子抛光技术研究[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2019.
SUO Lai-chun, ZHAO Jin-zhi, LIU Yuan-tao. Research on electrolysis and plasma polishing technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2019.
- [17] PARFENOV E V, FARRAKHOV R G, MUKAEVA V R, et al. Electric field effect on surface layer removal during electrolytic plasma polishing[J]. Surface and coatings technology, 2016, 307: 1329-1340.
- [18] YANG Liu-quan, LAUGEL N, HOUSDEN J, et al. Plasma additive layer manufacture smoothing (PALMS) technology—An industrial prototype machine development and a comparative study on both additive manufactured and conventional machined AISI 316 stainless steel[J]. Additive manufacturing, 2020, 34: 101204.
- [19] NESTLER K, BÖTTGER-HILLER F, ADAMITZKI W,

- et al. Plasma electrolytic polishing—An overview of applied technologies and current challenges to extend the polishable material range[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 42: 503-507.
- [20] ZEIDLER H, BOETTGER-HILLER F, EDELMANN J, et al. Surface finish machining of medical parts using plasma electrolytic polishing[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 49: 83-87.
- [21] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理第 5 版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of tribology fifth edition[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [22] 黄璐琦. 等离子体增强电化学抛光奥氏体不锈钢表面状态的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- HUANG Lu-qi. Effect of plasma enhanced electrochemical polishing on surface state of austenitic stainless steel[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [23] 孙冰. 液相放电等离子体及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- SUN Bing. Discharge plasma in liquid and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [24] 齐珂, 隋大山, 陈飞, 等. 316LN 钢奥氏体晶粒长大模型[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(3): 98-103.
- QI Ke, SUI Da-shan, CHEN Fei, et al. Study on austenite grain growth behavior of 316LN steel[J]. *Journal of plasticity engineering*, 2014, 21(3): 98-103.
- [25] 王军, 刘莹. 316L 不锈钢钝化膜的耐腐蚀性和血液相容性[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(5): 593-598.
- WANG Jun, LIU Ying. Corrosion resistance and hemocompatibility of passivated 316L stainless steel[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2018, 52(5): 593-598.
- [26] 陈光军, 侯帅, 韩松鑫. 加工表面质量对耐腐蚀性能影响的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 25-33.
- CHEN Guang-jun, HOU Shuai, HAN Song-xin. Research progress on effect of machined surface quality on corrosion resistance[J]. *Surface technology*, 2019, 48(10): 25-33.
- [27] 严彪. 不锈钢手册(精)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- YAN Biao. Stainless steel handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [28] 彭新元, 周贤良, 华小珍. 晶粒尺寸对 316LN 不锈钢晶间腐蚀敏感性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(1): 25-30.
- PENG Xin-yuan, ZHOU Xian-liang, HUA Xiao-zhen. Effect of grain size on susceptibility to intergranular corrosion of 316LN stainless steel[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2016, 36(1): 25-30.

(上接第 374 页)

- [22] 吴伟刚, 杨防祖, 骆明辉, 等. 柠檬酸盐体系铜电沉积及其在微机电系统中的应用[J]. 物理化学学报, 2010, 26(10): 2625-2632.
- WU Wei-gang, YANG Fang-zu, LUO Ming-hui, et al. Electrodeposition of copper in a citrate bath and its application to a micro-electro-mechanical system[J]. *Acta physico-chimica sinica*, 2010, 26(10): 2625-2632.
- [23] 潘功配. 固体化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 2009.
- PAN Gong-pei. Solid state chemistry[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2009.
- [24] 宋利君, 孟惠民. 电沉积纳米镍合金在模拟海水溶液中的析氢性能[J]. 物理化学学报, 2010, 26(9): 2375-2380.
- SONG Li-jun, MENG Hui-min. Electrodeposition of nanocrystalline nickel alloys and their hydrogen evolution in simulated seawater solution[J]. *Acta physico-chimica sinica*, 2010, 26(9): 2375-2380.
- [25] BRUSSE J A, EWELL G J, SIPLON J P, et al. Tin whiskers: Attributes and mitigation[J]. *Carts europe*, 2002(3): 16.

(上接第 388 页)

- [13] 张韬杰. 基于固结磨料盘的钼酸锂高效研磨加工技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- ZHANG Tao-jie. Study on high-efficiency lapping of lithium tantalite based on fixed abrasive pad[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [14] 卫志孝. 聚晶金刚石(PCD)的可磨削性[J]. 工具技术, 1990, 24(6): 5.
- WEI Zhi-xiao. Grindability of polycrystalline diamond (PCD)[J]. *Tool engineering*, 1990, 24(6): 5.
- [15] 赵萍, 王志伟, 袁巨龙. 半固着磨具“陷阱”效应影响因素分析[J]. 中国机械工程, 2011, 22(20): 2399-2403.
- ZHAO Ping, WANG Zhi-wei, YUAN Ju-long. Analysis for 'trap' effect influence factors of semi-fixed abrasive plate[J]. *China mechanical engineering*, 2011, 22(20): 2399-2403.
- [16] 王波. 半接触状态下固结磨料加工工艺的理论研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- WANG Bo. Theoretical research on fixed mixed contact abrasive processing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [17] 袁巨龙, 张韬杰, 杭伟, 等. 基于固结磨料盘的钼酸锂高效研磨加工试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 349-354.
- YUAN Ju-long, ZHANG Tao-jie, HANG Wei, et al. Experimental research on high efficiency lapping machining of lithium tantalate based on fixed abrasive pad[J]. *Surface technology*, 2019, 48(10): 349-354.
- [18] CHEN Xun, ROWE W B. Analysis and simulation of the grinding process. Part I: Generation of the grinding wheel surface[J]. *International journal of machine tools and manufacture*, 1996, 36(8): 871-882.
- [19] WANG De-xiang, GE Pei-qi, BI Wen-bo, et al. Grain trajectory and grain workpiece contact analyses for modeling of grinding force and energy partition[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2014, 70(9-12): 2111-2123.