



不同抛光方法对激光切割活检针表面质量及耐蚀性影响

熊夏青¹, 崔祎赞¹, 孙洪荣², 王季², 胡立力², 徐凯¹

(1. 上海交通大学转化医学研究院, 上海 200240; 2. 上海埃斯埃医疗技术有限公司, 上海 201112)

摘要: 为比较 3 种不同抛光处理方式对激光切割加工活检针的切口质量、内壁表面质量及耐蚀性的影响, 实验采用优化后的工艺参数, 激光切割加工活检针, 随机选取活检针分别进行等离子抛光(EPP)、磁针磁力抛光(MAF)、电解抛光处理(EP)。利用二维影像观测仪观测活检针切口位置处的毛刺挂渣情况; 通过 3D 测量激光显微镜测得活检针内壁的表面粗糙度值并观测内壁表面形貌; 通过极化曲线测试研究了经过抛光处理的活检针的耐蚀性。其中, 等离子抛光、磁针磁力抛光及电解抛光可完全去除切口毛刺挂渣, 降低内壁表面粗糙度值, 提高表面质量; 经磁针磁力抛光的活检针的耐蚀性能得到显著提升。

关键词: 表面质量; 耐蚀性; 活检针; 等离子抛光; 磁针磁力抛光; 电解抛光

中图分类号: TG178

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240128

Effects of Different Polishing Methods on Surface Quality of Biopsy Needle by Laser Cutting

XIONG Xiaqing¹, CUI Yiyun¹, SUN Hongrong², WANG Ji², HU Lili², XU Kai¹

(1. Institute of Translational Medicine, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai SA Medical Technology Co., Ltd., Shanghai 201112, China)

Abstract: To compare the effects of three different polishing methods on the kerf quality, inner wall surface quality and corrosion resistance of biopsy needles by laser cutting, biopsy needles are processed with optimized technological parameters. Biopsy needles are polished separately by electrolytic plasma polishing (EPP), magnetic abrasive finishing (MAF), electro-polishing (EP). The kerf quality is observed with two-dimensional image measuring instrument. The Ra and the surface morphology of the inner wall is measured and observed by the 3D measurement laser microscope. A polarization curve is plotted to verify the corrosion resistances of the biopsy needles with three different polishing treatments. Three methods namely EPP, MAF and EP can be used to completely remove the dross and oxides, reduce the Ra and improve the surface quality. The corrosion resistance of biopsy needle by magnetic abrasive finishing has been significantly improved.

Key words: surface quality; corrosion resistance; biopsy needle; electrolytic plasma polishing; magnetic abrasive finishing; electro-polishing

活体组织检查(简称活检), 是一种从患者身上获取活体组织样本进行病理学检查, 以供疾病诊断的方法^[1]。按手术方法, 活检分为开放式活检和微创活检^[2], 使用活检针切取样本是微创活检的一种方式, 该方式可在较小的组织损伤下直接获取病变部位的组织或细胞样本, 病理学检查结果

准确度高、对患者副作用小^[3], 在医疗领域具有广泛的应用。

活检针的制造质量对活检针的取样性能有着重要影响, 目前活检针的加工可采用对不锈钢管切割后磨削处理^[4]或激光切割^[5]等方式。其中, 磨削加工工艺复杂、周期长, 而激光切割

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 转化医学国家重大基础设施(上海)项目(GKZJ626001); 转化医学国家重大科技基础设施“十四五”系统能力提升计划(WH510132401)。

作者简介: 熊夏青, 硕士, 助理工程师, 主要从事材料加工工程方面的研究。E-mail: xiongxq@sjtu.edu.cn

利用高功率密度的激光束使材料迅速熔化, 借助高速气流吹去熔化物质^[6], 其加工效率高、切割精度好, 特别适用于新型活检针的研发阶段。然而, 激光切割是一个材料熔化蒸发、辅助气体吹除的过程^[7], 辅助气体优先吹走先熔化的金属, 后熔化的金属处于气流尾部且熔融物温度降低, 导致少量熔融物无法被吹走而冷却黏附在切缝表面^[8], 在切口位置不可避免地存在挂渣的现象^[9]。

根据文献 [10] 以及文献 [11], 活检针的外观及清洁度的要求是用正常或矫正视力观察针管不应有伤痕、毛刺或附着异物。此外, 活检针管的内壁表面质量对其活检性能有显著影响, 内壁表面质量越好, 表面粗糙度越低, 则样本在针管内受到的摩擦力减小, 活检取样长度增大, 活检取样效果好^[12]。因此, 需要对激光切割的活检针进

行后处理, 其中抛光处理是一种去除毛刺残渣, 提高表面质量的有效方法。

活检针的抛光方法主要包括机械抛光、电解抛光^[13]、等离子抛光^[14]、磁针磁力抛光^[15]等技术。但是, 抛光作为表面改性的一种模式, 在保留材料本身性能的同时能够改变材料的表面结构和化学组成^[16], 材料表面的结构与成分对耐腐蚀性有很大影响^[17], 因此需要对抛光后活检针的耐腐蚀性进行研究, 保证其满足 GB/T 18457—2015 等相关标准中耐腐蚀性要求。

1 试验

1.1 原材料与激光切割

针管原材料为 S31608 不锈钢管材, 其外径 3.30 mm, 内径 2.94 mm, 材料的主要成分如表 1 所示。

表 1 不锈钢管的主要化学成分

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
质量分数/%	≤0.08	≤1	≤2	≤0.045	≤0.03	16~18	10~14	2~3

激光切割设备采用昆山允可精密工业技术有限公司的型号为 YC-TLM500 的精密薄壁金属管五轴激光切割机, 其配套激光器为美国 IPG 公司生产的型号为 YLR-300-AC 的风冷型光纤激光器, 最大输出功率为 300 W, 可调范围为 10%~100%, 光束质量 $M^2 < 1.1$ 。激光切割头为透镜式聚焦, 可

调焦范围为 ±1.5 mm, 聚焦焦距为 50 mm, 聚焦光斑直径为 0.022 mm, 能够承受的最大激光功率为 800 W, 切割喷嘴出口直径为 0.5 mm, 为普通锥形喷嘴。基于前期测试研究经验, 采用如表 2 所示的经试验优化后的工艺参数进行切割加工。激光切割所得的活检针, 如图 1 所示。

表 2 激光切割工艺参数

工艺参数	激光功率/W	切割速度/(mm·s ⁻¹)	脉冲频率/Hz	脉冲宽度/μs	气体气压/Mpa	切割喷嘴/mm
数值	90	10	400	40	0.7	0.2



图 1 活检针样品图

1.2 抛光方法

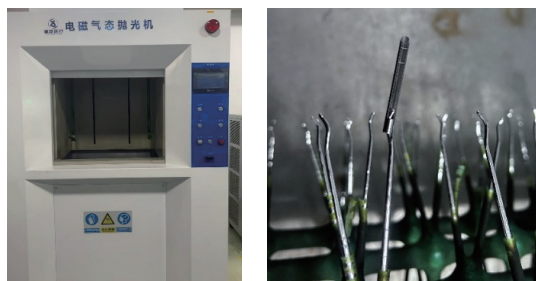
本文采用同种工艺参数激光切割得到的 12 根活检针, 随机选取 9 根平均分成 3 组, 对每组活检针分别进行等离子抛光(EPP)、磁针磁力抛光(MAF)和电解抛光(EP)处理。本文基于实验室前期研究经验, 对采用上述 3 种抛光处理方式优化后的工艺参数进行研究, 然后分别从切口质量、

内壁表面粗糙度及表面形貌、耐腐蚀性 3 方面分析这 3 种后处理方式的抛光效果。

实验 1: EPP 是通过气态离子与零件表面摩擦碰撞, 优先在微观凸起的位置形成放电通道而将这部分位置的材料去除。

实验采用常州肖邦 XBY-100A-T 电磁气态抛光机, 如图 2 所示, 设定抛光电流 100 A, 采用静液方式加工 30 s。具体步骤为: 将活检针通过挂具工装浸入 PH 数值为 6.1、温度 98.2 °C、浓度为 4% 的硫酸铵溶液中, 此时工件表面液体瞬间蒸发, 在工件与液体之间产生气层, 气态离子与零件表面摩擦碰撞, 活检针表面氧化层和毛刺凸起的

位置的气态离子会被优先电离形成等离子，通过等离子放电的能量而将这部分位置的材料去除。



(a) 电磁气态抛光机 (b) 实验过程图

图 2 电磁气态抛光机及实验过程图

实验 2: MAF 是通过小磁针与活检针表面以一定方式相对运动，磁场力将小磁针始终压向活检针表面，对表面产生挤压作用，表面凸起部位的塑性磨损相对较大。

实验采用苏州圣亚 SY1080 磁力抛光机，如图 3 所示，将活检针放入不锈钢材料的抛光液中，该溶液主要成分为非离子表面活性剂、水、柠檬酸，选用直径为 0.2 mm、高度为 2 mm 的磁针放入抛光液，调整设备旋转磁场的磁感应强度为 4200~4800 Gs，转动频率为 60 Hz，正反转时间间隔为 3 min，通过旋转磁场带动磁针快速旋转，让小磁针始终压向活检针表面，高速旋转研磨工件，从而达到表面抛光效果。磁针磁力抛光的抛光时间设为 15 min。



图 3 磁力抛光机

实验 3: EP 是利用阳极在电解液中所产生的电化学溶解现象，使阳极上的微观凸起部分发生选择性溶解而达到表面光亮的效果。

实验采用埃斯埃企业自制电解抛光设备，如图 4 所示，将活检针作为阳极放在挂具支架上，

放入 60~70 °C 等体积混合的硫酸和磷酸的电解液中，通 15~20 V 直流电而产生有选择性的阳极溶解，工件表面逐渐整平，从而达到工件增大表面光亮度的效果。电解抛光的抛光时间设为 15 s。



(a) 电解抛光设备 (b) 实验过程图

图 4 电解抛光设备及实验过程图

1.3 实验表征

实验采用苏州兰博思工业设备公司的型号为 VMA-2.1-Y800 的二维影像测量仪，如图 5 所示，观察活检针切口质量，主要观测切口位置处的毛刺、挂渣。该测量仪可利用轮廓光照明零件，通过人工调焦，物镜自动将清晰零件图像信息通过数据线传输到电脑的分析软件中进行图像分析处理。

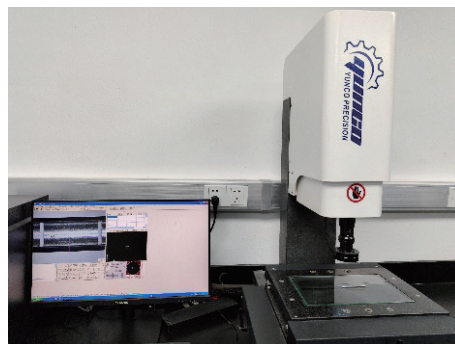


图 5 二维影像测量仪

活检针内壁表面的表面粗糙度及表面形貌使用奥林巴斯公司型号为 OLS5000 的 3D 测量激光显微镜进行测量，在每个零件的内部表面各随机取样 3 处测量，求取 3 次表面粗糙度测量值的平均值后再取每组零件表面的表面粗糙度均值。测试时物镜选用 50X，测试分辨率为 1080×720。

抛光前后的活检针的耐腐蚀性测试实验采用三电极法进行极化曲线的测试，工作电极为活检针，辅助电极是 Pt 电极，参比电极是饱和 Ag/AgCl 电极，电解液选用 3.5wt% NaCl 溶液，测试仪器为东华 DH7000 电化学工作站，测试装置如图 6 所示。将 3 个电极分别插入新配置的电解液中静置 1 min，先测试 300 s 无外加电流作用时的开路

电位作为自腐蚀电位, 然后对工作电极施加外部电流, 控制电极电势以 1 mV/s 扫描速率连续地改变, 从 -1.25 V 扫描到 1.25 V, 得到工作电极电位和电流密度的极化曲线。

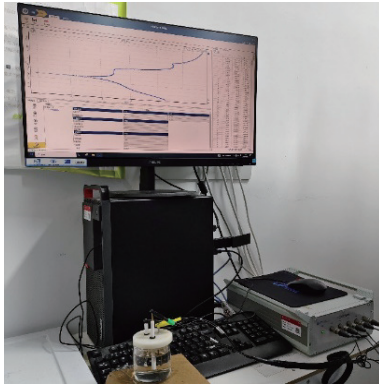


图6 极化曲线测抗腐蚀装置

2 结果及分析

2.1 切口质量与切口形貌

通过二维影像测量仪观测不同抛光方式处理后活检针切口位置的毛刺挂渣情况, 如图 7 所示。通过激光显微镜测得的切口图像, 如图 8 所示。激光切割的活检针采用同种工艺参数加工得到, 通过二维影像测量仪及激光显微镜观测可得, 活检针切口位置状态基本一致, 除未被及时被吹走的残渣外, 还存在由于激光切割热影响产生的氧化层, 如图 7(a)和图 8(a)所示。

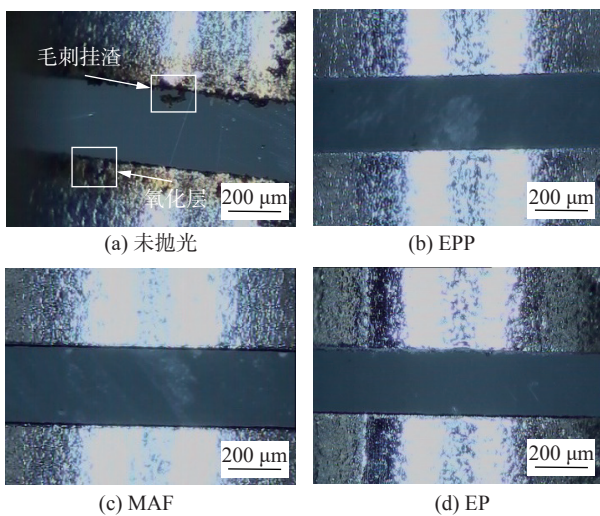


图7 切口毛刺挂渣观测图

如图 7(b)~图 7(d)和图 8(b)~图 8(d)所示, 等离子抛光、磁针磁力抛光、电解抛光处理的活检针切口位置无残渣残留, 表面未呈现麦黄色等

颜色。从微观角度看, 等离子抛光主要由于零件表面受到高速电子冲击产生热量引起熔化与气层发生气爆去除熔化金属的过程, 因此活检针切口位置的残渣和氧化物可被熔化去除。磁针磁力抛光是通过小磁针对活检针表面挤压摩擦的原理将活检针切口位置的残渣与氧化物去除。电解抛光利用金属表面微观凸点在特定电解液中和适当电流密度下首先发生阳极溶解的原理将切口位置的残渣和氧化物去除。上述 3 种抛光处理均可有效去除切口处的毛刺挂渣和周边氧化层。

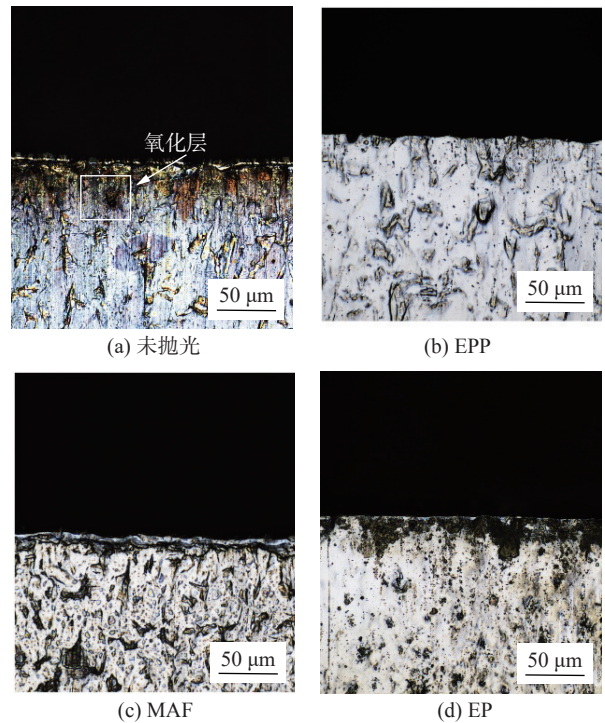


图8 切口位置激光显微镜测量图

2.2 内壁表面粗糙度与表面形貌

实验采用的 3 种抛光方式均能对内壁进行表面处理, 处理后活检针内壁表面的 3D 图像如图 9 所示, 内壁表面粗糙度 Ra 均值如表 3 所示, 采用的 3 种抛光处理方式均能降低针管内壁的 Ra 值, 其 Ra 均值分布在 0.20~0.43 μm 之间。未经抛光的活检针内壁表面粗糙度均值为 0.371 μm, MAF 处理后表面粗糙度均值最低, Ra 均值为 0.203 μm。活检针内壁的表面粗糙度 Ra 均值由小到大依次为 MAF(0.203 μm)、EPP(0.268 μm)、EP(0.320 μm)、未抛光(0.371 μm)。

未经抛光的活检针表面呈现麦黄色、淡蓝色等不同的颜色, 如图 10(a)所示, 这是由于激

光切割会对针管表面产生热影响，使其表层发生氧化反应而出现回火色。同时，由于激光及气流作用，针管表层受到的温度不同，则呈现颜色不同。

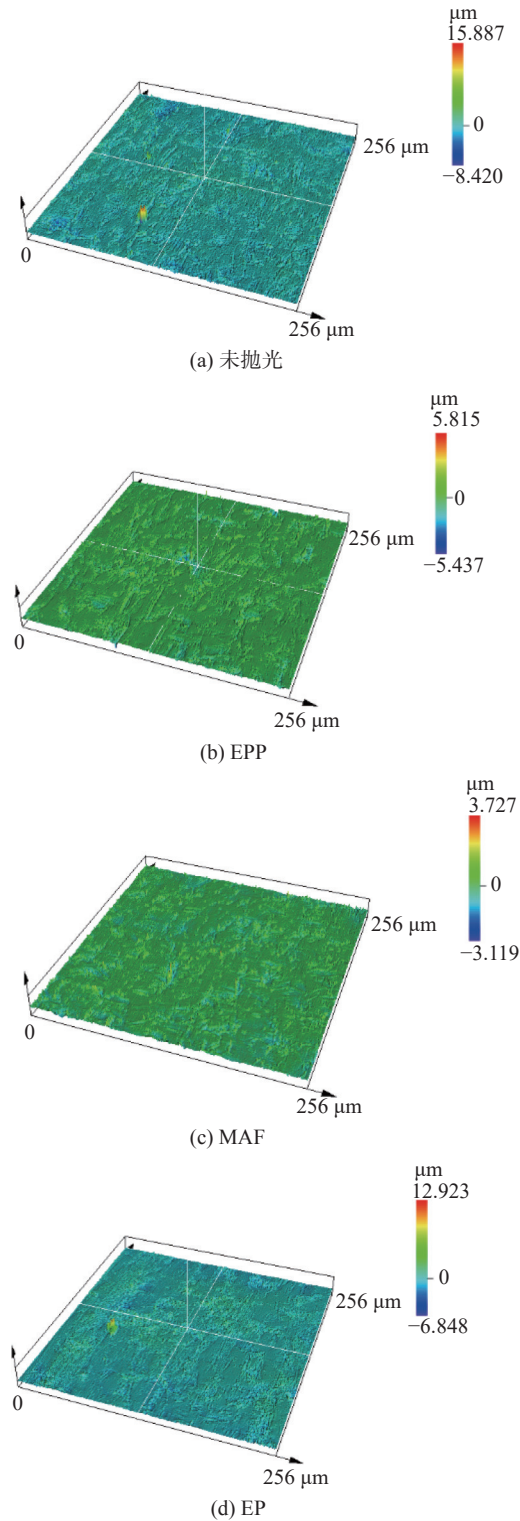


图 9 不同抛光方式处理后活检针内壁表面的激光显微镜 3D 测量图

表 3 不同抛光方式处理后活检针内壁表面粗糙度值 Ra

抛光方式	未抛光	EPP	MAF	EP
活检针1/ μm	0.393	0.276	0.188	0.310
活检针2/ μm	0.369	0.249	0.219	0.314
活检针3/ μm	0.350	0.278	0.202	0.336
平均值/ μm	0.371	0.268	0.203	0.320

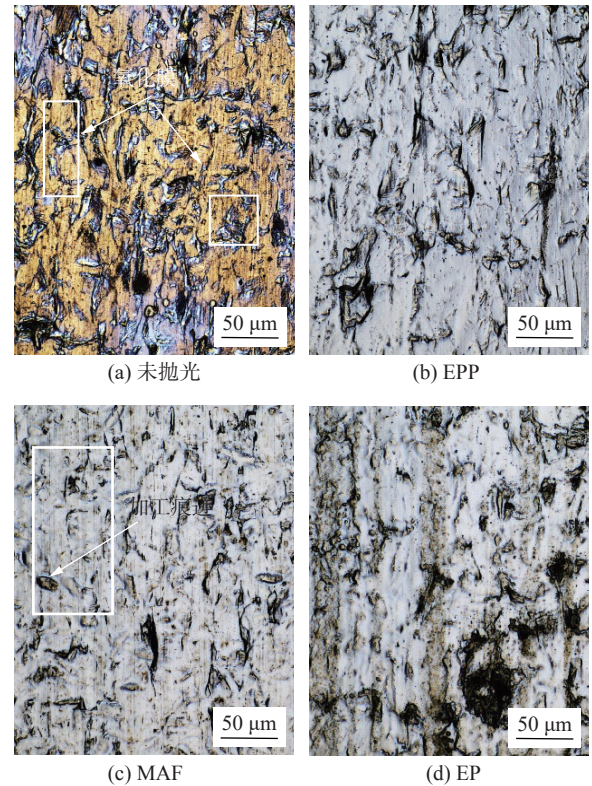


图 10 不同抛光方式处理后活检针内壁表面的表面形貌

经 EPP，针管内壁表面粗糙度均值下降 $0.103 \mu\text{m}$ ，表面质量得到提高。此外，对微凸位置放电去除材料的加工方式在抛光过程产生的作用力相对较小，且抛光时间相对较短，抛光过程除针管内壁氧化膜去除外，几乎不改变内壁的表面形貌特征，如图 10(b)所示。

经 MAF，针管内壁表面粗糙度均值下降 $0.168 \mu\text{m}$ ，表面质量得到提高。此外，除凸起位置材料去除外，MAF 几乎不改变针管内壁的表面形貌，但具有明显的方向性，如图 10(c)所示。

经 EP 处理后表面粗糙度均值下降 $0.051 \mu\text{m}$ ，表面质量略有提高。此外，针管内壁表面锐度降低，腐蚀感增强，如图 10(d)所示。

如图 9(b)~图 9(d)和图 10(b)~图 10(d)所示，EPP、MAF、EP 均可有效去除表面氧化膜，降低表面粗糙度，提高表面质量。等离子抛光在

抛光过程产生的作用力相对较小, 几乎不改变内壁的表面形貌特征。磁针磁力抛光后表面质量最好, 但具有明显的机械研磨加工方向性。电解抛光表面锐度降低, 表面质量略有提高, 但腐蚀感增强。

2.3 耐蚀性能分析

对比研究不同抛光方式下活检针的抗耐腐蚀性能, 进行了动态极化曲线测试实验。电化学测试是研究金属材料耐蚀性能的常用办法, 而 Tafel 极化曲线法可快速有效地测试金属材料的自腐蚀电位和腐蚀电流。自腐蚀电位是特定腐蚀体系无外加电流的情况下测得的金属电位, 它反映了金属材料发生腐蚀的难易程度, 其负值越大, 材料越容易腐蚀; 反之材料越抗腐蚀, 自腐蚀电位的提高表明合金的抗腐蚀能力增强。而腐蚀电流作为响应电流是腐蚀过程反应速率的体现, 电流越大, 证明该电势下的反应越剧烈。较高的腐蚀电流意味着材料一旦开始腐蚀, 其腐蚀速度会更快, 因此腐蚀电流可作衡量合金腐蚀程度和速度的指标^[18-20]。材料的自腐蚀电流密度通过 Tafel 插值法估算, 最终通过比较自腐蚀电位与自腐蚀电流密度来判断活检针采用不用抛光方式抛光后的耐蚀性。

如图 11 和表 4 所示, 使用不同抛光方式处理的活检针的 Tafel 曲线均有一定的偏移, 其中, EPP 和 MAF 的曲线向正方向偏移, 自腐蚀电位增加明显, 且 MAF 的曲线有较大的钝化区。

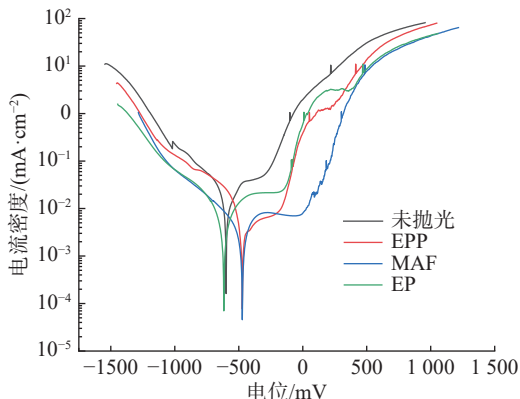


图 11 不同抛光方式下活检针的动电位极化曲线

未抛光的活检针自腐蚀电位为 -599.185 mV , EPP 处理后活检针自腐蚀电位最高, 为 -472.283 mV 。活检针自腐蚀电位值由小到大依次为 EP、未抛光、MAF、EPP。这表明经过 MAF 或 EPP 后, 活

检针的受腐蚀倾向变小。

未抛光的活检针自腐蚀电流密度为 $1.62 \times 10^{-4}\text{ mA/cm}^2$, MAF 处理后活检针自腐蚀电流密度最低, 为 $4.56 \times 10^{-5}\text{ mA/cm}^2$ 。活检针自腐蚀电流密度值由小到大依次为 MAF、EP、EPP、未抛光, 这表明以上 3 种抛光处理方式均能减慢活检针的腐蚀速率。

表 4 不同抛光方式下活检针的自腐蚀电位与自腐蚀电流密度

抛光方式	自腐蚀电位/mV	自腐蚀电流密度/(mA·cm ⁻²)
未抛光	-599.185	1.62×10^{-4}
EPP	-472.283	7.67×10^{-5}
MAF	-472.459	4.56×10^{-5}
EP	-617.260	7.01×10^{-5}

其中, 虽然经 EPP 处理的自腐蚀电位稍微高于经 MAF 处理的, 但是由于 MAF 的极化曲线钝化区比较大, MAF 的自腐蚀电流密度却最小, 降低最明显, 这说明 EPP 和 MAF 都能较好地降低材料受腐蚀的倾向, 但 MAF 在降低腐蚀速率方面有明显的优势。

3 讨论

表面粗糙度是影响材料耐蚀性的重要因素之一。随着表面粗糙度降低, 自腐蚀电位向正方向移动的同时伴随着腐蚀电流密度的降低^[21], 这是因为腐蚀易在晶界、缺陷等处优先发生。抛光后表面平整, 缺陷数量降低, 腐蚀沿缺陷扩展的可能性降低。

活检针经过抛光形成的不同表面形貌及成分对耐腐蚀性产生一定的影响, 经过抛光得到的活检针的自腐蚀电流密度相比未抛光处理的活检针均有一定降低, 一旦受到腐蚀, 可减慢腐蚀速率。EPP 和 MAF 处理可以增大活检针的自腐蚀电位, 降低活检针的受腐蚀的倾向, 提高材料的抗腐蚀能力。

其中, 活检针经 EPP 和 MAF 处理后的表面 Ra 数值相近, 自腐蚀电位数值相近, 但经磁针磁力抛光后的活检针具有相对较大的钝化区, 能更好地抑制表面点蚀现象的出现, 在降低腐蚀速率方面有明显的优势。

EP 虽然表面锐度降低, 表面粗糙度略有提高, 但由于晶界腐蚀的存在, 将活检针表面的刮

伤、孔洞、夹渣、析出物等原始状态凸显出来,且强酸电解过程容易破坏表面铬元素与氧气发生反应后形成的致密防护层,使其抗腐蚀性能提高不明显,但是 EP 设备便宜、抛光效率高,经后期清洗灭菌可符合临床使用需求,目前应用最广。

4 结束语

经激光切割的活检针切口位置除毛刺挂渣外,还存在由于激光加工热影响形成的氧化膜。EPP、MAF、EP 均可有效去除切口毛刺挂渣和氧化膜。

抛光处理后的活检针内壁的表面粗糙度 Ra 均值由小到大依次为 MAF、EPP、EP。每种抛光处理得到的针管表面形貌各不相同,EP 处理后表面腐蚀感增强。

经过 MAF 得到的活检针耐腐蚀性最优,活检针经过抛光形成的不同表面质量对耐腐蚀性产生了一定的影响。

MAF 方式在提高活检针表面质量和耐腐蚀性上具有一定优势,且设备便宜、环保清洁、工艺简单,后续将研究工艺提高抛光效率,以期更好地在医疗器械生产中得到应用。

参考文献

- [1] JONES J S. Prostate biopsy: Indications, techniques, and complications[M]. Totowa, NJ: Humana Press, 2008.
- [2] YEO L, PATEL D, BACH C, et al. The development of the modern prostate biopsy[M]//Prostate biopsy. Rijeka, Croatia: InTech, 2011.
- [3] Aubry W, Gupta S. Percutaneous image-guided biopsy[M]. New York: Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2014.
- [4] HONG K C, DWYER P E, KEIL E B, et al. Abrasive tool for grinding needles[P]. United States: US006015338A. 2000-01-18.
- [5] 刘国栋. 一种一次性乳腺活检针加工装配工艺: CN111493940A[P]. 2020-08-07.
- [6] RAJARAM N, SHEIKH-AHMAD J, CHERAGHI S H. CO₂ laser cut quality of 4130 steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(4): 351–358.
- [7] KASMAN Ş. Impact of parameters on the process response: A taguchi orthogonal analysis for laser engraving[J]. *Measurement*, 2013, 46(8): 2577–2584.
- [8] 顾俊, 刘钊鹏, 徐友钧, 等. TC4 钛合金激光切割热影响区及性能研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(1): 97.
- [9] 杨杰, 李鹏辉, 陈泽中, 等. 光纤激光切割对医用金属 L605 管切面质量的影响[J]. *材料热处理学报*, 2019, 40(8): 84–90.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 制造医疗器械用不锈钢针管: GB/T 18457—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [11] 国家食品药品监督管理总局. 一次性使用活组织检查针 第 1 部分: 通用要求: YY/T 0980.1—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [12] 李伟思. 活检针内壁加工工艺及其对取样长度的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [13] LANDOLT D, CHAUVY P F, ZINGER O. Electrochemical micromachining, polishing and surface structuring of metals: Fundamental aspects and new developments[J]. *Electrochimica Acta*, 2003, 48(20/21/22): 3185–3201.
- [14] 郑才国, 陈庆川, 聂军伟, 等. 等离子抛光石英玻璃表面粗糙度研究[J]. *实验室研究与探索*, 2020, 39(2): 9–11.
- [15] LIN C T, YANG L D, CHOW H M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 34(1): 122–130.
- [16] 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.
- [17] CHO E C, CHANGJIAN C W, CHEN H C, et al. Robust multifunctional superhydrophobic coatings with enhanced water/oil separation, self-cleaning, anti-corrosion, and anti-biological adhesion[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 314: 347–357.
- [18] 李伟雄, 许赫, 李琼, 等. 高性能医用钴基金属强化机理的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(5): 1045–1053.
- [19] LU Y J, GUO S, YANG Y, et al. Effect of thermal treatment and fluoride ions on the electrochemical corrosion behavior of selective laser melted CoCrW alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 730: 552–562.
- [20] 牛绍蕊. 不锈钢的电化学腐蚀性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [21] WALTER R, KANNAN M B. Influence of surface roughness on the corrosion behaviour of magnesium alloy[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(4): 2350–2354.

编辑 葛晋