doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.03.013

高频电刀电凝模式下304不锈钢和钨两种电极表面的 组织粘附行为*

付和林,郝汝飞,郑 靖,周仲荣

(西南交通大学材料先进技术教育部重点实验室,成都 610031)

摘 要:为探索电极材料熔点对电极表面组织粘附的影响,采用不同熔点的电极材料(304不锈钢和钨)对离体猪肝脏组织进 行电切割试验,研究了电凝模式下电极表面的组织粘附行为。结果表明,在电切割过程中,低熔点的304不锈钢电极表面发 生显微熔融、导致电极表面粗糙化,电极基体元素在粘附组织-电极界面出现扩散,粘附组织结合强度大于4.11 MPa;而高 熔点的钨电极表面形态无明显变化,电极基体元素在粘附组织-电极界面没有出现扩散,粘附组织结合强度约1.65 MPa。进 一步研究发现,钨电极表面粗糙度越大,粘附组织的结合强度越大,这间接证实电切割过程中304不锈钢电极表面显微熔融 导致的表面粗糙化是其表面粘附组织结合强度明显大于钨电极的主要原因之一。可见,采用高熔点的电极材料能够避免电 极表面显微熔融,从而减轻电极表面的组织粘附。

关键词:高频电刀; 304不锈钢; 钨; 组织粘附; 结合强度 文献标识码:A

中图分类号: O647.4; R616.1

文章编号:1007-9289(2016)03-0096-07

Tissue Sticking Behaviors on the Surfaces of 304 Stainless Steel and Tungsten Electrodes in Electrosurgical Unit Under a Coagulation Mode

FU He-lin, HAO Ru-fei, ZHENG Jing, ZHOU Zhong-rong

(Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: In this paper, the tissue sticking behaviors on 304 stainless steel and tungsten active electrodes under a coagulation mode were investigated and compared to explore the effect of the melting point of electrodes using a self-designed electrosurgical unit testing device. Ex vivo porcine liver was used as a tissue sample. The results show that due to low melting point, 304 stainless steel electrode surface changes from smooth to uneven as a result of micro-melting during the cutting test, and the element Fe in 304 stainless steel is found to diffuse into the stuck tissue. The binding strength of the stuck tissue is more than 4.11 MPa. For the tungsten electrode with a high melting point, neither obvious changes in the surface morphology nor the diffusion of element W into the stuck tissue upon electrode occurres during the cutting process. The binding strength of the stuck tissue-tungsten electrode interface is about 1.65 MPa. Additionly, the bigger the surface roughness of tungsten electrode samples is, the higher the binding strength of the stuck tissue-tungsten electrode interface is. Thus, it can be inferred that the surface roughening of 304 stainless steel electrode due to micro-melting contributes to the high binding strength of the stuck tissue on its surface. To utilize electrode materials with high melting point can help prevent the electrode surface from micro-melting, and alleviate the tissue sticking upon electrode surface.

Keywords: electrosurgical unit; 304 stainless steel; tungsten; tissue sticking; binding strength

收稿日期: 2016-01-30; 修回日期: 2016-03-24; 基金项目: *国家自然科学基金(51290291)

通讯作者:郑靖(1974—),女(汉),研究员,博士;研究方向:生物摩擦学;Tel: (028) 8763 4037; E-mail: zhengj168@163.com

网络出版日期: 2016-06-20 09:15; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20160620.0915.004.html

引文格式: 付和林、郝汝飞、郑靖、等. 高频电刀电凝模式下304不锈钢和钨两种电极表面的组织粘附行为[J]. 中国表面工程, 2016. 29(3): 96-102. FU H L, HAO R F, ZHENG J, et al. Tissue sticking behaviors on the surfaces of 304 stainless steel and tungsten electrodes in electrosurgical unit under a coagulation mode[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 96-102.

0 引 言

高频电刀以其切割速度快、止血效果好、对 切口具有一定杀菌作用的优点¹¹,逐渐取代传统手 术刀成为临床广泛应用的电外科手术器械[2]。其工 作原理是利用高频电流通过人体组织时带电粒子 剧烈振荡产生的热量来实现对组织的气化和凝 固,达到切割和止血的手术效果^[3]。然而,高频电 刀产生的组织热效应不仅可以实现切割和止血. 还会导致组织在手术电极表面粘附[4]。电极表面的 粘附组织不仅难以去除而且会增大整个电流回路 的电阻,导致电极表面的电流密度减小,出现切 不动和凝血不充分的现象。。医生通常会增大主机 输出功率以继续手术或者停止手术去清理电极, 但是,前者会加重组织损伤程度、延长术后愈合 时间,后者会耽误手术进程、增加手术时间。高 频电刀电极表面的组织粘附已成为制约其临床应 用的关键因素,引起了相关科研工作者的关注。

目前,减少高频电刀手术电极表面组织粘附 的措施主要集中于:①增设辅助装置[6-7],②对电 极材料进行表面改性^[8-9]。在增设辅助装置方面, 主要采用的手段为增设冷却循环系统和加装生理 盐水灌注装置。设置冷却循环可以降低表面温度 从而减轻组织粘附,添加生理盐水灌注是借助生 理盐水介质隔离组织和电极来减少电极表面组织 粘附。但是,设置冷却循环和生理盐水灌注装置 都需要在电极内部设置腔隙,不仅会增大电极原 有形状尺寸,而且增加了制造难度和成本。此 外,带生理盐水灌注的高频电刀在内镜手术中还 可能对邻近脏器组织造成热损伤。在表面改性方 面,最有效的方法是在电极表面制备聚四氟乙烯 疏水涂层[10],可以在一定程度上减轻电极表面的 组织粘附: 但是聚四氟乙烯涂层在高温下容易分 解产生有毒物质,这些有毒物质与水反应生成的 氢氟酸会对人体造成伤害凹。现阶段高频电刀手 术电极表面的组织粘附问题并没有得到有效的解 决,这很大程度上是因为组织在电极表面的粘附 机制和影响规律尚不清楚的。在高频电刀切割组织 的过程中, 电极表面不可避免地会发生电弧放电[12]。 电弧放电发生时,放电区域小且能量集中,会导 致电极表面局部出现上千度的瞬时高温,这可能 诱发电极表面显微熔融,导致电极表面特性发生 变化,从而影响电极表面的组织粘附。因此,高

频电刀电极表面的组织粘附行为应该与电极材 料特性密切相关,但此方面研究在国内外报道 较少。

熔点是金属材料的重要物理特性,不同熔点 的金属材料抵抗电弧放电破坏的能力不同。文中 选用304不锈钢和钨两种不同熔点的电极,在电凝 模式下对离体猪肝脏组织进行电切割试验,对比 研究了两种不同熔点电极表面的组织粘附行为, 旨在揭示电极材料熔点对电极表面组织粘附的影 响机制,研究结果可以为新型抗粘附手术电极的 研发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用新鲜猪肝脏组织作为电切割试验对象, 猪肝脏组织具有丰富的毛细血管分布和充足的血 液供应,能最大程度模拟实际手术过程中的出血 情况。试验过程中肝脏组织被切割成约10.0 cm× 5.0 cm×3.0 cm的条形。猪肝脏组织在离体4 h内需 完成电切割试验以防止血液凝固。

手术电极分别由304不锈钢和钨两种材料制备 而成。其中,304不锈钢是目前临床上最广泛使用 的手术电极材料,而钨是除了碳之外熔点最高的 元素,具有良好的生物相容性,是常用的医用金 属材料^[13]。电极表面在试验前经抛光处理至粗糙 度约为0.1 μm,以避免粗糙度不同导致的试验误 差。电极具体参数如表1所示。

表1 两种手术电极的表面参数

Table 1 Surface parameters of two active electrodes			
Doromotoro	Active electrode		
Parameters	304	Tungsten	
Size/mm ³	20×2×0.5	20×2×0.5	
RMS roughness/µm	0.107	0.112	
Water contact angle/(°)	68.3	65.9	
Melting point/°C	1 440	3 380	

此外,为考察表面粗糙度对电极表面组织粘 附的影响,分别采用320目(砂粒直径范围<60 μm, 记为No.1)和220目(砂粒直径范围60~100 μm,记 为No.2)的玻璃珠对钨电极表面进行喷砂处理。

1.2 电切割试验

选用赛龙(SAIRONG) 300型高频电刀作为主



图 1 高频电刀试验装置 Fig. 1 Electrosurgical unit testing device

机,工作频率为330 kHz,具有电切、电凝和混切 3种模式。电切割试验在自行设计的高频电刀试验 装置(图1)上完成,该装置由进给部分和定位部分 组成。进给部分控制电极在设定速度下自动切割, 定位部分调节肝脏样品的高度和切割的起始位 置。电极通过金属夹头固定在在进给部分上。根 据临床经验,文中选用电凝模式,功率50 W。切割速 度为8 mm/s,切割时间20 s,切割深度约10 mm。

1.3 拉伸破坏试验

在拉伸试验机(HY0580)上,采用垂直拉伸法 对比考察了两种电极表面粘附组织的抗拉强度、 拉伸破坏能耗和破坏形式。电切割试验后,截取 电极前端带有粘附组织的部分(长度约10 mm),利 用丙烯酸结构胶进行包埋,制备成拉伸试样。拉 伸试验参数为:试样测试区域为8.0 mm×2.0 mm; 拉杆移动速度为0.5 mm/min。每种拉伸试样测 5次,取平均值作为测试结果。

1.4 表面形貌与成分分析

采用扫描电镜(SEM, QUANTA 200)观察粘附 组织-电极界面形貌,利用能谱仪(EDS, PV7760/ 68 ME)测试粘附组织的元素成分及粘附组织-电极 界面的元素分布。利用Retc-MFT3000形貌仪观察 经不同手段处理后的钨电极表面三维形貌,测量 区域为1.0 mm×1.2 mm,电极表面粗糙度采用 NanoMap-D轮廓仪测量,测试长度为2 mm。

2 结果与讨论

2.1 界面形貌

图2为电切割试验前后两种电极前端横截面









(c) Tungsten, before testing

(d) Tungsten, after testing

图 2 电切割试验前后电极的截面形貌

Fig. 2 Cross section morphologies of the active electrode before and after cutting test

SEM形貌。可以看出,经抛光处理的304不锈钢电 极和钨电极在电切割试验前边界平整清晰,电切 割试验后,两种电极表面均出现粘附组织,但粘 附组织-电极界面形貌存在显著差异。304不锈钢 电极表面形态发生变化,边界由实验前的直线状 变为不规则的锯齿状,粘附组织-电极界面模糊, 而钨电极表面形态无明显改变,电极边界平整, 粘附组织-电极界面清晰可见。可见,熔点较低的 304不锈钢电极在试验过程中发生了显微熔融、导 致电极表面粗糙化,而高熔点的钨电极表面没有 出现显微熔融导致的表面粗糙化。

2.2 界面成分

图3示出了两种电极表面粘附组织的EDS谱 图,测试区域分别对应图2中的区域A和区域B。 可以发现,304 不锈钢电极表面粘附组织主要含 有C、O、P、K和Fe元素,而钨电极表面粘附组织 主要含有C、O、P、K元素,未出现钨电极基体元 素W的特征峰。肝脏组织作为生物组织,其主要 元素构成为C、H、O、P、K等。304不锈钢电极 主要由Fe、Cr、Mn、Ni等元素构成,钨电极主要 由W元素构成。显然,不锈钢电极表面的粘附组 织中出现电极基体元素Fe,而钨电极表面的粘附 组织均为肝脏组织的的热分解产物,没有出现电 极基体元素W。

EDS线扫描可以表征元素相对强度随位置的 变化,文中对粘附组织-电极界面进行了EDS线扫 描测试,进一步分析了两种电极基体元素在界面 的分布情况。图4给出了粘附组织-电极界面的 Fe元素和W元素的EDS线扫描图谱,分别为图2中 的线1和线2。由图4(a)可以看出,304不锈钢电极 表面的粘附组织层出现Fe元素,且粘附组织越靠 近电极表面,Fe元素含量越高,在距离电极表面 约3~5 μm处粘附组织中的Fe元素含量显著增加。



图 3 两种电极表面粘附组织的EDS图谱









显然,在电切割过程中,304不锈钢电极的基体元 素Fe在粘附组织-电极界面出现了微米尺度扩散。 如图4(b)所示,钨电极表面粘附组织层内没有出现 W元素(W元素在树脂和粘附组织层的含量相同, 近似为零),在粘附组织-电极界面W元素呈现跳跃 式增加。可见,在电切割过程中,钨电极的基体 元素在粘附组织-电极界面没有发生扩散。

2.3 界面拉伸破坏

表2给出了两种电极表面粘附组织的临界拉脱 力、破坏能耗和结合强度。可以看出,304不锈钢 电极试样发生破坏时的拉脱力(65.8 N)、破坏能耗 (1.31×10⁻³ J/mm²)和结合强度(4.11 MPa)均显著大 于钨电极(分别为26.4 N、0.16×10⁻³ J/mm²和 1.65 MPa)。拉伸破坏后两种电极的表面形貌如 图5所示。

表 2 两种电极试样的临界拉脱力、破坏能耗和结合强度 Table 2 Critical tensile force, energy dissipation and binding strength of two active electrodes in tensile testing

Active electrode	304	Tungsten
Critical tensile force / N	65.8±17.7	26.4±7.6
Energy dissipation / (10 ⁻³ J·mm ⁻²)	1.31±0.27	0.16±0.024
Binding strength / MPa	4.11±1.12	1.65 ± 0.48

可以发现,拉脱试验后的304不锈钢电极表面 依然存在一层完整的黑色粘附组织(图5(a)),而钨 电极试样表面可以观察到大面积的金属钨基体, 以及少量黑色粘附组织(图5(b))。显然,钨电极试 样的结合强度1.65 MPa为粘附组织-钨电极界面的 真实结合强度。而不锈钢电极试样的拉脱破坏并 不是发生在粘附组织-电极界面,而是粘附组织层 内发生了拉伸破坏,即粘附组织-304不锈钢电极 界面的真实结合强度大于表2给出的4.11 MPa。这 表明粘附组织-304不锈钢电极界面的结合强度远 大于粘附组织-钨电极界面的结合强度,也就是 说,去除304不锈钢电极表面的粘附组织需要更大 的力和更多的能量。



(b) Tungsten

图 5 拉伸破坏后两种电极的表面OM形貌

Fig. 5 OM surface morphologies of two electrodes after tensile testing

2.4 电极表面粗糙化对组织粘附的影响

如图2(a)(b)所示,304不锈钢电极表面在电切 割试验后发生了明显的表面粗糙化和基体元素扩 散。这可能是由于304不锈钢电极的熔点低,电极 表面在试验过程中产生了表面熔融,导致表面粗 糙化和基体元素扩散。而高熔点的钨电极在实验 前后表面粗糙度无明显变化(图2(c)(d))。为了探明 电极表面粗糙化对组织粘附的影响,进一步考察 了不同粗糙度的钨电极试样表面粘附组织的结合 强度。

图6为钨电极经过不同表面处理后的表面三维 形貌图及粗糙度值。抛光处理后的钨电极表面光 滑,粗糙度为0.11 μm,而喷砂处理后的钨电极表 面变得粗糙,凹凸不平,320目(No.1)和220目 (No.2)喷砂处理后的电极表面粗糙度分别为0.46和 0.78 μm。电切割试验后3种不同粗糙度钨电极表 面粘附组织的结合强度分别为1.65、2.33和2.86 MPa,





Fig. 6 Three-dimensional morphologies and surface roughness of the electrode subjected to different surface treatments

如图7所示。可见,钨电极表面粗糙度增大导致粘 附组织的结合强度显著增加,这从侧面证实304不 锈钢电极表面由于显微熔融导致的表面粗糙化会 加剧其表面的组织粘附。表面粗糙化会使得电极 表面形成很多凹面和孔隙(图 6(b)(c)),这会加剧电 极表面与粘附组织之间的机械啮合作用,增大界 面的结合强度^[14],从而对组织粘附行为产生较大 影响。





Fig. 7 Binding strength of stuck tissue on the surface of tungsten electrode with different surface roughness

2.5 熔点对金属电极表面组织粘附的影响机制

高频电刀具有电切、混切和电凝3种能量输出 模式,相比于电切和混切模式,电凝模式的电流 波形占空比更小,峰值电压更高,使得切割过程 中电极放电时间更短,能量更加集中,在切割组 织时穿透能力强、凝血效果好[15]。但是,电凝模 式下较高的峰值电压使得电极在切割组织的过程 中容易产生电弧放电,诱发电极表面显微熔融。 显微熔融会导致电极表面粗糙化和基体元素扩 散。电极表面粗糙化不仅会增大粘附组织与电极 表面之间的实际结合面积,而且会加剧粘附组织-电极界面的机械啮合作用,致使界面结合强度增 大。同时,显微熔融导致的电极基体元素扩散还 会使得粘附组织和电极的结合界面变宽[16], 增大 界面结合强度。因此,电凝模式下,304不锈钢手 术电极表面的粘附组织结合强度大,难以去除。 而高熔点的钨电极表面在电切割过程中不易发生 显微熔融,可以有效地避免电极表面粗糙化和基 体元素扩散,因此,其表面粘附组织的结合强度 较低。

综上所述,电极材料熔点越高,电极表面越

不容易发生显微熔融导致的表面粗糙化和基体元 素扩散,粘附组织的结合强度就越低,越容易被 去除。因此,在研究高频电刀手术电极的抗粘附 措施时,可以考虑通过表面合金化、表面涂层等 手段提高电极表面熔点,减轻手术电极表面的组 织粘附。

3 结 论

(1) 在电凝模式下,相比于304不锈钢电极, 高熔点钨电极表面的粘附组织与电极表面的结合 强度更小,更容易被去除。

(2) 电极材料熔点对电极表面的组织粘附行为 具有显著影响。与高熔点电极材料相比,低熔点 的电极材料表面在电切割过程中更容易发生显微 熔融,导致电极表面粗糙化和电极基体元素向粘 附组织扩散,使得粘附组织-电极界面的结合强度 增大。因此,提高电极表面熔点,有助于减轻手 术电极表面的组织粘附。

参考文献

- [1] CHAROENKWAN K, CHOTIROSNIRAMIT N, RER-KASEM K. Scalpel versus electrosurgery for abdominal incisions[J]. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2006, 6(6): 398-400.
- [2] MASSARWEH N N, COSGRIFF N, SLAKEY D P. Electrosurgery: history, principles, and current and future uses[J]. Journal of the American College of Surgeons, 2006, 202(3): 520-530.
- [3] WANG K, ADVINCULA A P. "Current thoughts" in electrosurgery[J]. International Journal of Gynaecology & Obstetrics the Official Organ of the International Federation of Gynaecology & Obstetrics, 2007, 97(3): 245-250.
- [4] DRABKIN R L. Some urgent problems in modern electrosurgery[J]. Biomedical Engineering, 1981, 15(3): 79-81.
- [5] NAU P, RATTNER D. The SAGES manual on the fundamental use of surgical energy (FUSE)[M]. New York: Springer, 2012.
- [6] LEVINE A H, MEADE J C, LICHTMAN P R. Electrosurgery with cooled electrodes[P]. US: 5647871. 1997-7-15.
- [7] PETRA D, SILKE T, ILKA S, et al. Cold saline irrigation of the renal pelvis during radiofrequency ablation of a central renal neoplasm: a case report[J]. Best Practice & Research Clinical Gastroenterology, 2008, 2(1): 1-4.
- [8] CEVIKER N, KESKIL S K. A new coated bipolar coagulator:technical note[J]. Acta Neurochirurgica, 1998, 140(6): 619-620.

- [9] CHENG H Y, OU K L, CHIANG H J, et al. Effect of antisticking nanostructured surface coating on minimally invasive electrosurgical device in brain.[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2015, 43(10): 1-11.
- [10] OU K L, CHU J S, HOSSEINKHANI H, et al. Biomedical nanostructured coating for minimally invasive surgery devices applications: characterization, cell cytotoxicity evaluation and an animal study in rat[J]. Surgical Endoscopy, 2014, 28(7): 2174-2188.
- [11] WARITZ R S. An industrial approach to evaluation of pyrolysis and combustion hazards[J]. Environmental Health Perspectives, 1975, 11: 197-202.
- [12] VAN W C W. Electrosurgery 101[J]. Current Surgery, 2000(2): 172-177.
- [13] PEUSTER M, FINK C, SCHNAKENBURG C V. Biocompatibility of corroding tungsten coils: in vitro assessment of

degradation kinetics and cytotoxicity on human cells[J]. Biomaterials, 2003, 24(22): 4057-4061.

- [14] 杨晖, 潘少明. 基体表面粗糙度对涂层结合强度的影响[J]. 热加工工艺, 2008, 37(15): 118-121.
 YANG H, PAN S M. Effect of substrate roughness on bond strength of coatings[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(15): 118-121 (in Chinese).
- [15] VILOS G A, RAJAKUMAR C. Electrosurgical generators and monopolar and bipolar electrosurgery[J]. Journal of Minimally Invasive Gynecology, 2013, 20(3): 279-287.
- [16] 苏修梁, 张欣宇. 表面涂层与基体间的界面结合强度及其 测定[J]. 电镀与环保, 2004, 24(2): 6-11.
 SU X L, ZHANG X Y. Interfacial bonding strength between surface coating and substrate and its measurement[J]. Electroplating & Pollution Control, 2004, 24(2): 6-11 (in Chinese).

(责任编辑:常青)

•本刊讯•

《中国表面工程》关于参考文献著录的要求

本刊参考文献符合国标GB/T7714—2015,采用顺序编码著录,依照其在文中出现的先后顺序用阿拉 伯数字标出,并将序号至于方括号内,排列于文后。参考文献应尽量引用国内外正式公开发表的引文且 各项信息齐全,作者的英文名采用姓前名后格式,姓用全称且全部字母大写,名用缩写且保留首字母大 写,作者在3名以上只列前3名,后加",等";题名后应标注文献标识类型;期刊名称(包括英文期刊)采 用全称;著录期刊的年、卷、期信息应齐全。具体格式如下:

- ① 期刊: [序号]作者.文名[J]. 刊名, 出版年, 卷(期): 起止页码.
- ②论文集:[序号]作者.题名[C].编者.文集名,出版地:出版者,出版年.
- ③学位论文: [序号]作者. 题名[D]. 保存地:学位授予单位,授予年份.
- ④专著:[序号]著者.书名[M].版本.出版地:出版者,出版年:起止页码.
- ⑤报告: [序号]作者.报告题名[R].出版地:出版者,出版年.
- ⑥标准:[序号]著者.标准名:标准顺序号-发布年[S].出版地:出版者,出版年,起止页码.
- ⑦ 专利: [序号]专利所有者. 专利题名: 专利号[P]. 公告日期或公开日期.
- ⑧报纸: [序号]作者. 题名[N]. 报纸名, 出版日期(版次).

⑨ 电子文献: [序号]作者名. 题名[J/OL]([EB/OL]或[DB/OL]). 发表或更新日期. [引用日期]. 获取和访问路径.

另为适应国际数据库的要求,从2014(6)期开始,本刊要求原属中文的参考文献需同时标出其对应的 英文格式。例如:

[1] 何家文. 追溯历史评表面形变纳米化 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 1-13.

HE J W. Comments on nano-treatment of surface attrition via historical review[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 113 (in Chinese).