

# 磁力搅拌电火花加工工艺对镍钛合金表面特征及疏水性的影响

冯超超, 李丽, 赵玉刚, 白雪, 崔程, 张岩  
(山东理工大学 机械工程学院, 淄博 255049)

**摘要:**采用磁力搅拌电火花加工工艺在镍钛合金表面制备疏水性表面来提高其生物相容性, 研究工艺参数对表面特征及疏水性的影响。采用扫描电子显微镜(SEM)对工件表面形貌进行分析, 使用光学接触角测量仪和TR200粗糙度仪分别测量接触角和表面粗糙度值。结果表明: 磁力搅拌电火花加工参数对表面形貌特征及疏水性影响显著。当电流为1.5 A时, 表面熔凝凸起随脉宽的增大而增大, 在脉宽为60 μs时其表面含有尺寸合适的熔凝凸起, 接触角达到峰值为138.2°; 当电流为4.5 A时, 表面富含气孔特征, 表面气孔的深度在脉宽为60 μs时达到最大值, 其表面接触角为133.6°。表面粗糙度对疏水性能无直接影响。采用磁力搅拌电火花加工工艺, 可以大幅提升镍钛合金表面的疏水性。

**关键词:**电火花; 磁力搅拌; 镍钛合金; 多孔; 疏水性

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)02-0120-08

## Effects of Magnetic Mixed EDM on Surface Characteristics and Hydrophobicity of Ni-Ti Alloy

FENG Chaochao, LI Li, ZHAO Yugang, BAI Xue, CUI Cheng, ZHANG Yan  
(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** The hydrophobic surface of Ni-Ti alloy was prepared by magnetic mixed electrical discharge machining (EDM) to improve its biocompatibility. The influence of the processing parameters on the surface characteristics and hydrophobicity were studied, respectively. The surface morphology of the workpiece was analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The contact angle and surface roughness were measured by optical contact angle measuring instrument and TR200 roughness meter, respectively. The results show that the parameters of magnetic mixed EDM have significant influence on the surface morphology and hydrophobicity. When the current is 1.5 A, the solidification bulges on the surface increases with the increase of the pulse duration. When the pulse duration is 60 μs, the surface contains a suitable size of the solidification bulges and the contact angle reaches a peak value of 138.2°. When the current is 4.5 A, the surface is rich in stomatal characteristics and the depth of the pore reaches the maximum at the pulse duration of 60 μs with the contact angle is 133.6°. The surface roughness has no direct effect on hydrophobicity. The hydrophobicity of the Ni-Ti alloy surface is greatly improved by using the magnetic mixed EDM process.

**Keywords:** electrical discharge machining (EDM); magnetic mixed; NiTi alloy; porous; hydrophobic

收稿日期: 2018-11-09; 修回日期: 2019-03-24

通信作者: 李丽(1975—), 女(汉), 教授, 博士; 研究方向: 先进制造技术及其装备; E-mail: sdutlili@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51775321); 山东省自然科学基金(ZR2018MEE025)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China (51775321) and Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2018MEE025)

引用格式: 冯超超, 李丽, 赵玉刚, 等. 磁力搅拌电火花加工工艺对镍钛合金表面特征及疏水性的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 120-127.

FENG C C, LI L, ZHAO Y G, et al. Effects of magnetic mixed EDM on surface characteristics and hydrophobicity of Ni-Ti alloy[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 120-127.

## 0 引言

研究发现血管支架表面良好的疏水性, 可以降低血小板在其表面的粘附与活化<sup>[1]</sup>, 药物洗脱支架表面良好的疏水性可实现所载药物的缓释, 延长药物的作用时间。在药物洗脱支架中, 多孔药物洗脱支架利用支架表面的多孔组织进行药物的存储和控释, 既可以起到药物洗脱支架的功效, 又具有裸金属支架的长期安全性, 表现出了诱人的前景<sup>[2]</sup>。在血管支架材料中, 镍钛合金由于具有独特的形状记忆性能、随体变形能力、超弹性以及无细胞毒性、无致癌性和易于制备载药微孔等特点而被用于多孔药物洗脱支架等生物医学方面<sup>[3-5]</sup>。

目前制备材料表面疏水微结构的方法主要有化学刻蚀、激光刻蚀与溶胶凝胶法等<sup>[6-8]</sup>, 每种制备方法都有各自的特点与适用范围, 但是这些方法往往由于设备昂贵、操作方法复杂或环境污染等缺点在工程上的应用受到限制。而镍钛合金具有较低的导热性、高延展性与高粘度等特性, 传统的车削与磨削等加工方法容易使得材料出现严重的加工硬化且表面质量变差<sup>[9-10]</sup>, 较难制备出疏水表面。电火花加工是利用浸在绝缘介质中的两极间脉冲放电时产生的电蚀作用来蚀除导电材料的方法, 它适合加工难切削导电材料, 其可加工性只与材料的导电性和热学特性相关, 同时镍钛合金较低的导热性有利于对放电热量的集中和有效利用, 所以电火花特别适合加工镍钛合金等低导热率材料。目前, 采用电火花工艺制备金属基疏水表面的研究较少。前期的研究表明, 当材料表面的结构特征是凹坑—凸起—气孔—颗粒组成的复合粗糙结构时, 表面具有较好的疏水性能<sup>[11-12]</sup>, 而采用电火花加工后的镍钛合金表面多数是由凹坑与凸起构成的<sup>[13-14]</sup>, 所以尝试使用电火花技术来探索制备疏水表面的新工艺。

作者所在团队前期研究发现, 在电火花加工中使用磁力搅拌可以有效降低电极损耗与异常放电情况<sup>[15-16]</sup>, 并可以让更多的空气混入工作介质, 当富含气体的工作介质流经加工区域时, 部分气体会溶入熔融金属形成气孔。文中为使加工后的镍钛合金表面具有较多的微孔特征, 提高镍钛合金表面的疏水性, 将磁力搅拌附加到电火花加工的过程中。

## 1 试验

### 1.1 试验装置及材料

试验装置是在 DM71 系列精密电火花成形机上进行改装而成的。磁力搅拌器安装在机床工作台上, 然后将工作液槽放置在磁力搅拌器与强力磁铁上, 搅拌子放入工作液槽中并由搅拌器带动旋转以搅拌工作液。工件装夹在依靠强力磁铁固定的夹具中, 电极通过工具夹具与主轴相连接, 结构原理如图 1 所示。

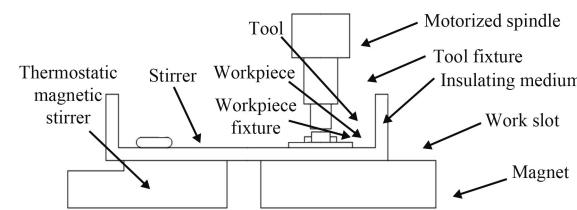


图 1 机床原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of machine tool

工件材料是镍质量分数为 50.8% 的镍钛合金, 工件电极尺寸  $10 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。工具电极为紫铜, 尺寸为  $\Phi 16 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。**表 1** 是紫铜电极和镍钛合金的热学物理常数。

表 1 材料的热物理特性

Table 1 Thermophysical properties of materials

Properties	Copper	NiTi
Density / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	8.96	6.45
Melting point / $^{\circ}\text{C}$	1083	1310
Thermal conductivity / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$ )	383.3	10
Specific heat / ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )	410	0.32

### 1.2 试验参数选择

试验采用负极性加工, 工作介质选择 MK602 专用火花液。电火花加工参数如下: 峰值电流为 1.5、4.5 和 9 A, 脉冲宽度为 15、30、60 和 90  $\mu\text{s}$ , 极间电压为 50 V, 脉冲间隔为 5  $\mu\text{s}$ 。恒温磁力搅拌器的功率为 30 W, 转速为 2600 r/min。

### 1.3 试样测试与表征

对加工后的工件依次使用丙酮与无水乙醇进行超声清洗, 清洗时间为 8 min。利用美国 FEI 公司 Apreo 型扫描电镜对工件进行表面形貌分析。使用时代集团公司 TR200 粗糙度仪对工件进行测量, 在工件表面选取 5 个不同的位置进行测量,

然后取其平均值。使用德国 dataphysics 公司 OCA15EC 型光学接触角测量仪测量静态接触角，水滴体积为  $5 \mu\text{L}$ ，在工件表面选取 5 个不同位置进行测量，取其平均值作为测量结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 表面微观形貌与结构

不同加工参数下的镍钛合金表面形貌如图 2 所示。在图 2 中发现除图 2(a) 以外，其余表面形貌均含有气孔。其主要形成原因是：磁力搅拌装置对工作液进行快速搅拌，使得空气进入工作液中，令工作液富含气体，在电火花负极性加工时，绝缘工作介质被电离，放电通道中存在的氢离子在负极性表面发生还原反应产生氢气，并且部分工作液会在高温下蒸发形成水蒸气，同时高温裂解产生氧气。电火花加工时表面金属呈熔融状态，放电通道中的气体不断溶解进入熔融的金属内，随着工作液的冷却流动，熔融态金属冷却凝固，气体溶解度不断下降，以气泡的形式从熔融态金属内溢出，最终形成气孔<sup>[17]</sup>。

图 2(a) 表面未发现气孔，这是由于其加工参

数为  $I=9 \text{ A}$ 、 $T_{\text{on}}=15 \mu\text{s}$  时，峰值电流较高，脉宽较小，放电时间较短，气体还未进入熔融金属，这些熔融金属便被较大的放电脉冲能量大量去除，所以表面无气孔形成，只有一定的熔凝凸起形成。

图 2(b)(c) 都含有气孔，但图 2(b) 的气孔多为浅气孔，这是因为二者电流虽然均为  $4.5 \text{ A}$ ，但由于图 2(b) 试样的放电脉宽较小，放电脉冲能量较小，熔化的金属材料相对较少且较薄，因此气体进入熔融金属的深度较浅，表面含有较多的浅气孔。而图 2(c) 因为放电脉冲宽度较长，放电脉冲能量较大，熔池大而深，气体有更多的时间进入熔池深处，因此形成了深气孔。

图 2(d) 的加工参数为  $I=1.5 \text{ A}$ 、 $T_{\text{on}}=60 \mu\text{s}$  时，脉冲宽度较大，但与脉宽同为  $60 \mu\text{s}$ 、电流为  $4.5 \text{ A}$  的图 2(c) 相比，其表面的气孔直径较小，这是因为在电流较小而脉宽足够大的情况下，放电通道扩张导致了放电点发散，放电能量只能熔化金属却无足够的压力将材料大量去除，在表面形成了熔凝凸起，而且在熔凝凸起之间有类“珊瑚礁”结构存在，这种特殊的结构是由于一部分蒸发和熔融溅射的金属未被抛出，而是被流动的工作液冷

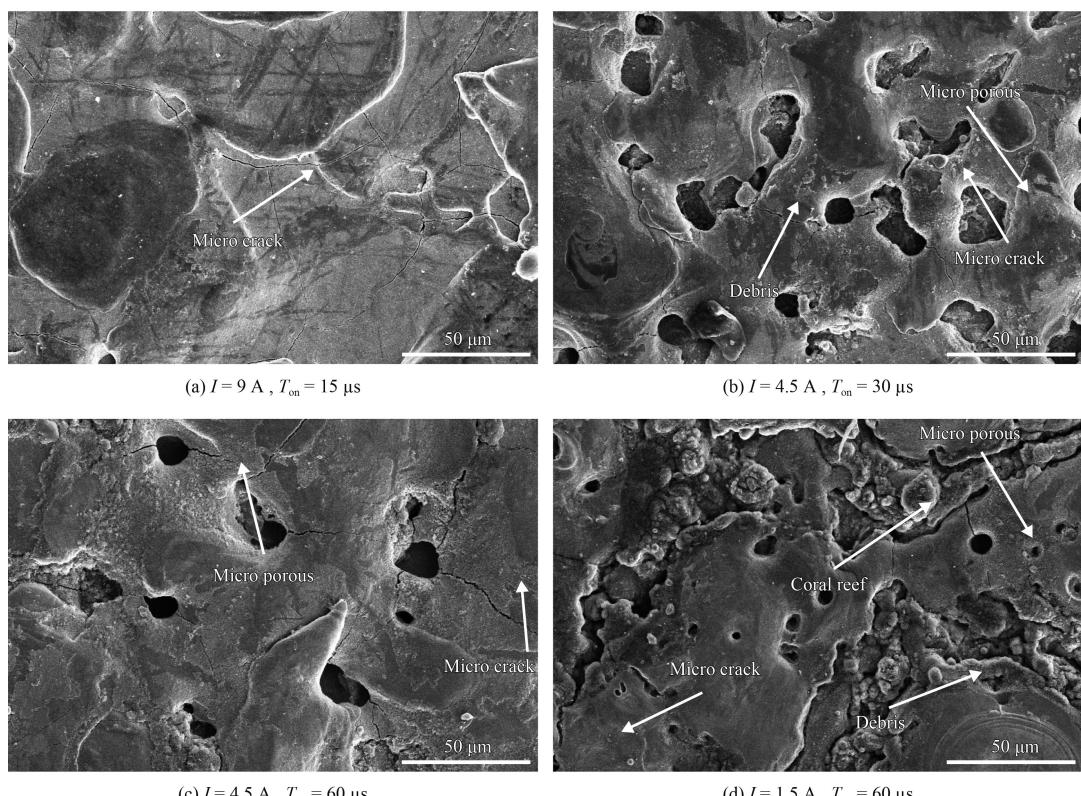


图 2 不同加工参数下的表面微观形貌

Fig.2 Surface microstructure under different processing parameters

却, 重新凝固在表面所形成<sup>[18]</sup>。因此形成的大量熔凝凸起与“珊瑚礁”结构挤占了气孔的空间, 所以在大脉宽的条件下, 表面气孔的尺寸较小。

## 2.2 加工工艺对表面接触角的影响

润湿性是固体表面的重要性质, 通常使用接触角 $\theta$ 来衡量材料表面的润湿性,  $\theta>90^\circ$ 为疏水表面,  $\theta<90^\circ$ 为亲水表面。镍钛合金的本征接触角经过测量为 $70^\circ$ , 表面呈现出亲水特性。要提高镍钛合金表面的接触角从而获得较好的疏水性, 那就需要构造合适的表面形貌。

磁力搅拌电火花加工后的镍钛合金表面与相应的静态接触角如图3所示。图3(a)~(c)显示当电流为1.5 A时, 表面形貌主要由熔凝凸起构成, 熔凝凸起的尺寸随着脉宽的增大而增大, 这是由于随着脉宽的增大, 脉冲能量增大, 熔化的金属也随之增多, 但是由于放电通道扩张, 放电点发散, 导致无足够的压力将材料去除, 因此熔凝凸起的尺寸也就越来越大。

熔凝凸起尺寸的增大导致“气垫”效应越来越显著, 接触角随之增大, 其中图3(c)的接触角达

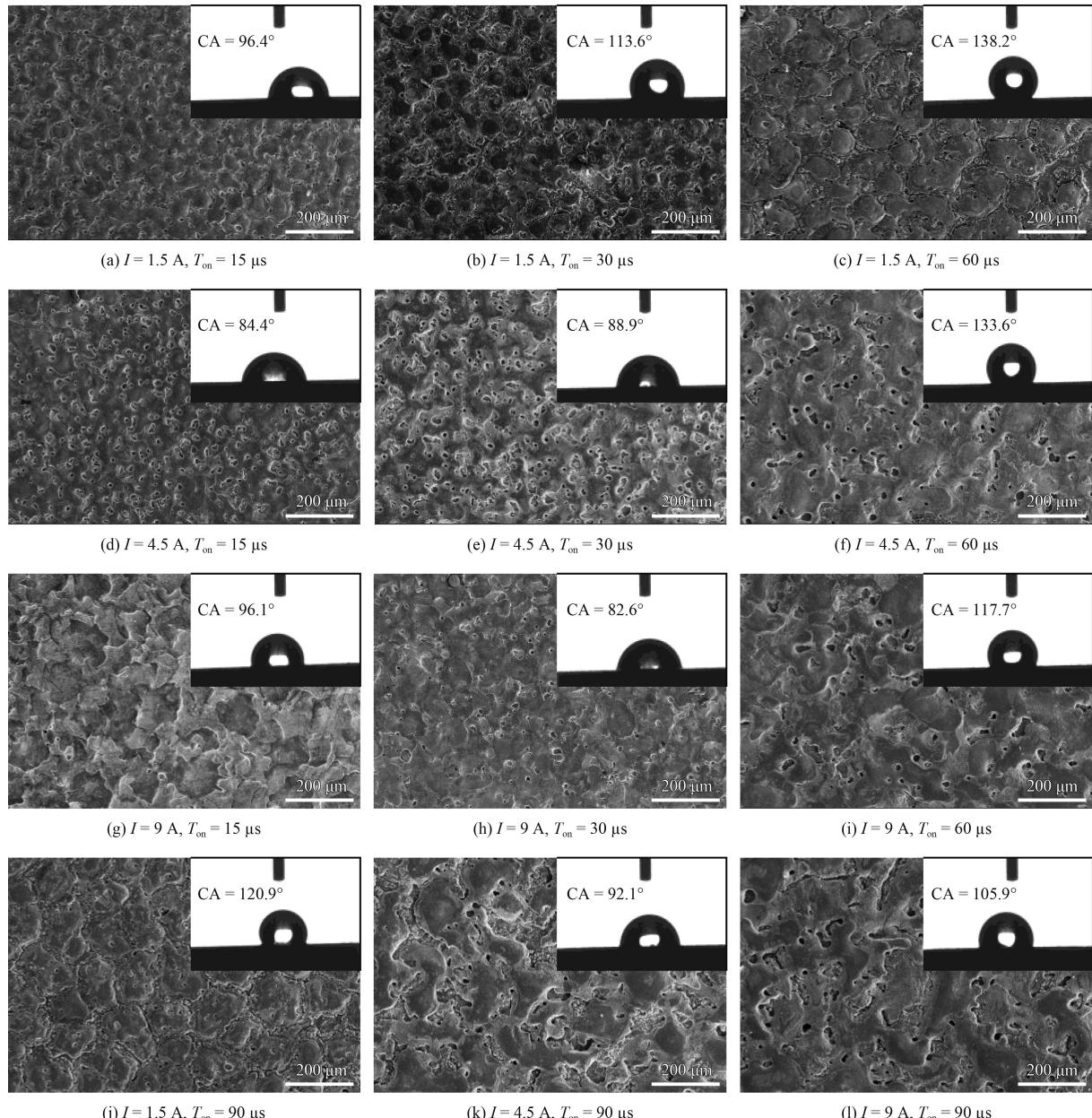


图3 磁力搅拌电火花加工后的表面形貌及所对应的接触角

Fig.3 Surface morphologies and corresponding contact angles after magnetic mixed EDM

到  $138.2^\circ$ ，这是因为其熔凝凸起尺寸较大，并且排列的更加规律、致密，所以当液滴接触其表面时，一个个的熔凝凸起形成支撑点将液滴托举起来，而凸起之间的空隙则是封闭了大量的空气，由于压力差而阻止了液滴完全进入熔凝凸起之间的缝隙，形成“气垫”效应，降低了液滴与固体的接触，并且熔凝凸起上有气孔的存在，这使得“气垫”效应进一步得到加强。从其高倍数图 2(d) 中发现熔凝凸起之间的“珊瑚礁”结构并不是在同一个高度，所以进入缝隙的液滴又在“珊瑚礁”结构上形成了二次“气垫”效应，材料表面由亲水性转变为疏水性，形成原理与 Cassie 理论相符合<sup>[19]</sup>。形成这种疏水性较强的表面形貌与使用磁力搅拌辅助电火花技术有很大关系，在无磁力搅拌的情况下，即便使用相同的工艺参数也得不到类似的表面<sup>[20]</sup>。图 3(a) 与图 3(b) 中的熔凝凸起尺寸较小，所以当液滴由重力作用在其表面时，由于接触面积小导致压强更大，这会使得较小尺寸的熔凝凸起能够刺入液滴，熔凝凸起尺寸越小，那么固体与液滴接触的面积越多，所以导致接触角越小。因此即使有着明显分界线的熔凝凸起依然无法大幅提高接触角。

从高倍数图 2(b) 与 (c) 发现当电流为  $4.5\text{ A}$  时，不同脉宽下的气孔深度不同，脉宽为  $30\text{ }\mu\text{s}$  时，气孔较浅，脉宽为  $60\text{ }\mu\text{s}$  时，气孔较深。从图 3(d)~(f) 发现当电流为  $4.5\text{ A}$  时，脉宽不同其表面气孔数量也不同，脉宽为  $15\text{ }\mu\text{s}$  与  $30\text{ }\mu\text{s}$  时，由于放电脉冲能量较小，熔化的金属材料相对较少且较薄，气体进入熔融金属的深度较浅，因此形成浅气孔的数量较多。而当脉宽为  $60\text{ }\mu\text{s}$  时，较大的放电脉冲能量将表面含有较浅气孔的金属材料大量去除，因此表面气孔的数量减少，但深度得到加强。

随着表面形貌的改变，接触角也随之变化，当表面含有较多的浅气孔时，接触角较小，而当表面含有较多的深气孔时，接触角较大。从图 3(d) 与图 3(e) 发现，浅层气孔较多的表面形貌的接触角均在  $90^\circ$  以下，还未达到疏水性。这是因为它们的表面含有较多的浅气孔，而且从高倍数图 2(b) 中可以发现这类表面形貌的浅气孔大而浅，这也导致了液滴在这种类型的表面很容易由于重力与毛细管力而进入浅层气孔中，因此液滴与固体

接触的面积增大，无法捕捉到足够的空气形成压强差，所以就没有形成“气垫”效应，当液滴与固体接触时，较大的接触面积会导致接触角较小。但是由于表面的微观结构发生了变化，所以接触角与本征接触角相比依然得到了小幅提升。而图 3(f) 的表面接触角达到了  $133.6^\circ$ ，其表面含有一定量的熔凝凸起与较多的深气孔，所以当液滴在其表面时，熔凝凸起将液滴托举起来，液滴由于压力差无法完全进入微孔，形成了“气垫”效应，从而表面具有较强的疏水性。

从图 3(g)~(i) 发现当电流为  $9\text{ A}$ ，随着脉宽的增大，表面形貌从无气孔特征发展到含有较少的浅气孔，再到变为含有一定深度的气孔。这是由于当脉宽较小时，熔融金属还未溶解气体便被大量去除。而当脉宽增大至  $30\text{ }\mu\text{s}$  时，气体进入熔融金属的时间增多，形成浅气孔。脉宽进一步扩大至  $60\text{ }\mu\text{s}$  时，气体进入熔融金属的时间进一步增大，所以表面形成有一定深度的气孔。

图 3(g) 显示形成了尺寸较大的熔凝凸起，但是这些凸起只是杂乱的重叠在一起，凸起与凸起之间并没有分界线，表面也没有形成气孔形貌，所以当液滴在其表面时，由于凸起重叠的高度不一致，导致凸起承托液滴的高度不同，所以表面的接触角为  $96.1^\circ$ 。随着脉宽的增大，表面形貌也发生了较大改变，在脉宽为  $30\text{ }\mu\text{s}$  时，表面含有较少的浅气孔，这会导致液滴与固体更多的接触，所以接触角相较于图 3(g) 反而是变小的。而在脉宽增大到  $60\text{ }\mu\text{s}$  时，表面含有一定量的深气孔，局部会有“气垫”效应产生，因此接触角相较于图 3(g) 有所提高。

从图 3(a)~(i) 中发现在相同的电流条件下，脉宽为  $60\text{ }\mu\text{s}$  时，表面接触角最大，并且发现在相同的脉冲宽度下，当电流为  $1.5\text{ A}$  时的接触角比电流为  $4.5\text{ A}$  与  $9\text{ A}$  的接触角大。但是有研究表明使用电火花技术加工镍钛合金，当电流低于  $1.5\text{ A}$  时表面已经不能正常放电<sup>[21]</sup>，所以不考虑降低电流以观察表面疏水性的改变。因此将脉宽增大至  $90\text{ }\mu\text{s}$  以观察表面疏水性的改变，结果如图 3(j)~(l) 所示。

从图 3(j)~(l) 中发现当脉宽增大至  $90\text{ }\mu\text{s}$ ，3 种电流对应的接触角与脉宽为  $60\text{ }\mu\text{s}$  时的接触角相比均有不同程度的降低。这是因为在脉宽为  $90\text{ }\mu\text{s}$  时，当电流为  $1.5\text{ A}$ ，表面熔凝凸起的尺寸较

图3(c)明显增大,但是接触角却略有降低,这是因为尺寸较大的熔凝凸起导致液滴与固体所接触的面积增大,空气与液滴接触的比例下降,“气垫”效应有所降低,因此接触角减小。当电流为4.5 A时,发现表面含有大量的凹坑,并且这些凹坑的尺寸较大,当液滴在其表面时很容易由于重力与毛细管力而进入凹坑中,导致液滴与固体更多的接触,表面的“气垫”效应消失,因此接触角与图3(f)相比是大幅降低。而当电流为9 A时,虽然表面形貌含有气孔特征,但由于在表面生成了一定数量的大凹坑,导致固体与液滴的接触面积增大,因此“气垫”效应有所降低,接触角与图3(i)相比是略有减小。

因此当电流较小为1.5 A与4.5 A时,接触角随着脉宽的增大呈现出先增大后减小的趋势,当脉宽为60  $\mu\text{s}$ 时接触角达到峰值。当电流增大到9 A时,也是脉宽为60  $\mu\text{s}$ 时接触角达到最大值

117.7°,脉宽增加或减小,接触角都低于该值。

从上述结论与图3中发现当工件采用磁力搅拌电火花加工后,其表面呈现出不同的形貌与疏水性。因此为了更加明确磁力搅拌电火花对表面形貌与疏水性的影响,选取两个具有较强疏水性的加工参数来进行浸油式电火花加工试验。

图4显示的是采用浸油式电火花加工后的表面形貌及所对应的接触角。其中与图4(a)(b)使用相同加工参数的是有磁力搅拌的图3(c)(f)。从图4(a)中发现其表面形貌未能像有磁力搅拌电火花加工后的图3(c)那样拥有较多明显的熔凝凸起,导致其无法有效支撑液滴,所以接触角较小。从图4(b)中发现其表面形貌未能像有磁力搅拌电火花加工后的图3(f)那样有较多的微孔,未能形成“气垫”效应,所以接触角较小。这也就证明了使用磁力搅拌电火花加工能对工件表面形貌造成较大影响,从而引起疏水性的改变。

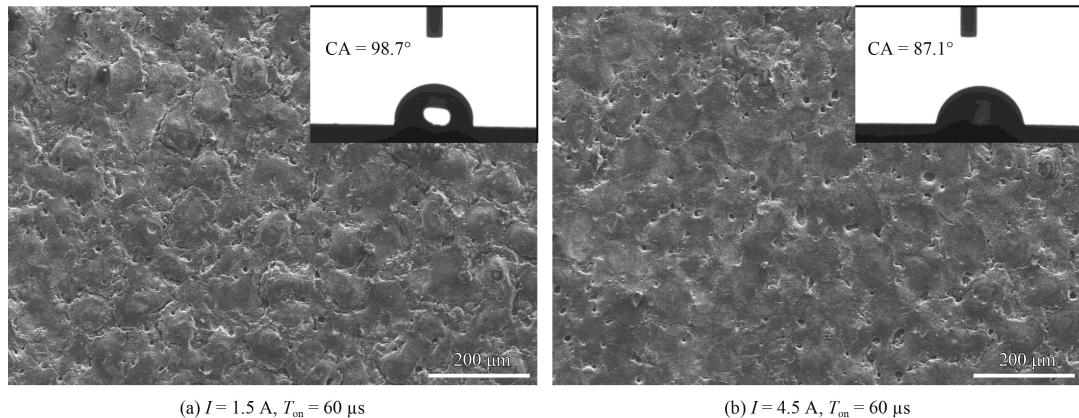


图4 浸油式电火花加工后的表面形貌及所对应的接触角

Fig.4 Surface morphologies and contact angles after oil-immersed EDM

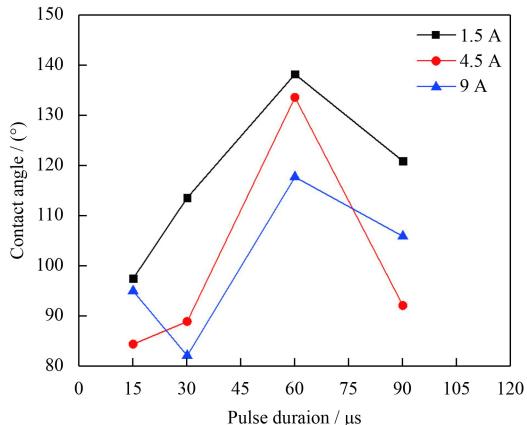
### 2.3 表面粗糙度对接触角的影响规律

材料表面具有一定程度的粗糙度有利于生物分子的吸附,这是由于细胞与生物大分子的尺寸在10 nm~10  $\mu\text{m}$ 之间,有研究表明当粗糙度处于此范围时可以提高材料的生物相容性<sup>[22]</sup>,从图5(b)中发现表面粗糙度均低于10  $\mu\text{m}$ ,这说明这些样件均有良好的生物相容性。图5(b)显示的是加工参数对表面粗糙度的影响。随着脉冲宽度与峰值电流的增大,脉冲能量也就越大,因此表面粗糙度也随之增大。

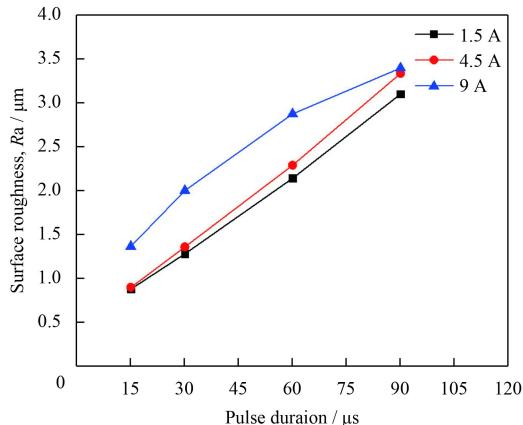
有研究认为随着粗糙度的增大,接触角也会随之增大<sup>[23]</sup>。但是文中发现表面粗糙度对于表面

的疏水性无直接影响,因为从图5中发现当脉宽由60~90  $\mu\text{s}$ 之间时,同一种电流下表面粗糙度随脉宽的增大而增大,但是接触角却是减小的。而当脉宽在30~60  $\mu\text{s}$ 时,电流越大表面粗糙度越大,但其接触角却是最小的。当脉宽相同时,电流为1.5 A的表面粗糙度是最小的,但是其接触角却是最大的。试验结果表明接触角并不全是随着表面粗糙度的增大而增大。

图6是表面粗糙度与接触角的关系。从图6可以发现,随着表面粗糙度的增大,接触角呈现不规律变化的趋势。表面粗糙度在2  $\mu\text{m}$ 时,接触角达到极小值,随着表面粗糙度的增加,接触角



(a) Effects of processing parameters on contact angle



(b) Effects of processing parameters on surface roughness

图 5 加工参数对接触角与粗糙度的影响

Fig.5 Effects of processing parameters on contact angles and surface roughness

到达极大值后开始急剧减小，当表面粗糙度较大为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时，其接触角的值比低表面粗糙度时的接触角的值小。因此表面粗糙度并不是决定接触角大小的直接因素，只有适合的表面形貌才能获得更好的疏水性。

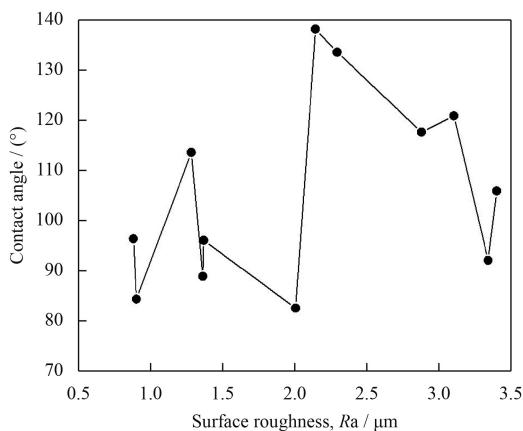


图 6 表面粗糙度与接触角的关系

Fig.6 Relationship between surface roughness and contact angles

### 3 结 论

(1) 磁力搅拌电火花加工工艺在合适的加工参数下，可以在镍钛合金表面上制备出熔凝凸起—凹坑—气孔—颗粒构成的复合结构。

(2) 加工参数对表面形貌特征影响显著，不同加工参数获得了不同表面微观结构。表面熔凝凸起的尺寸随脉宽的增大而增大，低脉宽下易产生浅气孔，大脉宽条件下容易获得深气孔。适当的脉冲宽度可以获得合适的表面熔凝与微孔结构，当脉宽为 $60\text{ }\mu\text{s}$ ，电流为 $1.5\text{ A}$ 时，表面由较多大

尺寸的熔凝凸起与“珊瑚礁”结构构成。

(3) 表面微观结构直接影响表面的疏水性能，当表面微观结构能与液滴形成“气垫”效应时，其表面的疏水性能得到大幅提升。当脉宽为 $60\text{ }\mu\text{s}$ ，峰值电流为 $1.5\sim 4.5\text{ A}$ 时，接触角均大于 $130^\circ$ ，加工表面能获得较好的疏水性。

(4) 接触角并不单纯随表面粗糙度的增大而增大，表面粗糙度对表面的疏水性能无直接影响。

### 参考文献

- [1] MORADI S, HADJESFANDIARI N, TOOSI S F, et al. Effect of extreme wettability on platelet adhesion on metallic implants: from superhydrophilicity to superhydrophobicity[J]. *Academy of Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(27): 17631.
- [2] PARK C, KIM S, KIM H E, et al. Mechanically stable tantalum coating on a nano-roughened NiTi stent for enhanced radiopacity and biocompatibility[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 30(5): 139-145.
- [3] MOHD JANI J, LEARY M, SUBIC A, et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities[J]. *Materials & Design*, 2014, 56(4): 1078-1113.
- [4] SUN L, HUANG W M, DING Z, et al. Stimulus-responsive shape memory materials: A review[J]. *Materials & Design*, 2012, 33(1): 577-640.
- [5] HENDERSON E, BUIS A. Nitinol for prosthetic and orthotic applications[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2011, 20(4-5): 663-665.
- [6] XU Y D, ZHU Z Y, XU T Z, et al. Fabrication and characterization of robust hydrophobic lotus leaf-like surface on  $\text{Si}_3\text{N}_4$  porous membrane via polymer-derived SiNCO inor-

- ganic nanoparticle modification[J]. *Ceramics International*, 2018.
- [7] ANNE-MARIE KIETZIG, MIRVAKILI M N, SAEIDKAMAL, et al. Laser-patterned super-hydrophobic pure metallic substrates: cassie to wenzel wetting transitions[J]. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2011, 25(20): 2789-2809.
- [8] JEONG C, CHOI C H. Single-step direct fabrication of pillar-on-pore hybrid nanostructures in anodizing aluminum for superior superhydrophobic efficiency[J]. *Acs Appl Mater Interfaces*, 2012, 4(2): 842-848.
- [9] WEINERT K, PETZOLDT V, KÖTTER D. Turning and drilling of niti shape memory alloys[J]. *Cirp annals - manufacturing technology*, 2004, 53(1): 65-68.
- [10] DIRK B, FELIX K, TOBIAS S. Micromilling of niti shape-memory alloys with ball nose cutters[J]. *Advanced manufacturing processes*, 2009, 24(12): 1266-1273.
- [11] 程杰, 于兆勤, 刘江文, 等. 磁粉电火花毛化制备铝基超疏水表面[J]. *机电工程技术*, 2017, 46(9): 31-35.  
CHENG J, YU Z Q, LIU J W, et al. Fabrication of super-hydrophobic aluminum base surface by MAEDM[J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2017, 46(9): 31-35 (in Chinese).
- [12] 弯艳玲, 廉中旭, 刘志刚, 等. 高速电火花线切割制备耐用品超疏水铜表面[J]. *材料科学与工程学报*, 2014, 32(5).  
WAN Y L, LIAN Z X, LIU Z G, et al. Fabrication of robust super-hydrophobic copper surface surface by HS-WEDM[J]. *Journal of Material Science & Engineering*, 2014, 32(5) (in Chinese).
- [13] HSIEH S F, LIN M H, CHEN S L, et al. Surface modification and machining of tini/tinb-based alloys by electrical discharge machining[J]. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2016, 86(5-8): 1475-1485.
- [14] DANESHMAND S. Experimental investigations into electro discharge machining of niti shape memory alloys using rotational tool[J]. *International journal of electrochemical science*, 2013, 8(8): 7484.
- [15] 赵林, 李丽, 王好臣, 等. TC4 钛合金混粉电火花表面改性研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(2): 138-143.
- ZHAO L, LI L, WANG H C, et al. Surface modification of TC4 titanium alloy by mixed powered electrical discharge machine in different tool electrode[J]. *Surface technology*, 2017, 46(2): 138-143 (in Chinese).
- [16] 刘云, 李丽, 李瑶, 等. 复合电极-混粉电火花加工 Ti-6Al-4V 钛合金的研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(9): 252-257.  
LIU Y, LI L, LI Y, et al. Composite electrode-powder mixed electric discharge machining Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(9): 252-257 (in Chinese).
- [17] LIU J F, GUO Y B. Process capability of Wire-EDM of NiTi shape memory alloy at main cut and trim cut modes[J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 1: 904-914.
- [18] LI L, WEI X T, LI Z Y. Surface integrity evolution and machining efficiency analysis of W-EDM of nickel-based alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 313(13): 138-143.
- [19] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of porous surfaces[J]. *Trans Faraday Soc*, 1944, 40(1): 546-551.
- [20] ALIDOOSTI A, GHAFARI-NAZARI A, MOZTARZA-DEH F, et al. Electrical discharge machining characteristics of nickel-titanium shape memory alloy based on full factorial design[J]. *Journal of intelligent material systems & structures*, 2013, 24(13): 1546-1556.
- [21] THEISEN W, SCHUERMANN A. Electro discharge machining of nickel-titanium shape memory alloys[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2004, 378(1): 200-204.
- [22] KASEMO B. Biocompatibility of titanium implants: surface science aspects[J]. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 1983, 49(6): 832-837.
- [23] 许金凯, 张林帅, 弯艳玲, 等. 电火花线切割制备超疏水铜表面的正交试验[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2015(3): 37-40.  
XU J K, ZHANG L S, WAN Y L, et al. Experimental study of super-hydrophobic brass surface obtained by WEDM[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015(3): 37-40 (in Chinese).