

# 电参数对7075铝合金微弧氧化膜层粗糙度的影响

张纪磊<sup>1,2</sup>, 柴永生<sup>1</sup>, 金靛婕<sup>2</sup>, 梁小蕊<sup>2</sup>, 卫尚涛<sup>1</sup>, 刘 咪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>烟台大学, 山东 烟台

<sup>2</sup>海军航空大学, 山东 烟台

收稿日期: 2022年3月11日; 录用日期: 2022年4月3日; 发布日期: 2022年4月12日

## 摘 要

本文在微小极间距条件下对7075铝合金进行了微弧氧化实验。比较了正向电压、占空比和脉冲频率等电参数对铝合金微弧氧化膜层粗糙度的影响。通过正交试验, 总结出单一电参数水平因素下膜层粗糙度的变化规律, 正向电压的增大, 反向占空比减小, 脉冲频率减小, 都会促使膜层粗糙度增大。通过相对极差分析发现, 反向占空比对微弧氧化膜粗糙度影响程度最大, 其次是极间正向电压, 脉冲频率影响最小。针对7075铝合金微弧氧化处理造成的粗糙度增大的问题, 应重点考虑增大电源的反向占空比。

## 关键词

微弧氧化, 7075铝合金, 粗糙度, 电参数, 正交试验

# Effect of Electrical Parameters on Roughness of Micro-Arc Oxidation Film of 7075 Aluminum Alloy

Jilei Zhang<sup>1,2</sup>, Yongsheng Chai<sup>1</sup>, Liangjie Jin<sup>2</sup>, Xiaorui Liang<sup>2</sup>, Shangtao Wei<sup>1</sup>, Mi Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yantai University, Yantai Shandong

<sup>2</sup>Naval Aviation University, Yantai Shandong

Received: Mar. 11<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2022; published: Apr. 12<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In this paper, the micro arc oxidation experiment of 7075 aluminum alloy was carried out under

文章引用: 张纪磊, 柴永生, 金靛婕, 梁小蕊, 卫尚涛, 刘咪. 电参数对 7075 铝合金微弧氧化膜层粗糙度的影响[J]. 材料科学, 2022, 12(4): 247-258. DOI: 10.12677/ms.2022.124026

the condition of micro electrode spacing. The effects of forward voltage, duty cycle and pulse frequency on the roughness of aluminum alloy micro arc oxidation film were compared. Through orthogonal test, the variation law of film roughness under single electrical parameter level factor is summarized. The increase of forward voltage, the decrease of reverse duty cycle and pulse frequency will increase the roughness of the film. Through the relative range analysis, it is found that the reverse duty cycle has the greatest influence on the roughness of micro arc oxide film, followed by the forward voltage between electrodes, and the pulse frequency has the least influence. In view of the increase of roughness caused by micro arc oxidation of 7075 aluminum alloy, we should focus on increasing the reverse duty cycle of the power supply.

## Keywords

Micro-Arc Oxidation, 7075 Aluminum Alloy, Roughness, Electrical Parameters, Orthogonal Test

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

7075 铝合金结构紧密, 具有较好的普通抗腐蚀性能和良好机械性能[1], 被广泛应用于航空航天、船舶制造和武器装备等领域[2] [3] [4]。通过对铝合金进行微弧氧化处理, 使其表面生成氧化铝陶瓷膜层, 可以进一步提升材料的耐磨损、耐腐蚀、耐高温等表面性能[5] [6] [7] [8], 因而使得该技术在铝合金应用领域得到大规模推广。但是, 由于微弧氧化陶瓷膜生长过程中, 难以避免放电微孔和裂纹的出现, 从而导致材料表面耐磨损、耐腐蚀、耐高温性能提升的同时, 粗糙度变大, 影响待处理元件本身的精密度[9]。因此在对铝合金进行微弧氧化处理时, 往往需要在提高膜层耐磨损、耐腐蚀、耐高温性能的同时, 尽可能降低膜层的粗糙度。特别是扫描式微弧氧化处理中, 由于极间距小, 加上电极形貌和扫描运动的影响, 膜层均一性更容易受到影响[10], 对降低膜层粗糙度的要求更高。

本文主要针对网状电极微小极间距条件下的微弧氧化处理进行研究, 通过正交试验, 分析电参数对微弧氧化成膜粗糙度的影响, 研究如何通过电参数的优化对氧化膜粗糙度进行靶向控制。以期对微弧氧化处理工艺的发展提供必要的理论依据。

## 2. 试验条件和方法

### 2.1. 试验条件

微弧氧化电源为济南能华机电设备有限公司生产的 NHSM800-5 型开关直流双脉冲电源。动阴极使用直径 16 mm 的网状电极, 材质为 304 不锈钢。阳极为待处理的 7075 铝合金, 内部各元素含量如表 1 所示。试验极间距为 2 mm。电解液为  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、 $\text{NaOH}$ 、 $\text{NaF}$  混合溶液, 配比参数见表 2。

Table 1. Content of elements in 7075 aluminum alloy (wt%)

表 1. 7075 铝合金中各元素含量(wt%)

元素	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al
含量	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.50	0.40	0.30	0.18~0.28	0.20	其他

**Table 2.** Electrolyte ratio  
**表 2.** 电解液配比

药品名称	浓度(g/L)
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	10
NaOH	5
NaF	2.5

## 2.2. 正交试验设计

为节省研究时间和精力,采用正交实验法,利用标准的正交矩阵对试验进行设计、比较、分析。固定反向电压为-200 V,总占空比 50%,反应时间 300 s。挑选具有代表性的因素(正向电压、占空比、频率等电参数)利用正交表安排试验如表 3 所示。

**Table 3.** Combination of electrical parameters  
**表 3.** 电参数组合

水平因素 \ 参数编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
正向电压(V)	300	300	300	400	400	400	500	500	500
正占空比	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
反占空比	40%	30%	20%	40%	30%	20%	40%	30%	20%
脉冲频率(Hz)	200	250	300	250	300	200	300	200	250

## 2.3. 粗糙度测量

利用北京吉泰科仪检测设备有限公司生产的 TR200 表面粗糙度检测仪(如图 1 所示),测量本研究所得试验样品表面膜层粗糙度。该表面粗糙度检测仪体积小,操作简便,功能全面测量快捷,精度稳定,测量参数符合 GB/T3505 国家标准。测量精度 0.001 μm,测量范围 0.005 μm~16 μm,取样长度 0.25 mm、0.8 mm、2.5 mm 三档可选,评定长度 1~5 倍取样长度可选。



**Figure 1.** TR200 surface roughness tester  
**图 1.** TR200 表面粗糙仪

本研究中为了尽可能得到整个样品表面的整体粗糙度情况,在样品的 4 处不同位置分别测量 7.5 mm 长度上的平均粗糙度,即取样长度设置为 2.5 mm,评定长度设置为 5,计算 4 次测量结果的平均值,看作最终膜层粗糙度。试验结果如表 4 所示。

**Table 4.** Measurement results of film surface roughness in electrical parameter comparison test**表 4.** 电参数对比试验膜层表面粗糙度测量结果

粗糙度( $\mu\text{m}$ ) \backslash 参数编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.375	0.356	0.511	0.189	0.796	0.92	0.202	1.028	1.218
2	0.340	0.351	0.525	0.220	0.613	0.923	0.194	1.120	1.072
3	0.365	0.352	0.458	0.187	0.595	0.846	0.231	1.012	1.138
4	0.321	0.310	0.492	0.213	0.893	0.908	0.180	0.997	1.115
平均值	0.350	0.342	0.497	0.202	0.724	0.899	0.202	1.039	1.136

## 2.4. 表面形貌观测

使用 VEGA XMU 扫描电子显微镜(SEM)对生成氧化膜表面形貌进行观测,通过分析不同电参数条件下微弧氧化膜层表面放电微孔和裂纹的变化规律,研究电参数对膜层粗糙度的影响机理。

## 2.5. 数据分析

通过极差分析法对结果进行分析,计算膜层硬度在同一个电参数水平上的平均值、极差值(最大值-最小值)和相对极差(极差/平均值)。通过相对极差值分别表示各个参数对陶瓷膜层硬度的影响程度[11],相对极差越大说明该参数的对成膜厚度影响程度越大,即该电参数的变化将最大程度影响膜层生长速度,若要提高膜层生长速度,则应优先考虑对该电参数进行优化;通过不同电参数下膜层硬度平均值的变化,研究电参数对膜层硬度的影响规律,确定该电参数应增大还是减小。

## 3. 正向电压对膜层粗糙度的影响

利用表 4 的测量结果,针对正向电压对样品陶瓷膜层粗糙度影响的进行极差分析,分析结果见表 5。表 4 中 1 至 3 号电参数组合中正向电压相同,均为 300 V,试验样品陶瓷膜层的粗糙度最大值为 0.497  $\mu\text{m}$ ,平均值 0.396  $\mu\text{m}$ 。4 至 6 号试验中,正向电压均为 400 V,生成样品的陶瓷膜层粗糙度最大值为 0.899  $\mu\text{m}$ ,平均值为 0.675  $\mu\text{m}$ ,相对 300 V 时的试验样品,陶瓷膜层平均粗糙度增加了 0.279  $\mu\text{m}$ ,增比高达 70.4%,正向电压增高导致的膜层粗糙度差,且变化明显。7~9 号试验中,正向电压同样又增加 100 V,增加至 500 V,生成样品的陶瓷膜层粗糙度最大值为 1.136  $\mu\text{m}$ ,平均值为 0.792  $\mu\text{m}$ ,陶瓷膜层平均粗糙度增加了 0.117  $\mu\text{m}$ ,增比 17.3%,膜层粗糙度虽有增加,但增幅已明显降低。

**Table 5.** Effect of forward voltage on film roughness**表 5.** 正向电压对膜层粗糙度的影响

正向电压(V)	粗糙度平均值( $\mu\text{m}$ )	极差( $\mu\text{m}$ )	相对极差
300	0.396	0.154	0.39
400	0.675	0.497	0.74
500	0.792	0.934	1.18

如图 2 所示,微弧氧化时间相同的情况下,正向电压增大会使微弧氧化反应生成的陶瓷膜层粗糙度增大,当正向电压达到一定程度时,粗糙度变化减缓。这是因为,正向电压增高,反应中放电能量高,反应更加剧烈,当击穿放电正向电压过高时,由于放电能量过高,很容易造成反应过于剧烈,使氧化陶

瓷膜局部出现烧蚀现象。同时随着反应电流密度的增大，脉冲能量不断升高，会使陶瓷膜层表面的放电微孔尺寸增大，氧化膜表面粗糙度变大，表面裂纹增多。图3为正向电压不同时陶瓷膜层表面SEM图像，其中图3(a)~(c)分别为1、5、8号试验参数下反应生成的陶瓷膜层，正向电压分别为300V、400V、500V。正向电压为300V时放电微孔小而密，最大微孔直径1.56 $\mu\text{m}$ ；正向电压为400V时，微孔数量变少，但放电微孔直径变大，最大微孔直径1.73 $\mu\text{m}$ ，而且陶瓷膜层表面出现明显的裂纹；正向电压为500V时，微孔数量继续增大，裂纹增多，最大微孔直径也增大至2.47 $\mu\text{m}$ 。可见，铝合金微弧氧化陶瓷膜层厚度增加，必将带来放电微孔增大的问题，从而影响陶瓷膜层的粗糙度和耐腐蚀性。

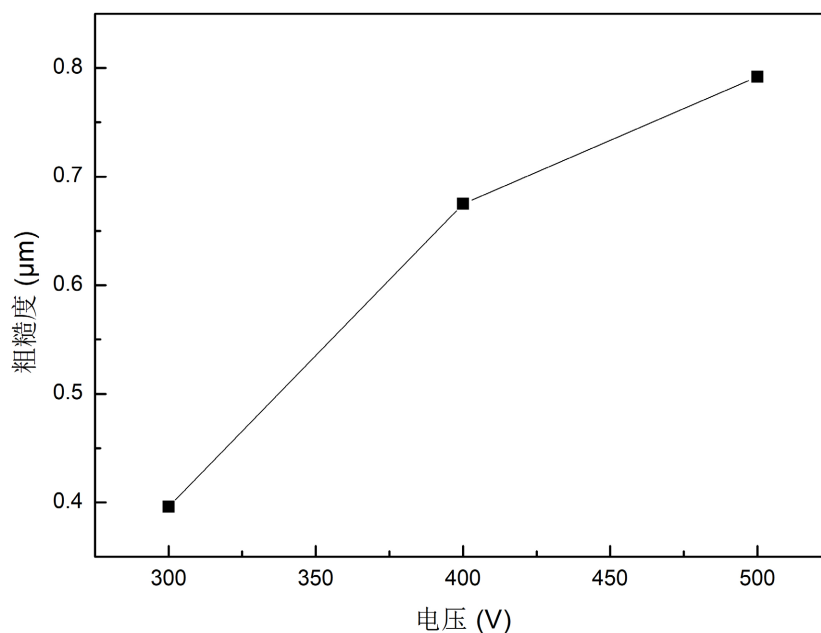
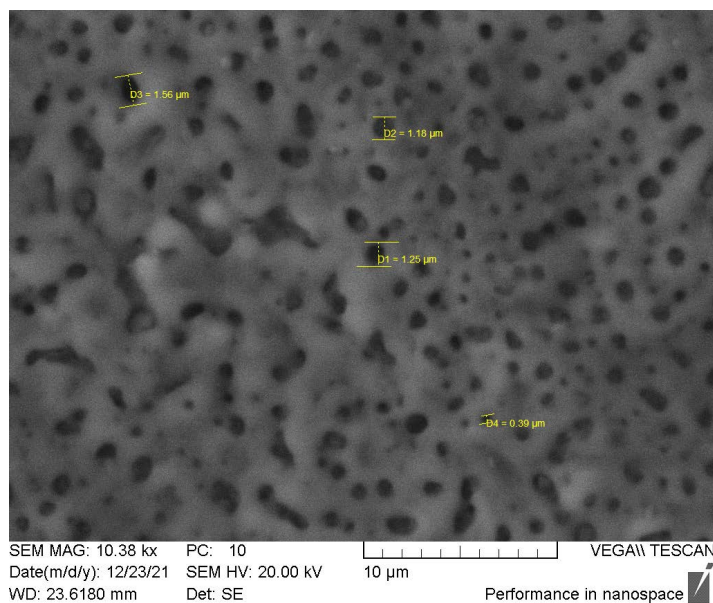


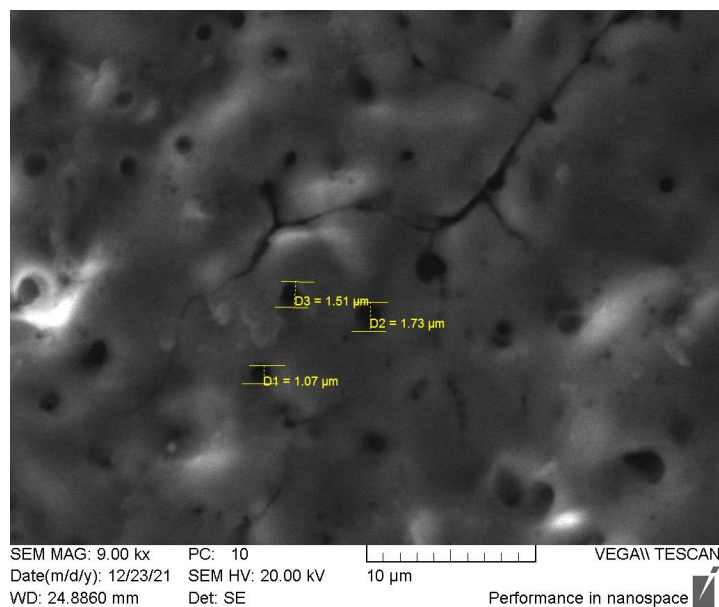
Figure 2. Effect of forward voltage on film roughness

图2. 正向电压对膜层粗糙度的影响

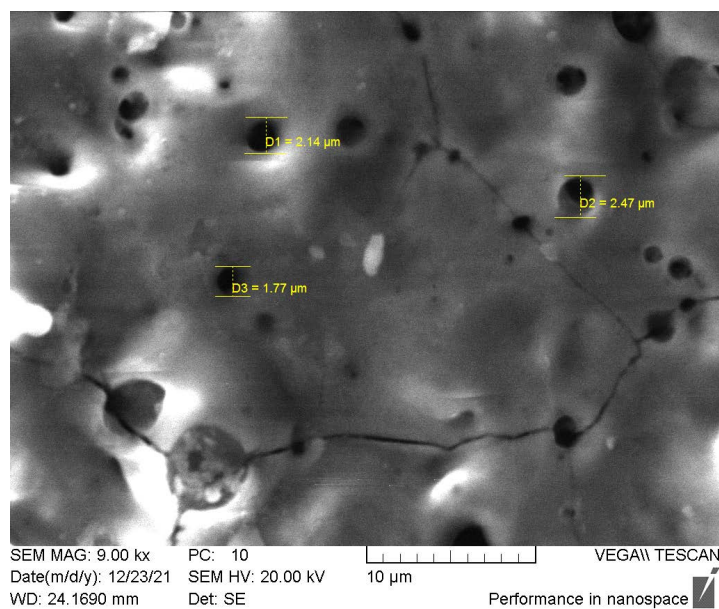


(a) 300 V





(b) 400 V



(c) 500 V

**Figure 3.** SEM images of the film surface generated under different forward voltage  
**图 3.** 不同正向电压生成膜层表面 SEM 图像

另外,由表 5 中的极差分析可知:正向电压均为 300 V 时,3 组试验样品陶瓷膜层的粗糙度极差为  $0.154\ \mu\text{m}$ ,相对极差 0.39,此时膜层粗糙度变化受其他参数影响较小。4 至 6 号试验中,正向电压 400 V,3 组试验样品的膜层粗糙度极差为  $0.497\ \mu\text{m}$ ,相对极差 0.74,相互之间的差异明显,说明在该正向电压下,其他电参数对试验样品陶瓷膜层粗糙度的影响显著增大。7~9 号试验中,正向电压增加至 500 V,生成样品的陶瓷膜层粗糙度极差为  $0.934\ \mu\text{m}$ ,相对极差 1.18,相互之间的差异更加明显,说明铝合金微弧氧化试验中,极间正向电压越高,其他电参数对生成氧化陶瓷膜层粗糙度的影响越大,更需要对频率、占空比等电参数进行更为精细的选择。

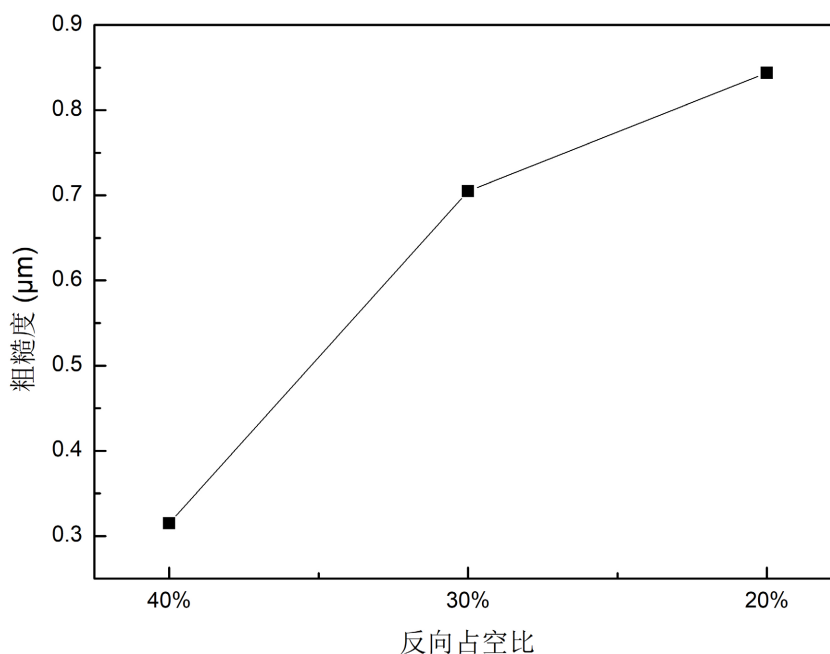
#### 4. 占空比对膜层粗糙度的影响

利用表 4 的测量结果, 对占空比相同的试验所得陶瓷膜层进行粗糙度的平均值、极差和相对极差分析, 结果如表 6 所示。1 号、4 号和 7 号电参数组合中占空比设置相同, 反向占空比为 40%, 正向占空比为 10%, 试验样品陶瓷膜层的粗糙度平均值  $0.315 \mu\text{m}$ 。2 号、5 号和 8 号试验中, 反向占空比为 30%, 正向占空比为 20%, 生成样品的陶瓷膜层粗糙度平均值为  $0.705 \mu\text{m}$ , 相对反向占空比为 40% 的试验样品, 陶瓷膜层平均粗糙度增加了  $0.390 \mu\text{m}$ , 增比高达 123.8%, 反向占空比减小后, 生成陶瓷膜层的粗糙度明显增大。3 号、6 号和 9 号试验中, 反向占空比为 20%, 正向占空比为 30%, 生成样品的陶瓷膜层粗糙度平均值为  $0.844 \mu\text{m}$ , 陶瓷膜层粗糙度平均值增加了  $0.139 \mu\text{m}$ , 增比 19.7%, 膜层粗糙度增幅不明显。

**Table 6.** Effect of reverse duty ratio on film roughness

**表 6.** 反向占空比对膜层粗糙度的影响

反向占空比	粗糙度平均值( $\mu\text{m}$ )	极差( $\mu\text{m}$ )	相对极差
40%	0.315	0.201	0.64
30%	0.705	0.689	0.98
20%	0.844	0.639	0.76



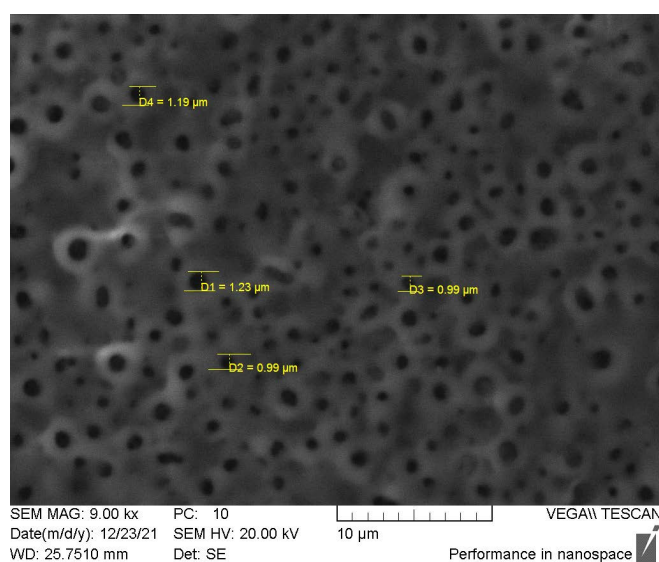
**Figure 4.** Effect of reverse duty ratio on film roughness

**图 4.** 反向占空比对膜层粗糙度的影响

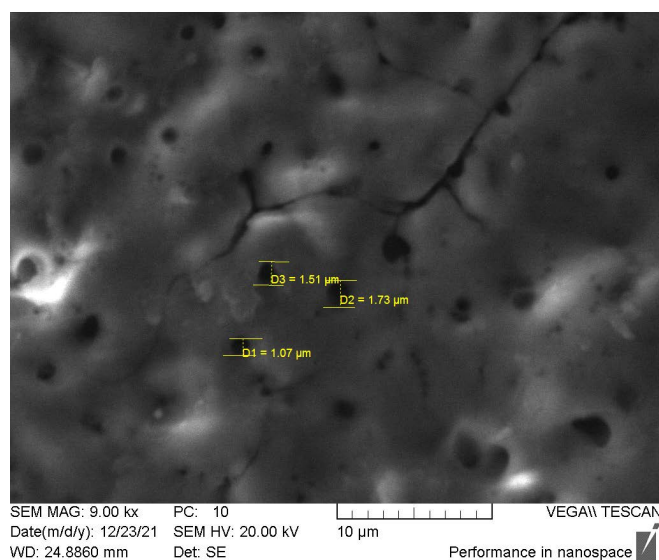
如图 4 所示, 微弧氧化时间相同的情况下, 随着反向占空比减小, 生成氧化陶瓷膜层粗糙度逐渐增加, 但增速减缓。经分析认为, 可能的原因是由于总占空比 50% 不变, 反向占空比减小, 正向电压占空比增大, 正向脉冲宽度变大, 单脉冲放电时间增加, 导致单脉冲放电能量大大增加, 增加了火花放电的持续时间, 从而影响微弧氧化反应的剧烈程度, 由于火花放电而导致的熔融氧化物必然增多, 电通道周围的冷凝氧化物颗粒随之增加, 氧化物颗粒在局部区域沉积增厚的情况也更为严重, 单个氧化物颗粒尺寸变大, 致使陶瓷膜层表面粗糙度增大。另外, 由于火花放电能量增大, 会导致放电通道直径变大, 使

得放电微孔尺寸变大；同时，由于负脉冲过程中，析氧的还原反应会使已经生成的氧化陶瓷膜表面发生溶解，凸起的熔融物距离阴极更近，更容易发生还原反应而溶解，从而改善膜层表面的粗糙度，因此反向占空比越大，陶瓷膜层粗糙度越小；而且，由于高能量使得反应温度更高、压强更大，进而使陶瓷膜层生长过程中受到的热应力变大，导致膜层表面裂纹增多，裂纹长度和宽度增大，同样造成陶瓷膜层表面粗糙度增大。

图 5 是 4、5、6 号试验参数所得到的陶瓷膜层表面 SEM 图像，它们的正向电压相同，均为 400 V 时，反向占空比各不相同。其中图 5(a)为 4 号试验参数，即反向占空比 40%生成的氧化陶瓷膜层，由图像可以看出，此时放电微孔孔径较小，且尺寸差异小，平均值约为 1.10  $\mu\text{m}$ ，微孔数量多而密集，膜层表面无裂纹。图 5(b)和图 5(c)分别为 5 号、6 号试验参数，反向占空比为 30%和 20%，明显出现多个孔径较大的放电微孔，不同微孔尺寸差异明显，相比图 5(a)，微孔数量明显减少，膜层表面出现多条裂纹，火山口状的熔融物沉积现象也更加明显。这与粗糙度测量所表现出的规律相一致，也与之前的理论分析结论相吻合。



(a) 40%



(b) 30%



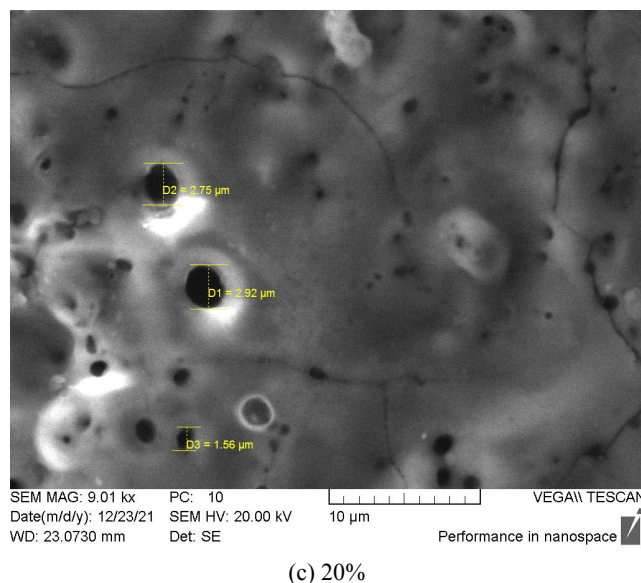


Figure 5. SEM images of film surface generated under different reverse duty cycle

图 5. 反向占空比不同生成膜层表面 SEM 图像

另外,由表 4 中的极差分析可知:反向占空比为 40%时,3 组试验样品陶瓷膜层的粗糙度极差为 0.201  $\mu\text{m}$ ,相对极差 0.64,此时膜层粗糙度较低,相对变化也不大,受其他参数影响较小。反向占空比为 30%时,3 组试验样品的膜层粗糙度极差为 0.689  $\mu\text{m}$ ,相对极差 0.98,是整个表格中相对极差最大的,说明在该占空比参数下,其他电参数对试验样品陶瓷膜层粗糙度的影响显著增大。反向占空比为 20%时,生成样品的陶瓷膜层粗糙度极差为 0.639  $\mu\text{m}$ ,相对极差 0.76,相比反向占空比为 30%时的试验结果,相对极差减小,在增加氧化陶瓷膜粗糙度方面,更不容易受其他电参数影响,即该反向占空比值对膜层粗糙度影响程度更大。

## 5. 脉冲频率对膜层粗糙度的影响

利用表 4 的测量结果,对脉冲频率相同的试验,所得陶瓷膜层进行粗糙度的平均值、极差和相对极差分析,结果如表 7 所示。表 4 中 1 号、6 号和 8 号电参数组合中频率设置相同,为 200 Hz,试验样品陶瓷膜层的粗糙度平均值 0.760  $\mu\text{m}$ 。2 号、4 号和 9 号试验中,频率设置为 250 Hz,生成样品的陶瓷膜层粗糙度平均值为 0.629  $\mu\text{m}$ ,相对频率为 200 Hz 的试验样品,陶瓷膜层平均粗糙度减小了 0.131  $\mu\text{m}$ ,减小的比例为 17.2%。3 号、5 号和 7 号试验中,频率设置为 300 Hz,生成样品的陶瓷膜层粗糙度平均值为 0.474  $\mu\text{m}$ ,陶瓷膜层粗糙度平均值减小了 0.155  $\mu\text{m}$ ,减小的比例为 24.6%。

Table 7. Effect of pulse frequency on film roughness

表 7. 脉冲频率对膜层粗糙度的影响

脉冲频率(Hz)	粗糙度平均值( $\mu\text{m}$ )	极差( $\mu\text{m}$ )	相对极差
200	0.760	0.697	0.92
250	0.629	0.786	1.25
300	0.474	0.523	1.10

膜层粗糙度随脉冲频率的变化曲线如图 6 所示,在微弧氧化时间相同的情况下,随着试验脉冲频率

增大,生成样品的陶瓷膜层粗糙度逐渐减小,但减小程度有所下降。经分析认为,当脉冲频率较小时,单次脉冲周期长,氧化陶瓷膜表面单次放电时间更长,能量更大,放电火花也更大,留下的放电微孔孔径较大,影响了陶瓷膜层表面的粗糙度;同时,更大的放电能量和更长的单次反应时间,使得火花放电喷出的氧化物熔融冷凝颗粒尺寸更大,因而膜层表面起伏较大,凹凸不平的情况更为严重,造成表面粗糙度变大;另外,由于单次放电能量高、周期长,使得反应温度更高、压强更大,反应过程中陶瓷膜层受到的热应力更大,可能导致膜层表面裂纹增多,裂纹长度和宽度增大,同样会造成陶瓷膜层表面粗糙度增大。当脉冲频率较大时,单脉冲周期短,放电能量少,反应剧烈程度会减缓,相应的放电微孔孔径、放电通道周围熔融物冷凝颗粒都会减小,裂纹情况也能得以改善。

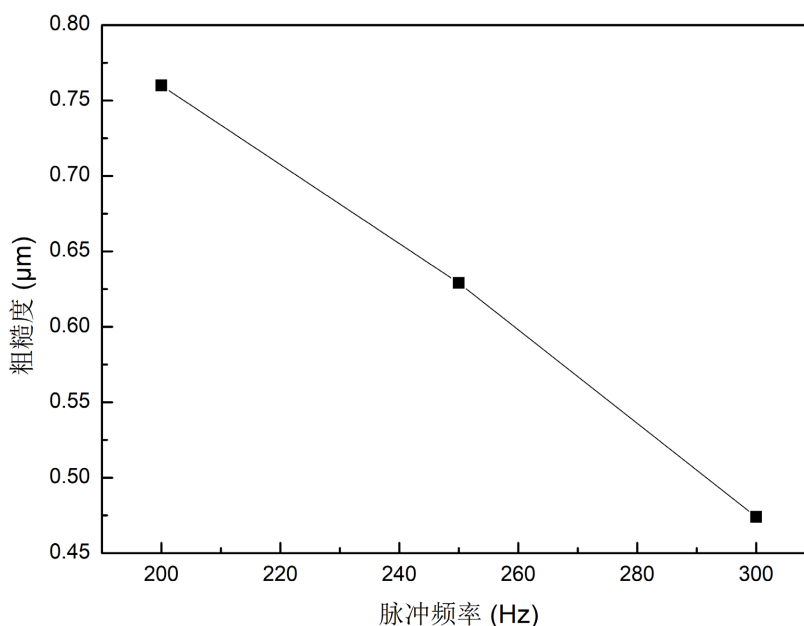
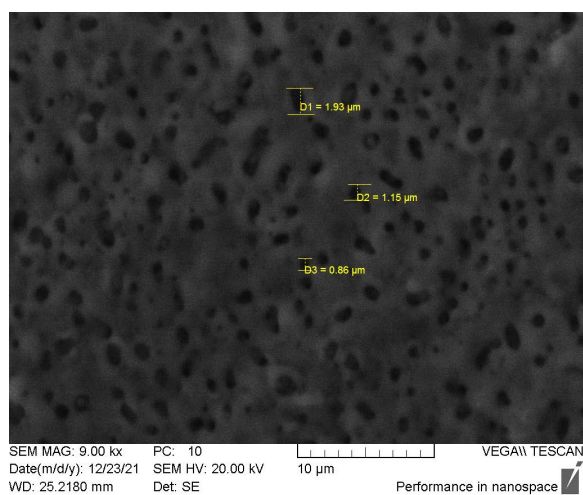


Figure 6. Effect of pulse frequency on film roughness

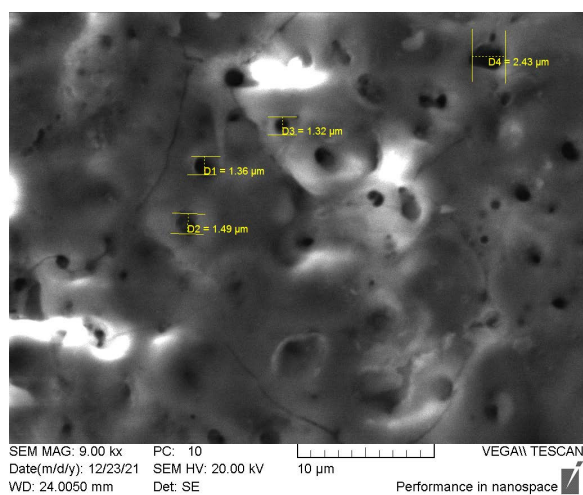
图 6. 脉冲频率对膜层粗糙度的影响

图 7 是 7、8、9 号试验参数所得到陶瓷膜层的表面 SEM 图像,它们的正向电压相同,均为 500 V 时,反向占空比和脉冲频率都不相同。其中(a)为 7 号试验参数,即频率 300 Hz 生成的氧化陶瓷膜层,由图像可以看出,此时放电微孔孔径较小,且尺寸差异小,最大值为 1.93  $\mu\text{m}$ ,微孔数量多而密集,膜层表面无裂纹。(b)和(c)的试验参数分别使用了 8 号、9 号,脉冲频率分别为 200 Hz 和 250 Hz,膜层表面明显出现多个孔径较大的放电微孔,不同微孔尺寸差异明显,相比图 7(a),微孔数量明显减少,膜层表面出现多条裂纹,火山口状的熔融物沉积现象也更加明显。这与粗糙度测量结果所表现出的规律相一致,也与之前的理论分析结论相吻合,即频率降低会使得生成陶瓷膜层表面粗糙度增大。

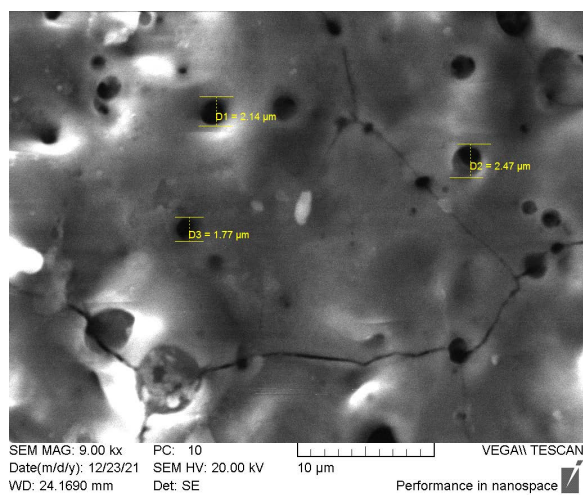
由表 7 中的极差分析可知:脉冲频率为 200 Hz 时,3 组试验样品陶瓷膜层的粗糙度极差为 0.697  $\mu\text{m}$ ,相对极差 0.92,此时膜层粗糙度平均值最大,但相对变化也较大,说明受其他参数影响较大。脉冲频率为 250 Hz 时,3 组试验样品的膜层粗糙度极差为 0.786  $\mu\text{m}$ ,相对极差 1.25,在平均粗糙度降低的同时,相对极差却增大,其他电参数对该频率下试验样品陶瓷膜层粗糙度的影响显著增大。脉冲频率为 300 Hz 时,生成样品的陶瓷膜层粗糙度极差为 0.523  $\mu\text{m}$ ,相对极差 1.10,虽然平均粗糙度降低,但是相对极差仍然较大,该频率下膜层粗糙度仍然容易受其他电参数影响。由于 3 组数据反映出的相对极差都较大,说明膜层粗糙度受其他电参数影响程度较大,受频率的影响程度较小。



(a) 300 Hz



(b) 200 Hz



(c) 250 Hz

**Figure 7.** SEM images of the film surface generated with different pulse frequencies

**图 7.** 脉冲频率不同生成膜层表面 SEM 图像

## 6. 不同电参数对膜层粗糙度的影响程度

通过计算同一水平因素下, 所得样品粗糙度的相对极差, 进一步分析各电参数对膜层粗糙度的影响程度, 确定影响陶瓷膜层粗糙度的各个因素的主次。根据表 5 的数据计算可得, 正向电压不同时, 膜层粗糙度测量的极差为  $0.396\ \mu\text{m}$ , 相对极差为 0.64, 用 Ra 表示; 根据表 6 的数据, 计算反向占空比不同时, 膜层粗糙度平均值的相对极差为 0.85, 用 Rb 表示; 根据表 7 的数据, 计算脉冲频率不同时, 膜层粗糙度平均值的相对极差为 0.46, 用 Rc 表示。相对极差由大到小排列为:  $Rb > Ra > Rc$ , 即三个因素中, 反向占空比对微弧氧化膜粗糙度影响程度最大, 其次是极间正向电压, 脉冲频率影响最小。

## 7. 总结

本文通过电参数正交试验, 研究了微小极间距条件下, 电参数对 7075 铝合金微弧氧化膜层粗糙度的影响。研究发现铝合金微弧氧化陶瓷膜层粗糙度会随着两极间正向电压的增大而增大; 当减小反向占空比, 增大正向占空比时, 生成陶瓷膜层也会粗糙度增大; 随着脉冲频率减小, 膜层粗糙度逐渐增大。通过相对极差分析发现, 在三个电参数中, 反向占空比对微弧氧化膜粗糙度影响程度最大。因此, 在进行扫描式微弧氧化处理时, 想要在提升材料其他表面性能的同时降低膜层粗糙度, 应优先考虑增大反向占空比。

## 参考文献

- [1] 赵钰涣, 龙芋宏, 徐榕蔚, 单晨, 张振杰, 蓝高强. 7075 铝合金选区激光熔化研究现状[J]. 现代制造工程, 2021(9): 146-151.
- [2] 杨勇, 陈宇海, 唐伟清, 黄俊, 罗军明. 7050 铝合金激光冲击强化 - 微弧氧化涂层的组织和性能[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(2): 112-119.
- [3] 赵树萍. 钛合金微弧氧化对其性能的影响[J]. 钛工业进展, 2001(6): 23-25.
- [4] 张荣发, 单大勇, 韩恩厚, 等. 电流模式对镁合金微弧氧化膜性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(9): 1392-1395.
- [5] 陈庚, 苗景国, 方琴, 苗骁, 王正云. 磷酸盐浓度对航空用 7050 铝合金微弧氧化膜层组织和性能的影响[J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2021, 21(4): 11-15+20.
- [6] 卢雪雪, 谢兰生, 陈明和. 工艺参数对 2060-T8 铝锂合金微弧氧化膜性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2016(23): 1228-1233.
- [7] 李玲慧. 铝钎镀层及微弧氧化膜性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛市: 燕山大学, 2015.
- [8] 李昊宸, 王赫男, 马雪菲. 铝合金微弧氧化工艺研究现状[J]. 热加工工艺, 2021, 50(22): 1-5+13.
- [9] 宋娜, 强巍, 陈震, 郭秀乔, 赵晨宇. 微弧氧化对 6061 铝合金衬套尺寸精度及性能的影响[J]. 材料保护, 2021, 54(6): 107-111+116.
- [10] 吕鹏翔. 扫描式微弧氧化方法及膜层性能研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [11] 钟凯琪, 肖旸, 芦星, 邓军. 煤火热能 TPCT 提取正交试验设计与极差分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(9): 135-141.