

纳米 BN 对 1060 铝微弧氧化膜层性能的影响

魏国栋, 曹晓明, 马瑞娜, 李世杰, 张俊伟

(河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300130)

摘要: **目的** 探究微弧氧化电解液中纳米氮化硼(BN)浓度对铝微弧氧化陶瓷层组织和性能的影响。**方法** 在硅酸盐体系电解液中加入 1~5 g/L 不同浓度的纳米 BN, 制备纳米 BN 复合微弧氧化层。利用扫描电镜、能谱仪和 X 射线衍射仪, 分别表征纳米 BN 复合微弧氧化层的微观组织、元素分布及物相组成。采用涂层测厚仪、粗糙度仪、显微硬度计、摩擦磨损试验机等手段, 研究纳米 BN 对 1060 纯铝微弧氧化膜层的厚度、粗糙度、显微硬度、摩擦学性能的影响。**结果** 在微弧氧化 BN 复合膜的表层有弥散分布的 BN 颗粒, 当电解液中添加 3 g/L 的纳米 BN 时, 制备的微弧氧化层的性能最好, 其表面的孔洞数量最少且孔径最小, 膜层表面更加致密, 其厚度可达到 $(93.8 \pm 1.9) \mu\text{m}$, 硬度达到 $(942 \pm 51) \text{HV}$, 粗糙度 R_a 降低为 $(3.66 \pm 0.14) \mu\text{m}$, 摩擦系数降低为 0.55, 磨损体积比未添加 BN 的膜层减少了 $1.18 \times 10^{-2} \text{mm}^3$, 并且磨痕平整光滑, 裂纹较少。**结论** 硅酸盐电解液中加入纳米 BN 能够改善 1060 纯铝微弧氧化膜层的综合性能。

关键词: 纳米 BN; 1060 纯铝; 微弧氧化; 硅酸盐

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)05-0007-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.008

Effect of Nano BN Additive on Performance of Micro-arc Oxide Film Formed on 1060 Aluminum

WEI Guo-dong, CAO Xiao-ming, MA Rui-na, LI Shi-jie, ZHANG Jun-wei

(School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

ABSTRACT: The work aims to explore effects of BN concentration in electrolyte system on microstructure and performance of the coating on aluminum in the method of micro-arc oxidation. Nano BN composite micro-arc oxide film was prepared by adding 1~5 g/L nano BN additive of different concentration in silicate system solution. Microstructure, element distribution and phase composition of the nano-BN composite micro-arc oxide film were characterized using scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy and X-ray diffraction. The effects of BN in electrolyte on thickness, roughness, microhardness and wear resistance of micro-arc oxide film on 1060 pure aluminum were investigated using coating thickness gauge, roughmeter, microhardness and friction wear testing machine. BN particles were dispersed on the surface of micro-arc oxide BN composite film. Performance of the micro-arc oxide film prepared by adding 3 g/L nano BN particles in electrolyte was the best. Pores on the film surface were the least, pore size was the smallest, and the film surface was denser. The thickness was up to $(93.8 \pm 1.9) \mu\text{m}$, hardness $(942 \pm 51) \text{HV}$, roughness R_a down to $(3.66 \pm 0.14) \mu\text{m}$, friction coefficient 0.55, wear volume decreased by $1.18 \times 10^{-2} \text{mm}^3$, and grinding cracks were smooth and cracks decreased. Addition of BN into the silicate electrolyte system can improve

收稿日期: 2016-12-14; 修订日期: 2017-04-22

Received: 2016-12-14; Revised: 2017-04-22

作者简介: 魏国栋 (1990—), 男, 硕士生, 研究方向为表面工程技术。

Biography: WEI Guo-dong (1990—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 马瑞娜 (1980—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面工程技术。

Corresponding author: MA Rui-na (1980—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: surface engineering.

overall performance of the micro-arc oxide film on pure aluminum.

KEY WORDS: nano BN; 1060 pure aluminum; MAO; silicate

1060 纯铝具有良好的塑性、耐蚀性、导电性及导热性,但其强度低且耐磨性能差。对铝进行微弧氧化处理后,可使其具有高显微硬度、高耐热性、高耐磨性、高耐蚀性等优良性能,但是氧化膜表面出现多孔结构的粗糙层,会导致其摩擦系数过大,耐磨效果不理想^[1]。目前,研究发现在微弧氧化过程中加入一些固体润滑剂或者添加剂,如纳米二氧化钛^[2]、纳米二氧化硅^[3]、聚四氟乙烯^[4]、纳米氧化铝^[5]、石墨^[6-7]、二氧化锆^[8]、二硫化钼^[9]等减磨粒子,可以改善微弧氧化膜层的润滑性,降低摩擦系数,提高其摩擦性能,优化的铝及其合金能在航空、机械、电子等领域得到更广泛的应用。

与石墨和二硫化钼相比,纳米六方氮化硼具有良好的粘附性、热稳定性、电绝缘性,在高温时仍然保持良好的导热性和稳定性,其硬度接近金刚石,具有优异的加工性能、耐腐蚀性及良好的润滑性^[10]。C. Lou 等人^[11]采用两步微弧氧化法制备出含氮化硼的复合层,其抗热震性有明显的提高,然而对耐磨性能研究却很少。

为了提高微弧氧化层的摩擦学性能,向微弧氧化电解液中直接添加不同浓度的纳米 BN 颗粒,采用阶段恒压的制备方式在 1060 纯铝表面进一步制备了含有纳米 BN 的复合微弧氧化层,表征了纳米 BN 复合微弧氧化层的微观组织、元素分布特征及物相组成,并研究了纳米 BN 对 1060 纯铝微弧氧化涂层的厚度、显微硬度、摩擦学性能的影响。

1 实验

1.1 试样材料

基体材料为 1060 纯铝,其化学成分(以质量分数计)为: Mg<0.03%, Mn<0.03%, Zn<0.03%, Cu<0.05%, Si<0.25%, Fe<0.35%, 余量为铝。微弧氧化前,试样依次用 240~1200 目水砂纸打磨,然后依次用丙酮、酒精、去离子水超声清洗,晾干待用。

1.2 电解液的配制

将纳米 BN 加入乙醇中(比例为 1 g BN 加 10 mL 乙醇),搅拌均匀后加入一定量的去离子水,并添加 0.05 g 十二烷基硫酸钠,继续搅拌 2 h 后制得分散液。

在 1 L 的烧杯中加入 0.5 L 去离子水,加入 2 g 氢氧化钾、5 g 硅酸钠、3 g 六偏磷酸钠,用磁力搅拌器不断搅拌,直至全部溶解,制得基础电解液。

将分散液与基础电解液以一定比例混合后超声 2 h,使 BN 充分分散于电解液中,形成稳定的悬浊液。

1.3 微弧氧化陶瓷层的制备

利用 MAO-DSM30F 型微弧氧化设备,采用阶段恒压的方式在 1060 纯铝表面制备微弧氧化陶瓷层,频率为 200 Hz,占空比为 40%,起始正负电压分别为 440 V 和 20 V,每隔 10 min 正负电压升高 20 V,加工时间为 70 min。在微弧氧化过程中,控制电解液的温度不超过 30 ℃。

1.4 膜层性能评价

1) 采用德国尼克斯公司生产的涂层测厚仪 QNIX450,对微弧氧化处理后试样的陶瓷膜层进行厚度测量。

2) 采用 TIME3200 型粗糙度仪测量微弧氧化处理后试样的粗糙度。

3) 采用 Hitachi S-4800 场发射扫描电镜对微弧氧化处理后试样的平面及截面形貌进行观察,采用 LTSM-4000 能谱仪对试样的元素成分进行分析。

4) 采用 Rigaku DMAX-RC 型 X 射线衍射仪($\text{CuK}\alpha$, $\lambda=0.154\ 06\ \text{nm}$)分析试样表面陶瓷膜的相组成。

5) 采用 HXD-1000 型显微硬度仪测试微弧氧化后试样的显微硬度。

6) 采用 SFT 型摩擦磨损试验机对微弧氧化处理后的试样进行摩擦磨损实验。

2 结果与讨论

2.1 微弧氧化陶瓷层的微观形貌及组织结构

图 1 为电解液中添加不同浓度的 BN 条件下制备的陶瓷涂层的 SEM 照片。从图 1a 可以看出,无添加剂时,膜层具有典型的“火山口”状结构,存在较多的微裂纹,膜层不够致密。微观孔洞直径较大,形状不规则,约为 10~50 μm 。而在电解液中添加纳米 BN 后,微弧氧化层的孔洞直径明显减小,约为 1~20 μm 。火山口的典型结构变得不明显,表面相对平整。

为了进一步研究纳米 BN 是否进入了微弧氧化层,对表面进行能谱分析。通过表 1 可知,未添加 BN 的膜层主要有 Al、O、Si 元素,Al 的原子数分数最大,膜层中的 Si 来源于电解液中的硅酸钠。添加不同量的 BN 后可以看出,膜层中不仅有 Al、O、Si,

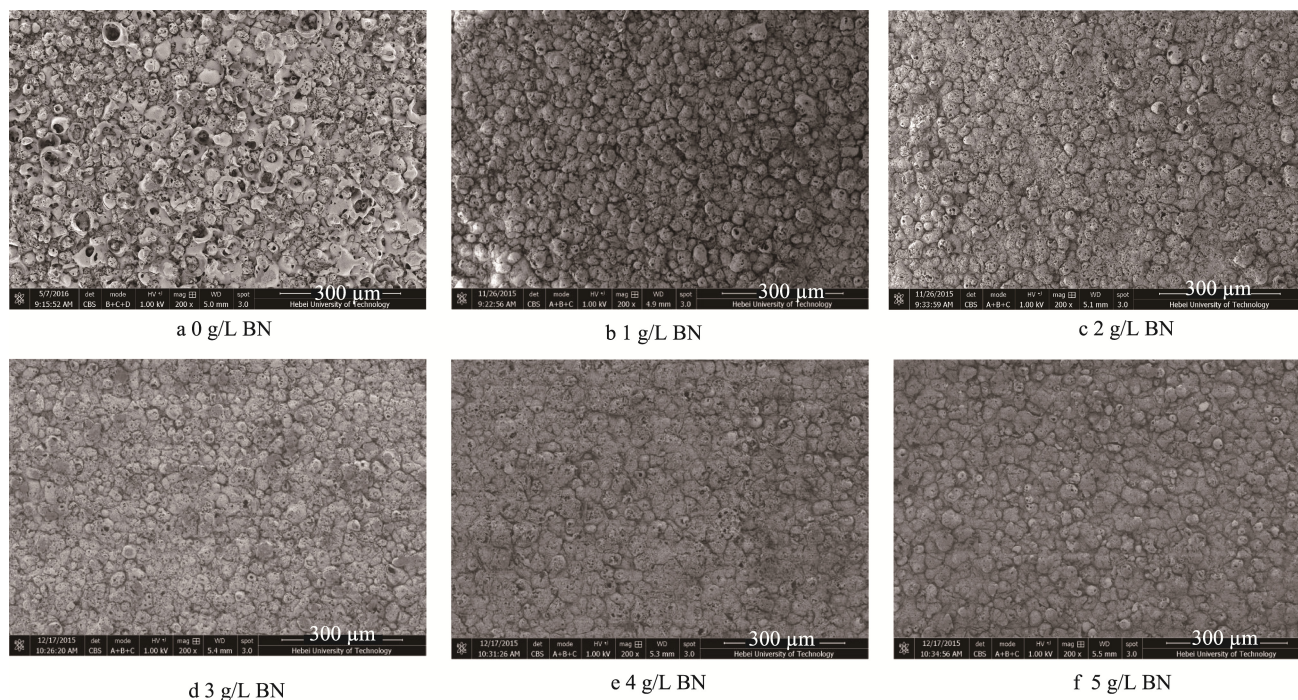


图1 不同浓度的BN条件下制备的陶瓷涂层的SEM照片

Fig.1 The SEM morphology of micro-arc oxidation coatings prepared with different concentration of BN

表1 不同BN浓度下制备的陶瓷涂层的EDS分析

Tab.1 EDS patterns of ceramic coatings prepared with different concentrations of BN in the electrolyte at.%

$\rho(\text{BN})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	O	Al	Si	B	N
0	30.7	43.35	25.95	0	0
1	19.96	23.87	14.67	21.5	20
2	19.87	22.28	15.38	22.12	20.35
3	17.31	18.56	15.17	22.48	26.48
4	14.75	13.0	13.48	23.66	35.11
5	11.73	12.47	8.66	35.08	32.06

还有B、N。基体采用的是1060纯铝，基础电解液是硅酸钠、六偏磷酸钠和氢氧化钾，都不含B、N两种元素，因此可以推断膜层的B、N来自于添加的纳米BN颗粒。纳米BN颗粒进入了膜层，会以什么样的方式存在，还需要用XRD测试方法对其进行进一步分析。

图2为电解液中添加不同浓度的BN条件下制备的陶瓷膜层的XRD图谱。通过图2可以看出，无BN添加剂的陶瓷膜层主要由基体1060纯铝、Mullite、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相组成。膜层中的铝相来源于基体，由于在微弧氧化过程中击穿放电及其表面有气体析出而形成较多的微孔，当膜层较疏松时，X射线易穿透氧化膜层而测得基体的晶体峰，表现为较强的Al衍射峰^[12]。添加纳米BN添加剂的陶瓷膜层出现了BN衍射峰，随着BN添加量的增加，BN峰先增大后减小，在3 g/L时，峰值最大。这说明膜层中的BN并不与电解液中BN添加的量成正比，并且BN未与

其他相发生反应生成新相。通过XRD、EDS等测试可知，纳米BN在微弧氧化过程中进入了膜层，并以BN相存在。

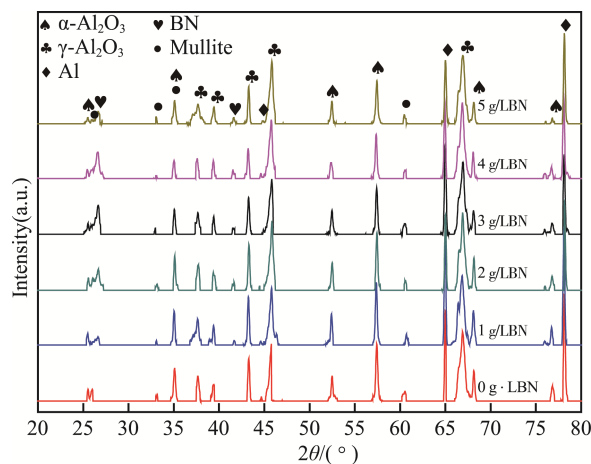


图2 添加不同浓度的BN条件下制备的陶瓷层的XRD图谱

Fig.2 XRD spectra of the ceramic layer prepared by adding different concentrations of BN

2.2 微弧氧化陶瓷层厚度、硬度及粗糙度表征

图3为不同浓度BN对膜层厚度的影响。通过图3可以看出，未添加纳米BN的陶瓷膜层厚度为 $(68.5 \pm 3.3) \mu\text{m}$ ，添加1 g/L BN的膜层厚度增加到 $(76.2 \pm 2.0) \mu\text{m}$ 。这是由于随着纳米氮化硼颗粒加入到电解液中，分散剂和表面活性剂的作用使其充分分散，并通过电泳、扩散、物理吸附作用吸附在铝基体表面，在微弧氧化过程中，纳米BN颗粒在等离子体微弧区

域内进行高温烧结, 并与微弧氧化生成的 Al_2O_3 一起通过放电通道喷射出来, 然后经过激发、电解液的液淬作用在喷射孔周围凝固, 形成陶瓷涂层。在这个过

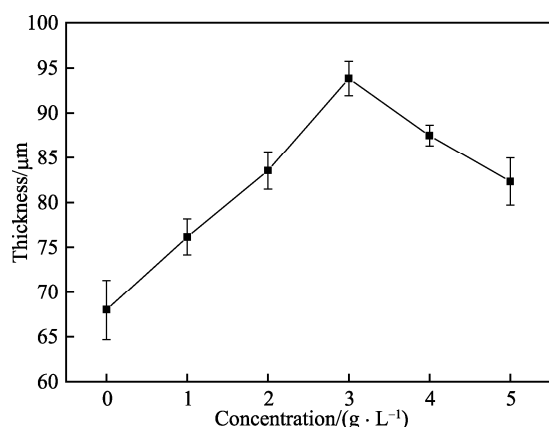


图 3 不同浓度 BN 对膜层厚度的影响

Fig.3 Effect of different concentration of BN on the thickness of the film

程中, BN 颗粒会被包裹起来, 随着微弧放电的不断进行, 膜层中包裹的 BN 量越来越多, 进而使膜层加厚。继续添加 BN 到 3 g/L 时, 膜层厚度达到最大, 为 $(93.8 \pm 1.9) \mu\text{m}$ 。随着 BN 浓度的增加, 每次熔融的氧化铝能包裹 BN 的量增加, 随 BN 的增加, 膜层厚度增加。然而在微弧氧化过程中继续添加 BN, 膜层厚度开始逐渐减小。这是因为过多的 BN 在分散剂和表面活性剂的作用下, 通过电泳、扩散、物理吸附等作用吸附在基体铝表面, 进而使等离子放电微区存在过多的 BN, 阻碍了微弧氧化放电的进行, 使微弧氧化的强度降低, 因此膜层厚度会随着 BN 浓度提高到一个最大值后逐渐降低。

图 4 为不同 BN 浓度下膜层的截面 SEM 图。如图 4 所示, 膜层结构主要由致密层和疏松层组成, 随 BN 添加量的增加, 陶瓷致密层的厚度增加, 并且变得更加致密。当添加 3 g/L BN 时, 膜层的致密层厚度最大, 且致密度最高。

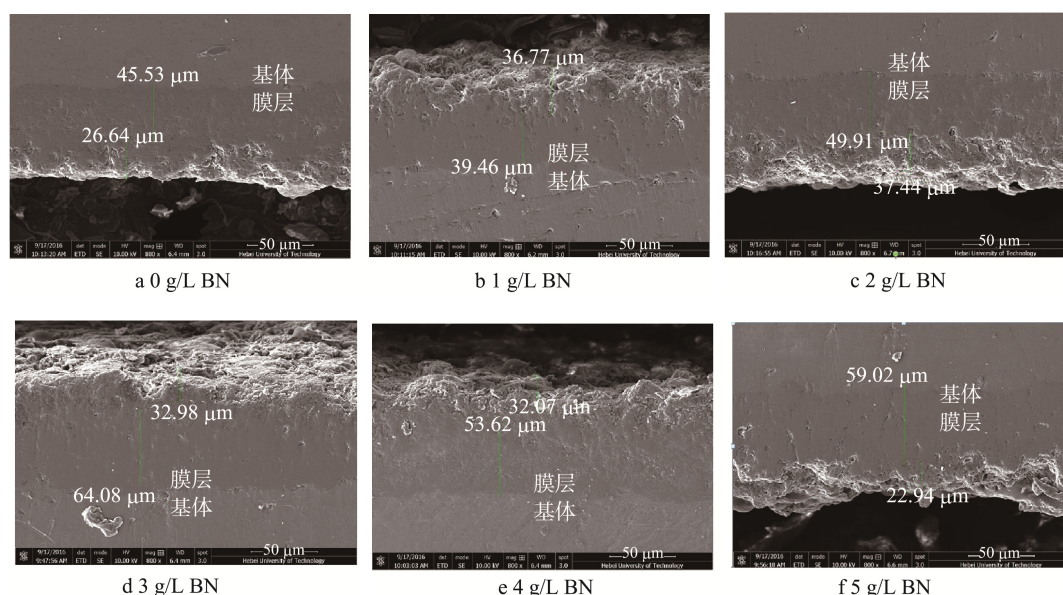


图 4 不同浓度的 BN 条件下制备的陶瓷涂层截面的 SEM 照片

Fig.4 SEM photo of the ceramic coating cross section under different concentration of BN

图 5 为不同浓度 BN 对膜层硬度的影响。膜层硬度随 BN 浓度的增加先升高后降低, 在 3 g/L 时出现极大值。这是因为在反应过程中, BN 颗粒随放电的产生而同步沉积于微弧氧化陶瓷层中, 和熔融的 Al_2O_3 一起遇冷凝固, 成为微弧氧化陶瓷层的一部分, 最终形成更加致密的复合膜层。纳米六方 BN 本身具有极高的硬度, 并且新形成膜层的裂纹等缺陷减少, 二者共同作用使膜层的硬度提高。

图 6 为不同浓度 BN 对膜层粗糙度的影响。随氮化硼含量的增加, 膜层的粗糙度先减小后增大, 总体呈降低趋势, 当 BN 质量浓度为 3 g/L 时, 膜层的粗糙度最小。前述形貌分析结果表明, 不添加纳米 BN

的膜层孔洞较大, 裂纹较多, 这导致膜层的粗糙度较大。纳米 BN 使膜层大孔数量减少, 宏观表现为粗糙度下降^[13]。当 BN 的量大于 3 g/L 时, 较多的纳米 BN 可能会吸附在微弧氧化膜层的表面, 因此在膜层表面形成更多不均匀的堆积状突起, 使膜层粗糙度升高。

2.3 微弧氧化陶瓷层的摩擦学性能

图 7 为不同浓度 BN 下所制备的陶瓷涂层的摩擦系数曲线。其中未添加纳米 BN 的陶瓷层的摩擦系数最大, 约为 0.8, 且波动性较大。这是由于未添加纳米 BN 的膜层表面孔洞裂纹较多, 且粗糙度较大, 随着纳米 BN 的加入, 摩擦系数总体上是降低的, 当

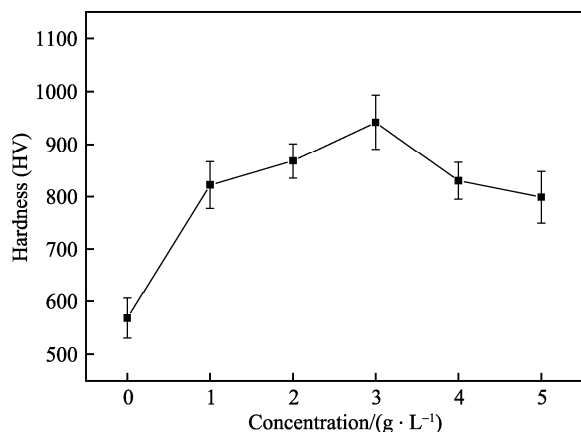


图5 不同浓度 BN 对膜层硬度的影响

Fig.5 Effect of different concentrations of BN on the hardness of the films

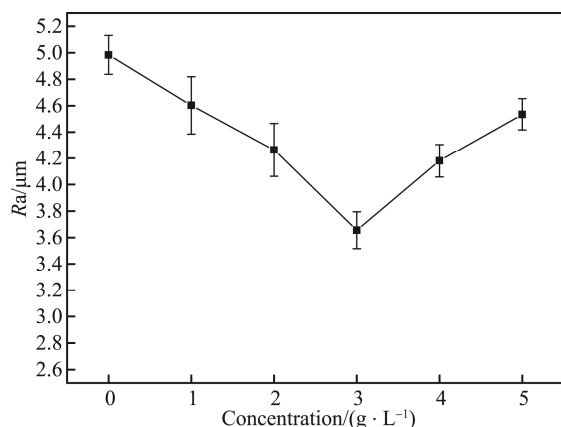


图6 不同浓度 BN 对膜层粗糙度的影响

Fig.6 Effect of different concentrations of BN on the roughness of the films

BN 添加量为 3 g/L 时, 摩擦系数最小, 约为 0.55。添加纳米 BN 膜层的摩擦系数降低, 说明纳米 BN 具有不错的减摩效果。

图 8 为不同浓度纳米 BN 膜层的磨损体积。可以看出随着 BN 添加量的增加, 磨损体积先下降后升高。未添加纳米 BN 的膜层的磨损体积最大, 为 $3.82 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$; 随着纳米 BN 的添加, 磨损体积开始减小, 当 BN 的添加量为 3 g/L 时, 膜层的磨损体积最小, 为 $2.64 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$, 与未添加 BN 的膜层相比, 磨损体积降低了 $1.18 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$; 继续添加纳米 BN, 膜层的磨损体积又开始增加。添加纳米 BN 的膜层的磨损体积减小, 说明纳米 BN 可以提高微弧氧化膜层的耐磨性能。

图 9 为添加不同浓度的 BN 条件下制备的陶瓷层的磨痕形貌。通过图 9a 可以看出, 不添加纳米 BN 的膜层的磨痕裂纹较多, 并表现出有片状剥落的倾向。通过图 9b—d 可以看出, 添加 BN 以后, 磨痕路径不连续。图 9b 中纳米 BN 的陶瓷层的表面粗糙不平, 但并未出现裂纹和层片剥落的现象; 图 9c—d 中纳米 BN 的陶瓷层的表面较平整, 未出现大量的裂纹

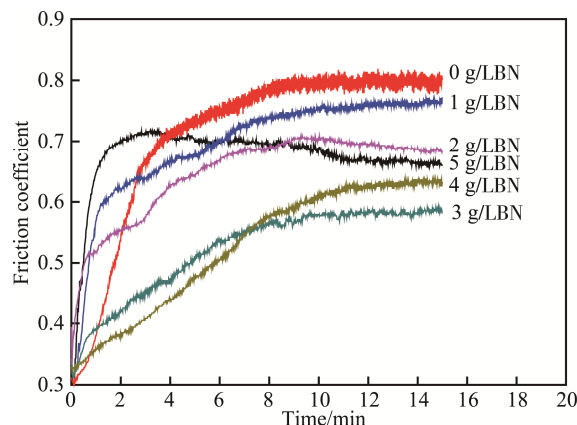


图7 不同浓度纳米 BN 膜层的摩擦系数曲线

Fig.7 Friction coefficient of ceramic coatings prepared in the electrolyte with different nano BN

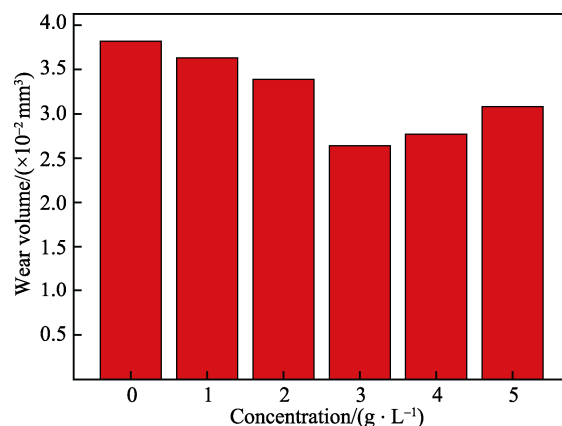


图8 不同浓度纳米 BN 膜层的磨损体积

Fig.8 wear volume of nano BN coatings with different concentration

和大量有剥落倾向的层片。这说明未添加纳米 BN 的膜层的摩擦学性能较差, 而添加 3 g/L 纳米 BN 的膜层的摩擦系数较低, 磨损体积减少, 磨痕形貌较平整光滑, 摩擦学性能较好。

2.4 讨论

微弧氧化膜层的微裂纹是由于微弧氧化过程中熔融态的氧化铝被喷射出来, 与电解液接触后迅速固化, 产生部分应力所致。孔洞是电解液与基体发生微弧氧化的放电通道, 其中有部分孔洞是盲孔^[14]。

添加纳米 BN 可提高微弧氧化陶瓷层的摩擦学性能, 其原因为: 未添加纳米 BN 的膜层的微裂纹、孔洞数量较多, 尺寸较大, 形成的膜层是一个多孔结构, 界面晶粒的边界较弱。这些缺陷会导致膜层过早开裂, 开裂后表面会留下许多颗粒状氧化铝, 该表面将作为新的磨损轨道, 颗粒状的氧化铝将作为磨料加速磨损^[15]。而添加纳米 BN 的膜层, 其微裂纹、孔洞的数量都减少, 孔洞的尺寸也减小, 致密度提高, 因此可以提高膜层的摩擦学性能提高。BN 的质量浓度为

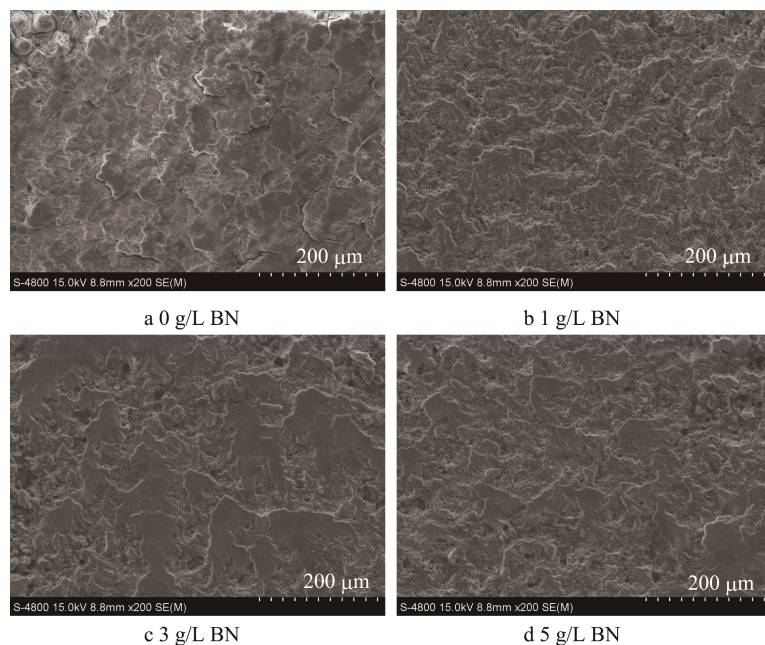


图 9 不同浓度纳米 BN 膜层的磨痕形貌

Fig.9 Wear trace morphologies of ceramic coatings prepared in the electrolyte with different nano BN

3 g/L 时, 膜层的摩擦学性能最好。

添加纳米 BN 后, 形成的复合膜层的厚度、硬度都相应提高, BN 的添加量为 3 g/L 时, 厚度达到最大, 为 $(93.8 \pm 1.9) \mu\text{m}$, 相应的硬度也达到最大, 为 $(942 \pm 51) \text{HV}$, 同时膜层的粗糙度最低, 为 $(3.66 \pm 0.14) \mu\text{m}$, 摩擦系数为 0.55。与未添加 BN 的膜层相比, 其磨损体积降低了 $1.18 \times 10^{-2} \text{mm}^3$ 。硬度的提高及粗糙度的降低, 对膜层耐磨性能有一定程度的改善。

实验所用的纳米六方氮化硼的粒径小、比表面积大、表面活性高, 其晶体结构类似石墨的层状结构, 呈现松散、润滑、易吸潮、质量轻等特性, 具有极佳的干润滑能力。由于添加纳米 BN 的膜层中弥散着大量的纳米 BN 颗粒, 这不但提高了膜层的致密度, 而且还阻止了膜层与对磨件的直接接触, 有效地避免了粘着磨损的发生, 并且微孔中的纳米 BN 颗粒能起到微润滑作用, 使摩擦系数显著降低^[16]。纳米 BN 是六方结构, 在磨损过程中, 该六方结构有利于形成一个分层结构与优选的方向, 有利于降低摩擦磨损^[15]。

3 结论

1) 在硅酸盐体系中添加适量的纳米 BN 颗粒, 可以制备纳米 BN 改性微弧氧化复合陶瓷层, 膜层主要由基体 1060 纯铝、Mullite、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{r-Al}_2\text{O}_3$ 相及 BN 相组成。

2) 在微弧氧化 BN 复合膜的表层弥散有 BN 颗粒, 当 BN 质量浓度达到 3 g/L 时, 膜层厚度达到 $(93.8 \pm 1.9) \mu\text{m}$, 硬度达到 $(942 \pm 51) \text{HV}$, 粗糙度 Ra 降到 $(3.66 \pm 0.14) \mu\text{m}$, 摩擦系数降到 0.55, 磨损

体积减少了 $1.18 \times 10^{-2} \text{mm}^3$, 并且磨痕平整光滑, 裂纹较少。

3) 当 BN 的质量浓度为 0~3 g/L 时, 随 BN 浓度的提高, 膜表面孔洞的直径减小, 微弧氧化膜层更加致密, 显微硬度和膜层厚度显著提高, 摩擦系数显著降低。当 BN 质量浓度为 3 g/L 时, 摩擦系数最小, 当 BN 质量浓度大于 3 g/L 时, 膜层厚度、显微硬度开始下降, 粗糙度开始上升。

4) 在硅酸盐电解液中加入纳米 BN 能够改善铝合金微弧氧化膜层的综合性能。

参考文献:

- [1] 钱建才, 许斌, 邹洪庆, 等. 2A12 铝合金硬质阳极氧化及膜层性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(5): 37—41.
QIAN Jian-cai, XU Bin, ZOU Hong-qing, et al. Preparation and Properties of Hard Anodic Oxide Coating on 2A12 Aluminium Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(5): 37—41.
- [2] LI Hong-xia, SONG Ren-guo, JI Zhen-guo. Effects of Nano-additive TiO_2 on Performance of Micro-arc Oxidation Coatings Formed on 6063 Aluminum Alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2013, 23: 406—411.
- [3] 吴德凤, 雷源源, 张晓燕, 等. 纳米 SiO_2 添加剂对铸造铝铜合金微弧氧化陶瓷层耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 42—44.
WU De-feng, LEI Yuan-yuan, ZHANG Xiao-yan, et al. Effect of Nano- SiO_2 Additive on the Microstructure and Wear Resistance of Micro-arc Oxidation Ceramic Coating on Casting Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 42—44.

- [4] 霍晓迪, 王青, 梁军, 等. 微弧氧化一步制备石墨-PTFE 共添加的自润滑膜层[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(2): 133—138.
HUO Xiao-di, WANG Qing, LIANG Jun, et al. One-step Preparation of Graphite/PTFE Co-containing Self-lubricating Coating by Plasma Electrolytic Oxidation[J]. Journal of Tribology, 2012, 32(2): 133—138.
- [5] 黄丹, 张晓燕, 吴德凤, 等. 纳米 α - Al_2O_3 添加剂对铝合金微弧氧化膜层性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 43—47.
HUANG Dan, ZHANG Xiao-yan, WU De-feng, et al. Effects of Nano α - Al_2O_3 Additive on the Performance of Micro-arc Oxidation Coating Formed on Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 43—47.
- [6] 杨志成, 吴向清, 谢发勤, 等. 纳米石墨改性 ZM5 镁合金微弧氧化陶瓷层摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2013, 26(2): 45—50.
YANG Zhi-cheng, WU Xiang-qing, XIE Fa-qin, et al. Tribological Properties of MAO Coating with Nano-graphite on ZM5 Magnesium Alloy[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(2): 45—50.
- [7] WU Xiao-hong, QIN Wei, GUO Yun, et al. Self-lubricative Coating Grown by Micro-plasma Oxidation on Aluminum Alloys in the Solution of Aluminate-Graphite[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(20): 6395—6399.
- [8] LI Hong, SUN Ye-zi, ZHANG Jin, et al. Effect of ZrO_2 Particle on the Performance of Micro-arc Oxidation Coatings on Ti6Al4V[J]. Applied Surface Science, 2015, 342: 183—190.
- [9] 彭俊杰. 微弧氧化在船用柴油机铝合金活塞上的应用[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
PENG Jun-jie. Application of Micro-arc Oxidation in Aluminum Alloy Piston of Marine Diesel Engine[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010.
- [10] 郭奇亮. 氮化硼作润滑剂添加剂的减磨效果[J]. 中国机械工程, 1995, 6(2): 57—58.
GUO Qi-liang. Reduction Effect of Boron Nitride as Lubricant Additive[J]. China Mechanical Engineering, 1995, 6(2): 57—58.
- [11] LOU C, WU C, YU B, et al. Effects of h-BN Additive on Microstructure, Mechanical Property and Thermal Shock Resistance of Al_2O_3 Micro-arc Oxidation Coating[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(6): 465—468.
- [12] 洪尚坤, 黎清宁, 屈婧婧, 等. 硝酸铈添加剂对 7075 铝合金微弧氧化陶瓷膜特性的影响[J]. 中国表面工程, 2014, 27(6): 116—121.
HONG Shang-kun, LI Qing-ning, QU Jing-jing, et al. Effect of $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ Additive on the Properties of Micro-arc Oxidation Coatings Formed on 7075 Aluminum Alloy[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(6): 116—121.
- [13] 郭豫鹏, 狄世春, 吕鹏翔, 等. CeO_2 对 2A12 铝合金微弧氧化膜层组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(9): 2240—2243.
GUO Yu-peng, DI Shi-chun, LYU Peng-xiang, et al. Effects of CeO_2 on Microstructure and Properties of Micro Arc Oxidation Coatings on 2A12 Aluminum Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(9): 2240—2243.
- [14] 赵坚, 宋仁国, 李红霞, 等. 纳米添加剂对 6063 铝合金微弧氧化层组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(4): 125—128.
ZHAO Jian, SONG Ren-guo, LI Hong-xia, et al. Effect of Nano-additive on Microstructure and Properties of Micro-arc Oxidation Coatings on 6063 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2010, 31(4): 125—128.
- [15] MA Kung-jeng. Preparation of Self-lubricating Composite Coatings Through a Micro-arc Plasma Oxidation with Graphite in Electrolyte Solution[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 259: 318—324.
- [16] 赵晴, 王伟, 王力强, 等. TC4 钛合金微弧氧化六方氮化硼复合膜的组织及摩擦学行为[J]. 材料保护, 2015, 48(6): 1—3.
ZHAO Qing, WANG Wei, WANG Li-qiang, et al. Microstructure and Tribological Behavior of TC4 Alloy Micro-arc Oxidation Hexa-boron Nitride Composite Films[J]. Material Protection, 2015, 48(6): 1—3.