

表面摩擦与润滑

SiO₂ 对镁合金阴极电泳涂层耐磨性的影响

朱阮利^{1,2}, 张津^{1,2}, 高帅^{1,2}, 倪娜^{1,2}

(1. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083;
2. 北京市腐蚀、磨蚀与表面技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 目的 提高镁合金有机涂层的耐磨性能。方法 用 KH450 硅烷改性 SiO₂ 粉体, 并充分分散于电泳漆中。用 KH460 硅烷预处理镁合金表面, 并阴极电泳复合涂层。通过铅笔硬度测试、摩擦磨损实验、画圈附着力测试、NMP (N 甲基吡咯烷酮) 试验和 Machu 试验, 分别评价阴极电泳涂层的硬度、耐磨性能、附着力、抗 NMP 溶胀性能和耐蚀性, 并通过扫描电子显微镜和光学显微镜对磨痕形貌进行分析。结果 在镁合金用 KH460 预处理的前提下, 添加 SiO₂ 粉体使涂层硬度由 4H 上升为 5H, 同时也提高了涂层的耐蚀性, 并且涂层的附着力保持为 1 级, 抗 NMP 溶胀性能仍 >120 h。在预处理镁合金基体上制得的原漆涂层和添加纳米 SiO₂ 的涂层耐磨性较好, 磨痕深度与涂层厚度的比值分别为 0.47 和 0.475, 摩擦系数均低于 0.4; 在未预处理镁合金基体上制备的原漆涂层和在预处理镁合金基体上制备的添加微米 SiO₂ 的涂层耐磨性较差, 磨痕深度与涂层厚度的比值分别为 0.665 和 0.673, 摩擦系数均大于 0.7。四种涂层磨损破坏的机制主要为疲劳破坏。结论 SiO₂ 粉体的加入可以有效提高涂层的耐蚀性和铅笔硬度, 同时不降低涂层的附着力和抗 NMP 溶胀性能。用硅烷对镁合金进行预处理, 向电泳漆中添加硅烷处理的纳米 SiO₂, 可有效提高阴极电泳涂层的耐磨性。

关键词: 镁合金; 阴极电泳涂层; SiO₂; 硅烷改性; 耐磨性

中图分类号: TG174.46

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)07-0027-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.07.006

Effect of SiO₂ on the Abrasion Resistance of E-coatings on Magnesium Alloy

ZHU Ruan-li^{1,2}, ZHANG Jin^{1,2}, GAO Shuai^{1,2}, NI Na^{1,2}

(1. Institute of Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Beijing Key Laboratory for Corrosion Erosion and Surface Technology, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve the abrasion resistance of organic coating on magnesium alloys. **Methods** In this paper, SiO₂ powders were modified with KH450 silane and dispersed in electrophoretic paint. The surface of magnesium alloys was modified by

收稿日期: 2015-04-02; 修订日期: 2015-05-07

Received: 2015-04-02; Revised: 2015-05-07

作者简介: 朱阮利(1984—), 男, 湖北人, 博士, 主要研究方向为镁合金腐蚀防护。

Biography: ZHU Ruan-li (1984—), Male, from Hubei, Ph. D., Research focus: corrosion and protection of magnesium alloys.

通讯作者: 张津(1963—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为金属表面处理及腐蚀防护。

Corresponding author: ZHANG Jin (1963—), Female, Ph. D., Professor, Research focus: metal corrosion and protection.

KH460 silane, and then composite cathode electrophoresis coatings were prepared on it. The pencil hardness test, friction and wear test, circle adhesion method, NMP (n methyl pyrrolidone) test and Machu test were taken to value the hardness, wear resistance, adhesion, anti-swelling properties of NMP and corrosion resistance of electrophoresis cathode coatings, respectively. Their morphologies were studied by SEM and optical microscopy (OM). **Results** The pencil hardness of the coating, which was prepared on the magnesium alloy modified with KH460, was improved from 4H to 5H by adding SiO_2 powders and the corrosion resistance was also increased. And their adhesion and anti-swelling properties of NMP were still kept at 1 class and >120 h respectively. The original coating and the coating containing Nano SiO_2 powder, both prepared on the magnesium alloy modified with KH460, had good wear resistance, and their ratios of wear scar depth and coating thickness were 0.47 and 0.475 respectively, their friction coefficients were lower than 0.4. The coating prepared directly on magnesium alloy and the coating containing Micron SiO_2 powder prepared on the magnesium alloy modified with KH460 had poor wear resistance, and their ratios of wear scar depth and coating thickness were 0.665 and 0.673 respectively, friction coefficients of them were higher than 0.7. The mainly wear failure mechanism of the four coatings was fatigue failure. **Conclusion** The addition of SiO_2 powder can improve the corrosion resistance and pencil hardness of coatings effectively, and did not decrease adhesion and anti-swelling properties of NMP. The pretreatment of magnesium alloy with silane and the addition of Nano SiO_2 in the electrophoretic paint can improve the wear resistance of coating.

KEY WORDS: magnesium alloy; cathodic electrophoretic coating; SiO_2 ; silanizing modification; wear resistance

在常用金属结构材料中,镁合金的耐蚀性较差,常需进行耐蚀防护处理,如有机涂层、微弧氧化和稀土转化膜^[1-3]等,其中最常用的是有机涂层防护处理。该方法具有操作简便、成本低、环保、涂层耐蚀性强等优点^[4],但涂层耐磨性较差,在使用过程中,镁合金部件与其他物品发生摩擦、磕碰,都会对有机涂层造成损伤,这既影响了美观,也影响了膜层的防护性能。

向有机涂层中加入无机颗粒,如碳纳米管、玻璃纤维及 Al_2O_3 、 TiO_2 、 SiO_2 等^[5-10],可以有效提高其耐磨性。Hui Zhang 等^[11]在聚合物涂层中加入纳米 SiO_2 ,结果表明,涂层的耐磨性得到有效提高,并且他们发现,填料与基体的界面对涂层的耐磨性具有重要的影响。Yingke Kang 等^[12]将 SiO_2 加入到环氧树脂涂层中,发现纳米填料的加入提高了涂层的粗糙度,并且加入一定量表面环氧改性的 SiO_2 填料可以降低涂层的摩擦系数和磨损速率。由此可见,对填料进行表面改性,提高填料与基体的匹配性,是提高复合涂层耐磨性的有效方法。

对填料进行表面改性的方法有很多^[11,13-14]。硅烷偶联剂是一种广泛应用的材料表面改性剂^[15],它与有机材料和无机材料均有良好的兼容性,可以有效改善填料与树脂之间的润湿性,从而提高材料的力学性能和耐蚀性能^[16],但硅烷改性有机无机复合涂层的耐蚀耐磨性方面的研究尚不多见。文中在镁合金基体上制备了硅烷改性 SiO_2 粉体复合阴极电泳涂层,并对其耐磨耐蚀性能进行研究。

1 试验

1.1 涂层制备

所用变形镁合金 AZ31B 的化学成分(以质量分数计)为:Si 0.021%,Fe 0.0015%,Cu 0.0011%,Mn 0.4%,Al 2.91%,Zn 0.85%,Ni 0.00084%,Mg 余量。镁合金的前处理流程为:60℃洗衣粉溶液中浸泡 40 min→水清洗干净→砂纸打磨至 2000 号→酒精中洗净→晾干备用。

纳米及微米 SiO_2 粉体购于南京海泰纳米有限公司,纳米粉体粒度为 20~40 nm,微米粉体粒度为 5~6 μm 。硅烷采用 γ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(KH450)和 γ -氨丙基甲基二乙氧基硅烷(KH460),购于南京能德化工有限公司。将硅烷和去离子水配制成 2%(体积分数)的硅烷溶液,其中 KH460 硅烷溶液用于处理镁合金,KH450 硅烷溶液用于处理粉体。电泳漆为西南技术工程研究所涂料工厂生产的 E11-93 环氧树脂改性聚氨酯电泳漆。

样品制备步骤如下:1)将镁合金在 KH460 硅烷溶液中浸泡 40 s,取出后用滤纸除去镁合金底部的液体,放入 100℃热处理炉中固化 40 min;2)将 KH450 硅烷溶液与 SiO_2 粉体混合,球磨 2 h 使其均匀分散,抽滤后,在 100℃烘烤 40 min,获得 KH450 改性粉体;3)将 KH450 改性粉体加入到电泳漆中,球磨混合 1 h,粉体的加入量为 25 g/L;4)将硅烷处理的镁合金试样放入电泳槽进行阴极电泳,电泳电压为 120 V,电

泳时间为 150 s,槽液温度为 28 ~ 32 ℃。实验中制备了四种涂层,见表 1。

表 1 不同工艺制备的四种涂层
Tab. 1 Four kinds of coating prepared by different processes

样品	制备方法	
	镁合金是否硅烷处理	阴极电泳漆
E-coating	否	未添加 SiO ₂ 的原漆
KH460+E-coating	是	未添加 SiO ₂ 的原漆
Micron SiO ₂ /E-coating	是	添加 KH450 改性微米 SiO ₂ 的电泳漆
Nano SiO ₂ /E-coating	是	添加 KH450 改性纳米 SiO ₂ 的电泳漆

1.2 性能测试及组织观察

1) 采用 UMT 摩擦磨损测试系统测试四种涂层的耐磨性能。取完整样品,在中间沿宽度方向以直线往复式进行摩擦磨损测试,相关测试参数如下:滚球为直径 2 mm 的 GCr15 钢,摩擦速度 15 mm/s,载荷 5 N,测试时间 10 min。用蔡司 EVO18 扫描电镜、数码相机、奥林巴斯 BX53 光学显微镜对涂层及其摩擦磨损后的磨痕进行观察,并用扫描电镜附带的 EDS 能谱仪分析元素和成分。

2) 采用 NMP(N 甲基吡咯烷酮)测试涂层的抗有机溶剂溶胀能力。将样品冲成直径 13 mm 的圆片,浸泡于 NMP 溶液中,水浴温度为 60 ℃。每隔一段时间观察并拍照。

3) 通过 Machu 实验对涂层的耐蚀性进行评价,所用腐蚀介质为 5% NaCl+0. 6% H₂O₂(均为质量分数)溶液。先对样品进行封边处理,用工具刀在涂层表面矩形对角线上刻划两条深达基体的划痕,划痕长度为 4 cm,再在 37 ℃下浸泡 24 h,之后更新腐蚀溶液,再浸泡 24 h。取出试样,用胶带沿划痕剥离涂层,观察涂层脱落程度。

4) 参照 GB/T 6739—2006《色漆和清漆 铅笔法测定漆膜硬度》测试电泳涂层的铅笔硬度。参照 GB/T 1720—1979《漆膜附着力测定法》,采用 QFZ 型漆膜附着力试验仪(中国天津材料试验机厂)测试电泳涂层的附着力。参照 GB/T 1764—1989《漆膜厚度的测定》,使用 QNIX 4500 V3 膜层测厚仪(德国)测试电泳涂层的厚度。

2 结果及分析

2.1 硅烷改性 SiO₂ 粉体对涂层基本性能参数的影响

四种阴极电泳涂层的性能测试结果见表 2。由表 2 数据可知,与未加入 SiO₂ 粉体的涂层相比,加入粉体的涂层厚度有所增加,硬度提高。E-coating 涂层在附着力测试中剥落较多,为 2 级,在 NMP 试剂中浸泡 30 分钟就完全剥落;而其他经硅烷处理的三种涂层结合力均为 1 级,抗 NMP 溶胀性能都大于 120 h;这说明采用 KH460 硅烷对镁合金基体进行表面改性,可以有效改善涂层与基体的界面结合。

表 2 不同电泳涂层性能参数
Tab. 2 Properties and parameters of the samples by different preparations

样品	厚度/ μm	铅笔 硬度	附着 力/级	NMP 测试/h
E-coating	18. 5	4H	2	0. 5
KH460+E-coating	21. 9	4H	1	>120
Micron SiO ₂ /E-coating	23. 7	5H	1	>120
Nano SiO ₂ /E-coating	28. 4	5H	1	>120

从以上分析可知,粉体的加入使得涂层的厚度略有增加,硬度提高,且不降低涂层的结合力和抗 NMP 溶胀性能。这可能是因为硅烷可以有效改善无机填料与有机基体之间的界面匹配^[14],使得基体与 SiO₂ 粉体之间形成良好的界面结合。

2.2 硅烷改性 SiO₂ 粉体对涂层耐蚀性的影响

采用 Machu 加速腐蚀试验对四种涂层的腐蚀防护性能进行评价,图 1 为 48 h Machu 试验后试样的表面形貌。可以看出,E-coating 表面涂层大面积脱落,KH460+E-coating 表面的涂层相对完整,没有严重剥落现象,但在划痕边缘和交叉处发生了严重腐蚀。Micron SiO₂/E-coating 和 Nano SiO₂/E-coating 也在划痕边缘有腐蚀发生,但与 KH460+E-coating 样品相比,腐蚀程度都较轻微。Behzadnasab^[17]等在环氧树脂涂层中加入一定量的硅烷改性 ZrO₂,涂层的耐蚀性得到明显提高,本实验在电泳涂层中加入硅烷改性的 SiO₂ 也起到了提高抗腐蚀性能的作用。其原因是,硅烷改性陶瓷粉体与涂层具有良好的界面结合,从而起到了良好的屏障作用。

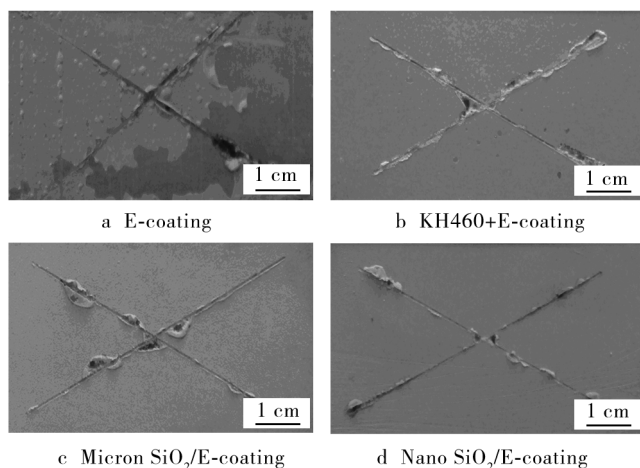


图1 不同涂层 Machu 试验 48 h 后的形貌

Fig. 1 Morphology of different samples after Machu experiment for 48 h

2.3 硅烷改性 SiO_2 粉体对涂层耐磨性能的影响

图2为四种涂层的表面形貌。可见 E-coating 和 KH460+E-coating 表面较为平整,加入两种粉体后的涂层表面粗糙度明显增大,其中 Nano SiO_2 /E-coating 的粗糙度最大。这可能是由于纳米 SiO_2 颗粒较小,而且数量较多,较大地改变了涂层的成分和结构,从而导致涂层的表面粗糙度增大。虽然加入两种粉体的涂层粗糙度较大,但是总体来看,其表面的凸凹起伏分布较为均匀。

伏分布较为均匀。

成分分析结果(见图3)显示,Micron SiO_2 /E-coating 和 Nano SiO_2 /E-coating 中的 Si 含量相近,Si 原子数分数分别为 36.43% 和 38.26%,较 KH460+E-coating 中的 Si 含量明显增加。Si 含量相近说明这两种涂层中的 SiO_2 含量相当。这可能是由于纳米 SiO_2 颗粒较小,且表面能较大,容易分散在电泳漆的浆料中,并形成良好吸附或包裹,较容易电泳到涂层中,使得涂层中的纳米 SiO_2 颗粒数量较多。因此总体上来看,这两种涂层的成分是相当的。

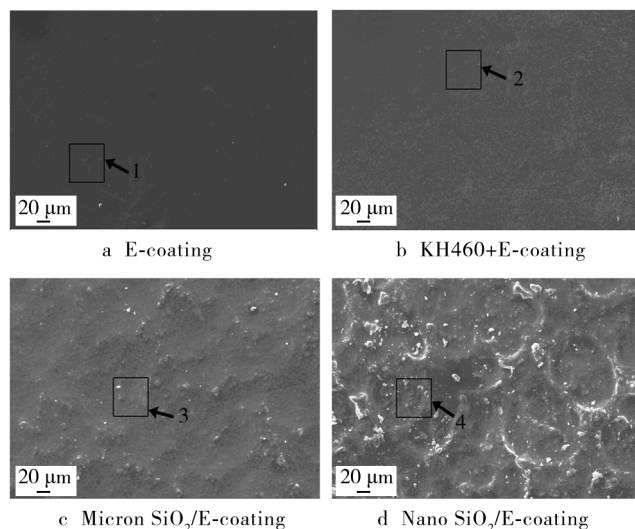


图2 电泳涂层的表面形貌

Fig. 2 SEM of different coatings

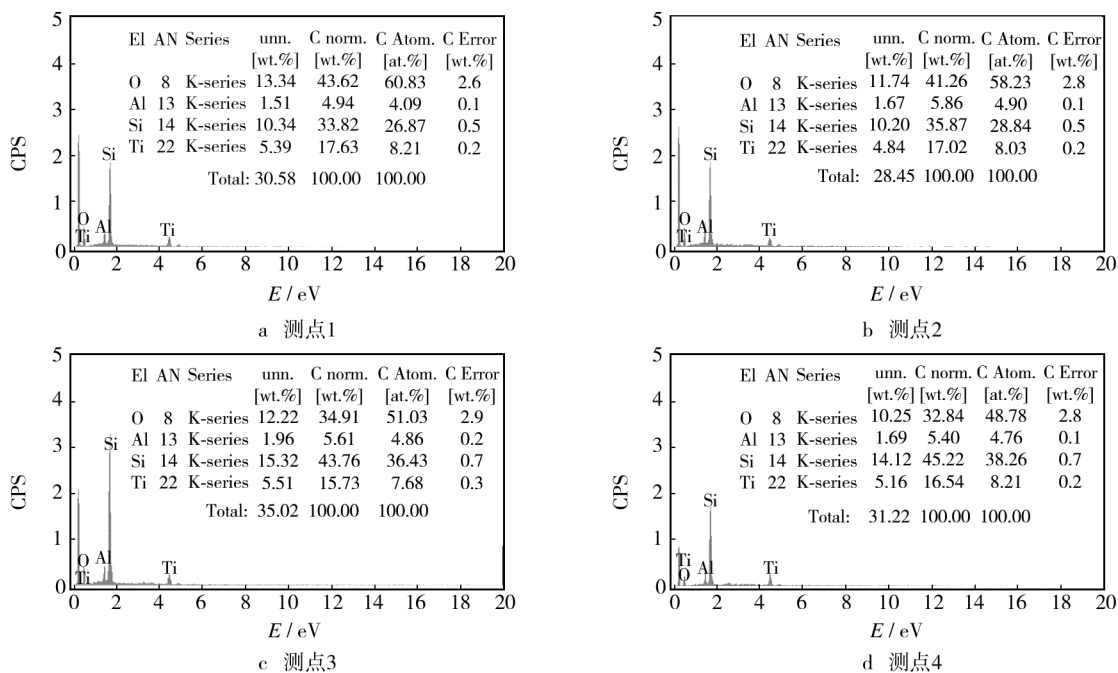


图3 图2中各点的EDS分析

Fig. 3 EDS analysis of Fig. 2: a) point 1; b) point 2; c) point 3; d) point 4

图 4 为四种涂层样品的摩擦系数曲线。可以看出,E-coating 的初始摩擦系数约为 0.3,在前 300 s 近似呈直线缓慢上升,之后快速上升,最终达到 0.78。KH460+E-coating 的初始摩擦系数约为 0.15,磨损过程中,摩擦系数近似呈直线上升,最终摩擦系数约为 0.37。这可能是因为在磨损过程中,随着磨损量的增加,摩擦副与样品的接触面积增大,从而使得摩擦系数增大。Micron SiO₂/E-coating 在经过短暂的磨合阶段后,摩擦系数急剧增大,到 350 s 时,摩擦系数趋于稳定,最终稳定在 0.95;Nano SiO₂/E-coating 的摩擦系数在经过磨合阶段后,上升较慢,200 s 以后趋于稳定,最终稳定在 0.37。对比可知,E-coating 和 Micron SiO₂/E-coating 的摩擦系数较大,而 KH460+E-coating 和 Nano SiO₂/E-coating 的摩擦系数较小。

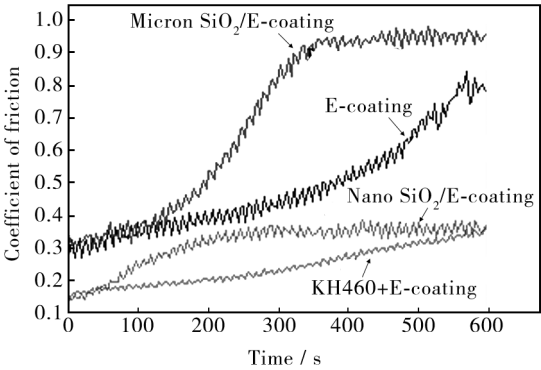


图 4 涂层样品的摩擦系数
Fig. 4 Friction coefficient of different coatings

图 5 为四种电泳涂层的磨痕在光学显微镜下的形貌。由图 5a 可见,E-coating 磨痕的左侧磨损较为严重,右侧磨损较为轻微。由图 5b 可见,KH460+E-coating 磨痕均匀而轻微,表现出良好的耐磨性。由图 5c 可见,Micron SiO₂/E-coating 磨痕的局部出现了灰白区域,涂层磨损严重,耐磨性较差。由图 5d 可见,Nano SiO₂/E-coating 磨损明显,并且磨痕中广泛、均匀地分布着许多白色区域。这些白色区域可能是镶嵌在涂层中的纳米 SiO₂。白色区域在经过磨损后依然存在,而没有剥落,这说明在磨损的过程中,SiO₂ 区域抑制了涂层磨损的进行。

图 6 为摩擦磨损示意图,根据几何关系可以得出平均磨痕深度与磨痕宽度的关系式,如(1)式所示。其中, R 为钢球半径,其值为 1 mm; L 为磨痕宽度; h 为磨痕深度。

$$h=R-\sqrt{R^2-\left(\frac{L}{2}\right)^2}$$

(1)

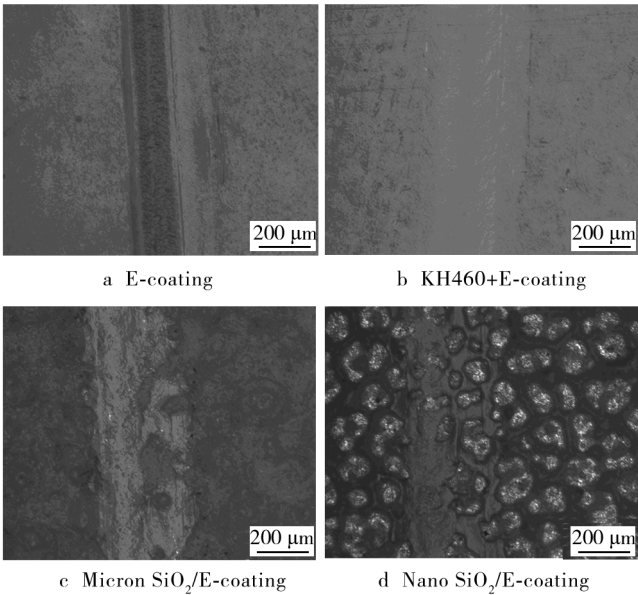


图 5 阴极电泳涂层在光学显微镜下的磨痕形貌
Fig. 5 Wear morphology of different coatings in optical microscopy

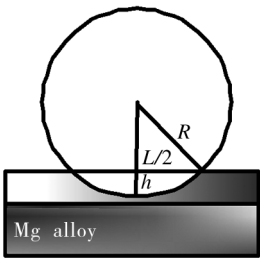


图 6 摩擦磨损示意
Fig. 6 Schematic diagram of wear

对图 5 中的磨痕进行分析,测量出磨痕宽度,再根据公式(1)可以计算出各试样磨痕的平均深度,结果见表 3。可以看出,KH460+E-coatingd 的磨痕最浅,其次为 E-coating 和 Nano SiO₂/E-coating,Micron SiO₂/E-coating 的磨痕最深。四种涂层的磨痕深度都小于涂层的厚度,说明都没有被完全磨穿。从涂层的磨痕深度来看,Micron SiO₂/E-coating 的磨损量最大,其次

表 3 阴极电泳涂层磨损参数
Tab. 3 Abrasion resistance of E-coating with and without SiO₂ modification

样品	$L/\mu\text{m}$	$h/\mu\text{m}$	涂层厚度 $\delta/\mu\text{m}$	h/δ
E-coating	313	12.3	18.5	0.665
KH460+E-coating	286	10.3	21.9	0.470
Micron SiO ₂ /E-coating	357	16.1	23.7	0.673
Nano SiO ₂ /E-coating	328	13.5	28.4	0.475

为 Nano $\text{SiO}_2/\text{E-coating}$, 但由于这两种涂层的表面粗糙度较大, 单纯的磨痕深度不能完全反映耐磨性。对比 h/δ 值, Micron $\text{SiO}_2/\text{E-coating}$ 的 h/δ 值高于其他三种涂层; E-coating 的 h/δ 值为 0.665, 说明其磨损量也较大。Nano $\text{SiO}_2/\text{E-coating}$ 虽然磨痕较深, 但是由于涂层较厚, 因此 h/δ 值不大, 只有 0.475, 与 KH460 + E-coating 相近。结合图 4 中的摩擦系数曲线可知, Micron $\text{SiO}_2/\text{E-coating}$ 的耐磨性最差, 其在磨损过程中摩擦系数较大, 磨痕较深, h/δ 值也最大; KH460 + E-coating 具有良好的耐磨性, 其摩擦系数较低, 磨痕深度较小, h/δ 值也较小; Nano $\text{SiO}_2/\text{E-coating}$ 虽然磨痕深度较深, 但是涂层粗糙度较大, 而且摩擦系数和 h/δ 值均比较小, 与 KH460 + E-coating 相当, 因此认为其也具有良好的耐磨性。

图 7 为四种阴极电泳涂层磨损后在扫描电镜下的显微形貌。可以发现, 四种涂层表面都发生了破坏。E-coating 在磨损过程中, 由于塑形变形而产生疲劳裂纹, 表面出现很多弧形磨痕, 其磨损机制属于疲劳磨损^[12,18], 并且局部区域被完全磨穿, 破损区域的涂层完全剥离。KH460 + E-coating 也有疲劳裂纹产生, 发生了疲劳磨损, 但涂层依然在基体表面附着良好, 其原因是 KH460 对镁合金表面的改性提高了涂层与基体的结合力, 使得涂层不易剥落。

Micron $\text{SiO}_2/\text{E-coating}$ 表面破损严重, 不仅有疲劳裂纹产生, 而且有部分涂层剥离后粘附在试样表面 (如图 7c 中箭头所示)。这些被磨掉的涂层粘附在涂层表面, 可能会形成粘着磨损, 从而促进疲劳裂纹处

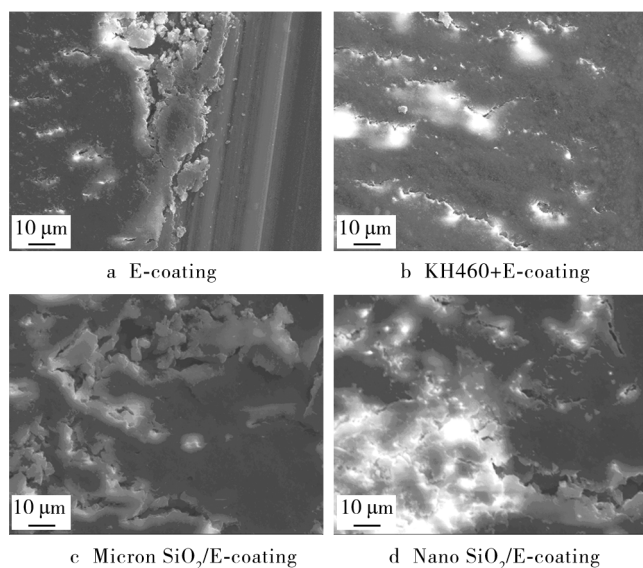


图 7 阴极电泳涂层磨痕的 SEM 形貌

Fig. 7 SEM morphology of different coatings after wear

涂层的破坏, 还会使得涂层的摩擦系数增大, 磨损量增加。因此 Micron $\text{SiO}_2/\text{E-coating}$ 的耐磨性最差, 其磨损失效机制是疲劳磨损为主, 可能还有粘着磨损。

Nano $\text{SiO}_2/\text{E-coating}$ 中也有疲劳裂纹产生, 磨损失效机制主要为疲劳磨损。其耐磨性较好, 具有较低的摩擦系数和 h/δ 值, 可能的原因是: 其一, 涂层中的纳米 SiO_2 可以提高涂层的硬度, 使得涂层整体耐磨性提高; 其二, 涂层中的纳米颗粒聚集区 (见图 5) 较涂层区更耐磨, 其形成的微凸起还可以减小两个摩擦副的接触面, 从而降低了摩擦系数, 使涂层耐磨性提高^[19]; 其三, Shi Guang^[20] 等认为, 在环氧树脂中加入 KH550 改性纳米 Al_2O_3 制备的复合材料在磨损过程中, 脱落的纳米粉体可能形成良好的固体润滑, 从而改善耐磨性, 本实验中的纳米 SiO_2 可能也有类似的效果, 磨损掉的纳米 SiO_2 粒径较小, 在涂层与钢球之间形成滚动摩擦, 将滑动磨损变为滚动磨损, 从而提高了涂层的耐磨性。Nano $\text{SiO}_2/\text{E-coating}$ 的摩擦系数与 KH460 + E-coating 相近的原因可能是, 后者由于具有平整、光滑的表面而具有较低的摩擦系数, 前者则主要是由于涂层与钢球接触面积较小而具有较低的摩擦系数。

3 结论

1) 用硅烷对镁合金表面进行预处理, 能够有效提高阴极电泳涂层的耐磨性、耐蚀性及其与基体的结合力。

2) 加入硅烷改性的 SiO_2 粉体, 可以改善阴极电泳涂层的耐蚀性和铅笔硬度, 并且不降低涂层与基体的结合力及涂层的抗 NMP 溶胀性能。

3) Micron $\text{SiO}_2/\text{E-coating}$ 的耐磨性不及 KH460 + E-coating, 摩擦系数较大, 其失效机制为疲劳磨损 + 粘着磨损。Nano $\text{SiO}_2/\text{E-coating}$ 由于纳米 SiO_2 粉体的存在, 有效抑制了磨损的发生, 其耐磨性与 KH460 + E-coating 相当, 失效机制是疲劳磨损 + 粘着磨损, 且以疲劳磨损为主。

4) 微米 SiO_2 粉体的加入降低了涂层的耐磨性, 纳米 SiO_2 粉体的加入对涂层耐磨性的改善不明显。

参考文献

- [1] CHEN C, ZHANG M, CHANG Q, et al. Laser Cladding of ZM5 Magnesium Base Alloy with Al+Nano-SiC Powder[J]. Laser in Engineering, 2008, 18: 85—94.

- [2] DURDU S, USTA M. Characterization and Mechanical Properties of Coatings on Magnesium by Micro Arc Oxidation [J]. *Applied Surface Science*, 2012(261): 774—782.
- [3] ZHANG J, WU C. Corrosion Protection Behavior of AZ31 Magnesium Alloy with Cathodic Electrophoretic Coating Pretreated by Silane [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2009(66): 387—392.
- [4] HU R, SU Z, BU J, et al. Recent Progress in Corrosion Protection of Magnesium Alloys by Organic Coatings [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2012(73): 129—141.
- [5] WANG Y, LIM S, LUO J L, et al. Tribological and Corrosion Behaviors of Al₂O₃/Polymer Nanocomposite Coatings [J]. *Wear*, 2006, 260(9/10): 976—983.
- [6] KIM M T, RHEE K Y, LEE J H, et al. Property Enhancement of a Carbon Fiber/Epoxy Composite by Using Carbon Nanotubes [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42(5): 1257—1261.
- [7] MOHAN N, NATARAJAN S, KUMARESHBABU S P. Abrasive Wear Behaviour of Hard Powders Filled Glass Fabric-Epoxy Hybrid Composites [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3): 1704—1709.
- [8] HEDAYATI M, SALEHI M, BAGHERI R, et al. Tribological and Mechanical Properties of Amorphous and Semi-crystalline PEEK/SiO₂ Nanocomposite Coatings Deposited on the Plain Carbon Steel by Electrostatic Powder Spray Technique [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2012, 74(1): 50—58.
- [9] SONG H, ZHANG Z. Study on the Tribological Behaviors of the Phenolic Composite Coating Filled with Modified Nano-TiO₂ [J]. *Tribology International*, 2008, 41(5): 396—403.
- [10] 庞佑霞, 许焰, 张昊, 等. 微/纳米复合涂层的抗冲蚀磨损性能 [J]. *材料工程*, 2013(9): 60—63.
- PANG You-xia, XU Yan, ZHANG Hao, et al. Erosion Resistance of Micro/Nano Composite Coating [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2013(9): 60—63.
- [11] ZHANG H, ZHANG H, ZHOU L, et al. Abrasive Wear of Transparent Polymer Coatings: Considered in Terms of Morphology and Surface Modification of Nanoparticles [J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 88: 151—157.
- [12] KANG Y, CHEN X, SONG S, et al. Friction and Wear Behavior of Nanosilica-filled Epoxy Resin Composite Coatings [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(17): 6384—6390.
- [13] SHI Y, FENG X, WANG H, et al. The Effect of Surface Modification on the Friction and Wear Behavior of Carbon Nanofiber-filled PTFE Composites [J]. *Wear*, 2008, 264(11/12): 934—939.
- [14] REN G, ZHANG Z, ZHU X, et al. Influence of Functional Graphene as Filler on the Tribological Behaviors of Nomex Fabric/Phenolic Composite [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 49(0): 157—164.
- [15] 汤晓东, 张振海, 徐丽萍, 等. 纳米 SiO₂ 的改性及其对水性聚氨酯树脂复合涂层性能的影响 [J]. *表面技术*, 2013, 42(4): 12—16.
- TANG Xiao-dong, ZHANG Zhen-hai, XU Li-ping, et al. Modification of Nano-SiO₂ and Its Effect on the Properties of Waterborne Polyurethane Resin Coating [J]. *Surface Technology*, 2013, 42(4): 12—16.
- [16] 黄大庆, 王智永, 刘俊能. 偶联剂对吸波涂层力学性能的影响及其作用机理的研究 [J]. *材料工程*, 1999(9): 28—31.
- HUANG Da-qing, WANG Zhi-yong, LIU Jun-neng. Effects of Coupling Agents on Mechanical Properties of Radar Absorbing Coatings and Its Mechanism [J]. *Journal of Materials Engineering*, 1999(9): 28—31.
- [17] BEHZADNASAB M, MIRABEDINI S M, KABIRI K, et al. Corrosion Performance of Epoxy Coatings Containing Silane Treated ZrO₂ Nanoparticles on Mild Steel in 3.5% NaCl Solution [J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(1): 89—98.
- [18] BARLETTA M, PUOPOLO M, GISARIO A, et al. Application and Drying at Ambient Temperature of Thick Organic-Inorganic Hybrid Coatings on Glass [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 236: 212—223.
- [19] KELLERMANN K, EHRHARDT S, FANDREY J, et al. Influence of Surface Roughness on the Tribological Properties of HF-CVD Diamond Coated Heat-treatable Steel [J]. *Wear*, 2010, 269(11/12): 811—815.
- [20] SHI G, ZHANG M Q, RONG M Z, et al. Sliding Wear Behavior of Epoxy Containing Nano-Al₂O₃ Particles with Different Pretreatments [J]. *Wear*, 2004, 256(11/12): 1072—1081.

(上接第10页)

- [17] RONCONI L, CHRISTINE M, PIERO Z, et al. Gold (III) Dithiocarbamate Derivatives for the Treatment of Cancer: Solution Chemistry, DNA Binding and Hemolytic Properties [J]. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2006, V49(5): 1648—1657.
- [18] 周慧云, 李继红, 刘斌, 等. 化学镀镍层缓蚀工艺研究 [J]. *表面技术*, 2014, 43(5): 81—86.
- ZHOU Hui-yun, LI Ji-hong, LIU Bin, et al. Study on Corrosion Inhibition Process of Electroless Nickel Coating [J]. *Surface Technology*, 2014, 43(5): 81—86.