

文章修改联系电话、邮箱
收稿日期: 2015-03-21 (文章投稿日期); 修订日期: 2015-04-15 (文章修订日期)
Received: 2015-03-21; Revised: 2015-04-15
基金项目: "十二五"科技支撑计划项目(2011BAK10B05, 2012BAD29B05); 质监总局公益项目(2011HK260)
Fund: "Twelfth Five-Year" Science and Technology Support Program(2011BAK10B05, 2012BAD29B05); Public Welfare Project of the State Administration of Quality Supervision(2011HK260)
*通信作者 (Corresponding author) (注: 第一作者为学生的必须有通信作者。)

标题

李飞¹, 张一明^{2*}

(1. 广西大学 a. 省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室 b. 资源环境与材料学院, 南宁 530004; 2. 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

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..... **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..... **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.....

关键词: 镁合金; 阴极电泳涂层; SiO₂; 硅烷改性; 耐磨性; 磨损机制

中图分类号: TH117

Title

LI Fei¹, ZHANG Yiming^{2*}

(1. a. State Key Laboratory of Featured Metal Materials and Life-cycle Safety for Composite Structures, b. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hunan Hengyang 421001, China)

ABSTRACT: To improve the abrasion resistance of organic coating on magnesium alloys, in this paper, SiO₂ powders were modified with KH450 silane and dispersed in electrophoretic paint...

KEY WORDS: magnesium alloy; cathodic electrophoretic coating; SiO₂; silane modification; wear resistance wear mechanism

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.....

向有机涂层中加入无机颗粒, 如碳纳米管、玻璃纤维及Al₂O₃, TiO₂, SiO₂等^[5-10], 可以有效提高其耐磨性。Zhang等^[11]在聚合物涂层中加入纳米SiO₂, 结果表明, 加入填料后, 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。汤晓东等^[12]将SiO₂加入环氧树脂涂层中发现.....

对填料进行表面改性的方法有很多^[11,13-14].....文中在镁合金基体上制备了硅烷改性SiO₂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 0.001 5%, Cu 0.001 1%, Mn 0.4%, Al 2.91%, Zn 0.85%, Ni 0.000 84%, Mg余量。镁合金的前处理流程为: 60 °C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。采用纯度≥99.99%的纯镍样块, 尺寸为10 mm×10 mm×5 mm。

纳米及微米SiO₂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。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.....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 °C热处理炉中固化40 min; 2) 将KH450硅烷溶液与SiO₂粉体混合, 球磨2 h使其均匀分散, 抽滤后, 在100 °C烘烤40 min, 获得KH450改性粉体。

空白玻璃组表面芽孢杆菌黏附率为(49.95±0.80)%, E51 树脂表面黏附率为(46.58±0.99)%, PMPS 和MPMPS-30 树脂涂层表面芽孢杆菌黏附率分别为(17.56±4.37)%和(15.54±2.37)%。

批注 [Y1]: 初投稿不出现作者及著作权单位 (包括中英文及作者介绍), 以便盲审: 通信作者右上角*

批注 [M2]: (同一单位不同二级单位, 按 a、b、c 等字母依次编号, 中文部分各二级单位用空格隔开, 英文部分用“,” 隔开; 单位所在地不是省会, 则需要加省份名)

批注 [Y3]: 请在 <http://zflh.xhma.com/> 查询

批注 [Y4]: 作者名字采用后才补充, 姓全部大写, 名首字母大写, 名中间不需要连字符

批注 [Y5]: 中文参考文献为单个作者, 直接写中文姓名, 序号标在名字后右上方, 如张英^[1]; 两位以上作者时, 只写一作姓名+等, 等后右上方标序号, 如汤晓东等^[12]; 英文参考文献标注方法同中文, 区别在于只写作者姓, 且只有首字母大写, 其余字母小写, 如参考文献为 ZHANG J, 正文引用时写作 Zhang 等^[11]

批注 [Y6]: 出现%的时候不能笼统称为含量, 要标明体积分数或质量分数等

批注 [Y7]: 正文及图表中 4 位数字及以上时 3 位一空

批注 [M8]: 正文及图表中数值和单位之间有 1 个空格 (% 及 ° 等除外); 且表示尺寸时每个数字后都要写单位

批注 [M9]: 单位相同的量值范围, 前一个量值的单位可以省略, 只需在后一个量值上写出单位(% 及 ° 等除外)。

批注 [M10]: 参量与其公差的单位相同时, 数值括起来, 单位写在后面

将包覆 B₄C 涂层的石墨试样分别在 800、1 000、1 200、1 400 °C 空气环境中进行氧化试验，观察其在不同温度下的微观形貌，并进行氧化行为分析。随后，进行室温至 1 400 °C 的动态宽温域氧化试验，进一步研究其氧化防护温度范围。

CDI和N-CDI的XPS全光谱及N-CDI高分辨率下的C 1s、N 1s、O 1s谱图。N-CDI所含N元素含量增加，表明N成功地被掺杂。N-CDI的C 1s谱图中有C=C/C-C (284.4 eV)、C-N/C-O (285.2 eV)和C=O (287.1 eV) 3个吸收峰(图3b)。在同一温度下加入15 mg/L N-CDI后的R_{pa}值均增加，表明碳钢表面被缓蚀剂分子有效覆盖。而C_{dl}值较空白溶液均下降，是由于加入N-CDI后，N-CDI在碳钢表面形成吸附取代了碳钢表面吸附的其他腐蚀性离子，双电层厚度增加，薄膜的介电常数减小且电极的暴露面积减小，腐蚀速率因此降低。

采用正硅酸乙酯与乙醇物质的量比为1:20、提拉速度为500 μm/s及正硅酸乙酯与乙醇物质的量比为1:30、提拉速度为1 000 μm/s制备的SiO₂薄膜，折射率分别为1.35和1.33

1.2 性能测试

1) 采用UMT摩擦磨损测试系统测试4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。

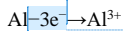
2) 采用NMP试剂测试涂层的抗有机溶剂溶胀能力。

.....

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

4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 min就完全剥落；而其他经硅烷处理的3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。



2.2 硅烷改性SiO₂粉体对涂层耐蚀性的影响

根据 GB/T 228.1—2021 《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》的要求.....

2.3 硅烷改性SiO₂粉体对涂层耐磨性能的影响

图1为4种涂层的表面形貌。可以看出，E-coating和KH460+E-coating表面较为平整，加入2种粉体后的涂层表面粗糙度明显增大，其中Nano SiO₂/E-coating的粗糙度最大，见图1d..

批注 [M11]: 几个数值同一单位，单位标在最后一个数字后（%及°等除外）

批注 [M12]: 元素符号和轨道符号之间空一格

批注 [M13]: 化学键单键和双键符号可直接复制批注处的（此为该符号标准的写法）

批注 [Y14]: 正文及图中的物理量用斜体表示，下标一般用正体表示（表示量、坐标轴、可变量符号除外，即下标若是变化的量则用斜体）

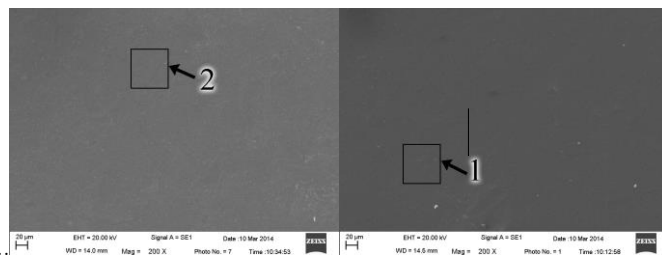
批注 [M15]: 绝大部分物理量必须只用 1 个字母表示（有国标的，按国标规定正确使用量符号）

批注 [M16]: 正确的比号格式

批注 [M17]: 所有单位为国际单位制，正文中的复合单位用/隔开

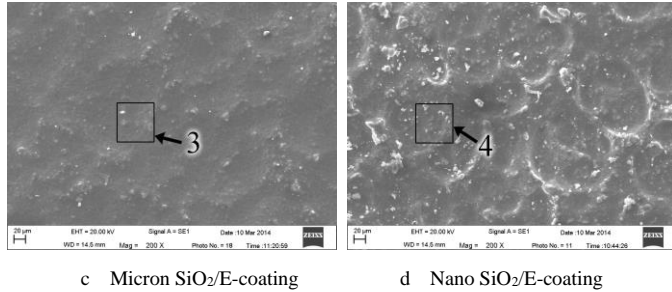
批注 [M18]: 负离子及单位的上标负号及平标的负号可直接复制批注处的（此为该符号标准的写法）

批注 [Y19]: 正文和图中提及分图题序号时，不加括号



a E-coating

b KH460+E-coating



c Micron SiO₂/E-coating d Nano SiO₂/E-coating

图1 电泳涂层的表面形貌

Fig.1 SEM of different coatings

批注 [A20]: 图片需清晰, 分辨率不低于 300 dpi。照片应配有相应标尺; 图表内需用全英文; 分图题不加括号; 图片及图题在对应的段落后

成分分析结果如图3所示.....

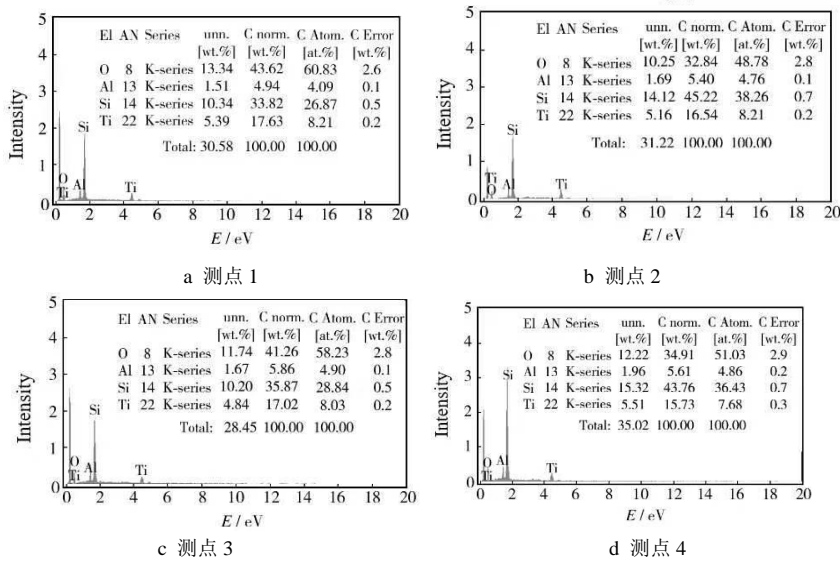


图2 图2中各点的EDS分析

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

批注 [A21]: 坐标图要求有纵横坐标标目(标值的物理意义及相应单位);

1) 当总图题不包含分图题时, 将中文分图题写在对应图片下面, 英文图题则写总图题+分图题

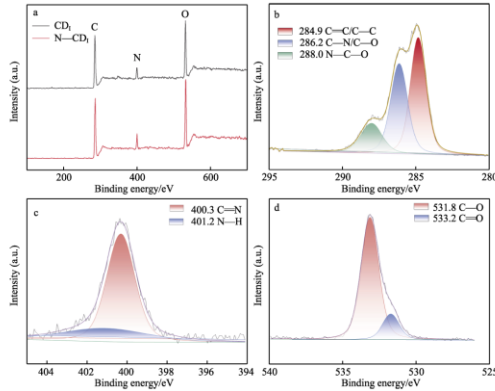


图3 CDI 和N-CDI 的全光谱 (a) 及N-CDI 高分辨率下的XPS 分析 (b~d)

Fig.3 Full spectrum CDI and N-CDI (a) and XPS analysis of N-CDI under high resolution (b-d)

批注 [M22]: 2) 当总图题包含分图题时, 可将总图题写作: xxx (a)、xxx (b) 及 xxx (c) 的格式。在这种情况下, 需要在分图左上角标注 a、b、c 序号。

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, 如式 (1) 所示。

$$h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (1)$$

批注 [M23]: 请使用数学公式编辑器 **MathType** 编辑公式。式中涉及的物理量请用国家规定的量符号表示 (斜体); 在公式下一行对式中量符号的具体含义做说明; 对公式要进行编号

式中: R 为钢球半径, 其值为 1 mm; L 为磨痕宽度; h 为磨痕深度。对图5中的磨痕进行分析, 测量出磨痕宽度, 再根据式 (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

表 1 阴极电泳涂层磨损参数

Tab.1 abrasion resistance of E-coating with and without SiO₂ modifying

Simples	$L/\mu\text{m}$	$h/\mu\text{m}$	$\delta/\mu\text{m}$	$J_{\text{cor}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
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

批注 [A24]: 表格纵列需为同一物理量, 且小数点后位数应相同。图表内需用全英文; 单位和物理量间用/隔开

批注 [M25]: 表中及图纵横坐标上的复合单位用括号括起来

3 结论

- 1) 用硅烷对镁合金表面进行预处理……
- 2) 加入硅烷改性的SiO₂粉体……
- 3) Micron SiO₂/E-coating的耐磨性不及KH460+E-coating……
- 4) 微米SiO₂粉体的加入降低了涂层的耐磨性……

参考文献:

注:

- 1、作者引用的参考文献应为亲自阅读过的、发表于正式出版物上的原始文献。避免引用摘要、简讯等文献;
- 2、综述类参考文献一般不少于 50 条, 其他研究类论文一般不少于 25 条;
- 3、格式参照 GB/T 7714—2015 《信息与文献参考文献著录规则》标准格式编写。

- 1) 标点符号均采用英文半角格式，并空一格。
- 2) 中文文献要有对应的英文，对应英文中“作者姓名”形式必须为“姓”中的字母全部大写，“名”仅保留首字母，且大写，作者仅列出前3位，然后用“等”。
- 3) 英文文献（包含外国人撰写的英文文献和中国人撰写的英文文献）中必须遵守姓前名著录法，“姓”全部大写，名缩写为首字母，缩写名后不加点“.”，作者仅列出前3位，然后用“et al”。
- 4) 英文标题及英文期刊名称中实词的首字母大写。
- 5) 起止页码用“-”。
- 6) 所有参考文献均要在正文中标注。
- 7) 参考文献是按照在正文中出现的先后顺序编号。

参考文献示例：

[1] **期刊**：著者. 篇(题)名[J]. 刊名, 出版年, 卷号(期号): 起止页码.

例：

中文文献（必须要有对应的英文）：

李亮, 帅美荣, 李海斌, 等. 2209 双相不锈钢本构模型及热加工参数优化[J]. 精密成形工程, 2022, 14(8): 48-54.

LI L, SHUAI M R, LI H B, et al. Constitutive Model and Hot Working Parameters Optimization of 2209 Duplex Stainless Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(8): 48-54.

英文文献：

SHANG L R, ZHANG W X, XU K, et al. BioInspired Intelligent Structural Color Materials[J]. Materials Horizons, 2019, 6(5): 945-958.

[2] **专著**：主要著作责任者. 书名[M]. 出版地: 出版者, 出版年: 参考起止页码.

例：张朝晖. ANSYS 热分析教程与实例解析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 1-5.

ZHANG C H. ANSYS Thermal Analysis Course and Example Analysis[M]. Beijing: China Railway Press, 2007: 1-5.

[3] **会议论文集**：作者(报告人). 题名[C]// 会议录或会议名. 出版地: 出版者, 出版年: 参考起止页码.

例：傅好华, 单月晖. 智能化人机协同作战发展研究[C]// 中国指挥与控制学会第九届中国指挥控制大会论文集. 北京: 兵器工业出版社, 2021: 219-223.

FU H H, SHAN Y H. Study on the Development of Intelligent Cooperative Operation[C]// Proceedings of the 9th China Command and Control Conference. Beijing: Publishing House of Ordnance Industry, 2021: 219-223.

出版者不详时，标注为[s.n.]；出版地不详时，标注为[S.l.]

[4] **学位论文**：作者. 篇(题)名[D]. 学位授予单位城市: 单位名称, 年: 参考页.

例：于洋. 基于层叠式压电作动器的薄壁结构的形状控制技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2008: 5-10.

YU Y. A Study of Shape Control for Thin Walled Structure Based on Laminated Piezoelectric Actuators[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008: 5-10.

[5] **专利**：专利申请者或所有者. 专利题名: 国别, 专利号[P]. 公告日期或公开日期.

例：杨光. 一种便于老年人使用的设计: 中国, 201210590768.X[P]. 2013-04-03.

YANG G. A Design that is Convenient for the Elderly to Use: China, 201210590768.X[P]. 2013-04-03.

[6] **标准**：发布机构或者作者名字. 标准名称: 标准编号[S]. 出版地: 出版者, 出版年: 参考起止页码.

例：全国信息与文献标准化技术委员会. 文献著录: 第4部分 非书资料: GB/T 3792.4—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 3.

China National Information Technology Standardization Network. Bibliographical Description—Part 4: Non-book Materials: GB/T 3792.4-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 3.