

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.04.012

镁合金表面防护中石墨烯基多功能涂层的应用进展

韩文静^{1*}, 宋进朝², 张晓光³

(1. 永城职业学院 机电工程系, 河南 永城 476600;

2. 永城职业学院 建筑工程系, 河南 永城 476600;

3. 东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 镁及其合金具有优良的物理和机械性能,使其可用于最重要的工业应用,如航空航天、汽车、生物医学和电子产品,然而耐腐蚀性差的特性限制了其应用。石墨烯及其衍生物的二维原子结构和优异性能可以实现传统材料的表面功能化,成为智能多功能涂层。重点阐述了耐蚀耐磨一体化涂层、耐蚀超疏水一体化涂层、耐蚀自修复涂层等3类石墨烯基多功能涂层在镁合金表面防护中的研究情况。

关键词: 石墨烯基多功能涂层; 镁合金; 应用; 进展

中图分类号: TG178

文献标识码: A

Process of the application of the graphene-based multifunctional coating in the surfaces protection of magnesium alloy

Han Wenjing^{1*}, Song Jinchao², Zhang Xiaoguang³

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Yongcheng Vocational College, Yongcheng 476600, China; 2. Department of Architectural Engineering, Yongcheng Vocational College,

Yongcheng 476600, China; 3. College of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Magnesium and its alloys have excellent physical and mechanical properties that make them useful in the most important industrial applications such as aerospace, automotive, biomedical, and electronics. However, the poor corrosion resistance of magnesium and its alloys limits its application. Due to the two-dimensional atomic structure and excellent properties of graphene and its derivatives, the surface functionalization of traditional materials can be realized and become intelligent multifunctional coatings. The research situation of 3 kinds of graphene-based multifunctional coating in the surface protection of magnesium alloys is emphatically expounded, including anti-corrosion and wear-resistant integrated coating, anti-corrosion super-hydrophobic integrated coating, and anti-corrosion self-healing coating.

Keywords: graphene-based multifunctional coating; magnesium alloy; application; progress

镁及其合金具有低密度、高比强度和优异的生物相容性,因而在航空航天、汽车工业和可生物降解

的植入物中引起了广泛关注^[1]。镁合金因其密度低、强度适中、易加工性等,是最重要的轻质结构材

收稿日期: 2022-09-21

修回日期: 2023-01-15

作者简介: 韩文静(1985—),女,硕士,副教授, email: hanwenjing19850122@126.com

基金项目: 2021年度河南省高等学校重点科研项目资助计划(21A880017)

料之一^[2]。镁合金的 $[\text{MgO}+\text{Mg}(\text{OH})_2]/\text{Mg}$ 体积比,即 PRB 值低于 1.0 时,自然形成的氧化膜通常是多孔的,不能提供有效的保护^[3]。由于石墨烯具有二维形貌、高表面积、低密度和抗离子渗透性等显著特性,使石墨烯基涂层具有用作防腐涂层的潜力^[4]。多层镁系统组合技术是防止镁在恶劣服务环境中腐蚀的一种很有前途的方法。在不同的技术应用中开发先进的功能性和智能型防腐涂料非常重要。传统应用一方面需要更先进的涂层,另一方面需要满足一些新的高科技应用的要求。由于石墨烯及其衍生物的独特的二维原子结构以及易于组装、性能可设计性强的特性,有望实现传统材料的表面功能化,成为智能多功能涂层。主要从耐蚀耐磨一体化涂层、耐腐蚀超疏水一体化涂层、耐腐蚀自修复涂层三方面的研究情况进行阐述。

1 耐蚀耐磨一体化涂层

耐蚀耐磨一体化涂层可有效延长涂层的使用寿命,耐磨性可保护涂层不因外力损伤而脱落和失效。即使在磨损的情况下,它也能显著降低磨损率,并保持残余涂层的连续性,以实现持续的防腐。镁合金虽然具有广泛的有益性能,但对各种酸性和碱性溶液的腐蚀和摩擦阻力低^[5]。可以找到经济的解决方案来保护镁合金表面免受腐蚀/磨蚀性介质的影响^[6]。氧化石墨烯(GO)显示出较大的利用潜力,是一种较好的自润滑剂和金属基材腐蚀抑制材料。

1.1 氧化石墨烯耐蚀耐磨涂层

1.1.1 电泳沉积技术制备的涂层

Askarnia R 等^[7]通过使用电泳沉积技术(EPD)沉积氧化铝/氧化石墨烯复合涂层,研究了 AZ91D 镁合金的性能改进。添加 GO 显著改善了腐蚀耐蚀性,含有 2 wt.% GO 的样品具有最高的耐蚀性,约是基体合金的两倍。这归因于 GO 可以防止涂层微观结构中裂纹的形成。样品在 3.5 wt.% NaCl 溶液中保存 7 天,随着 GO 的添加,凹坑的数量显著减少。

Zhang Y L 等^[8]将 GO 结合到基于等离子体电解氧化(PEO)的涂层中,以进一步提高 AZ31 镁合金的摩擦学性能和耐腐蚀性。嵌入的 GO 添加剂降低了表面粗糙度和孔隙率,促进了阻塞孔和小尺寸结构的形成,同时提高了含 GO 涂层的显微硬度。用 $20 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ GO 添加剂制备的复合涂层足以维持低

而稳定的摩擦系数和高耐磨性,有效降低腐蚀速率并提高极化电阻。

Gnedenkov S V^[9]通过电泳沉积工艺在 AZ91 镁合金的 PEO 涂层上制备了 GO 层。超分散聚四氟乙烯颗粒(SPTFE)的涂层表现出更好的抗腐蚀和抗磨损性能。PEO 涂层具有多孔结构,在 EPD 处理后发生了显著变化,其微孔和微裂纹被 GO 颗粒封闭。Zhao J M 等^[10]在 AZ31 镁合金上将 GO 添加到电解质中制备 PEO 涂层。研究发现 PEO 涂层上的微孔数量显著减少。加入 2 g/L GO 后,PEO 涂层的耐蚀性能显著提高。Han B J 等^[11]在 AZ91 镁合金上制备 PEO 涂层的过程中,将石墨烯添加到电解质中。石墨烯成功添加到 PEO 涂层中,减少了涂层中微孔和裂纹的数量和尺寸。与基体相比,当电解液中石墨烯的添加量为 250 mg/L 时,PEO 涂层的显微硬度提高了 15 倍以上,腐蚀电流密度降低了约 3 个数量级。这是因为石墨烯添加剂优先位于 PEO 涂层中微孔和裂缝的边界。当浸入腐蚀介质时,涂层中的石墨烯会阻止腐蚀性介质穿透内层,从而提高 AZ91 镁合金的耐腐蚀性能。

Khiabani A B^[12]采用等离子电解氧化和电泳沉积法相结合的方法在 AZ91 镁合金表面成功制备了一种新型 MgO/GO 双相涂层。动电位 Tafel 曲线测量表明,PEO 涂层腐蚀电流密度为 $-1.75 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$,裸基材腐蚀电流密度为 $-1.24 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$,MgO/GO 涂层的腐蚀电流密度降低到 $-0.867 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。MgO/GO 涂层的表面电阻值(最高阻抗模块 $|Z|_{f \rightarrow 0} = 1.64 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$)略高于 PEO 涂层($8.21 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$),这归因于形成 GO 薄膜作为表层能防止腐蚀性溶液渗入 AZ91 基材。研究表明,MgO/GO 复合涂层表现出优异的防腐性能。加入 GO 薄膜可提供更程度的涂层致密性,从而在腐蚀性环境中产生出色的耐腐蚀性。基于这些发现,MgO/GO 涂层可以帮助制备 AZ91 合金,以用作金属可生物降解的骨植入物。

1.1.2 Hummers 技术制备的涂层

Tong L B 等^[13]采用改进的 Hummers 法在挤压镁锌钙合金表面制备了一种新的氧化石墨烯涂层。GO 涂层通过化学反应覆盖了镁基体,通过互锁效应形成了重叠的多层结构。通过硅烷/氧化石墨烯涂层,镁合金涂层内稳定的共价键有效地限制了电解液向镁表面的渗透,表现出优异的腐蚀阻隔效

果。GO涂层耐磨性显著提高,这是由于镁基体与GO之间的结合良好,具有高硬度和良好的润滑效果。如图1所示,揭示了GO涂层的腐蚀和磨损机制。一些GO片材在初始阶段通过酰胺化反应键合在APTES中间层上,并形成超薄GO薄膜。随着进

一步地沉淀,更多的GO薄片可以随机堆叠在原始GO薄膜上,形成许多高度互锁的GO簇。最后,完整的GO涂层完全覆盖了Mg-Zn-Ca合金的表面^[14]。由于GO涂层内的强烈相互作用,GO片材在摩擦或磨损过程中难以剥离。

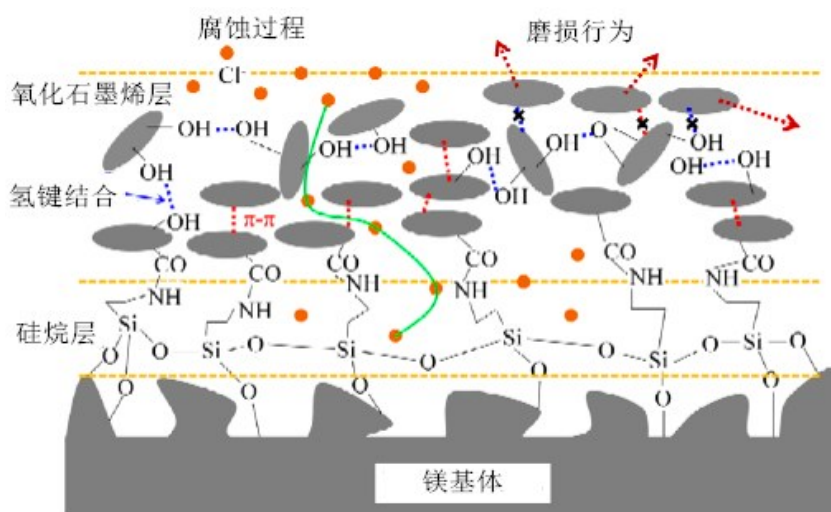


图1 GO涂层腐蚀和磨损机理示意图^[13]

Fig. 1 Sketch map for the corrosion and wear mechanisms of GO coating^[13]

周星怡等^[15]采用 Hummer 法在镁合金表面制备防腐耐磨一体化涂层,将硬脂酸(SA)接枝到GO片上,采用自组装法在镁合金表面制备SA-GO复合涂层。SA-GO涂层可以显著提高镁合金的耐腐蚀性,这归因于接枝后氧化石墨烯片的孔隙率的降低和疏水性的增加。由于氧化石墨烯片材的抗磨损效果和SA的自润滑性能,与镁合金基体相比,SA-GO涂层的磨损率降低了99.3%。

1.2 氧化石墨烯耐蚀耐磨涂层

Maurya R 等^[16]通过含有聚苯胺/石墨烯片(PANI/Gr)的环氧涂层为Mg-9Li-7Al-1Sn和Mg-9Li-5Al-3Sn-1Zn合金提供机械、摩擦和腐蚀保护。与纯环氧涂层($E = 6 \text{ GPa}$ 和 $H = 0.35 \text{ GPa}$)相比,含PANI/Gr的涂层表现出增强的机械完整性和更高的弹性模量和硬度($E = 8 \text{ GPa}$ 和 $H = 0.68 \text{ GPa}$)。含PANI/Gr涂层的体积磨损量($W_v = 4.53 \times 10^{-3} \text{ m}^3$)比纯环氧涂层的磨损量($W_v = 5.15 \times 10^{-3} \text{ m}^3$)低。PANI/Gr与腐蚀介质中的纯环氧树脂涂层(-1.56 V)相比,含涂层能够保持更高的OCP(-1.45 V)。含有PANI/Gr的涂层显示出高度保护性,PANI基涂层具有出色的阻隔性能和阳极保护,耐腐蚀性更优。

1.3 还原氧化石墨烯耐蚀耐磨涂层

楚景慧等^[17]通过旋涂辅助自组装技术制备了具有还原氧化石墨烯/聚乙烯醇(RGO/PVA)耐蚀耐磨“砖泥结构”的一体化仿生涂层。氢键/共价键混合键合网络在涂层的内部形成,“泥”成分为PVA分子,“砖”成分为RGO片材。研究改变PVA的用量对交联效果的影响。当PVA的含量适当(50 wt.%)时有利于形成致密的层状结构,缺陷较少且具有优异的结合强度,能显著提高涂层的耐腐蚀性能。RGO片材的高硬度和良好的润滑效果赋予复合涂层优异的耐磨性。含有一定量PVA的仿生石墨烯基涂层具有优异的润滑性和阻隔作用,可为镁合金提供综合的耐腐蚀和耐磨保护。

综上所述,石墨烯的结构、层数和缺陷程度对其摩擦磨损性能影响很大。双层石墨烯具有较低的黏附性和高效的层间滑动能力,在润滑性能方面优于单层石墨烯。在金属表面上构建具有持久防腐保护的石墨烯基涂层仍然面临挑战。具有“砖泥结构”的复合涂层为镁合金基体提供了有效的耐腐蚀和耐磨性能,但仍存在不确定性和不可控性,例如RGO片材上的官能团数量、涂层内部化学键的强度、涂层之间的缺陷。虽然目前的研究为镁合金表面综合耐

腐蚀耐磨仿生石墨烯基涂层的设计提供了一种简便的方法,但仍需进一步研究 RGO 与聚合物的理想化学组合,探索 RGO 片材的完美排列具有阻隔和润滑效果。

2 耐腐蚀超疏水一体化涂层

应用于海洋环境时,镁合金的腐蚀是不可避免的棘手问题。超疏水涂层因其超疏水性和自清洁性能在金属腐蚀防护方面具有巨大潜力。然而,表面机械稳定性差,严重阻碍了实际应用^[17]。超疏水/氧化石墨烯复合涂层是指超疏水材料与 GO 相结合,利用 GO 独特的性能(如防结垢、自清洁、耐腐蚀等),形成水接触角大于 150° ,滑动角小于 10° 的涂层^[18]。耐腐蚀超疏水一体化涂层可大大减少腐蚀介质与涂层的实际接触面积,减缓腐蚀性离子向涂层的扩散^[19]。超疏水防腐涂层可应用于具有特定表面

要求的领域。利用石墨烯的不渗透性和疏水性构建的超疏水涂层可以进一步延长涂层的防腐寿命。

Nine M J 等^[20]使用聚二甲基硅氧烷(PDMS)修饰的硅藻土(DE)混合物制备含有石墨烯的超疏水多功能复合涂层。由于分子扩散阻挡特性,涂层表现出自清洁作用以及强大的机械耐久性和耐腐蚀性,如图 2 所示。通过添加 TiO_2 纳米粒子,超疏水性进一步提高。当应用于粘合剂基材,涂层能保持超疏水和自清洁性能。含有 rGO 的涂层表现出优异的耐腐蚀性,缓蚀率为 96.78%。Ikhe A B 等^[21]利用全氟聚硅氧烷与 GO 形成复合材料(PPFS/GO)并应用于 AZ31 镁合金在 NaCl 中进行腐蚀防护。由于 PFOTES 的残余疏水性和 GO 的高表面积协同效应,实现了 PPFS/GO 的有效抑制。PPFS 的聚合物性质也有助于涂层和 AZ31 之间的强附着力。

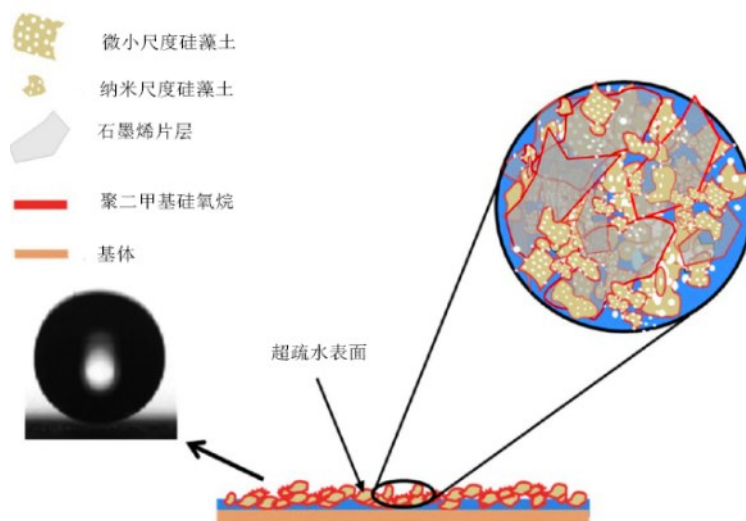


图 2 含 GO 的多功能超疏水表面示意图^[20]

Fig.2 Schematic of prepared multifunctional superhydrophobic surface composed of GO sheet^[20]

陈宁宁等^[22]采用两步法在 AZ91 镁合金上制备了超疏水复合膜,先进行微弧氧化(MAO),然后进行石墨烯/硬脂酸(GO/SA)混合。应用 GO/SA 复合材料后,MAO 层的亲水性多孔表面可转变为静态接触角为 162° 的超疏水表面。与裸镁合金相比,具有超疏水复合膜的 AZ91 合金腐蚀电流密度降低,电化学阻抗增加了 4 个数量级。MAO 膜的高绝缘性和石墨烯的阻隔作用提高了耐腐蚀性。

Yan Z 等^[23]研究了具有交替层的珍珠层仿生 GO/环氧树脂(NBGE)涂层的防腐性能。在

3.5 wt.% NaCl 溶液中具有 5 层 GO 和 6 层环氧树脂总厚度为 $17\text{ }\mu\text{m}$ 的 NBGE 涂层的钢的腐蚀速率比纯环氧涂层下钢的腐蚀速率慢 20 倍。由于通过涂层中嵌入的 GO 层减少的孔隙和缺陷,限制了 O_2 、 H_2O 和 Cl 在钢-涂层界面处发生的化学反应。赵碧芳等^[19]制备了 EP/GO/ SiO_2 涂层,涂层内部的氧化石墨烯薄片被拉伸,为涂层提供了良好的阻隔性能、优异的耐腐蚀性,疏水角提高到 84.4° 。

Li B F 等^[24]通过电沉积和喷涂的方法在镁合金表面制备了氧化石墨烯/聚吡咯(PPy)-沸石咪唑骨

架8(ZIF-8)双层涂层(SGPZ),如图3所示,涂层由底部GO层和上部超疏水PPy/ZIF-8层组成。GO层延长了腐蚀离子的传输路径,阻止了镁合金与腐蚀溶液的接触。双层超疏水涂层具有优异的自清洁和机械性能。涂层在3.5 wt.% NaCl溶液120 h,仍保

持良好的耐腐蚀性。GO层作为超疏水层和镁合金之间的连接层,可增强对镁合金的持久保护防腐性能。SGPZ涂层的水接触角(WCA)大于 $156.9 \pm 2.0^\circ$,水滑动角(WSA)小于 5° 。经过30次砂纸摩擦试验,SGPZ涂层仍保持超疏水性。

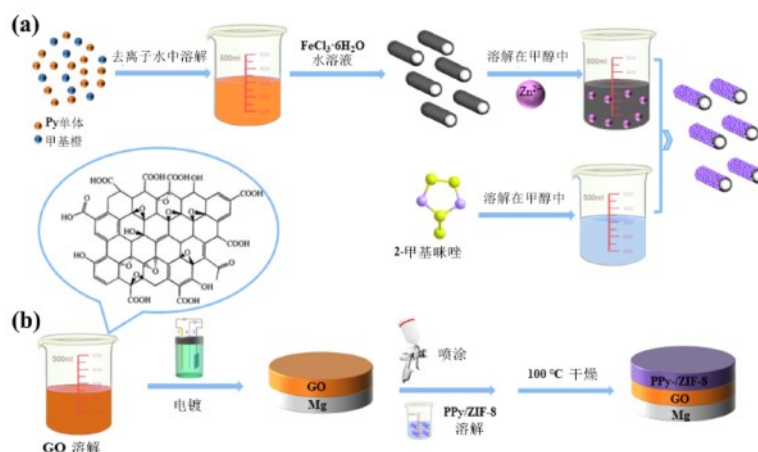


图3 PPy/ZIF-8(a)和镁合金上SGPZ(b)涂层制备示意图^[24]

Fig. 3 Preparation Schematic diagram of PPy/ZIF-8 (a) and SGPZ coating on Mg alloy (b)^[24]

超疏水涂层减少了腐蚀性物质和细菌的吸附定植,增强涂层的自清洁能力和防腐效果。涂层表面粗糙度和化学结构影响疏水性;表面化学改性可以形成均匀和超疏水材料,掺杂在超疏水涂层中,能有效地增强涂层的超疏水性,防止腐蚀介质的侵入,达到镁合金的防腐效果。

3 耐腐蚀自修复涂层

石墨烯片的阻隔性在腐蚀介质到达基体表面并引起基体金属腐蚀时可减缓腐蚀速度,激发出自修复离子并进行释放。在自修复过程可进一步抑制基体金属的溶解。GO中存在许多官能团,如羰基、羟基、羧基和环氧基团,这些基团充当活性位点,使GO纳米片的共价和/或非共价功能化更容易,从而提高相容性。因此封装GO被用作一种防腐剂,在一段时间内从涂层中释放出来,从而产生智能涂层。自修复涂层被用作功能有效的薄膜,可以处理由内在或外在环境造成的问题。自修复聚合物涂层的机理包括间隙闭合和裂缝修复两个主要步骤。

Zong Q等^[25]研究了AZ91D合金上双(8-羟基喹啉)镁($\text{Mg}(\text{HQ})_2$)涂层的生长机理和电化学行为。AZ91D合金在8-羟基喹啉阴离子溶液中的腐蚀诱导了合金表面花状 $\text{Mg}(\text{HQ})_2$ 涂层的活性沉积。

$\text{Mg}(\text{HQ})_2$ 涂层通过其自修复行为提供长期屏障,延缓腐蚀性物质的腐蚀攻击。一旦涂层出现腐蚀缺陷,释放出来的 Mg^{2+} 离子和8-羟基喹啉阴离子在缺陷上再结晶形成 $\text{Mg}(\text{HQ})_2$ 沉积物,从而有效地抑制了局部腐蚀的进一步发展。

自修复防腐涂层具有延长使用寿命和防止基材腐蚀的能力。Fan F等^[26]在镁合金(AZ31)上开发了一种具有快速自愈能力和改进的耐腐蚀性的涂层系统。涂层包括铈基转化层、氧化石墨烯层和支化聚乙烯胺/聚丙烯酸多层(PEI/PAA)。将GO作为缓蚀剂,并使用PEI/PAA多层膜为涂层系统提供自愈能力。电化学阻抗谱(EIS)表明涂层的耐腐蚀性能得到改善。涂层在有水的情况下也具有快速的自愈能力。

Chen C等^[27]通过静电自组装形成了氧化石墨烯和磷酸盐插层水滑石(PIH)。由于GO和水滑石的强阻隔性能的协同作用,GO对PIH的良好分散,由于 Cl^- 和 PO_4^{3-} 之间的可持续离子交换在金属/涂层界面形成磷酸盐膜,基于GO@PIH的WEC表现出优异的防腐能力,失效时间延长至30 d。当腐蚀性离子到达金属/涂层界面时,GO@PIH/WECs表现出自愈性能;这归因于从PIH纳米板释放出 PO_4^{3-} 。

羟基喹啉(HQ)在金属基材上的自愈行为方面

起着至关重要的作用。Soliman H 等^[28]在 AZ31 镁合金表面制备了具有修复性能的 GO 纳米颗粒增强 HQ 涂层,过程如图 4 所示。镁合金表面经过氧化或磷化处理后,涂层中 GO 片自由活性电荷基团的膨胀和混合能够引发自修复行为,减弱腐蚀对基体的损害。GO/HQ 沉积之前的表面处理对启动分子之

间的更多锚定键及加快划痕愈合起到至关重要的作用。沉积在氧化或磷化内层上的聚合 HQ-GO 杂化膜具有自愈功能和增强抗腐蚀性的作用。AZ31 未经表面预处理 GO/HQ 涂层性能效果不好,这证实了在前表面处理的重要作用。

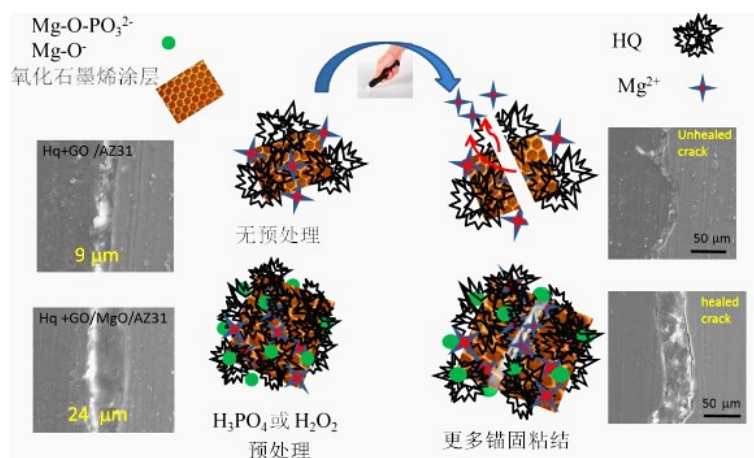


图 4 AZ31 表面处理(氧化或磷化)与未处理的 HQ+GO 的示意图^[28]

Fig. 4 A schematic of the HQ+GO deposited on non-treated compared to surface treated (oxidized or phosphatized) AZ31^[28]

综上所述,GO 嵌入对自愈现象的影响与使用氧化或磷化处理的镁合金的表面处理密切相关。自愈行为机制与它们的结构和组成密切相关。自愈行为与涂层的致密结构相结合,引入了更多的桥接—O—,可以增强原子之间的整合,阻碍电解质扩散的延长,进而克服腐蚀性离子的侵袭。

4 结语

利用石墨烯优异的性能实现涂料的多功能化仍是目前的研究热点。但还要进一步研究耐腐蚀/耐磨一体化石墨烯基涂层的构建及其防护性能的研究,提高多羟基涂层的亲水性,实现还原石墨烯氧化物片的有序排列和良好的界面结合,进一步增强涂层的阻隔能力。镁合金表面高效、长效的 GO 复合涂层的设计和开发仍然是巨大挑战。尤其是基于石墨烯或化学改性石墨烯材料的涂层体系仍有待进一步发展。未来的研究还应侧重于提高长期耐腐蚀性与疏水性,使用更环保的试剂,寻找更经济、更简单的生产路线,制备具有快速自愈能力和高耐腐蚀性的涂层系统。

参考文献

- [1] Shi D F, Pérez-Prado M T, Cepeda-Jiménez C M. Effect of solutes on strength and ductility of Mg alloys[J]. Acta Materialia, 2019, 180: 218-230.
- [2] Sun Y Q, Peng L J, Huang G J, et al. Effects of Mg addition on the microstructure and softening resistance of Cu-Cr alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 776: 139009.
- [3] Ayman E, Junko U, Katsuyoshi K. Application of rapid solidification powder metallurgy to the fabrication of high-strength, high-ductility Mg-Al-Zn-Ca-La alloy through hot extrusion[J]. Acta Material, 2011, 59: 273-282.
- [4] Chu J H, Tong L B, Jiang Z H, et al. A comparison study of Ce/La and Ca microalloying on the bio-corrosion behaviors of extruded Mg-Zn alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(4): 1269-1280.
- [5] Guo K W. A review of magnesium/magnesium alloys corrosion and its protection[J]. Recent Patents on Corrosion Science, 2010, 2: 13 - 21.
- [6] Ma K J, Mohannad M, Al Bosta S, et al. Preparation of self-lubricating composite coatings through a micro-arc plasma oxidation with graphite in electrolyte solution[J].

- Surface and Coatings Technology, 2014, 259: 318-324.
- [7] Askarnia R, Ghasemi B, Fardi S, et al. Improvement of tribological, mechanical and chemical properties of Mg alloy (AZ91D) by electrophoretic deposition of alumina/GO coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 403: 126410.
- [8] Zhang Y L, Chen F, Zhang Y, et al. Influence of graphene oxide additive on the tribological and electrochemical corrosion properties of a PEO coating prepared on AZ31 magnesium alloy[J]. Tribology International, 2020, 146: 106135.
- [9] Gnedenkova S V, Sinebryukhov S L, Mashtalyar D V, et al. Composite fluoropolymer coatings on Mg alloys formed by plasma electrolytic oxidation in combination with electrophoretic deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 283: 347-352.
- [10] Zhao J M, Xie X, Zhang C. Effect of the graphene oxide additive on the corrosion resistance of the plasma electrolytic oxidation coating of the AZ31 magnesium alloy[J]. Corrosion Science, 2017, 114: 146 - 155.
- [11] Han B J, Yang Y, Li J, et al. Effects of the graphene additive on the corrosion resistance of the plasma electrolytic oxidation (PEO) coating on the AZ91 magnesium alloy [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018, 13(9): 9166-9182.
- [12] Khiabani A B, Rahimi S, Yarmand B, et al. Electrophoretic deposition of graphene oxide on plasma electrolytic oxidized magnesium implants for bone tissue engineering applications[J]. Materials Today Proceedings, 2018, 5 (7): 15603-15612.
- [13] Tong L B, Zhang J B, Xu C, et al. Enhanced corrosion and wear resistances by graphene oxide coating on the surface of Mg-Zn-Ca alloy[J]. Carbon, 2016, 109: 340-351.
- [14] Nair R R, Wu H A, Jayaram P N, et al. Unimpeded permeation of water through helium-leak-tight graphene-based membranes[J]. Science, 2012, 335: 442-444.
- [15] 周星怡. 基于镁合金表面防腐耐磨一体化有机/无机复合涂层制备及其性能研究[D]. 常州: 常州大学, 2021.
- [16] Maurya R, Siddiqui A R, Katiyar P K, et al. Mechanical, tribological and anti-corrosive properties of polyaniline/graphene coated Mg-9Li-7Al-1Sn and Mg-9Li-5Al-3Sn-1Zn alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(8): 1767-1778.
- [17] 楚景慧. 镁合金表面石墨烯基涂层的仿生构筑及防护机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [18] 魏梦媛. 基于改性氧化石墨烯的疏水涂层制备及其性能研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018.
- [19] 赵碧芳. 镁合金表面多功能一体化涂层的构筑研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [20] Nine M J, Cole M A, Johnson L, et al. Robust superhydrophobic graphene-based composite coatings with self-cleaning and corrosion barrier properties[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(51): 28482-28493.
- [21] Ikhe A B, Kale A B, Jeong J, et al. Perfluorinated polysiloxane hybridized with graphene oxide for corrosion inhibition of AZ31 magnesium alloy[J]. Corrosion Science, 2016, 109: 238-245.
- [22] 陈宁宁, 王燕华, 钟莲, 等. 石墨烯/硬脂酸超疏水复合膜层的防腐性能[J]. 材料研究学报, 2017, 31(10): 751-754.
- [23] Yan Z, Jingwei T, Jing Z, et al. Thin nacre-biomimetic coating with super anticorrosion performance[J]. ACS Nano, 2018, 12(10): 10189-10200.
- [24] Li B F, Yin X G, Xue S Y, et al. Facile fabrication of graphene oxide and MOF-based superhydrophobic dual-layer coatings for enhanced corrosion protection on magnesium alloy[J]. Applied Surface Science. 2022, 580: 152305.
- [25] Zong Q, Wang L, Sun W, et al. Active deposition of bis (8-hydroxyquinoline) magnesium coating for enhanced corrosion resistance of AZ91D alloy[J]. Corrosion Science, 2014, 89: 127-136.
- [26] Fan F, Zhou C, Wang X, et al. Layer-by-layer assembly of a self-healing anticorrosion coating on magnesium alloys[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7 (49): 27271-27278.
- [27] Chen C, He Y, Xiao G, et al. Synergistic effect of graphene oxide@phosphate intercalated hydroxycalcite for improved anti-corrosion and self-healable protection of waterborne epoxy coating in salt environments[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(8): 2318-2326.
- [28] Soliman H, Qian J Y, Tang S, et al. Hydroxyquinoline/nano-graphene oxide composite coating of self-healing functionality on treated Mg alloys AZ31[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 385: 125395.