



镁合金防腐蚀技术的研究现状及未来发展方向

王敬丰¹, 覃彬², 吴夏¹, 潘复生¹, 汤爱涛¹

(1. 重庆大学国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400045; 2. 重庆大学化学与化工学院, 重庆 400045)

[摘要] 镁合金由于具有优良的性能而在电子、汽车和航空航天工业得到广泛应用,但其较差的耐腐蚀性能又使其应用受到限制,因此可通过净化合金成分、改变微观结构和采用适当的表面处理方法来改善镁合金的耐腐蚀性能。主要介绍了当前镁合金防腐蚀技术的国内外研究现状,对这些技术进行了评价并指出镁合金各种表面处理技术的优缺点及其未来发展方向。

[关键词] 镁合金; 腐蚀; 表面处理; 耐蚀性; 国内外发展概况

[中图分类号] TQ174.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2008)05-0071-04

Current Status and Development of Research on Anti-corrosion Technology for Magnesium Alloys

WANG Jing-feng¹, QIN Bin², WU Xia¹, PAN Fu-sheng¹, TANG Ai-tao¹

(1. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

[Abstract] Magnesium alloys, owing to their excellent combination of properties, have found numerous applications in the electronic, automobile and aerospace industries. However, these alloys are also restricted because of their corrosion resistance. So, their corrosion resistance may be improved by some kinds of methods, such as scavenging alloys, improving microstructure and right surface treatment. The present anti-corrosion technology for magnesium alloys were introduced and evaluated. The characteristic and the developing direction of surface treatment technologies for magnesium alloys were discussed.

[Key words] Magnesium alloy; Corrosion; Surface treatment; Corrosion resistance; Current status at home and abroad

0 引言

由于镁合金具有质轻、比强度高、阻尼减振性好、电磁屏蔽能力强、导电导热性好、且资源丰富易于回收等特点,近年来引起了世界各国的高度重视,美国、日本、德国等发达国家已将镁合金列为 21 世纪研究与开发的重点项目,加强了镁合金在汽车、计算机、通讯、航空航天和国防军工等领域的应用开发研究,镁合金已成为世界最令人瞩目的绿色环保工程材料,其消费量呈持续高速增长。然而,镁合金同时也存在耐蚀性差、耐磨性差、易燃、室温塑性变形困难等缺点。尤其是镁合金的耐蚀性差,已成为制约其发挥性能优势的主要因素之一。这是因为镁的标准电极电位是所有结构金属中最低的,而且镁的氧化膜疏松多孔,对基体没有多大的保护能力,不能适用于大多数腐蚀性环境^[1-5]。因此,镁合金防腐蚀技术现已成为当前镁合金研究

开发中急需解决的关键技术之一。

本文主要介绍当前镁合金防腐蚀技术的研究现状,对这些技术进行了评价,并指出其未来发展方向。

1 国内外研究现状

当前常用的提高镁合金耐蚀性的方法主要有改变镁合金基体的合金成分、改善镁合金的微观结构以及表面处理技术等三类,其中表面处理技术是目前镁合金防腐蚀最常用的技术。

1.1 净化合金成分或开发新合金

使镁合金耐腐蚀性能下降的主要杂质元素有 Fe、Ni、Cu 和 Co 等,控制这些元素的含量是解决镁合金腐蚀的有效途径之一。目前,开发高纯度镁合金已成为欧美汽车工业增加镁用量的主要途径。开发新的合金种类,也是解决传统镁合金腐蚀问题的有效途径,如添加稀土或混合稀土能使镁合金在含氯离子的水溶液中具有优良的耐蚀性^[6]。

1.2 改善镁合金的微观结构

合金成分、加工处理方式都会影响到镁合金的腐蚀性能,如 AZ91D 压铸镁合金的耐腐蚀要高于铸态 AZ91D 镁合金,其主要

[收稿日期] 2008-06-23

[基金项目] 重庆市科委自然科学基金项目(CSTS2006BB4199);重庆市科技攻关项目(CSTC 2006AA4012)

[作者简介] 王敬丰(1971-),男,湖北宜昌人,博士,副教授,主要从事镁合金及其腐蚀防护技术的研究开发。

原因是压铸合金的晶粒和 β 相更细,使得耐蚀性得到提高^[7]。又如 Mathieu S 等^[8]的研究发现,半固态铸造的 AZ91D 镁合金的耐腐蚀性要优于高压压铸镁合金,其原因是前者微观结构中 α 相和 β 相(分别为腐蚀电偶的阳极和阴极)的面积比及 α 、 β 相中 Al 含量的差别都比后者小。

从理想状态来说,具有高耐腐蚀性的镁合金体系应该是那些单相、化学成分均一,并且含有足够的致钝合金元素的体系。通常,非晶态的合金能够满足这些要求。1988 年以来研制的 Mg-Tm-Ln(Tm = Ni、Cu 或 Zn, Ln = Y、Ce 或 Nd)非晶态合金由于其良好的玻璃形成能力和优异的力学性能而受到关注^[9-12]。对它们的耐蚀性研究发现,其耐蚀性远高于纯镁和多相晶态镁合金。晶态镁合金的腐蚀速率高、钝化行为差主要归因于结构和化学上的不均匀,造成不同腐蚀相之间的电偶腐蚀。这预示着非晶态镁合金可能作为一种新的耐蚀镁合金材料^[13-14]。

快速凝固处理是先进金属材料的发展方向之一,通过快速凝固处理也可使镁合金获得优良的耐蚀性能。其原因有 2 个方面:其一是快速凝固合金的成分和组织均匀,能抑制局部腐蚀;其二是快速凝固技术能提高合金的固溶度,使有害杂质固溶于合金基体中,不会形成有害析出相,从而减轻了腐蚀。更为重要的是由于快速凝固处理可以形成具有“自愈”能力的更具保护性的非晶态氧化膜。试验表明快速凝固工艺可以将镁合金的腐蚀速率降低至少 2 个数量级,并且点蚀电位大大提高^[15-16]。

1.3 表面处理技术

1.3.1 化学转化膜

化学转化膜法也称为化学氧化法,其原理是使金属工件与处理液发生化学反应,生成一层保护性钝化膜。这种工艺需用的设备简单、投资少,处理成本低,适合于量少和使用环境较好且对工件表面质量要求不高的镁合金件^[17-19]。另外,化学氧化法适合镁合金零部件的原位修复,并且化学转化膜可提供较好的涂装基底。

传统的化学转化膜法是铬酸盐处理,但该法的致命弱点是处理液中含有毒性高易导致癌的六价铬。目前研究的热点为无铬转化方法,主要有磷酸盐处理^[20]、锰盐-磷酸盐处理^[21]、硅酸盐处理、锡酸盐处理^[19]、钼酸盐处理^[22]、稀土金属盐、有机金属化合物处理等。

1.3.2 阳极氧化

阳极氧化是镁合金最基本也是应用很广的表面处理方法,所得膜比化学转化膜厚而坚固,具有防护、装饰和提供优良的油漆及涂料基底等多种功能,可作为中等腐蚀气氛中的保护层。阳极氧化膜的耐蚀性优于化学转化膜的耐蚀性,但由于阳极氧化膜多孔,必须采用封闭处理,否则其耐蚀性还不如镁合金化学转化膜的耐蚀性。应用最广的阳极氧化工艺是美国的 DOW17 和 HAE 工艺^[23]。20 世纪 80 年代以来,随着镁合金压铸业的迅速发展,一些能得到高质量表面膜、符合环保要求的镁合金阳极氧化新工艺被开发出来,如 Tagnite 工艺^[24]、德国的 Magoxid-Coat 法^[25]、日本的 UBE5 工艺^[9]和新西兰的 Anomag 法^[26]。

1.3.3 微弧氧化处理

微弧氧化法为 A J Zolulin 等人^[27]研制的一种等离子体微弧阳极氧化法,是近年来兴起的一种表面新技术。该法突破了传统阳极氧化技术工作电压的限制,将工作区域引到高压放电

区,利用微弧区瞬间高温烧结作用直接在铝、镁、钛等非铁族金属表面原位生长陶瓷膜。与阳极氧化工艺相比,微弧氧化在阳极区产生等离子微弧放电,火花存在时间为 1~2s,火花放电使阳极表面局部温度升高,使微区温度高于 1 000℃。从而使阳极氧化物熔覆在金属表面,形成陶瓷质的阳极氧化膜,这种膜的孔隙率大大降低,大大提高了阳极氧化膜的硬度和致密性。火花产生的原因是由于外加电压大于已沉积层的击穿电压。氧化膜厚度随电流密度和处理时间增加而增厚,一般膜厚度在 2.5~30.0 μm 。较普通阳极氧化耐蚀性及耐磨性有较大提高。这种方法具有氧化膜中微裂纹自愈合的特点,可进一步提高镁合金的耐蚀性、耐磨性,成为镁合金阳极氧化的发展方向之一。

1.3.4 表面渗层

此法主要包括渗氮和渗铝两种处理工艺。渗氮是通过将氮气解离,用高电压加速装置,把氮离子植入镁合金的表面。Nakatsugawa I 等人^[28]对镁合金 AZ91D 进行离子渗氮的研究表明氮离子的渗入大大提高了镁合金的抗蚀性。众所周知,铝合金表面要比镁合金表面容易处理,铝的氧化膜有较好的保护作用,而且 Al_2O_3 有高的硬度,提高了铝合金的耐磨性。因此,镁合金表面渗铝也能提高其耐蚀、耐磨性。I Shigematsu 和 M Nakamura^[29]等人对镁合金表面进行了渗铝研究,采用固体粉末渗铝,将镁件埋入铝粉,通入纯度大于 99.995% 的氩气,在 450℃ 下加热 1h,然后在炉内冷至 100℃ 以下,可得 750 μm 的 Al_2Mg 中间过渡层。铝在表面氧化为 Al_2O_3 分散在镁表面,提高了镁件的表面硬度和耐腐蚀性能。由 X 射线分析可知,表面层主要由 α 相 Mg 和 β 相($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$,典型的金属间化合物)组成。在渗铝层的硬度为 HV140~160,比其基体的硬度 HV60 有很大的提高。

1.3.5 电镀和化学镀

镁合金化学活性高,属于较难进行电镀或化学镀的金属,在进行电镀或化学镀之前必须进行预处理^[30],电镀层可选用 Cu 或 $\text{Ni}_2\text{Cr}_2\text{Cu}$ 层^[31]。化学镀膜通常用化学镀 Ni-P 合金^[14,32]。化学镀镍磷镀层厚度均匀,硬度高,耐磨性好,有良好的耐蚀性,有很好的可焊性和可抛光性。镁合金表面化学镀或电镀工艺与其它基底金属如钢铁、铝及铝合金的相比要困难,这是因为:1) 镁很活泼,氧化膜在合金表面迅速生成,妨碍了沉积的金属与基底形成金属-金属键;2) 镁在普通镀液中与其它金属离子置换反应很激烈,而这一置换层通常是松散无结合力;3) 基体中的第二相有不同的电化学特性,可能导致沉积不均匀;4) 由于难以得到质量满意的镁合金铸件,基底表面的孔隙和夹杂可能成为镀层孔隙的来源。因为镀层的标准电位远大于镁合金基底,所以镀层必须保证无孔,否则任一通孔都会由于大的腐蚀电流而产生严重的电化学腐蚀,这可能比不镀的情况更糟。

1.3.6 热喷涂

热喷涂技术是一种重要的表面工程技术,自 1982 年由德国人发明以来,近 20 年发展迅速,相继出现了超音速火焰喷涂(HVOF)、高速电弧喷涂(HVAS)、气体爆炸式喷涂和低压等离子弧喷涂等。热喷涂通过火焰、电弧或等离子体等热源,将某种线状或粉状的材料加热至熔化或半熔化状态并加速形成高速熔滴,喷向基体在其上形成涂层,可以对材料表面进行强化,提高其耐磨和耐腐蚀等性能^[6]。

在镁合金表面喷涂 Al 并加热扩散,使表面涂层的 Al 和次

表面层中的 Mg 能相互扩散,形成 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$,同时消除了基体与喷涂层间的孔隙,达到了封闭涂层的效果,涂层熔合致密,可有效地提高镁合金表面的耐腐蚀性能^[33-34]。

可在镁合金表面喷涂纳米材料涂层。它可以是由单一纳米材料组成的涂层材料,也可以是由 2 种或多种纳米材料组成的复合纳米体系。日本 Mazda 汽车公司利用热喷涂技术组装 2618 涂层时就获得了 50nm 的粒状 S- Al_2CuMg 和针状 S'- Al_2CuMg 纳米相,该项技术已在发动机气缸衬里等复杂形状的工件上得到应用。美国 USN 公司用等离子方法获得了纳米结构相的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层,涂层致密度为 95%~98%,结合强度比传统喷涂粉末层高 3 倍,显微硬度明显增强。总之,从已有的研究结果看,用热喷涂技术制备纳米结构涂层无论其结构怎样变化,与传统涂层相比,纳米结构涂层在强度、韧度、抗蚀、耐磨、抗热疲劳等方面均有显著提高。

1.3.7 激光表面处理

激光处理即利用激光束对镁合金表面进行辐射处理,使表面在高能光束的作用下熔化后,再凝固。用激光处理镁合金可提高镁合金的表面性能。目前已经发展了许多激光处理改性材料的手段,如表面熔凝、涂覆、合金化、激光辅助化学物理气相沉积和焊接等。用于镁合金表面改性的常用技术则有激光表面热处理和激光表面合金化。经激光处理的镁合金在表面形成的“波峰”和“波谷”形貌,这些形貌的形成与激光处理的重叠处理有关,还与激光的能量密度有关。处理过的合金显微硬度在由表向里的前 30 μm 是比较低的,随着深度的增加,硬度上升。激光处理使合金表面形成压应力,可以提高抗疲劳腐蚀能力,并不能显著提高抗蚀性。

1.3.8 气相沉积

气相沉积有物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)以及离子束辅助气相沉积等方法。气相沉积直接从气相获得涂层,因此该方法对环境的污染较少,但气相沉积方法比较昂贵。

PVD 由来已久,应用也很广泛,将之运用于镁合金表面却是近十年的事情。F Stippich 等人使用 15keV 的 Ar^+ 束在纯 Mg、AZ91 表面沉积 MgO 膜,膜层可达 1 μm 厚,且克服了自然氧化膜的多孔性缺陷,该结晶状低孔性膜可提供较好的耐蚀性。通过控制离子束参数和添加其他合金元素还可得到高结晶度、高强度的合金表面^[35]。

CVD 是借助空间气相化学反应在基体表面上沉积固态薄膜的工艺。德国有人采用 CVD 法在镁及镁合金的表面沉积铝保护层,并比较了不同的催化剂在沉积中的作用,结果表明 NH_4Cl 和碘催化效果最好,所获膜层具有良好的防腐性能。意大利也有人采用等离子体辅助化学气相沉积(PECVD)的方法在镁合金的表面获得了含硅的有机化合物耐腐蚀涂层,所得的表面层厚度仅有 1.3 μm ,但表现出良好的耐腐蚀性能。

1.3.9 有机物涂层及其他

大多数镁合金件在表面化学氧化或阳极氧化处理之后,都要进行有机物涂装处理,以进一步提高耐蚀性^[36-37]。有机物涂层有多种,如油或油脂就可短时间保护镁合金,油漆和蜡也是常用的防蚀涂层。环氧树脂涂层因其粘附力强、不浸润水、强度高而被广泛应用。其处理方法是先将工件加热到 200~220 $^{\circ}\text{C}$,浸入树脂溶液。除去溶液后滴干,空气干燥以蒸发溶剂,再在 200~

220 $^{\circ}\text{C}$ 烘烤以使树脂固化。可重复 1~2 次以得到所需的涂层厚度,通常是 2.5 μm 。油漆是在各种表面处理完后的最后工序,最好先用铬酸盐防蚀底漆打底,再用高质量的表面涂层以达到美观的效果。此外,还有搪瓷处理,这种处理适用于那些固相线温度不太低的合金。在涂玻璃料之前需将工件浸入铬酸盐溶液进行表面准备。镁合金表面机械喷丸处理,可改变表面应力状态,使表面成为压应力,有利于提高抗疲劳和抗疲劳腐蚀性能。

2 未来发展方向

在上述的三类提高镁合金的方法中,前两类方法主要是提高整体部件的耐腐蚀性,而后一类方法是通过不同方法在基体表面形成一种很薄的功能层,以此来大幅度提高镁合金的耐腐蚀性能,其成本低廉、工艺简单,是当前最主要的镁合金防腐技术。

镁合金表面防护性涂层各有其优缺点。化学转化膜层的投资少,目前已开发出多种代铬转化涂层,但镁合金表面化学特性的不均匀性是形成均匀、无孔的转化膜层的最大困难。另外,转化膜的耐腐蚀性能和耐摩擦性能都不足以使其在恶劣条件下单独使用,因而一般被用作有机涂层的前处理。微弧氧化技术工艺简单、清洁无污染、膜层均匀质硬、综合性能高,是镁合金表面处理的重点方向之一。但目前对微弧氧化机理认识不够成熟,强化膜厚度有限,故有待进一步研究发展。镁合金表面电镀层或者化学镀层的成本较低,但存在环境污染、耐腐蚀性能不高等问题。激光熔覆技术在材料表面改性和提高材料综合力学性能方面效果显著,且对环境污染小得多,多层熔覆不但能增加涂层厚度,而且细化了晶粒,大幅度提高了耐磨性和耐蚀性,但在镁合金表面进行熔覆的研究还尚属鲜见,有待于进一步开展研究。镁合金表面渗层处理也是对环境无害的绿色工业,如能开发实际应用的工艺,表面渗层处理法尤其是真空氮离子植入,明显改善耐蚀和耐磨性,并可处理形状复杂的工件,将会是镁合金表面处理很有前途的发展方向之一。用热喷涂法对镁合金表面处理以提高其硬度、耐磨性和耐热性方面的研究报道很少,因此研究改善镁合金的表面强度,提高其耐磨和耐蚀等综合性能的涂层具有实际意义。喷涂具有隔热性能的热障涂层防止过热,可提高镁合金的高温抗氧化性能,也将会是镁合金表面处理的新研究领域。

由此可见,可用于在镁及其合金表面形成防护涂层工艺虽多,但缺乏能在恶劣环境条件下提供足够防护性能的单层膜层,至今为止,世界各国还没有能开发出一种能抵抗恶劣环境的单层的防护层能适用于镁合金基体,所以采取多层复合叠加(化学转化膜层、电化学阳极化膜层+多层油漆、树脂等)进行镁合金材料防腐处理也是一种办法,但这正是镁合金在汽车、航空航天、电子等工业中广泛应用的一大障碍,国内外广大学者仍需要对此进行更深入地研究。

[参考文献]

- [1] 朱绒霞,马康民,徐可为.沿海某型飞机镁合金零部件腐蚀与表面防护[J].轻金属,2004,308(6):39-41
- [2] 陈晓阳,曾大本.镁合金制件的应用及发展前景[J].铸造,1999,(11):53-55
- [3] 刘正,王越,王中光,等.镁基轻质材料的研究与应用[J].材料研

- 究学报, 2000, 14(5): 449-456
- [4] 刘长瑞, 王伯建, 胡裕邦. 镁合金材料在电子行业的开发应用前景[J]. 铝镁通讯, 2001, (2): 53-55
- [5] 张清, 李全安, 文九巴, 等. 稀土在镁合金腐蚀防护中的应用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 27(2): 41-42
- [6] 席晓光. AZ91D 镁合金脉冲阳极氧化处理及腐蚀性能评价[J]. 表面技术, 2007, 36(1): 8-10
- [7] Wang H Y, Jiang Q L, Li X L, et al. Effect of Al content on the self-propagating high-temperature synthesis reaction of Al-Ti-C system in the model magnesium [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 36(6): 9-12
- [8] Mathieu S, Rapin C, Hazan J, et al. Corrosion behaviour of high pressure die-cast and semi-solid cast AZ91D alloys [J]. Corrosion Science, 2002, 44: 2 737-2 756
- [9] Xi X K, Zhao D Q, Pan M X, et al. Highly processable $Mg_{65}Cu_{25}Th_{10}$ bulk metallic glass [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2004, 34(4): 189-192
- [10] Tan Chaogui, Jiang Wenjuan, Wu Xueqing, et al. Effect of crystallization on corrosion resistance of $Cu_{52.5}Ti_{30}Zr_{11}Sn_{6}$ bulk amorphous alloy [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2007, 17(7): 51-54
- [11] Yamamoto T, Zhang T, Moue A. Formation, thermal stability, mechanical properties and corrosion resistance of Cu-Zr-Ti-Ni-Nb bulk glassy alloys [J]. Mater Trans, 2003, 44: 1 147-1 152
- [12] Qin F X, Bae G T, Dan Z H, et al. Corrosion behavior of the $Mg_{65}Cu_{25}Gd_{10}$ bulk amorphous alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 44(9): 636-639
- [13] Gebert A, Haehnel V, Park E S, et al. Corrosion behaviour of $Mg_{65}Cu_{7.5}Ni_{7.5}Ag_5Zn_5Gd_5Y_5$ bulk metallic glass in aqueous environments [J]. Electrochimica Acta, 2008, 53: 3 403-3 411
- [14] 姚军, 孙广平, 贾树盛. 镁合金表面处理的研究进展[J]. 焊接技术, 2004, 36(60): 4-6
- [15] Qin F X, Bae G T, Dan Z H, et al. Corrosion behavior of the $Mg_{65}Cu_{25}Gd_{10}$ bulk amorphous alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 44(9): 636-639
- [16] Subba Rao R V, Wol U, Baunack S, et al. Corrosion behaviour of the amorphous $Mg_{65}Y_{10}Cu_{15}Ag_{10}$ alloy [J]. Corrosion Science, 2003, 45: 817-832
- [17] 贾志华, 王玉平. 镁及镁合金化学镀 Ni_2Cu_2P 三元合金工艺[J]. 电镀与涂饰, 2004, 23(3): 6-8
- [18] 边风刚, 李国禄, 刘金海, 等. 镁合金表面处理的发展现状[J]. 材料保护, 2002, 35(3): 1-2
- [19] Umebara H, Takaya M, Terauch S. Permanganate conversion coatings for magnesium alloys [J]. Mater Sci Forum, 2003, 419-422: 883-888
- [20] Gonzalez. M A, Nunez C A-Lopez. A Nonchromae conversion coating for magnesium alloys and magnesium-based metal matrix composites [J]. Corrosion Science, 1995, 37(11): 1 736-1 772
- [21] 钱建刚, 李获, 郭宝兰. 镁合金的化学转化膜[J]. 材料保护, 2002, 35(3): 5-6
- [22] 吴敏, 吕柏林, 梁平. 镁及其合金表面处理研究现状[J]. 表面技术, 2005, 34(5): 13-17
- [23] Barton, Tomos F. Anodization of magnesium based alloys [P]. US Pat: 5 792 335, 1998-08-11
- [24] Von C, Hilmar. Method and device for forming a layer by plasma-chemical process [P]. US Pat: 4 915 978, 1990-04-10
- [25] Bartak D E. Hard anodic for magnesium alloys [P]. US Pat: 540 664, 1997-04-08
- [26] Unigovski Y B, Gutman E M. Surface morphology of a die-cast Mg alloy [J]. Applied Surface Science, 1999, 153(1): 47-52
- [27] Zozulin A J, Bartak D E. Anodized coating for magnesium alloys [J]. Met. Finish, 1994, 92(3): 39-44
- [28] Nakatsugawa I. Characterization and performance of laser melted AZ91D and AM60B [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 299(1): 38-45
- [29] Shigematsu I, Nakamura M, Siatou N, et al. Surface treatment of AZ91D magnesium alloy by aluminum diffusion coating [J]. J. Mater. Sci. Lett., 2000, 19: 473-475
- [30] 马壮, 孙方红, 胡文全. 镁合金化学镀 Ni_2P 的工艺研究[J]. 表面技术, 2005, 34(6): 45-48
- [31] Sharma A K. Gold plating on magnesium alloys for space application [J]. Metal Finishing, 1993, 91(3): 34-40
- [32] 邓妹皓, 易丹青, 毛俊华, 等. 镁及镁合金环保型阳极氧化工艺研究[J]. 电镀与涂饰, 2005, 24(1): 15-19
- [33] 龚巍巍, 张乐, 吴晓玲, 等. 镁合金等离子体微弧氧化过程控制的研究[J]. 材料热处理学报, 2005, 26(1): 77-80
- [34] Sebralla L, Adler H J, Bram C. Method for treating metallic surfaces [P]. CA Pat: 2 275 729, 1998-03-04
- [35] Stippich F, Vera E, Wolf G K, et al. Enhanced corrosion protection of magnesium oxide coatings on magnesium deposited by ion beam-assisted evaporation [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 103/104: 29-35
- [36] 王立世, 蔡启舟, 魏伯康, 等. 镁合金双脉冲微弧氧化表面膜层的形成及结构分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(3): 187-190
- [37] A lex J. Lin Zozu, Duane E Bartak. Anodized coatings for magnesium alloys [J]. Metal Finishing, 1994, 92(3): 39-40

(上接第6页)

该项研究成果仅是初步的, 还需进一步试验研究, 解决电镀过程中的 WC 纳米颗粒团聚问题及纳米复合涂层的抗磨损和抗磨蚀性能测试中存在的各种问题。

[参 考 文 献]

- [1] 郭鹤桐, 张三元. 复合电镀技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 553
- [2] 王吉会, 尹玫. (Ni-P)-WC 纳米微粒复合电镀的研究[J]. 电镀与精饰, 2005, 27(1): 1-4
- [3] Xu B S. Electrodepositing nickel silica nano-composites coatings [J]. Electrochemistry Communications, 2005, 7: 572-575
- [4] Benea L. Wear corrosion properties of nano-structured SiC-nickel composite coatings obtained by electroplating [J]. Wear, 2002, 249: 995-1 003
- [5] 彭元芳, 赵国鹏, 刘建平, 等. Ni-Al₂O₃ 纳米复合电镀最佳工艺条件的确定[J]. 表面技术, 2004, 33(1): 53-55
- [6] 朱龙章, 张元庆, 陈宇飞, 等. 电沉积镍-钴-碳化钨复合镀层的研究[J]. 电镀与涂饰, 1999, 18(1): 4-7
- [7] 李志林, 刘建军, 关海鹰. Ni-纳米 TiO₂ 复合电镀层的制备与性能研究[J]. 材料保护, 2006, 39(7): 20-22, 25