

锌镍合金镀工艺优化及镀层耐腐蚀性的研究

陈伟, 唐凌燕, 周英, 陈刚

(重庆望江工业有限公司, 重庆 400071)

摘要: **目的** 研究锌镍合金镀层的耐腐蚀性能。**方法** 通过正交试验法,对锌镍合金电镀工艺进行优化,获得镀液配方。通过中性盐雾试验评判优化后的锌镍合金镀层的耐腐蚀性能,并与镀锌层和镀镉层进行对比。分析主盐、络合剂、pH 值、电流密度、温度等对镀层耐腐蚀性的影响。**结果** 最优配方为:氧化锌 6 ~ 14 g/L,硫酸镍 20 ~ 30 g/L,氢氧化钠 100 ~ 140 g/L,光亮剂 4 ~ 6 g/L,络合剂 50 ~ 70 g/L。该配方获得的锌镍合金镀层在中性盐雾实验中,出白锈的时间可以达到 720 h 以上。**结论** 锌镍合金镀层的耐腐蚀性优良,优于镀锌层和镀镉层。

关键词: 电镀; 锌镍合金; 耐腐蚀性; 中性盐雾试验

中图分类号: TQ153.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)02-0110-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.02.021

Research on Process Optimization of Zn-Ni Alloy Plating and Coating Corrosion Resistance

CHEN Wei, TANG Ling-yan, ZHOU Ying, CHEN Gang

(Chongqing Wangjiang Industry Co. Ltd, Chongqing 400071, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the corrosion resistance of Zn-Ni alloy coating. **Methods** By orthogonal test method, the Zn-Ni alloy electroplating technology was optimized, and the plating solution formula was obtained. The corrosion resistance of the optimized Zn-Ni alloy plating was evaluated by neutral salt spray test, and compared to those of the galvanized layer and cadmium plating layer. The influence of the main salt, complexing agent, pH value, current density and temperature on the coating corrosion resistance was analyzed. **Results** The optimal formula was: zinc oxide 6 ~ 14 g/L, nickel sulfate 20 ~ 30 g/L, sodium hydroxide 100 ~ 140 g/L, brightener 4 ~ 6 g/L, and complexing agent 50 ~ 70 g/L. The Zn-Ni alloy coating obtained using this formula had a white rust occurrence time of more than 720 hours in the neutral salt spray test. **Conclusion** The Zn-Ni alloy coating had excellent corrosion resistance, superior to those of zinc and cadmium plating layer.

KEY WORDS: electroplate; zing-nickel alloy; corrosion resistance; neutral salt spray test

现代社会,钢铁在国民经济的各个产业,如房地产、制造业、军工,都发挥着及其重要的作用,在人们的生活中占有越来越重要的地位^[1]。钢铁的腐蚀问题非常突出,对经济的稳定发展、人们的日常生活和

收稿日期: 2014-09-20; 修订日期: 2014-12-20

Received : 2014-09-20; Revised : 2014-12-20

基金项目: 国防基础科研基金项目(C102012C003)

Fund: Supported by the Base of National Defense Scientific Research Fund(C102012C003)

作者简介: 陈伟(1975—),男,重庆人,高级工程师,主要研究方向为电镀、表面处理与涂装。

Biography: CHEN Wei (1975—), Male, from Chongqing, Senior engineer, Research focus: electroplating and surface treatment and painting.

环境带来了巨大危害。电镀作为加强钢铁耐腐蚀性能的一种方法,得到了广泛应用。锌镍合金镀是一种新兴的电镀工艺,由于镀层耐腐蚀性优良,因而在提高钢铁的防腐蚀性方面发挥着越来越重要的作用。

锌和镍对钢铁都有防护作用。锌的标准电极电位比铁负,属于阳极性镀层;镍的标准电极电位比铁正,属阴极性镀层。当形成 Zn-Ni 合金镀层时,镀层的电位随含镍量的变化而变化。当镍质量分数为 7% ~ 18% 时,Zn-Ni 合金镀层的电位与 Fe 接近,但仍为阳极镀层^[2],此时 Zn-Ni 合金镀层具有以下特性:1) 耐腐蚀性高,比镀锌层高 3 倍以上,经彩色或黑色钝化后,耐蚀性会大大提高;2) 几乎无氢脆;3) 与基体结合牢固,并有良好的可焊性;4) 镀液成分简单,易于维护^[3]。

目前,电镀 Zn-Ni 合金多用于汽车钢板,以提高车体的防护性,延长使用寿命,同时可使汽车轻量化,从而节省能源。随着科技的发展,电镀 Zn-Ni 合金已经在航空、航天、轻工及家电领域得到应用。我公司目前产品上所使用的耐腐蚀镀层绝大多数仍为常规镀锌层和镀镉层。镀锌主要用于在陆地性气候中服役的产品上;镀镉主要用于在海洋性气候中服役的产品上,特别是标准件和紧固件,目前只能用镀镉层作为防护层^[4-5]。常规镀锌、镀镉存在以下缺点:1) 耐腐蚀能力不强,一般镀锌层和镀镉层的耐盐雾试验时间为 144 h 左右;2) 后处理常采用 Cr⁶⁺钝化,Cr⁶⁺是具有严重污染性的重金属离子,近年来,环保法规中对其使用的限制越来越大;3) 镉是一种毒性很大的金属,饮用含镉超标的水,会使人 and 动物产生骨痛病,继而发生骨质疏松、脆断和肌体萎缩,也叫“镉脆”,因此,国家已经明令禁止镀镉。为此,寻找一种符合环保和职业卫生健康且耐腐蚀性能优良的镀层迫在眉睫。鉴于 Zn-Ni 合金镀层在陆地和海洋气候下的优良性能,文中通过正交试验法获得优化的 Zn-Ni 合金电镀工艺,对优化工艺制备的锌镍合金镀层进行耐腐蚀性能评价^[6],并与镀锌层、镀镉层进行对比,对影响锌镍合金镀层耐腐蚀性的因素进行了分析,以期对锌镍合金电镀工艺替代镀锌、镀镉工艺提供参考。

1 实验

1.1 正交试验优化 Zn-Ni 合金电镀工艺

锌镍合金电镀工艺分为酸性和碱性两种^[7],前期

对两种工艺进行了初步研究,最后选取了比较适合我公司的碱性锌镍合金电镀工艺。

选择氧化锌浓度、硫酸镍浓度、氢氧化钠浓度、光亮剂浓度、络合剂浓度、电流密度为因素,按照 6 因素 5 水平 L₂₅(5⁶) 设计正交试验,见表 1 和表 2。

表 1 因素水平表
Tab.1 Factors and levels

水 平	氧化锌/ (g·L ⁻¹)	硫酸镍/ (g·L ⁻¹)	氢氧化钠 /(g·L ⁻¹)	光亮剂/ (g·L ⁻¹)	络合剂/ (g·L ⁻¹)	电流密度 /(A·dm ⁻²)
1	2	15	80	3	40	1
2	6	20	100	4	50	2
3	10	25	120	5	60	3
4	14	30	140	6	70	4
5	18	35	160	7	80	5

表 2 正交实验设计
Tab.2 Orthogonal experimental design

序 号	水平					
	氧化 锌	硫酸 镍	氢氧 化钠	光亮 剂	络合 剂	电流 密度
1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5
6	1	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	3	3	4	5	1	2
9	4	4	5	1	2	3
10	5	5	1	2	3	4
11	1	1	3	5	2	4
12	2	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1
14	4	4	1	3	5	2
15	5	5	2	4	1	3
16	1	1	4	2	5	3
17	2	2	5	3	1	4
18	3	3	1	4	2	5
19	4	4	2	5	3	1
20	5	5	3	1	4	2
21	1	1	5	4	3	2
22	2	2	1	5	4	3
23	3	3	2	1	5	4
24	4	4	3	2	1	5
25	5	5	4	3	2	1

镀层附着力是衡量镀层质量的重要指标,因此选取镀层附着力为判定依据。附着力测试采用 GB/T 5270—85《金属基体上的金属覆盖层(电沉积层和化

学沉积层)附着强度试验方法》中的 1.8 条——划线、划格试验:用一刃口磨成 30°锐角的硬质钢划刀,在试样上划几条间隔为 1 mm 的平行线,然后再 90°翻转划几条间隔为 1 mm 的平行线,互相相交,划线时,应施以足够的压力,使划刀一次就能划破覆盖层到达基体金属,然后观察格子内的覆盖层是否从基体上剥落或剥落面积的多少。正交实验的结果见表 3。

表 3 正交实验结果

Tab.3 Orthogonal experimental results

序号	附着力	序号	附着力	序号	附着力
1	严重剥落	10	严重剥落	19	未剥落
2	未剥落	11	轻微剥落	20	轻微剥落
3	未剥落	12	轻微剥落	21	未剥落
4	未剥落	13	未剥落	22	轻微剥落
5	轻微剥落	14	轻微剥落	23	轻微剥落
6	轻微剥落	15	严重剥落	24	轻微剥落
7	轻微剥落	16	未剥落	25	轻微剥落
8	严重剥落	17	轻微剥落		
9	未剥落	18	未剥落		

根据正交试验结果确定最优工艺为:氧化锌 6 ~ 14 g/L,硫酸镍 20 ~ 30 g/L,氢氧化钠 100 ~ 140 g/L,光亮剂 4 ~ 6 g/L,络合剂 50 ~ 70 g/L,电流密度 2 ~ 4 A/dm²。按照该优化工艺参数进行实验,所得样件的镀层附着力良好,未出现镀层剥落的现象。

1.2 Zn-Ni 合金镀层的表征及耐蚀性分析

基材为 150 mm×60 mm×10 mm 的冷轧 40Cr 钢板。按照优化的锌镍电镀配方配制镀液,以阳极为镍板,分别电镀 20,30,60,90 min,电镀完成后进行钝化,获得锌镍合金电镀试样。采用传统镀锌、镀镉配方电镀 30 min,并进行钝化,获得镀锌和镀镉试样。三种试样的镀层厚度均为 10 μm 以上。

采用 S-550 扫描电镜和 AES-430S 俄歇电子能谱对镀层微观组织形貌及成分进行分析测试。

按照 GB/T 10125—1997《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》^[8] 中的中性盐雾 (NSS) 试验要求,判定镀层的耐蚀性。喷雾介质采用 5% (质量分数) NaCl 溶液,其 pH 值为 7,试验箱温度为 35 ~ 35.6 ℃,溶液沉降量为 1.6 mL/(80 cm² · h)。试样放置于与垂线呈 25°的样架上,采用连续喷雾方式。试样经 2,6,16,24,48,96,120,240,480,720,960,1000 h 中性盐雾试验后,进行外观检查。

2 结果与讨论

2.1 锌镍合金镀层的耐腐蚀性

经过 NSS 试验,几种镀层试样出现白锈和红锈的时间见表 4。镀锌层和镀镉层均在 96 h 出现白锈,而锌镍合金镀层在 720 h 出现白锈,且 1000 h 以内未出现红锈。由此可见,锌镍合金镀层的耐腐蚀性远远优于同等厚度的镀锌层和镀镉层。此外,镀层的厚度也是关系到镀层耐腐蚀性能高低的一个关键因素,从表 3 可知,随着锌镍合金镀层厚度的增加,镀层的耐腐蚀性增强。因此欲提高镀层的耐腐蚀性能,对镀层厚度的控制也非常重要。

从图 1 可以看出,经过 1000 h 盐雾试验后,镀锌

表 4 镀层的 NSS 试验结果

Tab.4 NSS test results of coatings

序号	镀层种类	电镀时间/min	白锈出现时间/h	红锈出现时间/h
1	镀锌	30	96	240
2	镀镉	30	96	480
3	镀锌镍合金	20	720	
4	镀锌镍合金	30	720	
5	镀锌镍合金	60	960	
6	镀锌镍合金	90	960	

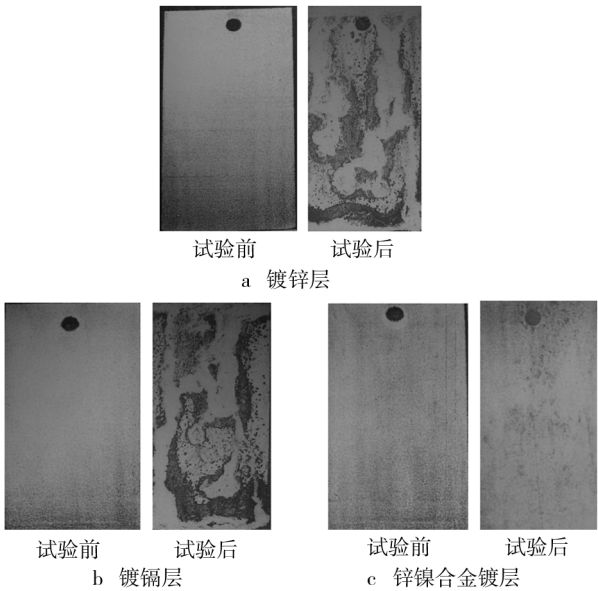


图 1 三种镀层盐雾试验前后的照片

Fig.1 The images of the zinc coating(a), cadmium coating(b), zinc-nickel alloy coating(c) before and after salt spray test for 1000 hours

层和镀镉层表面锈蚀非常严重,但锌镍合金镀层的表面只有轻微变化。这也说明锌镍合金镀层的耐腐蚀能力远远大于镀锌层和镀镉层。

2.2 锌镍合金镀层微观形貌及成分

从三种镀层的 SEM 照片(图 2)可以看出,锌镍合金镀层中的孔隙比镀锌层、镀镉层要小得多,说明锌镍合金镀层原子之间的孔隙很小,从而使其具有良好的耐腐蚀能力。

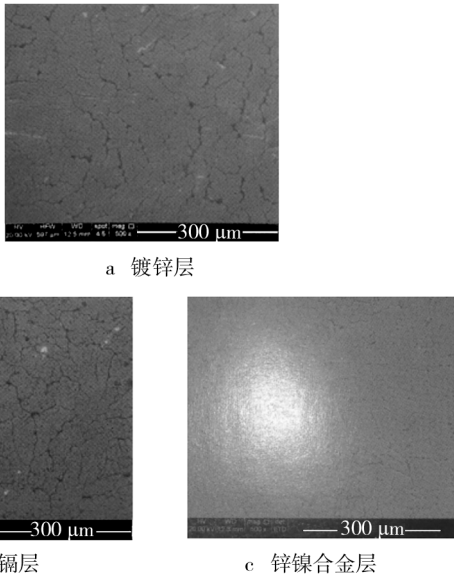


图 2 三种镀层的 SEM 形貌

Fig.2 SEM micrographs of the zinc coating(a), cadmium coating(b), and zinc-nickel alloy coating(c)

锌镍合金镀层中的成分分布如图 3 所示。从图 3 可知,镀层由表及里,镍元素含量先增加,达到一定程度后逐渐减小,锌元素的含量则是不断减小。从曲线的曲率可见,镀层由表及里,锌元素含量的变化比镍元素含量的变化快。这主要是因为锌的电位比镍负,

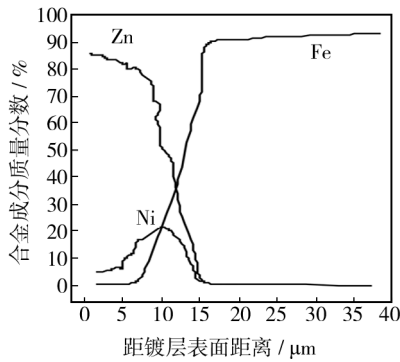


图 3 锌镍合金镀层成分分布曲线

Fig.3 Composition distribution curve of the Zn-Ni alloy coating

锌镍合金电沉积属于异常共沉积的缘故。

2.3 工艺因素对锌镍合金镀层耐蚀性的影响

2.3.1 主盐的影响

在本文工艺中,氧化锌和硫酸镍为主盐,提供合金镀层所需的锌和镍。锌离子的来源还可以采用氯化锌、硫酸锌等盐类,不过由于氧化锌为两性氧化物,价格也比较便宜,所以一般采用氧化锌作为提供锌离子的主盐^[9]。镀液中的锌镍含量比对镀层含镍量的影响较大,从而影响镀层的耐腐蚀性能。一般来说,镍质量分数 7%~9% 的锌镍合金层耐腐蚀性比同厚度的锌、镉层高 3~5 倍;镍质量分数 10%~16% 的合金层(最佳为 13%)耐腐蚀性比锌、镉层高 6~10 倍。含镍 10%~16% 的锌镍合金仍为 γ 单相相组织,这种稳定的 γ 单相是锌镍合金镀层具有高耐腐蚀性的原因之一。因此,保证镀液中主盐浓度的稳定,也就保证了镀液中锌镍离子含量比的稳定,从而为得到高耐腐蚀性的锌镍合金镀层提供了保证^[10-11]。

2.3.2 络合剂的影响

锌酸盐镀锌溶液中,一般采用有机胺作为络合剂,有机胺中使用较多的有乙烯二胺、乙烯三胺、三乙醇胺等。本配方中使用的络合剂为三乙醇胺,它与锌离子和镍离子都能形成络合离子,使得电镀时镀液中的锌镍离子含量比较稳定,从而使得电镀溶液比较稳定,有利于镀液的维护,同时保证了镀层中的锌镍离子含量比也比较稳定。此外,适量的络合剂还可以增强阴极极化,细化晶粒,改善镀层外观^[12]。

2.3.3 pH 值的影响

一般来说,pH 值过低,镀液中的 H^+ 浓度增加,会使锌阳极溶解加快,溶液中的 Zn^{2+} 浓度增加,从而改变镀液中锌镍离子的含量比,影响镀液的稳定性;pH 值过高,镀液中的 OH^- 浓度增加,容易生成氢氧化物沉淀夹杂在镀层中,使得镀层发暗、粗糙和发脆,得到不合格的镀层。所以在锌镍合金电镀中,需经常调节镀液的 pH 值,保持 pH 值的稳定^[13]。

2.3.4 温度的影响

温度的高低对镀层的外观以及镀层的锌镍含量比(Zn/Ni)有很大的影响。温度过高,镀层发暗,阴极极化削弱,会使得镀层中的镍含量增加,锌镍含量比下降,从而影响镀层的耐腐蚀性能;温度过低,镀液的阴极极化增强,反应速度加快,会使得镀层粗糙、发毛,外观和附着力受到影响。所以,锌酸盐镀锌的工艺温度一般控制在 15~45℃。在实际生产中,镀槽

一般要配换热设施,以方便溶液温度的调节^[14]。

2.3.5 电流密度的影响

电流密度对离子沉积速度的影响非常大,一般来说,随着电流密度的增大,阴极极化增强,离子沉积的速度也就越快。锌镍合金电镀属于异常共沉积^[15],沉积的离子有 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 两种,而 Ni^{2+} 的电位比 Zn^{2+} 的电位更负,也就是说,随着电流密度的增大,镀层中镍含量的增加更快,从而使得镀层中的锌/镍含量比下降。这一方面会影响镀液的平衡和稳定,另一方面也会使镀层的耐腐蚀性能下降。因此,锌镍合金电镀时,电流密度一般控制在 $1 \sim 3 \text{ A/dm}^2$ 。在该电流密度范围内,可以得到比较好的镀层外观,同时,合金镀层中的锌镍含量比变化不大。

3 结论

1) 厚度相同时,锌镍合金镀层的耐蚀性高于镀锌层和镀镉层。

2) 随着厚度的增加,锌镍合金镀层的耐蚀性有所提高。

3) 在电镀锌镍合金镀层时,应该严格控制电流密度和 pH 值。

参考文献

- [1] 许强龄. 现代表面处理新技术[M]. 上海:上海科技文献出版社,1994.
XU Qiang-ling. New Technology of Modern Surface Treatment[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press,1994.
- [2] 张琳,王振尧. 碳钢和耐候钢在盐雾环境下的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程,2014,11(2):1—5.
ZHANG Lin, WANG Zhen-yao. Study on Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Salt Spray Test[J]. Equipment Environmental Engineering,2014,11(2):1—5.
- [3] 李国英. 表面工程手册[M]. 北京:机械工业出版社,2001:75—77.
LI Guo-ying. Handbook of Surface Engineering[M]. Beijing: Machinery Industry Press,2001:75—77.
- [4] 许爱忠,胡文彬. 锌镍合金镀层耐蚀机理研究进展[J]. 电镀与环保,2000(3):1—3.
XU Ai-zhong, HU Wen-bin. Research Development of Corrosion Mechanism of Zn-Ni Alloy Coating[J]. Electroplating

and Pollution Control,2000(3):1—3.

- [5] 李明,李敏伟,马英,等. 电镀 Cd 层在海洋大气环境中的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程,2013,10(1):33—37.
LI Ming, LI Min-wei, MA Ying, et al. Study of Cadmium Electroplates Corrosion Behavior in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering,2013,10(1):33—37.
- [6] 曹宏涛,李雪亭. 基于海洋环境的紧固件腐蚀防护要求及措施[J]. 表面技术,2013,42(1):105—108.
CAO Hong-tao, LI Xue-ting. Marine Environment Fasteners Corrosion Protection Requirements and Technical Measures[J]. Surface Technology,2013,42(1):105—108.
- [7] 蔡加勤,王宁,周绍民. 碱性电镀光亮锌镍合金研究[J]. 表面技术,1993,13(4):3—5.
CAI Jia-qin, WANG Ning, ZHOU Shao-min. Study on Bright Zn Ni Alloy Electroplating in Alkaline [J]. Surface Technology,1993,13(4):3—5.
- [8] GB/T 10125—1997, 人造气氛腐蚀试验——盐雾试验[S].
GB/T 10125—1997, Artificial Atmosphere Corrosion Test—Salt Spray Test[S].
- [9] 蒋丹雅,吴菊珍. 电镀耐蚀性锌镍合金工艺研究[J]. 新技术新工艺,2010(4):57—59.
JIANG Dan-ya, WU Ju-zhen. Study on Corrosion Resistance of Zn Ni Alloy Plating Process [J]. New Technology and New Process,2010(4):57—59.
- [10] 龚利华. 添加剂对锌镍合金电镀的影响[J]. 腐蚀与防护,2006,27(4):171—174.
GONG Li-hua. Effect of Additives on Zinc-Nickel Alloy Electroplating [J]. Corrosion & Protection,2006,27(4):171—174.
- [11] 邵大伟,贺志荣,张永宏. Ni 含量对热浸 Zn-Al-Ni 合金镀层组织和耐腐蚀性能的影响[J]. 表面技术,2013,42(2):18—19.
SHAO Da-wei, HE Zhi-rong, ZHANG Yong-hong. Effect of Ni Content on Microstructure and Corrosion Resistance of Hot-dip Zn-Al-Ni Alloy Coating [J]. Surface Technology,2013,42(2):18—19.
- [12] 赵忠镇,教喜章. Zn-Ni 合金镀层耐腐蚀性的分析[J]. 腐蚀与防护,1998,19(3):113—114.
ZHAO Zhong-zhen, JIAO Xi-zhang. Analysis of Zinc Nickel Alloy Coating Corrosion Resistance [J]. Corrosion and Protection,1998,19(3):113—114.
- [13] 张允诚,胡如南,向荣. 电镀手册[M]. 北京:机械工业出版社,2007:354—356.
ZHANG Yun-cheng, HU Ru-nan, XIANG Rong. Electroplating Manual[M]. Beijing: Machinery Industry Press,2007:354—356.

- [14] 谢孟华. 钢桥面喷砂除锈施工工艺研究[J]. 交通标准化, 2014, 42(9): 32—34.
XIE Meng-hua. Construction Technology of Sandblasting Rust Treatment for Steel Bridge Deck[J]. Transportation Standardization, 2014, 42(9): 32—34.
- [15] 易承波. 钢渣作船体喷砂除锈磨料的可行性研究[J]. 表面技术, 2010, 39(4): 91—93.
YI Cheng-bo. The Study on Feasibility of Steel Slag Abrasive Used in Shot Peening Derusting in Hull[J]. Surface Technology, 2010, 39(4): 91—93.
- [16] 钟鹏. 风淬转炉渣作为喷砂磨料的可行性及效果研究[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 49—54.
ZHONG Peng. Feasibility and Application Effect Research of the Wind Quenching Slag as Sand Blasting Abrasive[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 49—54.
- [17] 陈玲, 刘鹏. 炸药与火药[M]. 武汉: 武汉军械士官学校出版社, 2008.
CHEN Ling, LIU Peng. Explosive[M]. Wuhan: Wuhan Ordnance Petty Officer School Press, 2008.

(上接第 37 页)

- [11] HU Rong-gang, ZHANG Su, BU Jun-fu, et al. Recent Progress in Corrosion Protection of Magnesium Alloys by Organic Coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2012, 73: 129—141.
- [12] 许晨阳, 杨盼, 刘彩梅, 等. AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Al60Si40 涂层研究[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 21—23.
XU Chen-yang, YANG Pan, LIU Cai-mei, et al. Laser Surface Cladding of Al60Si40 Coating on AZ91D Mg Alloy[J]. Surface Technology, 2009, 38(6): 21—23.
- [13] 王霞, 彭健锋, 张志东, 等. 化学镀 Ni-P 镀层的应用现状[J]. 西部探矿工程, 2006(增刊): 135—137.
WANG Xia, PENG Jian-feng, ZHANG Zhi-dong, et al. The Application Status of Ni-P Coating[J]. West-china Exploration Engineering, 2006(S): 135—137.
- [14] 朱丹, 丁毅, 朱靖, 等. AZ31 镁合金化学镀 Ni-Cu-Sn-P 前处理工艺的研究[J]. 电镀与环保, 2012, 32(3): 25—27.
ZHU Dan, DING Yi, ZHU Jing, et al. A Study of the Pre-treatment for Electroless Ni-Cu-Sn-P Plating on AZ31 Magnesium Alloy[J]. Electroplating & Pollution Control, 2012, 32(3): 25—27.
- [15] ZHANG W X, JIANG Z H, LI G Y, et al. Electroless Ni-Sn-P Coating on AZ91D Magnesium Alloy and Its Corrosion Resistance[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202: 2570—2576.
- [16] 刘克铭, 马壮, 李海玉, 等. Ni-Sn-P 化学镀层对镁合金耐腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(8): 142—144.
LIU Ke-ming, MA Zhuang, LI Hai-yu, et al. Effect of Ni-Sn-P Coating on Corrosion Resistance of Magnesium Alloy[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(8): 142—144.
- [17] 贺忠臣. AZ31 镁合金在碱性溶液中化学镀 Ni-P/Ni-Sn-P 工艺研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2007: 46—57.
HE Zhong-chen. Investigation of Electroless Plating Ni-P/Ni-Sn-P in an Alkaline Solution on AZ31 Magnesium Alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2007: 46—57.

(上接第 114 页)

- [14] 田伟, 谢发勤, 吴向清. 锌镍合金电镀工艺研究[J]. 材料保护, 2008(1): 34—35.
TIAN Wei, XIE Fa-qin, WU Xiang-qing. Electroplating of Zinc Nickel Alloy[J]. Materials Protection, 2008(1): 34—35.
- [15] 何为. 锌镍合金的异常共沉积与正常共沉积的转变[J]. 表面技术, 1998, 27(2): 22—24.
HE Wei. Anomalous Codeposition of Zinc Nickel Alloy Deposits Normal Shift[J]. Surface Technology, 1998, 27(2): 22—24.