

Zn-Ni 合金防腐涂层技术研究进展

乔小平, 李鹤林, 赵文轶

(西安交通大学 材料科学与工程学院, 西安 710049)

摘 要: Zn-Ni 合金涂层技术是近年发展起来的防腐涂层新技术,与锌涂层相比,该涂层具有十分优异的腐蚀防护性能。随着工业的发展,Zn-Ni 合金涂层将会成为锌的替代性涂层,在钢铁腐蚀防护领域得到广泛应用,极具发展前景。文中介绍了用电镀、热浸镀、热喷涂和渗镀的方法制备 Zn-Ni 合金涂层的主要进展情况,讨论了 Zn-Ni 合金涂层的腐蚀防护机理,指出了今后应把开发 Zn-Ni 合金基材作为 Zn-Ni 合金涂层技术获得突破的关键,把开发 Zn-Ni 复合涂层作为扩大 Zn-Ni 合金涂层应用的手段,同时应加强对 Zn-Ni 合金涂层耐腐蚀机理的研究,为 Zn-Ni 合金涂层技术的研究和应用提供理论指导。

关键词: Zn-Ni 合金; 涂层; 防腐; 研究进展

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)05-0008-05

The Development of Zn-Ni Alloy Anticorrosive Coating

QIAO Xiao-ping, LI He-lin, ZHAO Wen-zheng

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: The way of forming Zn-Ni alloy coating is a newly developed anticorrosive technology. The corrosion resistance of the Zn-Ni alloy coatings is better than that of unalloyed zinc, which shows a trend of substituting for zinc coatings and will be widely applied in the areas of steel protection. In this work, the recent development of the study on preparing Zn-Ni alloy coatings by electroplating, hot dipping, thermal spraying and diffusion are reviewed. The anti-corrosion mechanism of the Zn-Ni alloy coatings is discussed. The preparation of Zn-Ni basic alloy is the key work for the development of Zn-Ni alloy coating. The exploration of newly Zn-Ni composite coatings is the approach for the breakthrough of application; meanwhile, the research on the anti-corrosion mechanism of Zn-Ni alloy coatings should be further intensified to provide guidance for the research and application of the zinc-nickel alloy coatings.

Key words: Zn-Ni alloy; coating; anticorrosion; development

0 引 言

长期以来,人们一直以锌涂层作为钢铁上主要的防护涂层。但在实际应用中发现锌涂层有一些不足之处,例如:在含有 SO_2 、 H_2S 、海水介质及海洋性气氛中,锌涂层耐蚀性较差;锌涂层的焊透性和可加工性差,而且容易产生氢脆,不适合结构件的防护。实际应用中发现以锌为主要成分,并含有少量其它金属的锌合金涂层具有很好的腐蚀防护性能,如锌镍、锌铁、锌钴、锌铝等^[1-3],其中,以 Zn-Ni 合金的性能最好。据报道,含镍 12%~14% 的 Zn-Ni 合金镀层其耐蚀性是相同厚度锌镀层的 5~6 倍^[4]。同时该合金涂层具有良好的可焊和可加工性,几乎没有氢

脆,因而被广泛应用于汽车、航天航空、机电等领域中钢铁件的防护。

目前,国内外学者对 Zn-Ni 合金防腐涂层技术进行了大量研究,并开发出多种 Zn-Ni 合金防腐涂层制备技术,如 Zn-Ni 合金电沉积技术、热喷涂技术、热浸镀技术及渗镀技术等。文中将对这些技术的研究和应用现状进行综述,分析其防腐机理,并对 Zn-Ni 合金涂层防腐技术的发展提出几点建议。

1 Zn-Ni 合金涂层技术的研究现状

1.1 Zn-Ni 合金电沉积技术

电沉积是指在电流的作用下,电解液中的金属离子还原,并沉积到零件表面形成有一定性能的金属镀层的过程。电沉积法的主要优点是所

制备的涂层密度高、孔隙率低,同时通过控制电沉积工艺参数,就能精确地控制涂层的厚度、成分、组织结构,从而控制其性能。早在1906年,E. P. Schock 和 A. Hirsch^[5]在研究合金电沉积时就发现锌和镍可以实现共同沉积,但当时并未对其耐蚀性进行研究。关于 Zn-Ni 合金镀层优异耐蚀性的认识源于一个实验,20 世纪 40 年代美国的 Standerd Steel Spring 公司在钢基体上先镀了一层镍,再镀锌,最后进行热处理,结果发现涂层的耐蚀性明显优于同样厚度的纯锌和纯镍镀层。这一发现大大推动了人们对电沉积 Zn-Ni 合金技术的研究^[6]。电沉积 Zn-Ni 合金大规模的工业应用出现于上世纪 80 年代,并最先在日本和德国取得成功。我国在这方面的研究起步比较晚,但从 90 年代起取得了长足的发展。

Zn-Ni 合金的研究主要集中在镀液和添加剂的开发上,电镀 Zn-Ni 合金的镀液主要分为两大类,即酸性和碱性镀液。酸性镀液主要有硫酸盐^[7]和氯化物^[8]两种体系,其中氯化物体系是由酸性氯化物镀锌液转化而来。碱性镀液主要有锌酸盐体系、焦磷酸盐体系、氰化物体系等^{[9][10]}。其中锌酸盐体系是由碱性锌酸盐镀锌发展而来,研究最多。焦磷酸盐体系由于溶解性不好,需在较高的温度下工作,研究比较少。氰化物体系由于对环境的污染较大,几乎被禁止使用。两类镀液各有其优缺点:酸性镀液的优点是电流效率高,沉积速度快。碱性镀液的最大优点是分散能力和深镀能力较强,无氢脆,镀液对工件的腐蚀性小,缺点是电流效率较低,沉积速度慢。我国市场上的 Zn-Ni 合金电沉积技术主要有厦门大学的碱性工艺^[11]、武汉材料保护研究所的 NZ-918 碱性工艺^[12]和哈尔滨工业大学的 731-1 工艺^[13]。

电沉积 Zn-Ni 合金技术推广应用中最大问题是镀液中锌和镍的含量波动较大,导致镀层中镍含量不稳定,进而影响耐腐蚀性能。随着电镀的进行,镀液中锌离子和镍离子不断消耗,消耗的锌离子和镍离子需要及时补充。目前主要有两种补充方式,一是使用锌板作为阳极,镍通过补加镍的盐溶液补充。此方法需要在电镀过程中随时分析镀液中镍离子和锌离子的含量,费工费时。另一种方式是使用锌和镍两个阳极,分别进行控制,这一方法虽然实现了锌离子和镍离子的自动补充,但是由于锌比镍活泼,镍离

子很容易在锌表面发生置换反应,在锌的表面形成一层镍,导致控制镀液中主盐离子浓度非常困难。郭领军等人^[14]用铸造的方法,研制出适合电镀用的 Zn-Ni 合金阳极,解决了 Zn-Ni 合金电镀中存在的工艺复杂、镀层成分和性能不稳定等缺点。

为了挖掘 Zn-Ni 合金的潜能,突破其性能的极限,又发展了 Zn-Ni 复合电沉积新工艺,即在镀液中加入一种或多种不溶性固态颗粒,在金属离子被还原的同时,将不溶性固态颗粒均匀地夹杂到金属镀层中。大连理工大学李静文成功制备了 Zn-Ni-TiO₂ 复合镀层,并对其光电效应进行研究^[15]。魏攀制备了 Zn-Ni-Al₃O₂ 复合镀层并对其性能进行研究,结果表明 Al₃O₂ 降低了镀层的孔隙率,从而降低了基体直接发生化学腐蚀与电化学腐蚀的可能性^[16]。

1.2 Zn-Ni 合金热浸镀技术

热浸镀技术是将一种金属浸在熔融状态的另一种低熔点金属中,在其表面发生一系列的反应,冷却后在基体表面形成一层保护层的方法。传统的热浸镀防腐蚀涂层主要是热浸镀 Zn 涂层。在生产应用中发现,适合热镀锌的钢只能是 Si 含量较低的沸腾钢,对于 Si 含量较高的镇静钢,由于 Si 会显著增加 Fe 与 Zn 的反应活性,会导致镀层灰暗、厚度增加、结合力差。针对这一问题,热镀锌工作者进行了大量研究,结果发现在锌浴中加入镍可大大抑制 Fe 与 Zn 的反应。研究表明^[17]:镍的含量通常控制在 0.04%~0.09% 时,活性钢的 Sandelin 效应得到有效控制,所获得的镀层外观光亮且粘附性较好。

Sokolowski 等人^[18]对热浸镀 Zn 和 Zn-Ni 合金进行了 2~4 年户外暴露腐蚀试验,表 1^[18]为试验结果。可以看出,热浸镀 Zn-Ni 合金镀层的耐腐蚀能力随着腐蚀时间的延长而逐步显现。

为了加快 Ni 在 Zn 浴中的溶解速度,通常采用加 Zn-Ni 中间合金的方法,中间合金通常采用 Zn-2%Ni、Zn-0.5%Ni、Zn-0.24%Ni 几种。对于 Zn-Ni 中间合金的制备,目前常用的方法是采用硼酸钠和氯化钙等熔盐覆盖熔化的锌液,避免锌的高温挥发和氧化损失,然后再加入镍粉或镍屑生产 Zn-Ni 合金母液。熔盐保护可以提高合金配制时锌液的温度,加快镍的熔化速度,减少炉时,但熔盐在常温下一般具有吸水性,一旦

停炉,炉胆极易返潮,影响熔炉使用寿命,另外,镍粉与常规镍材价格的差别也导致其生产成本大副增加。王辉^[19]对固体 Ni 在液态 Zn 中的溶解规律进行了研究,结果表明:镍在锌浴中的溶解速度随着锌液温度升高而缓慢增大,在 600~750 ℃ 之间溶解速度急剧增加。凌克奇^[20]公布了一种使用海绵镍熔炼 Zn-Ni 合金的方法,海绵镍是一种镍基多孔海绵状结构,比表面积大,在锌液中的溶解速度快。

表 1 户外暴露试验腐蚀速率对比^[18]
Table 1 The comparison of corrosion rate between Zn and Zn-Ni coating by outdoor test^[18]

	2 年平均腐蚀速率/ ($\mu\text{m}/\text{年}$)		4 年平均腐蚀速率/ ($\mu\text{m}/\text{年}$)	
	锌镀层	Zn-Ni 镀层	锌镀层	Zn-Ni 镀层
工业大气中	6.91	7.15	5.94	5.93
海洋大气中	2.41	2.19	1.97	1.80

1.3 热喷涂 Zn-Ni 合金涂层技术

热喷涂 Zn-Ni 合金涂层技术是将 Zn-Ni 合金丝材或粉末加热到熔融或半熔融状态,用高速气流将其雾化、加速撞击到基体表面,形成与基体结合牢固的涂层。热喷涂技术的最大优点是对工件形貌要求低,且能在室外作业。缺点是涂层的孔隙率较高,尤其是贯通孔容易导致腐蚀介质与基体直接接触而降低防腐性能。B. Arsenault 等^[21]指出机械混合团聚的锌粉和镍粉不具备 Zn-Ni 合金的耐蚀性能,必须首先将锌和镍合金化。热喷涂 Zn-Ni 合金涂层的难点是喷涂用粉末或丝材的研制。锌的熔点为 419 ℃,沸点为 907 ℃,而镍的熔点却高达 1454 ℃,可见锌和镍很难熔炼,因为当达到镍的熔点时,锌已严重烧损。B. Arsenault^[21]等人采用过饱和低压氩气保护法熔炼出了含镍 30% 的 Zn-Ni 合金粉末。此方法能耗高,成本高,不适合于大规模工业应用。全红烨等人^[22-23]熔炼了不同 Ni 含量的 Zn-Ni 合金铸锭,将铸锭进行压力加工,拉拔制成 Zn-Ni 喷涂丝,分别采用电弧喷涂和火焰喷涂工艺制备 Zn-Ni 合金涂层,并对涂层的结合强度和耐蚀性能进行了检测,结果见表 2^[22]和表 3^[23]。

表 2 涂层结合强度试验结果^[22]
Table 2 The bond strength of the coating^[22]

工艺方法	试样结合强度/ MPa		平均结合强度/ MPa
电弧喷涂	24.3	25.1	24.7
火焰喷涂	8.8	8.0	8.3

表 3 涂层中性盐雾试验结果^[23]
Table 3 The neutral salt-fog test results of the coating^[23]

涂层成份	腐蚀速率(mm/a)	腐蚀形态
Zn-1%Ni	0.31	局部出现鼓泡
Zn-3%Ni	0.24	局部出现鼓泡
Zn-5%Ni	0.16	涂层完整
纯 Zn	0.38	腐蚀不均匀,涂层鼓泡

张琦^[24-25]等人利用高能球磨机制备了镍含量高达 30% 的 Zn-Ni 合金粉末,用氧乙炔火焰对所制 Zn-Ni 合金进行喷涂,得到 Zn-Ni 过饱和固溶体的合金涂层,该涂层的腐蚀电位(-0.32 V)低于同等条件下不锈钢腐蚀电位(-0.20 V),自腐蚀电流密度($1.55 \times 10^{-4} \text{ mA}/\text{cm}^2$)低于不锈钢自腐蚀电流密度($6.751 \times 10^{-4} \text{ mA}/\text{cm}^2$),表现出良好的耐蚀性。

1.4 Zn-Ni 渗层防腐技术

Zn-Ni 渗层防腐技术是用加热扩散把锌和镍渗入基体表面,得到 Zn-Ni 合金层。其突出特点是表面防护层的形成主要依靠加热扩散的作用,因而不存在结合力不足的问题。章关孙等人公开了一种 Zn-Ni 黑色金属防腐工艺^[26],其方法是将锌粉和镍粉及其它粉末按一定比例均匀混合,然后将工件和混合粉一起放入密闭容器中,对容器进行加热,锌和镍渗入工件表面,据检测,渗层厚度可达 30~100 μm ,硬度可达 300 HV 以上,中性盐雾试验 600 h 以上不出现红锈,二氧化硫试验 120 h 以上不出现红锈。在国外,目前还未见关于 Zn-Ni 渗层防腐技术的报道。

2 Zn-Ni 合金涂层的防腐蚀机理

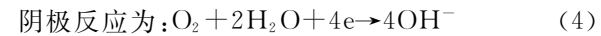
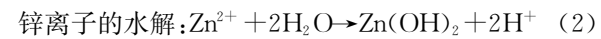
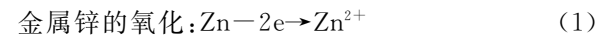
在研究制备工艺的同时,研究工作者也相当重视 Zn-Ni 合金涂层的耐蚀机理。电镀、热浸镀、热喷涂和热渗镀技术原理虽各不相同,但是它们的主要目的都是在基体表面使锌和镍合金化,形成 Zn-Ni 化合物,因此利用这四种方法所

制备的 Zn-Ni 合金防腐涂层的耐腐蚀机理也大体相同,其区别只在于不同涂层的镍含量不同进而导致其相结构不同,不同相结构的 Zn-Ni 合金涂层耐蚀性有很大差异。当合金组织为单一的 γ 相对耐蚀性最佳;当合金组织为 $\gamma + \eta$ 相时,耐蚀性次之;当合金组织为 $\gamma + \alpha$ 相时,耐蚀性最差^[27]。

目前国内外关于 Zn-Ni 合金涂层的耐蚀机理的研究还在不断的完整和发展。关于 Zn-Ni 合金涂层优于纯锌镀层的耐蚀性,比较公认的观点主要有以下几种。

(1) 锌的标准电极电位为 -0.762 V , 比铁负(铁的标准电极电位为 -0.441 V), 锌对铁起阳极保护作用。镍的标准电位为 -0.250 V , 比铁正, 镍对铁不能起阳极保护作用, Zn-Ni 合金层的电极电位随镀层含镍量而变化。通过适当调整 Zn-Ni 的成分, 使 Zn-Ni 合金与钢铁基体之间的电极电位变小, 即形成原电池的电动势减小, 镀层将缓慢的腐蚀, 而锌与铁的电位相差大, 腐蚀速度快, 寿命较短, 这是 Zn-Ni 合金涂层比锌镀层具有更高防护性能的原因之一。

(2) 研究表明^[24, 27-29]: 在腐蚀初期, Zn-Ni 合金与锌的腐蚀行为和腐蚀产物均相同。Zn-Ni 合金涂层中, 首先发生锌的溶解, 镍几乎不溶解, 其反应式为:



随着腐蚀的进行, 镀层中出现镍的富积层, 镀层中的镍抑制反应(3)的进行, 使得整个腐蚀反应的速度减慢。同时涂层表面覆盖了反应(2)产生的 $\text{Zn}(\text{OH})_2$, 该产物均匀致密地覆盖在涂层表面, 且不易导电, 对涂层起到保护作用。这一机理可以从实验证据得到支持: 常规热镀锌和热镀 Zn-Ni 合金的盐雾对比试验发现^[31] 在腐蚀早期两种镀层的腐蚀失重相差不大, 腐蚀失重的差距随着腐蚀时间的延长而加大。24 天后, Zn-Ni 合金镀层的腐蚀失重只有锌镀层的一半左右。说明腐蚀产物有阻碍腐蚀的作用。而对于纯锌镀层, 腐蚀产物主要是 ZnO , ZnO 是半导体, 且比较疏松, 且没有结合力, 因而对涂层没有防护性。

3 Zn-Ni 合金防腐涂层的应用与展望

在 4 种 Zn-Ni 合金涂层制备技术中, Zn-Ni 合金电沉积技术和 Zn-Ni 合金热浸镀技术在实际生产中得到了大量应用。热喷涂 Zn-Ni 合金涂层技术和 Zn-Ni 渗层防腐技术目前仍处于研究开发阶段, 具体的应用较少。汽车钢板电镀 Zn-Ni 合金后, 很薄的镀层就可具有很高的耐蚀性, 可以在延长汽车寿命的同时, 减轻重量和降低成本。日本的汽车公司在 80 年代就成功地将 Zn-Ni 合金电沉积技术应用于汽车零部件的表面处理。电沉积 Zn-Ni 合金涂层技术有望代替占电镀行业 60% 的纯锌镀层。热浸 Zn-Ni 合金工艺不仅有效地解决了活性钢镀锌的问题, 而且与锌镀层相比, 在镀层表面质量和耐腐蚀性能方面都有明显提高。目前, 大部分热镀锌厂已经采用该技术来提高产品质量, 降低产品成本。

综上所述, 各种制备 Zn-Ni 合金防腐涂层的技术正逐步完善, 在越来越多的领域逐步取代纯锌涂层, 使得钢铁结构件的长效防腐性能得到进一步的提高, 其未来有很大的发展空间, 无论是 Zn-Ni 合金涂层的防腐蚀机理还是工艺技术方面, 都尚待深入研究。建议今后 Zn-Ni 合金涂层技术的研究重点应在以下几方面。

(1) Zn-Ni 合金的制备工艺研究。利用热喷涂、热浸镀 Zn-Ni 合金涂层时, 首先必须将锌和镍合金化, 然后将其转移到基体表面。利用电沉积工艺制备 Zn-Ni 合金镀层时, 如果能制备出合适的 Zn-Ni 合金阳极, 则可使电镀工艺大大简化, 使其得到更广泛的应用。但由于锌和镍的熔点相差较大, 给铸造合金带来困难, 目前报道的制备方法成本高, 限制了其大规模工业应用。因此必须在 Zn-Ni 合金母材制备工艺上加强研究。

(2) 对 Zn-Ni 合金涂层的成分、微观结构和防腐性能之间的关系进行深入研究。目前对于 Zn-Ni 合金涂层成分、结构、性能之间的关系还缺乏十分清晰的认识, 因此需要利用新的试验方法和仪器系统研究涂层的成分、结构和耐腐蚀性能之间的关系, 揭示其耐腐蚀机理, 为 Zn-Ni 合金涂镀层的发展提供技术理论支撑。

(3) 开发新的 Zn-Ni 合金涂层体系。随着材料科学与技术的飞速发展, 人们越来越热衷于利用现代研究方法手段对传统材料的微观结

构进行改造,如复合镀层、组分调制多层膜,在保证 Zn-Ni 合金涂层优良耐蚀性的同时,赋予其新的物理、化学和力学性能。

参考文献

- [1] 王凤平. 腐蚀电化学原理方法及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] 陈永雄, 朱子新, 刘燕, 等. Zn-Al 合金防腐涂层制备技术的研究进展 [J]. 金属热处理, 2004, 29(12): 45-59.
- [3] Richard Sard. Advances in functional zinc and zinc alloy coatings [J]. Plating and Surface Finishing, 1987, 74(2): 30-34.
- [4] Hall D E. Electrodeposited zinc-nickel alloy coatings-A review [J]. Plating and Surface finishing, 1983, 70(11): 59-65.
- [5] Schock E P, Hirsch A. The electrolytic deposition of nickel-zinc alloys [J]. Journal of the American Chemical Society, 1907, 29: 314-321.
- [6] Sard R. Advances in functional zinc and zinc alloy coatings [J]. Plating and Surface Finishing, 1987, 74(2): 30-34.
- [7] Abou-krisa M M. Electrochemical studies of zinc-nickel codeposition in sulphate bath [J]. Applied Surface Science, 2005, 254(4): 1035-1048.
- [8] Felloni L, Fratesi R, Quadrini E, et al. Electrodeposition of zinc-nickel alloys from chloride solution [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1987, 17: 574-582.
- [9] Müller C, Sarret M, Benballa M. Complexing agents for a Zn-Ni alkaline bath [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2002, 519(2): 85-92.
- [10] 吴浩杰. 碱性锌酸盐 Zn-Ni 合金电镀工艺及机理研究 [D]. 南昌航空大学, 2008.
- [11] 蔡加勒, 周绍民. 碱性电镀光亮 Zn-Ni 合金研究 [J]. 电化学, 1995, 1(3): 332-338.
- [12] 熊刚, 邹群, 蔡群英, 等. NZ-918 碱性锌-镍合金的工艺性能 [J]. 材料保护, 1994, 27(9): 22-26.
- [13] 屠振密, 李宁, 安茂忠, 等. 电镀合金适用技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [14] 郭领军, 李贺军, 李克智, 等. 电镀用 Zn-Ni 合金阳极的研制及应用 [J]. 铸造, 2002, 51(9): 554-556.
- [15] 李静文. Zn-Ni-TiO₂ 复合镀层制备及其光电效应研究 [D]. 大连理工大学, 2009.
- [16] 魏攀, 陈斌, 何方波, 等. 锌-镍、纳米氧化铝复合电沉积及镀层结构性能研究 [J]. 电镀与涂饰, 2010, 29(5): 1-5.
- [17] 孔纲, 卢锦堂, 陈锦虹, 等. 热浸 Zn-Ni 合金镀层技术的研究与应用 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(4): 223-225.
- [18] Sokolowsk R, Vieille-Montagne. Proceedings of 15th international galvanizing conference [C], Rome, 1998: GE1/1.
- [19] 王辉. Zn-Ni 合金的研制及在含硅活性钢热镀锌领域的应用 [J]. 中国有色冶金, 2007, 2: 23-26.
- [20] 凌克奇, 王辉, 陈顺. 一种 Zn-Ni 合金的生产方法 [P]. 申请号: 01106889.2.
- [21] Arsenault B, Champagne B. Zinc-nickel coatings for improved adherence and corrosion resistance [J]. Surface and Coatings Technology, 1989, 37: 369-378.
- [22] 肖宏滨, 祝要民, 刘泽昊, 等. 热喷涂技术制备 Zn-Ni 合金涂层及性能研究 [J]. 新技术新工艺, 2000, 8: 31-32.
- [23] 全红焯, 刘泽昊, 王岳. ZnNi 合金用作热喷涂防腐涂层材料 [J]. 材料保护, 2000, 33(2): 47-48.
- [24] 张琦. 低电极电位 Zn-Ni 合金涂层的制备与性能研究 [D]. 武汉理工大学, 2010.
- [25] 程旭东, 张琦, 孟令娟, 等. 一种 Zn-Ni 合金粉末的制备方法及其应用 [P]. 申请号: 200910063904.8.
- [26] 章关孙, 任佑乾. Zn-Ni 渗层黑色金属防腐工艺 [P]. 申请号: 101319300A.
- [27] 陈天玉. 镀镍合金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [28] 许爱忠, 胡文彬, 沈斌, 等. 锌-镍合金镀层耐蚀机理研究进展 [J]. 电镀与环保, 2000, 20(3): 1-5.
- [29] 肖作安, 费锡明, 邹勇进. Zn-Ni 合金镀层耐蚀性的研究 [J]. 材料保护, 2005, 38(3): 15-17.
- [30] 蒋永锋, 翟春泉, 郭兴伍, 等. 强碱性溶液电镀 Zn-Ni 合金研究进展 [J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(4): 586-589.
- [31] 孔纲, 卢锦堂, 陈锦虹, 许乔瑜, 等. 热浸 Zn-Ni 合金工艺及镀层性能 [J]. 材料保护, 1996, 29(9): 11-14.

作者地址: 陕西省西安市咸宁西路 28 号

710049

西安交通大学 材料科学与工程学院

Tel: 131 5215 3835

E-mail: qxp0911@163.com