无镍磷化与不同基材及涂料的配套性研究

蓝花 周全 孟东阳 肖迪 田小龙 郁瑞生

（东风商用车有限公司，武汉 430056）

摘要：为探讨无镍磷化在多种基材上的成膜效果及与涂料的配套性能，通过试验研究了无镍磷化在冷轧钢板、热轧钢板和铝合金上的磷化膜特性，测试了各基材上无镍磷化膜与电泳漆和粉末涂料的配套性能。结果表明，在所试验基材上，该无镍磷化膜的性能与三元磷化膜的性能相当，且与电泳漆和粉末涂料的配套性能良好，可适用于车身、喷粉车架等汽车零部件的漆前磷化处理。

关键词：无镍磷化 电泳漆 金属基材 耐盐雾性

中图分类号：U466 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250320

Research on the Compatibility of Nickel-Free Phosphating with Multiple Substrates and Coatings

Lan Hua, Zhou Quan, Meng Dongyang, Xiao Di, Tian Xiaolong, Yu Ruisheng

(Dongfeng Commercial Vehicle Co., Ltd., Wuhan 430056)

Abstract: To investigate the film-forming performance of nickel-free phosphating on various substrates and its compatibility with coatings, this paper examines the characteristics of nickel-free phosphating films on cold-rolled steel sheets, hot-rolled steel sheets, and aluminum alloys, and evaluates their compatibility with electrophoretic paint and powder coatings. The results show that the performance of the nickel-free phosphating film on the tested substrates is comparable to that of ternary phosphating films, and it demonstrates good compatibility with both electrophoretic paint and powder coatings. Therefore, it can be applied to the pre-paint phosphating treatment of automotive components such as vehicle bodies and powder-coated frames.

Key words: Nickel-free phosphating, Electrophoretic coating, Metal substrate , Salt spray resistance

1 前言

随着国家环保法规的日益严格，重金属镍的使用和排放受到了更为严格的限制。在汽车涂装领域，传统的三元锌镍锰磷化技术面临巨大的环保压力，开发无镍磷化技术已成为当务之急。无镍磷化液不含镍元素，可从根本上减少镍的排放。

虽然三元磷化获得广泛应用，但研究人员并没有停止对无镍磷化的研究，凯密特尔、帕卡等表面处理公司在该领域进行了一系列的专利布局[1-3]。早期关于无镍磷化的研究报道[4-6]表明，无镍磷化与电泳漆配套的漆膜性能可达到500 h中性盐雾试验的要求，未满足车身防腐等级要求，限制了无镍磷化液在车身及高耐蚀性汽车零部件上的应用。近期，吴小松等[7]研究了锌镍合金表面多种前处理工艺及其与电泳漆的配套性能，结果表明，无镍磷化加钝化的前处理工艺与电泳漆的配套性能可达到耐1 000 h中性盐雾的要求，赵勇等[8-9]的报道显示，无镍磷化在重型载货汽车车身

作者简介：蓝花（1984—），女，高级工程师，硕士学位，研究方向为汽车涂装材料与工艺开发。

参考文献引用格式：

蓝花, 周全, 孟东阳, 等. 无镍磷化与不同基材及涂料的配套性研究[J]. 汽车工艺与材料, 2026(5): 35-39.

LAN H, ZHOU Q, MENG D Y, et al. Research on the Compatibility of Nickel-Free Phosphating with Multiple Substrates and Coatings[J]. Automobile Technology & Material, 2026(5): 35-39.

上获得应用，与电泳漆的配套性能达到耐1 000 h中性盐雾的要求，可见，无镍磷化技术已经取得较大的突破。

基于汽车板材的多样化，同时为验证无镍磷化技术的改进效果，本文选取某公司的无镍磷化产品及其配套表调剂进行工艺试验，测试无镍磷化在冷轧钢板、热轧钢板和铝合金基材上的磷化膜性能，并研究其与电泳漆和粉末涂料的配套性能，评估无镍磷化工艺在实际应用中的可行性。

2 材料与方法

2.1 试验基材

本试验所用基材为DC04冷轧钢板、6061铝合金和经过抛丸处理的DL590热轧钢板，各基材试板的尺寸均为70 mm×110 mm。

磷化材料为某公司的锌系无镍磷化液（简称无镍磷化），同时选用该公司同类型的三元锌镍锰磷化液（简称三元磷化）作为对比样。所用磷化液不含镍元素，但在药剂组成中增加了偶联剂成分，弥补因镍的缺失而出现的磷化缺陷，同时在促进剂中复合了改性稀土元素，达到细化晶粒、加速成膜、增加与漆膜的结合力和耐蚀性的效果。

所用脱脂剂及表调剂材料均为同一公司配套的碱性脱脂剂和液体表面调整剂，表调剂的主要成分为磷酸盐。所用电泳漆为市场上已商品化应用的某超高泳透力阴极电泳漆，粉末涂料为黑色聚酯粉末涂料。

2.2 前处理工艺

漆前处理工艺基本流程为脱脂→水洗→表调→磷化→水洗→纯水洗→烘干，本文所述脱脂、表调和磷化工序均采用浸渍处理方式，前处理完成后再进行后续的电泳或喷粉处理。脱脂、表调和磷化工序的基本工艺参数如表1所示。

表1 各工序基本工艺参数

工序	项目	参数值
脱脂	游离碱/pt	10.4
	总碱/pt	12.7
	温度/℃	45
	时间/min	3
表调	总浓度/pt	2.0
	pH值	10.55
	温度/℃	25
	时间/min	1
磷化	游离酸/pt	0.7（无镍磷化） 0.7（三元磷化）
	总酸/pt	22.3（无镍磷化） 22.4（三元磷化）
	促进剂/pt	3.5（无镍磷化） 3.5（三元磷化）
	氟离子含量/mg·L^{-1}	189（无镍磷化） 189（三元磷化）
	温度/℃	42（无镍磷化） 35（三元磷化）
	时间/min	3（无镍磷化） 3（三元磷化）

注：仅在处理铝合金时通过补加氟化物调控氟离子含量。

2.3 电泳涂装

电泳时阴、阳极面积比为4∶1，极间距为20 cm，电泳电压为220 V，温度为(31±1) ℃，时间为3 min（含30 s斜升时间），漆膜烘干条件为170 ℃/20 min。电泳涂装试板放置24 h后进行性能测试。

2.4 粉末喷涂

热轧钢板磷化处理后喷涂粉末涂料，静电喷涂电压为50~90 kV，供粉气压为0.1~0.2 MPa，出粉量为100~200 g/min，喷枪口与工件之间的距离为150~250 mm，烘干条件为180 ℃/20 min，粉末喷涂试板放置24 h后进行性能测试。

2.5 性能测试

采用扫描电子显微镜观察磷化结晶形貌。磷化膜重按GB/T 9792—2003《金属材料上的转化膜单位面积膜质量的测定 重量法》测定。

产渣量测试方法为：配置5 L磷化工作液，在正常工艺参数下，用试板（总面积约为1 m^2）按工艺流程进行磷化处理，用滤纸过滤磷化工作液中的沉渣，烘干至恒重后称重，沉渣的质量即为产渣量。

磷化膜P比（P-ratio）采用X射线衍射仪测试，通过同位素峰值角为14.88°（记为a）和14.55°（记为b）的衍射强度比值计算，P比为$a/(a+b)$。

电泳漆泳透力测试采用“四枚盒”法，将安装完成的“四枚盒”按规定的温度、电压（电泳漆厚度

约为20 μm的试验条件)电泳,电泳时间为3 min,然后将“四枚盒”解体、清洗、烘干,获取*G*面和*A*面的漆膜厚度,*G*面和*A*面的漆膜厚度比即为泳透力值。

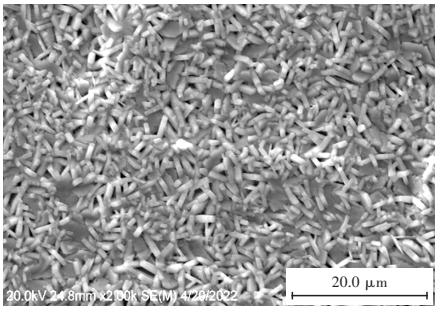
漆膜耐中性盐雾试验按照GB/T 10125—2021《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》方法进行测试。

3　结果与讨论

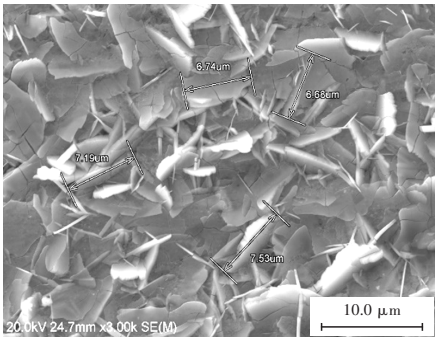
3.1　各基材的磷化膜性能

3.1.1　磷化结晶形貌及晶粒尺寸

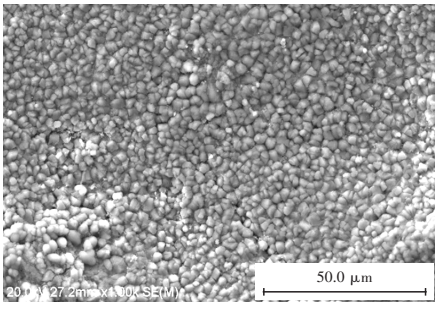
试验各基材上的磷化结晶形貌及晶粒尺寸测量结果如图1所示。图1的磷化晶粒形貌显示,无镍磷化在冷轧钢板、热轧钢板和铝合金上的磷化结晶均较为规则且致密,孔隙率小,但晶粒形状稍有差异,在冷轧钢板上呈长粒状,在热轧钢板上呈圆粒状,而在铝合金上呈长片状。



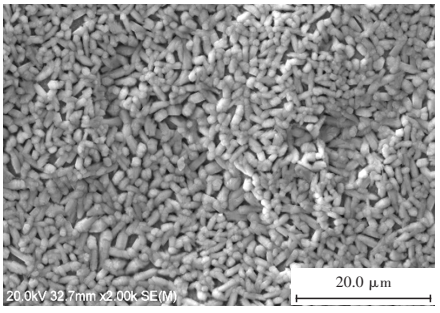
(a)DC04-无镍磷化(×2 000)



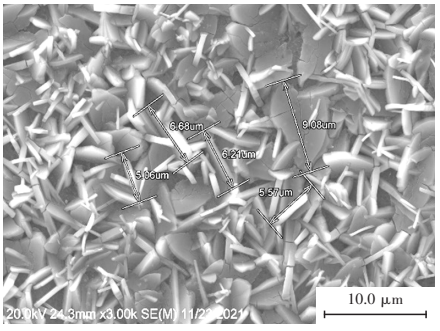
(b)6061-无镍磷化(×3 000)



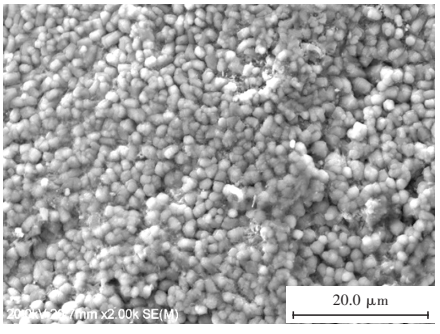
(c)DL590-无镍磷化(×1 000)



(d)DC04-三元磷化(×2 000)



(e)6061-三元磷化(×3 000)



(f)DL590-三元磷化(×2 000)

图1　各基材上磷化结晶形貌的SEM图

晶粒尺寸方面,在2种钢板基材上的晶粒尺寸差别不大,约为2~4 μm,在铝合金上的晶粒尺寸约为6~8 μm。

由此可知,该无镍磷化膜结晶致密度和晶粒尺寸与三元磷化膜相当。

3.1.2　磷化膜重

按前述方法对试验所获得的磷化膜进行膜重测试,测试结果如表2所示。由表2可知,在同一基材上,无镍磷化和三元磷化的膜重相当。

表2　各基材上的磷化膜重测试结果　　g/m^2

基材	三元磷化	无镍磷化
DC04	1.7	1.8
6061	1.6	1.9
DL590	3.1	3.5

3.1.3 磷化膜P比

磷化膜P比X射线衍射(X-Ray Diffraction,XRD)的衍射图如图2所示,由X射线衍射强度的测量结果可知,无镍磷化膜在2种钢铁基材上的P比达到95%,与电泳漆配套的磷化膜P比指标要求为≥85%,无镍磷化膜的P比满足要求。

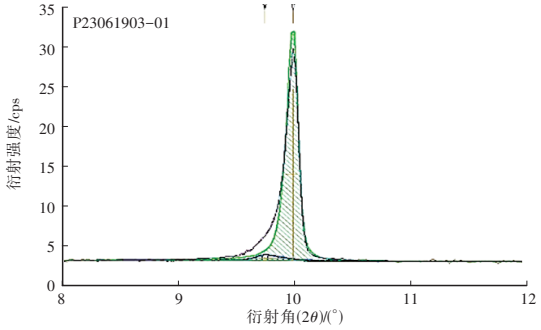


图2 磷化膜P比的XRD衍射图

3.2 磷化产渣量

采用DC04基材试板,经试验测试,该无镍磷化液的产渣量为3.92 g/m^2,而相同脱脂表调条件下,三元磷化的产渣量为3.56 g/m^2。除温度外,2种磷化的其他参数基本相同,无镍磷化的处理温度比三元磷化高7 ℃,温度升高使磷酸二氢盐的离解度增大,成膜离子浓度提高,最终其膜重比三元磷化略重,产渣量比三元磷化高0.35 g/m^2,该产渣量现场除渣设备可应对,因此,无镍磷化在现场应用是可行的。

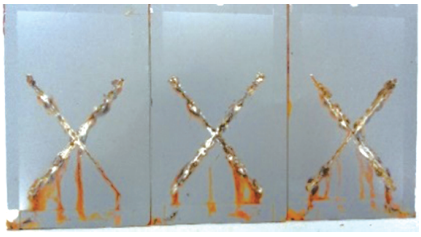
3.3 与油漆的配套性能

冷轧钢板和6061铝合金基材主要用于车身,车身底漆为阴极电泳漆,因此,试验冷轧钢板和铝合金基材经磷化前处理后进行电泳涂装,漆膜烘干后再对电泳试板进行性能测试。商用车车架的基材为热轧钢板,因此,热轧钢板基材经无镍磷化前处理后进行粉末涂料喷涂,烘干后再对粉末涂料试板进行性能测试,测试结果如表3、图3所示。

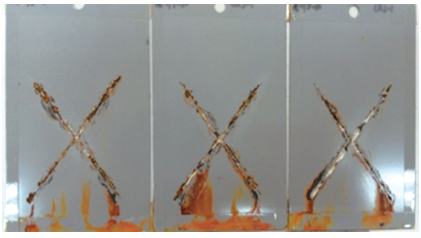
冷轧钢板和铝合金经无镍磷化前处理后配套阴极电泳漆,电泳漆膜的附着力、冲击强度、杯突及锥棒弯曲等机械性能满足要求。

表3 无镍磷化膜与油漆涂层配套性能

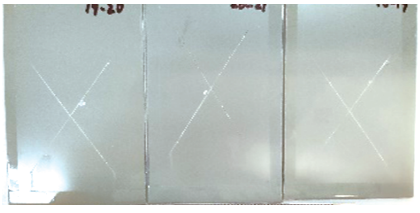
检测项目	电泳漆			粉末涂料
	冷轧钢板+无镍磷化	冷轧钢板+三元磷化	铝合金+无镍磷化	热轧钢板+无镍磷化
漆膜厚度/μm	18~20	18~20	20~21	70~88
附着力(1 mm格)/级	0	0	0	1
冲击强度/cm	50(合格)	50(合格)	50(合格)	
杯突/mm	6(合格)	6(合格)	6(合格)	
锥棒弯曲/mm	0	0	0	
四枚盒泳透力/%	58.24	60.94		
耐盐雾性能	1 000 h中性盐雾,沿叉单侧扩蚀宽度<2 mm,板面无起泡或锈蚀	1 000 h中性盐雾,沿叉单侧扩蚀宽度<2 mm,板面无起泡或锈蚀	1 000 h中性盐雾,沿叉单侧扩蚀宽度<2 mm,板面无起泡或锈蚀	600 h中性盐雾,沿叉单侧扩蚀宽度<2 mm,板面无起泡或锈蚀



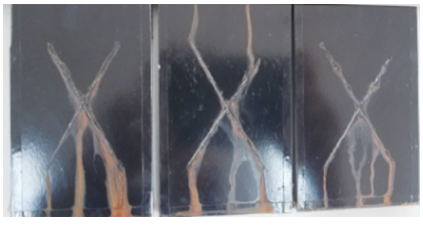
(a)DC04-无镍磷化-1 000 h盐雾



(b)DC04-三元磷化-1 000 h盐雾



(c)6061-无镍磷化-1 000 h盐雾



(d)DL590-无镍磷化-600 h盐雾

图3 各试板盐雾试验后表面

在泳透力方面,无镍磷化四枚盒泳透力为58.24%,虽比同条件下三元磷化的泳透力(60.95%)稍低,但能满足≥55%的要求。

冷轧钢板和铝合金基材的电泳漆膜的耐盐雾性能均可达到“1 000 h中性盐雾,沿叉单侧扩蚀宽度≤2 mm”的要求。

热轧钢板经无镍磷化处理后配套黑色聚酯粉末涂料,漆膜厚度为70~88 μm,漆膜附着力为1级,漆膜耐盐雾性能可达到600 h,能够满足喷粉车架油漆涂层的防腐要求。

4　结束语

本文试验所用无镍磷化在车身冷轧钢板和车架热轧钢板上的结晶均呈粒状,磷化结晶均匀致密,晶粒尺寸为2~4 μm,膜重为1.5~2.0 g/m^2,P比达95%,产渣量为3.92 g/m^2,磷化膜性能与相同条件下的三元磷化膜性能相当。

无镍磷化中氟离子含量调整至适当范围后,可在6061铝合金表面获得结晶致密的磷化膜,且与电泳漆的配套性能良好,说明该无镍磷化亦适用于钢铝共线涂装地前处理。

无镍磷化的工作温度为42 ℃,比三元磷化高约7 ℃,故无镍磷化的能耗高于现行三元磷化,但无镍磷化不含重金属镍,在环保性方面优于三元磷化。

本研究所用无镍磷化液及其配套表调剂适用于冷轧钢板、热轧钢板和铝合金基材的涂装前处理,与超高泳透力阴极电泳漆和粉末涂料的配套性良好,可用于车身的漆前处理和采用粉末喷涂工艺的热轧钢板车架涂装前处理。

参考文献:

[1] 凯密特尔有限责任公司,罗地亚经营管理公司.金属表面的无镍磷化方法和用于这种方法的组合物:CN201980066328.4[P]. 2021-06-08[2025-11-26].

[2] 凯密特尔有限责任公司.用于无镍磷化金属表面的改进方法:CN202511101614.3[P]. 2025-11-25[2025-11-26].

[3] 沈阳帕卡濑精有限总公司.一种环保高效的无镍锰系磷化处理药剂及其制备方法和应用:CN202110124772.6[P]. 2023-02-24[2025-11-26].

[4] 李艳霞.锌锰系磷化工艺的研究[J]. 上海涂料, 2019, 57(3): 35-38.

[5] 邢汶平, 李艳霞, 向丽琴.锌锰系无镍磷化及其与阴极电泳的配套性能[J]. 材料保护, 2012, 45(10): 62-64.

[6] 米德伟, 杨昌柱, 濮文虹.阴极电泳无镍磷化工艺的开发及配套性能研究[J]. 现代涂料与涂装, 2012, 15(1): 48-51.

[7] 吴小松, 胡熙国, 张宇霄, 等.锌镍合金汽车零部件涂装前处理工艺设计及应用[J]. 当代化工研究, 2025(20): 161-163.

[8] 赵勇, 佟光来, 李伟, 等.二元无镍磷化新工艺在重型载货汽车车身上的应用[J]. 汽车工艺师, 2024(8): 16-22.

[9] 北奔重型汽车集团有限公司.一种环保型重卡驾驶室磷化工艺:CN202411671421.7[P]. 2025-03-25[2025-11-26].

AT&M