

# 稀土镧无铬锌铝涂层的制备及性能研究

尹天罡, 杨 慧, 张宇航, 张潇华  
(山东石油化工学院, 山东 东营 257061)

**摘要:** 为提高无铬 Zn-Al 涂层的耐蚀性, 通过向涂液中添加稀土  $\text{LaCl}_3$  和  $\text{La}_2\text{O}_3$  增强颗粒, 研究稀土镧种类和含量对涂液和涂层性能的影响。结果表明: 稀土  $\text{LaCl}_3$  和  $\text{La}_2\text{O}_3$  对涂液性能, 涂层的厚度、粗糙度无明显影响, 但添加  $\text{LaCl}_3$  的涂层表面出现颗粒, 且颗粒的数量随  $\text{LaCl}_3$  的增加而增加, 结合力随  $\text{LaCl}_3$  增加而略微降低; 添加 0.15%  $\text{LaCl}_3$  时, 涂层的耐蚀性最优。添加  $\text{La}_2\text{O}_3$  的涂层表面变得更光滑且具有金属光泽, 结合力良好; 添加 0.3%  $\text{La}_2\text{O}_3$  时, 涂层的耐蚀性最优。

**关键词:** 无铬铝锌涂层; 稀土镧; 添加量; 耐蚀性

中图分类号: TQ637 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)12-0011-05

## Preparation and Properties of Rare Earth Lanthanum Chromium-free Zinc-aluminum Coating

YIN Tian-gang, YANG Hui, ZHANG Yu-hang, ZHANG Xiao-hua

(Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, Dongying 257061, Shandong, China)

**Abstract:** In order to improve the corrosion resistance of chromium-free Zn-Al coatings, the effects of rare earth lanthanum types and contents on the properties of the coating solution and coating were studied by adding rare earth  $\text{LaCl}_3$  and  $\text{La}_2\text{O}_3$  enhanced particles to the coating solution. The results show that the rare earth  $\text{LaCl}_3$  and  $\text{La}_2\text{O}_3$  have no significant effect on the properties of the coating solution, the thickness and roughness of the coating, but the particles appear on the surface of the coating with  $\text{LaCl}_3$ , and the number of particles increases with the increase of  $\text{LaCl}_3$ , and the binding force decreases slightly with the increase of  $\text{LaCl}_3$ . When 0.15% of  $\text{LaCl}_3$  is added, the corrosion resistance of the coating is optimal. The surface of the coating with the addition of  $\text{La}_2\text{O}_3$  becomes smoother and has a metallic luster, and the adhesion is good; When 0.3% of  $\text{La}_2\text{O}_3$  is added, the corrosion resistance of the coating is optimal.

**Key words:** chromium-free aluminum zinc coating; rare earth lanthanum; addition amount; corrosion resistance

## 0 引言

达克罗涂层也称锌铝涂层, 是由片状锌粉和铝粉互相堆叠形成的一种挥发性有机化合物涂层, 具有无氢脆、耐高温、耐腐蚀、附着力强、导电性能好等特点, 广泛应用于民用和军用领域<sup>[1]</sup>。然而, 涂层中的铬酸盐不仅对人体有很强的致癌作用, 而且对生态环境也有

很大的危害。为解决此问题, 人们开发出了无铬达克罗涂层, 但其耐腐蚀性明显低于传统达克罗涂层<sup>[2]</sup>。

针对无铬锌铝涂层的不足, 研究者在无铬达克罗涂层中加入稀土元素。相关改性研究表明, 稀土盐是一种具有自愈合作用的环保钝化剂, 在金属表面防护领域可以替代铬酸盐<sup>[3]</sup>, 利用稀土元素对涂层进行改性, 制备稀土复合水性无铬锌铝涂层。鲁俊等<sup>[4]</sup>用磷酸作为黏结剂和钝化剂, 稀土铈为助剂, 制得一种耐蚀性能优良的无铬达克罗涂液, 研究表明, 稀土铈盐的添加有效地降低了涂层的腐蚀电流, 对达克罗涂层起到较好的缓蚀作用。李新波<sup>[5]</sup>在研究稀土镧盐对水性锌铝

收稿日期: 2025-02-28

基金项目: 大学生创业创新训练项目 DC2024103。

作者简介: 尹天罡(2003—), 男, 本科在读, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。E-mail: 3161612891@qq.com。

涂层工艺与性能的影响时,选择分别向涂层中加入硝酸镧和硝酸铈,不仅改善了涂层的结构,而且明显提高了涂层的耐蚀性能。当硝酸镧的加入量为 7 g/L,或硝酸铈为 10 g/L 时,所得涂层的中性盐雾试验时间分别达到 1 200 h 和 1 000 h,性能达到最优。秦晓伟<sup>[6]</sup>在研究稀土盐对锌铝涂层性能的影响时,向锌铝涂层中添加不同量的硝酸铈铵、氧化铈、硝酸镧和氧化铈。研究发现,这四种稀土盐在涂层当中,主要起到钝化与屏蔽作用,以此来达到提升涂层耐腐蚀性能的目的。陈丽姣<sup>[7]</sup>分别研究了稀土  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  和  $\text{La}(\text{NO}_3)_3$  对无铬锌铝合金涂层的影响,当  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  的用量为 1.5 g/L 时涂层的耐蚀性最好, $\text{La}(\text{NO}_3)_3$  的用量为 0.1 g/L 时涂层的耐蚀性最好,并大大降低了能耗。王睿谦等<sup>[8]</sup>通过盐雾腐蚀试验和电化学测试发现:当稀土元素的质量分数为 0.017% 时对 Q355NHq 钢耐蚀性最好。许可等<sup>[9]</sup>通过在涂层中添加适量的稀土氧化物的方法发现得到的涂层组织均匀、晶粒细化、裂纹敏感性降低<sup>[10]</sup>,使涂层表面耐磨性、耐蚀性、抗高温氧化性得到提高。众多研究发现,稀土元素可在金属基体表面形成稀土金属氧化物或氢氧化物转化膜<sup>[11]</sup>,沉淀于阴极区,使基体的腐蚀得到有效抑制<sup>[12-15]</sup>。稀土盐协同钝化是一种很有潜力的表面处理技术<sup>[16]</sup>,将稀土元素加入无铬锌铝涂层中,可使涂层的耐蚀性有所提高。目前对稀土元素作为增强相改性无铬达克罗涂层有一定的研究,但多集中于稀土铈,而对其他稀土元素的改性研究相对较少。本项目以稀土镧为增强相,通过向涂液中添加  $\text{LaCl}_3$  和  $\text{La}_2\text{O}_3$  增强颗粒,以期获得性能更优的无铬达克罗涂层。

## 1 试验部分

试验材料:Q235 片状试样,尺寸为 30 mm×20 mm×3 mm,基体上方有一圆形孔洞。用 600 目、800 目砂纸打磨,直至去除 Q235 钢片上的油污和铁锈并使其表面平整光滑。打磨结束后先用去离子水清洗试样,再用无水乙醇溶液清洗。清洗结束后,用吹风机将试样吹干后密封保存,待涂覆使用<sup>[17]</sup>。

涂液配方:片状锌粉、铝粉、缓蚀剂、黏结剂和分散剂。

配制溶液:涂液分 A、B 两个组分,A、B 组分需单独配制。

A 组分:称取 25 g 锌粉和 5 g 铝粉置于烧杯中,再量取 22 mL 聚乙二醇和 2 mL 的 NP-10 倒入烧杯中,用玻璃棒在常温下顺时针搅拌 1 h 左右,直至粉浆分散均匀。

B 组分:称取 1.5 g 钼酸钠缓蚀剂和 25 mL KH-560 硅烷偶联剂置于另一烧杯中,在常温下,利用 HJ-4 磁力加热搅拌器搅拌 1 h 左右,直至钼酸钠溶解,为使钼酸钠充分溶解,可在搅拌前用玻璃棒将钼酸钠颗

粒研磨粉碎。

两组分搅拌完成后,将 B 组分加入 A 组分,再加入稀土镧增强颗粒和 5 mL 去离子水,整体用玻璃棒顺时针搅拌 5 min 左右,待混合充分且均匀后,可放在磁力搅拌器上搅拌 8 h 左右等待后续使用。

工艺过程:将 Q235 钢片挂在铁钩上,完全浸入配制好的涂液中,重复浸入几次后,使用自制的甩涂装置甩去多余涂液,以避免涂层厚度不均以及在烧结过程中出现宏观裂纹。涂覆完成后,将试样在 200 °C 的 SX-G07123 节能箱式电炉中烘烤 15 min,然后取出空冷。冷却之后进行二次涂覆,再将试样放入 260 °C 的电炉中烧结固化 30 min 即可制得涂层。

性能测试:根据 GB/T 26110—2010《锌铝涂层技术条件》<sup>[18]</sup>对涂层表面形貌进行评价;采用 MDJ 倒置金相显微镜进行观察涂层表面微观形貌;采用 JUT-800 高精度涂层测厚仪进行测试涂层的厚度;采用表面粗糙度仪(TR-100)测试涂层的粗糙度;采用划格法测试涂层的结合力;采用全浸试验法测耐蚀性<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对涂液的影响

以稀土  $\text{LaCl}_3$  对无铬 Zn-Al 涂液性能的影响为例,主要包括黏度和稳定性。随着  $\text{LaCl}_3$  添加量的增加,涂液的黏度并未发生明显变化。所有测试样品的涂液均能够自由下落,在下落过程中保持均匀,且没有出现中断现象。这表明,在所研究的  $\text{LaCl}_3$  添加量范围内,涂液的黏度适中,不会对涂液的性能产生负面影响,可以正常使用。此外,本试验还对涂液的稳定性进行了观察。通过观察涂液状态变化来判断涂液稳定性的好坏。观察发现,所有涂液样品在室温下静置 24 h 后均未出现分层、变质变色和起泡等现象,说明  $\text{LaCl}_3$  的添加不会影响涂液的稳定性。

综上所述, $\text{LaCl}_3$  的添加不会对无铬 Zn-Al 涂液的黏度和稳定性产生负面影响,这为  $\text{LaCl}_3$  作为改性剂在无铬 Zn-Al 涂料中的应用提供了理论依据。

### 2.2 对涂层的形貌影响

图 1 展示了不同  $\text{LaCl}_3$  添加量下无铬 Zn-Al 涂层的宏观形貌。由图可以看出,所有涂层均呈现银灰色金属光泽,且表面平整,无气泡、夹杂物、裂纹等缺陷。然而,随着  $\text{LaCl}_3$  添加量的增加,涂层表面逐渐出现颗粒状物质,且颗粒随着  $\text{LaCl}_3$  添加量的增加而增多,其中添加 0.15%  $\text{LaCl}_3$  的涂层表面颗粒数最少,添加 1.0%  $\text{LaCl}_3$  的涂层颗粒最多。这表明  $\text{LaCl}_3$  的添加会导致涂层表面出现颗粒,且颗粒数量随  $\text{LaCl}_3$  添加量的增加而增多。颗粒出现可能是由于  $\text{LaCl}_3$  颗粒未完全溶解,从而在涂层制备过程中析出形成。

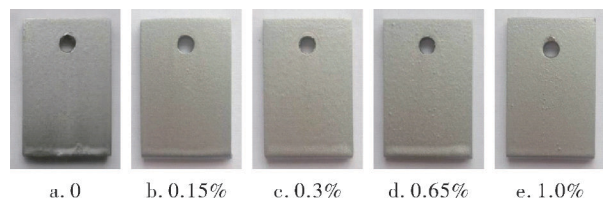
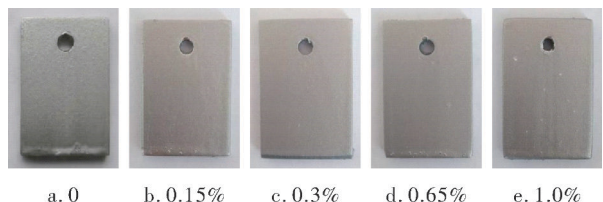
图1 不同 LaCl<sub>3</sub> 添加量下的涂层宏观形貌

图2清晰地展示了添加不同含量 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的宏观形貌变化。观察发现,相较于未添加 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的涂层,添加了 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的涂层表面显得更加光滑,金属光泽也更为强烈。值得注意的是,在添加量为 1.0% 的 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层中,表面出现了一些微小的白色斑点,这可能是由于涂液在制备过程中搅拌不够充分,导致部分微溶的 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 未能均匀分散于涂层之中。然而,这并未影响到涂层的整体质量,所有涂层表面均呈现出平整且致密的特点,无任何漏涂、气泡、剥落、裂纹或夹杂物等缺陷。此外,涂层在长时间放置后依然保持原有色泽,符合 GB/T 26110—2010 的要求,这表明少量 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的添加对优化无铬锌铝涂层的宏观形貌具有积极作用。

图2 添加不同 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量涂层的宏观形貌

### 2.3 对涂层的粗糙度影响

表1展示了添加稀土 LaCl<sub>3</sub> 和 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后涂层的粗糙度变化情况。观察稀土 LaCl<sub>3</sub> 添加量与无铬 Zn-Al 涂层粗糙度之间的关系,发现所有涂层的粗糙度均保持在 1.68~1.95 μm 的范围内。没有添加 LaCl<sub>3</sub> 的涂层为 1.68 μm;当添加 0.3% 和 1.0% LaCl<sub>3</sub> 后,涂层粗糙度仅增大了 0.02 μm,都为 1.7 μm;当 LaCl<sub>3</sub> 的添加量为 0.15% 和 0.65% 时,涂层的粗糙度分别增大了 0.14 μm 和 0.28 μm,达到 1.82 μm 和 1.95 μm。这一变化趋势表明,随着 LaCl<sub>3</sub> 添加量的增加,其对涂层粗糙度的影响逐渐增强,且这种增强效应在添加量为 0.65% 时达到了顶峰,此时涂层厚度显著增加至 1.95 μm,这可能是由于稀土 LaCl<sub>3</sub> 颗粒的加入在一定程度上与涂层基体发生反应,形成新的化合物或相,这些新形成的化合物或相可能对涂层的微观结构产生影响导致涂层表面出现微观起伏,同时也填补了部分表面缺陷,从而对粗糙度产生了一定程度的补偿作用。

与 LaCl<sub>3</sub> 不同,添加 0.15% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的涂层表现出最

低的粗糙度,达到 1.57 μm,这表明,在适量的 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加范围内可以显著改善涂层的表面光滑度,使其更加平整光滑。这种改善可能源于 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微粒在涂层中的均匀分布,它们能够填充涂层表面的微小缺陷,从而减少表面的不平整性。相比之下,其余 3 种添加了 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的涂层粗糙度均高于未添加 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的涂层,且添加 1.0% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的涂层粗糙度最高,达到 2.09 μm。这表明,过量的 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加可能导致粗糙度的增加,这可能是由于 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微粒在涂层中的分布不均或者形成了较大的团聚体,从而破坏了涂层的平整性。

表1 稀土镧涂层的粗糙度

涂层	粗糙度/μm	涂层	粗糙度/μm
未添加 LaCl <sub>3</sub>	1.68	未添加 La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.68
0.15% LaCl <sub>3</sub>	1.82	0.15% La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.57
0.3% LaCl <sub>3</sub>	1.70	0.3% La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.90
0.65% LaCl <sub>3</sub>	1.95	0.65% La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.74
1.0% LaCl <sub>3</sub>	1.70	1.00% La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.09

### 2.4 对涂层的厚度影响

表2展示了添加稀土 LaCl<sub>3</sub> 和 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后涂层的厚度变化情况。结果表明,添加 LaCl<sub>3</sub> 会导致涂层厚度上下浮动。在添加 0.15% LaCl<sub>3</sub> 时,涂层厚度最大为 32.23 μm;在 LaCl<sub>3</sub> 含量为 0.65% 时,涂层厚度最低为 17.67 μm。当 LaCl<sub>3</sub> 的添加量为 0.15% 时,涂层的厚度达到了最大值,为 32.23 μm。这可能是由于 LaCl<sub>3</sub> 微粒在涂层中的分布较为均匀,起到了一定的填充作用,从而增加了涂层的厚度。然而,随着 LaCl<sub>3</sub> 添加量的进一步增加,涂层的厚度却开始逐渐减小。当添加量达到 0.3% 和 0.65% 时,涂层的厚度分别降低到了 26.00 μm 和 17.67 μm。这可能是由于过量的 LaCl<sub>3</sub> 微粒在涂层中形成了团聚体,导致涂层内部的孔隙率增加,从而使得涂层厚度减小。在 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量逐渐增加的过程中,涂层厚度也随之上升,在 0.3% 时达到了顶峰,此时的涂层厚度高达 41.13 μm。这一峰值表明,适量的 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加可以最大化地提升涂层的厚度,从而可能增强涂层的防护性能和耐久性。然而,当 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的添加量超过 0.3% 后,涂层厚度的增加趋势开始发生逆转。随着添加量的继续增加,涂层厚度开始逐渐下降。这一变化可能源于过量的 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微粒在涂层中的不均匀分布或团聚现象,导致涂层内部的孔隙率增加,结构变得疏松,从而使得涂层厚度减小。值得注意的是,尽管涂层厚度在 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量超过 0.3% 后开始下降,但仍然高于未添加 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的涂层厚度。这表明,即使 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的添加量超出了最优范围,它仍然对涂层厚度具有一定的提升作用。

表 2 稀土镧涂层的厚度

涂层	厚度/ $\mu\text{m}$	涂层	厚度/ $\mu\text{m}$
未添加 $\text{LaCl}_3$	26.27	未添加 $\text{La}_2\text{O}_3$	26.27
0.15% $\text{LaCl}_3$	32.23	0.15% $\text{La}_2\text{O}_3$	36.00
0.3% $\text{LaCl}_3$	26.00	0.3% $\text{La}_2\text{O}_3$	41.23
0.65% $\text{LaCl}_3$	17.67	0.65% $\text{La}_2\text{O}_3$	31.50
1.0% $\text{LaCl}_3$	28.63	1.0% $\text{La}_2\text{O}_3$	30.23

### 2.5 对涂层的附着力影响

图 3 展示了  $\text{LaCl}_3$  添加量对无铬 Zn-Al 涂层附着力的影响。划格法测试结果表明,添加 1.0% $\text{LaCl}_3$  的涂层结合力略有降低,ISO 等级为 1, 其他四种涂层的结合力均表现良好,ISO 等级全为 0。这说明少量  $\text{LaCl}_3$  的添加不会影响涂层与基体的结合力,但过量的  $\text{LaCl}_3$  会导致结合力下降。结合力下降的原因可能是由于  $\text{LaCl}_3$  含量的增加减少了 KH560 和基体之间单位面积形成的共价键数量,从而降低了涂层的附着力<sup>[18]</sup>。

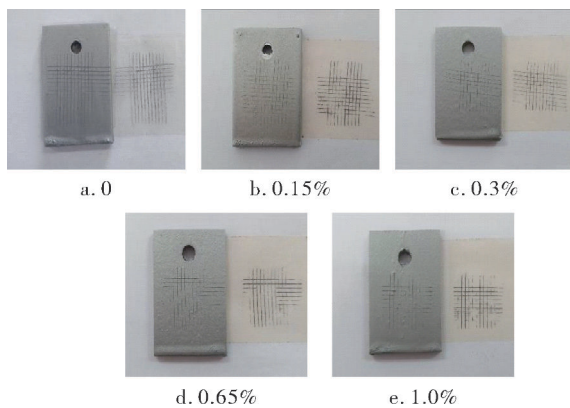


图 3 不同  $\text{LaCl}_3$  添加量下涂层附着力

但是,在添加不同  $\text{La}_2\text{O}_3$  含量的涂层结合力测试结果中,5 种涂层测试过程均无脱落,ISO 等级全为 0 级,可见,添加少量  $\text{La}_2\text{O}_3$  不影响 KH560 和基体之间单位面积形成的共价键数量<sup>[18-20]</sup>。共价键作为连接涂层与基体的关键纽带,其数量的稳定对于保持涂层的结合力至关重要。因此,在适量的  $\text{La}_2\text{O}_3$  添加范围内,涂层的结合力可以得到有效保障,不会因为  $\text{La}_2\text{O}_3$  的引入而产生不利变化。

### 3.6 对涂层的耐蚀性影响

图 4 展示了不同  $\text{LaCl}_3$  添加量对无铬 Zn-Al 涂层最终形貌的影响。观察发现,未添加  $\text{LaCl}_3$  的涂层边缘出现了红锈,表面伴有裂痕,表明其耐蚀性较差。而添加 0.15% $\text{LaCl}_3$  的涂层表面仅呈现轻微鼓包,无红锈生成,展现出较好的耐蚀性能。值得注意的是,添加 0.3% $\text{LaCl}_3$  的涂层腐蚀最为严重,表面红锈区域明显,伴有大量小鼓包和点蚀现象。相比之下,0.65%和 1.0% $\text{LaCl}_3$

添加量的涂层虽存在鼓包和轻微点蚀,但红锈较少,腐蚀程度相对较轻。综合分析,添加 0.15% $\text{LaCl}_3$  的涂层在耐蚀性方面表现最为优异。图 5 呈现了不同  $\text{La}_2\text{O}_3$  含量涂层在最终腐蚀阶段的形貌特征。结果显示,未添加  $\text{La}_2\text{O}_3$  的涂层边缘已出现明显红锈,且表面伴有细微裂痕,表明其耐蚀性较弱。添加 0.15% $\text{La}_2\text{O}_3$  的涂层则呈现出半边开裂并即将脱落的现象,基体已遭受腐蚀并产生红锈,耐蚀性能最差。添加 0.3% $\text{La}_2\text{O}_3$  的涂层保持较好完整性,仅下端略显黄色变化,展现出最优的涂层形貌与良好的耐蚀性。而添加 0.65%与 1.0% $\text{La}_2\text{O}_3$  的涂层则分别出现了开裂与点状腐蚀现象。

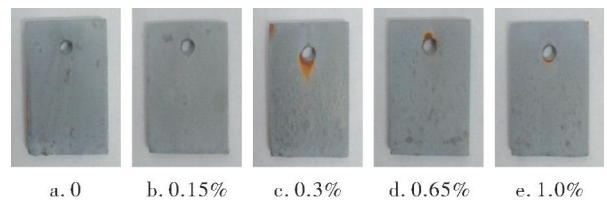


图 4 不同  $\text{LaCl}_3$  含量涂层腐蚀最终形貌

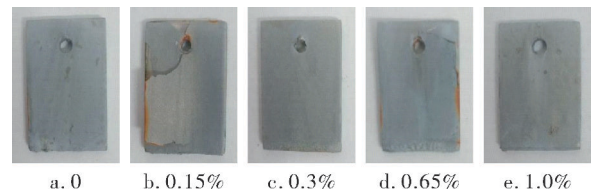


图 5 不同  $\text{La}_2\text{O}_3$  含量涂层最终腐蚀形貌

## 3 结语

1)在溶液性能和涂层形貌方面,0 至 1.0%的  $\text{LaCl}_3$  或者  $\text{La}_2\text{O}_3$  的添加对涂液性能均无明显影响。在此添加范围内,无论是添加  $\text{LaCl}_3$  还是  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,涂层表面都会呈现出良好的银灰色金属光泽。但是, $\text{LaCl}_3$  的添加会使涂层表面出现颗粒,且随着  $\text{LaCl}_3$  添加量的增加,涂层表面颗粒物增多;而  $\text{La}_2\text{O}_3$  的添加会使涂层的光滑程度更高,更具银白色金属光泽。

2)在涂层厚度和粗糙度方面, $\text{LaCl}_3$  的添加对涂层厚度的影响有限,涂层厚度仅在 17~33  $\mu\text{m}$  范围内波动,粗糙度维持在 1.8  $\mu\text{m}$  左右。 $\text{La}_2\text{O}_3$  的添加会使涂层厚度略微升高,在添加量为 0.3%时达到峰值,达到了 41.13  $\mu\text{m}$ 。 $\text{LaCl}_3$  的添加会使涂层粗糙度维持在 1.8  $\mu\text{m}$  左右, $\text{La}_2\text{O}_3$  的添加会使涂层粗糙度维持在 1.5~2.1  $\mu\text{m}$  范围内。其中添加 0.3% $\text{La}_2\text{O}_3$  的涂层粗糙度略高于添加 0.15% $\text{LaCl}_3$  的涂层。

3)在涂层结合力和耐蚀性方面,添加 0.15%至 0.65%的  $\text{LaCl}_3$  的涂层粘贴后网格依旧清晰可见,ISO 等级为 0,结合力优良,当添加 1.0% $\text{LaCl}_3$  时,涂层测试网格有微微脱落现象,涂层 ISO 等级为 1,涂层的结

合力降低。但是,在添加 0.0%至 1%的  $\text{La}_2\text{O}_3$  后,涂层测试过程均无脱落,涂层的 ISO 等级均为 0 级,这表明  $\text{La}_2\text{O}_3$  添加对涂层结合力的提升具有积极作用。添加 0.15% $\text{LaCl}_3$  可以有效提高涂层的耐蚀性,减少腐蚀试验中红锈和裂纹的出现。然而,过量的  $\text{LaCl}_3$  反而会降低涂层的耐蚀性能。对于  $\text{La}_2\text{O}_3$  而言,其添加也可改善涂层的耐蚀性,且在添加量为 0.3%时达到最优效果。

#### 参考文献:

- [1] 王泊发,俞江南,王雨侓,等. 锌铝粉包覆改性对无铬达克罗涂层耐蚀性的影响[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2024(2):48-56.
- [2] 李红玲,章艳玲. 硝酸铜改性无铬达克罗涂层的腐蚀行为与防腐机理[J]. 机械工程材料, 2023(7):37-42.
- [3] 李红玲. 环境友好型达克罗处理技术的现状及研究进展[J]. 表面技术, 2023(10):115-123.
- [4] 鲁俊,梁英,汤尚文,等. 无铬达克罗涂料工艺及耐蚀性能研究[J]. 应用化工, 2011(4):612-613.
- [5] 李新波. 稀土盐对水性锌铝涂层工艺与性能的影响研究[D]. 广州:广东工业大学, 2011.
- [6] 秦晓伟. 稀土盐对锌铝涂层性能影响的研究[D]. 上海:上海应用技术大学, 2021.
- [7] 陈丽姣. 无铬达克罗工艺及耐蚀性的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007:18-21.
- [8] 王睿谦,韩宇龙,郭丽雅,等. 稀土铈对 Q355NHq 钢在模

拟海洋大气环境中腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2024(3):37-46.

- [9] 许可,杨贵荣,宋文明,等. 稀土对复合涂层微观组织与耐蚀性影响研究进展[J]. 金属热处理, 2024(2):252-259.
- [10] 余红艳. 激光熔覆原位生长 TiC/TiB<sub>2</sub> 陶瓷相增强铁基涂层组织及性能研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2023.
- [11] 刘元伟. 纳米  $\text{SiO}_2$ -稀土元素复合改性环氧树脂防腐涂层的耐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2015(8):738-741.
- [12] 李红玲,刘清玲. 稀土在金属防腐方面的应用及研究进展[J]. 材料保护, 2013(9):48-50.
- [13] 陈仕箐,李会宁,严榕秋. 水的渗透性对水性环氧防腐涂层性能的影响[J]. 现代涂料与涂装, 2024(12):11-14.
- [14] 杨文忠,田丰. 稀土金属缓蚀剂的研究进展[J]. 工业用水与废水, 2010(5):1-5.
- [15] 侯继宗,张美明,李志宝,等. 新型水性可剥临时保护涂料的研制及性能研究[J]. 现代涂料与涂装, 2023(7):1-4.
- [16] 李红玲. 环境友好型达克罗处理技术的现状及研究进展[J]. 表面技术, 2023(10):115-123.
- [17] 陈利刚,熊莹,杨云涛,等. 金属表面  $\text{TiO}_2$  薄膜的制备及其血液相容性研究[J]. 科技风, 2009(5):45-46.
- [18] 李慧莹. 钼酸钠缓蚀剂对无铬锌铝涂层性能影响的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
- [19] 杨慧,张潇华,胡程程,等. 纳米  $\text{SiO}_2$  含量对无铬 Zn-Al 涂层性能影响[J]. 现代涂料与涂装, 2024(12):7-10.
- [20] 仝飞. 微纳米材料增强无铬锌铝涂层研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014. ◆

(上接第 10 页)次,在不饱和聚酯基材上附着力达 0 级。

2)选择固化剂 N3390,涂层在弹性手感良好的基础上,其耐摩擦达 60 次以上和良好的抗刮效果,可操作时间符合连续流生产线的效率要求。

3)固化剂添加量按  $n(\text{NCO}):n(\text{OH})=(1:1.1)$  为宜,过量可能导至涂层变硬,影响手感。

4)消光粉 OK520 添加量不超过 6%为宜,光泽度约为 8%,过量的消光粉可能导涂层发白和附着力减弱。

5)喷涂橡胶漆需要良好的施工环境,相对湿度大于 90%时应停止喷涂作业。

#### 参考文献:

- [1] 肖铁民,何健松,冯小龙,等. 聚氨酯材料在汽车领域应用的研究现状与发展趋势[J]. 机电工程技术, 2025(7):1-6.

[2] 孙源,辛宇,田丰,等. 生物医用聚氨酯材料用于组织再生修复替代的应用进展[J]. 石油化工, 2024(8):1089-1097.

[3] 姚督生,王光芒,诸峰,等. 聚氨酯材料在锂离子电池中的应用的最新进展[J]. 当代化工研究, 2024(20):11-14.

[4] 舒航,王宝清. 弹性手感涂料的简介及发展[J]. 河南化工, 2017(11):17-19.

[5] 张玉兴,陈斌,王木立. ABS 用弹性手感涂料的研究[J]. 涂料技术与文摘, 2013(12):27-29.

[6] 王敏. 弹性橡胶装饰涂料的研制与施工[J]. 现代涂料与涂装, 2007(3):15-18.

[7] 钟范. 不饱和聚酯树脂在复合材料中的应用及发展[J]. 现代盐化工, 2024(6):4-5.

[8] 张文泉,祖宇飞,李明浩,等. TMP/BDO 配比对聚氨酯弹性体结构及性能的影响[J]. 聚氨酯工业, 2025(1):10-14. ◆