

抛丸工艺对油漆涂层性能的影响

李佩林, 陈欣华, 张俊荣, 郭春杰
(博戈橡胶塑料(株洲)有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 分别对抛丸处理和未抛丸处理的金属基材进行对比, 包括基材的表面形貌、粗糙度、液体接触角、表面能等, 分析抛丸和未抛丸试板表面的差异。对抛丸处理和未抛丸试板喷漆后涂层的附着力、湿热试验、盐雾试验及户外加速腐蚀试验等性能进行对比。结果表明: 增加抛丸处理对于涂层的附着力及防腐性能有明显的提升, 并针对抛丸管理提出相关建议。

关键词: 抛丸; 涂层; 附着力; 湿热; 盐雾; 腐蚀

中图分类号: TQ639 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)08-0026-04

Effect of Shot Blasting on Performance of Metal Surface Coating

LI Pei-lin, CHEN Xin-hua, ZHANG Jun-rong, GUO Chun-jie
(BOGE Rubber & Plastics (Zhuzhou) Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China)

Abstract: The surface morphology, roughness, liquid contact angle and surface energy of the metal substrates treated with and without shot blasting were compared respectively. The adhesion, thermal-humidity resistance, salt spray resistance and outdoor accelerated corrosion properties of shot blasting and non-shot blasting samples were compared, and it was found that the above properties after shot blasting were obviously better than those of the non-shot blasting, put forward relevant suggestions for improving shot blasting management.

Key words: shot blasting; coating; adhesion; thermal-humidity resistance; salt spray; corrosion

0 引言

金属防腐^[1-2]有喷漆、喷粉、电泳、自泳、电镀、久美特、冷喷锌、渗锌等各种防腐工艺。其中, 喷漆工艺是通用性强、应用最广泛的防腐工艺。

涂装三要素包括涂装工艺、涂装材料、涂装管理。涂装行业一直有“三分油漆, 七分施工”的说法, 充分体现了涂层质量不仅与涂料本身性能有关, 而且与涂装工艺及管理也有重要关联。

涂装前处理工艺有抛丸、喷砂、喷丸、打磨、酸洗、磷化、激光处理、火焰处理等。而抛丸处理工艺具有设备投资较小、操作简单、生产效率高、无需化学品等优点, 是一种应用非常广泛的物理处理方式。抛丸的基本原理是利用高速旋转的抛丸器将钢丸或钢砂甩出, 对工件表面进行冲击、切削以便清理表面氧化皮、锈

蚀、污物等, 达到清洁和产生一定粗糙度的作用。通过选择丸料的颗粒大小、形状、材质、硬度, 控制合适的电流、抛射时间, 得到理想的表面处理效果。金属表面通过抛丸处理后既清理了锈蚀和氧化皮, 同时可使基材表面获得合适的粗糙度, 增加油漆和金属基材的附着力^[3]。

本文针对抛丸和不抛丸处理的两种金属表面状态及喷涂后涂层的性能进行了对比测试和分析研究, 得出了数据量化的结果, 展现了抛丸对涂层性能的具体影响, 更加直观。

1 试验部分

1.1 主要原材料

150 mm×100 mm×5 mm 碳钢试板, HT-1 脱脂清洗剂, GH40 钢丸, 某品牌双组分黑色环氧油漆(涂层厚度 80~120 μm)。

1.2 工艺方案

方案一: 有机溶剂脱脂(HT-1 清洗剂清洗试板)→砂纸研磨→喷漆→干燥。

收稿日期: 2024-04-25

作者简介: 李佩林(1973—), 男, 本科, 主要从事表面处理、涂装工艺技术工作。E-mail: LPL200509@126.com。

方案二:有机溶剂脱脂(HT-1 清洗剂清洗试板)→抛丸处理(Q326 抛丸机、GH40 钢丸)→喷漆→干燥。

1.3 性能检测

1.3.1 表面形貌

采用日立 S-3700N 扫描电镜观察抛丸和未抛丸试板的表面形貌。采用德国马尔 MarSurf PS10 便捷式粗糙度仪测量抛丸和未抛丸试板的表面粗糙度(R_z)。采用美国科诺工业有限公司的 SL150E 接触角测试仪测量试板表面的水和 CH_2I_2 (二碘甲烷)的接触角,再根据杨氏方程计算出表面张力,通过对比抛丸和未抛丸试板表面张力的大小,反映抛丸能增加金属基材的表面活性基团,从而有利于涂料与金属基材的化学结合的能力。

1.3.2 附着力

采用划格法和拉开法测试附着力,对比抛丸和不抛丸处理的钢板上漆膜附着力的差异。

划格法(GB/T 9286—2021)附着力测试操作简单,既可用于实验室也可用于生产现场实物测试,实际应用较广泛,通过评级来判定,最高为 0 级,但无法体现附着力的具体数值。

拉开法(GB/T 5210—2006)可以得到准确的附着力数值,可以量化出涂层附着力的实际强弱差异,用数字表示涂层附着力,量化直观,对于附着力的对比验证更精准。但其主要用于实验室,现场应用较少。

1.3.3 耐湿性

按 STD 423—0018 标准进行 96 h、360 h 湿热试验,对比抛丸和不抛丸处理的钢板上漆膜耐湿性能的差异。

1.3.4 耐盐雾腐蚀性能

采用 STD 420—0010 进行 500 h 盐雾试验,对比抛丸和不抛丸处理的钢板上漆膜耐盐雾腐蚀性能的差异。

1.3.5 户外加速腐蚀性能

采用 STD 1027、1372 标准进行 12 周加速户外耐腐蚀测试,对比抛丸和不抛丸处理的钢板上漆膜的防腐性能的差异。

2 结果与讨论

2.1 抛丸和未抛丸试板表面状态对比

2.1.1 表面形貌

抛丸和未抛丸试板表面形貌如图 1 所示。

由图 1 对比观察可知,抛丸后的试板表面更为粗糙。

2.1.2 表面粗糙度

抛丸和未抛丸试板表面粗糙度如表 1 所列。

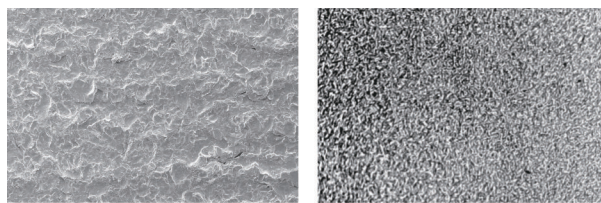


图 1 抛丸和未抛丸试板表面形貌

表 1 抛丸和未抛丸试板表面粗糙度

试板	粗糙度值(R_z)/ μm
未抛丸试板	5.1~6.2
抛丸试板	26.0~48.0

由表 1 可知,抛丸的试板表面比未抛丸的试板的表面粗糙度增加了 20~35 μm 。

根据 Wenzel 理论,所有的固体表面均具有一定粗糙度,粗糙表面的实际表面积 S_A 远远大于其几何表面积 S_G 。Wenzel 将固体表面粗糙度定义为 $r=S_A/S_G$,且粗糙度 $r \geq 1$ 。当 $r=1$ 时,固体表面为理想表面, r 值越大固体表面越粗糙。从 Wenzel 方程中可以看出,增加固体表面粗糙度,可使亲水表面的亲水性增强。涂膜与基材间的附着有机械附着和化学附着两种机理,其中机械附着力取决于基材的性质(粗糙度、多孔度)以及所形成的涂膜强度。

2.1.3 试板的液体接触角和表面能

抛丸和未抛丸试板表面能如表 2 所列。

表 2 抛丸和未抛丸处理试板的液体接触角和表面能

表面处理	水滴定接触角/ $^\circ$	二碘甲烷滴定接触角/ $^\circ$	色散分量/ $(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	极性分量/ $(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	表面能/ $(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$
未抛丸	131.1	84.5	17.92	1.07	19.00
抛丸(GH40)	104.9	58.8	30.26	0.03	30.29

由表 2 可知,未抛丸试板的表面能为 19.00 mN/m ,而抛丸试板的表面能为 30.29 mN/m ,抛丸试板比未抛丸的表面能增加了约 60%。

润湿是影响涂膜附着于基材上的一个重要因素,接触角反映的是液体对基材表面润湿的能力,接触角越小越利于润湿,反之则越难润湿,因此从润湿角度,欲使油漆能很好地附着在低表面能的基材上,可通过提高基材的表面张力来达成。

根据 Young 方程: $\cos\theta=(\gamma_{s-g}-\gamma_{s-l})/\gamma_{l-g}$ 可知,基材表面能越高使其润湿的液体越多。表面能越大,吸附能力越强,基材表面容易与涂料分子形成较强的作用力。

2.1.4 小结分析

油漆与基材的附着力主要有机械附着和化学附着 2 种机理,其中化学附着与油漆材料、基底材质、表面能等相关,而机械附着则与基材的粗糙度、比表面积、多孔度等相关。

根据对试板的表面形貌及粗糙度,接触角、表面能等的对比分析可知,抛丸处理后的金属试板表面的油漆涂层附着力理论上应该优于未抛丸试板涂层。

2.2 抛丸和未抛丸试板油漆涂层的附着力

抛丸和未抛丸试板油漆涂层的拉开法附着力对比如表 3 所列。

表 3 拉开法附着力对比

项目	抛丸			未抛丸		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#
破坏力/MPa	8.2	9.1	8.5	6.5	6.8	7.1
平均值/MPa	8.6			6.8		

由表 3 可知,未抛丸的油漆试板附着力为 6.8 MPa,经抛丸处理的油漆试板平均附着力提升至 8.6 MPa,附着力提升了 26.5%,提升非常明显。

抛丸和未抛丸试板油漆涂层的划格法附着力对比如表 4 所列。

表 4 划格法附着力对比

项目	抛丸			未抛丸		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#
附着力/级	0	0	0	0	0	0

由表 4 可知,两种油漆试板涂层的划格附着力均为 0 级,并没有差别。分析其原因:划格附着力测试用 0、1……的级别表示,是一种定性的测试方法。本试验采用的油漆为双组分环氧漆,油漆与基材本身的附着力好,不抛丸时划格附着力已达到了 0 级,因此增加抛丸处理其划格附着力也同为 0 级,未增加。

2.3 抛丸和未抛丸试板油漆涂层防腐性能

2.3.1 湿热试验对比

抛丸和未抛丸湿热试验对比如表 5 所列。

表 5 96 h、360 h 湿热试验对比

项目	起泡等级/级			划格附着力/级			评价
	1#	2#	3#	1#	2#	3#	
96 h	未抛丸	0	0	0	0	0	合格
	抛丸	0	0	0	0	0	合格
360 h	未抛丸	1	1	1	1	1	不合格
	抛丸	0	0	0	0	0	合格

注:油漆试板膜厚 100~110 μm。

由表 5 可知,耐湿试验 96 h 后,两种试板均无起泡,划格附着力未出现下降,涂层性能均合格且无明显的差别。试验 360 h 后,未抛丸板则出现了起泡、划格附着力也由初始 0 级下降至 1 级,而抛丸试板则依然合格,说明抛丸对于涂层的较长时间的抵抗湿热的性能有明显提升。

2.3.2 盐雾试验对比

抛丸和未抛丸盐雾试验对比如表 6 所列。

表 6 500 h 盐雾试验对比

项目	油漆试板(膜厚 100~110 μm)	
	未抛丸处理	抛丸处理
试验要求	试验时间 500 h,非划痕区域腐蚀面积不超过 0.05%; 划痕处腐蚀宽度 ≤ 3 mm	
试验结果	划痕处涂层剥离、丧失 附着力的面积约达 50%	表面无泡无锈,斜线腐蚀宽度 2.6 mm,水平线的腐蚀宽度 2.5 mm
评价	不合格	合格

表 6 中 500 h 盐雾试验^[4]的结果表明,经抛丸处理的试板附着力和起泡评价均合格,但未抛丸处理的试板附着力和起泡评价均不合格^[9]。说明抛丸和未抛丸处理的油漆试板在经过较长时间的盐雾腐蚀后存在较明显的差异。

500 h 盐雾试验^[4]的结果还表明,未抛丸处理的试板涂层附着力不合格^[9],附着力下降明显,出现大面积剥落,而经抛丸处理的试板表面无起泡、无生锈,斜线和水平线的腐蚀宽度为 2.6 mm、2.5 mm,评价为合格。说明经过长时间的盐雾试验后,抛丸处理的油漆试板在盐雾试验中的抗腐蚀性能大大提高。

2.3.3 加速户外腐蚀对比

抛丸和未抛丸加速户外腐蚀对比如表 7 所列。

表 7 12 周加速户外腐蚀试验结果对比

项目	油漆试板(膜厚 100~110 μm)	
	未抛丸处理	抛丸处理
试验要求	试验时间 12 周,非划痕区域腐蚀面积不超过 0.05% (≤Ri 1 级);划痕处腐蚀宽度 ≤ 6 mm	
试验结果	非划痕区的表面无锈; 划痕处剥离腐蚀宽度分别 10 mm、11 mm	非划痕区的表面无锈; 划痕处剥离腐蚀宽度分别 为 3.1 mm、3.2 mm
评价	不合格	合格

12 周加速户外腐蚀试验结果表明,抛丸处理和未抛丸处理的油漆试板在经过较长时间的户外加速腐蚀

试验后,存在较明显的差异,经抛丸处理的油漆试板防腐性能更优,这也与表6盐雾腐蚀中两者结果差异的趋势一致。

3 结语

沃尔沃、斯堪尼亚、戴姆勒等作为欧美防腐标杆的商用车企业,其表面处理防腐体系标准中附着力的测试标准和要求非常多,通过多维度模拟各种工况环境来测试涂层体系的附着性能,除了常规的划格附着力测试外,还有耐高压水冲击测试附着力、-20℃低温附着力测试、湿热试验后附着力测试、耐热水浸泡试验后附着力测试、500~1 000 h盐雾腐蚀试验后附着力测试、6~12周循环腐蚀试验后附着力测试等。由此可见附着力是涂层性能中的一项关键和重要指标,是涂层防腐防护及其他各项性能的前提和基本保障。

涂层与基材间的附着力由机械附着力和化学附着力两大类组成。通过对抛丸处理和未经抛丸处理的金属试板粗糙度、接触角、表面能、涂层的拉开法附着力、划格法附着力等的对比检测和分析,抛丸处理可提高金属基材的粗糙度,增大比表面积,增加金属表面的活性、增大表面能,从而提高金属基材与涂料涂层的附着力。通过湿热试验、盐雾试验、循环腐蚀试验等各项测试结果发现,在抵抗腐蚀的试验过程中出现起泡、剥落、腐蚀等失效现象时会伴随有附着力下降甚至丧失,因此涂层附着力下降是导致涂层防护失效的重要原因。同时也看到经抛丸处理的金属基材的油漆涂层抵抗各项腐蚀的能力也大幅提升。

抛丸工艺及管理是一个系统工程,影响抛丸质量的因素较多:抛丸前基材表面氧化皮、锈蚀程度,磨料的硬度、材质及化学成分、晶相结构,磨料的粒径及配比,抛丸的时间及电流,抛射的角度,抛头挡板的调整、维护更换,除尘器的清理维护、保养更换等,日常管理中需提高认识、加强细节的管控。

1)要提高粗糙度的认知:粗糙度大小不利于涂层附着力,但粗糙度也并非越大越好,粗糙度过大会使涂层膜厚不均匀,在波谷凹坑处会截留气泡,易导致涂膜起泡,波峰处膜厚不足,引起“点锈”,同时,粗糙度过大,还会造成膜厚的“损失”,增加涂料成本。金属表面处理的粗糙度值一般控制在涂层总厚度的25%~30%为宜。在满足最小粗糙度前提下,应尽量选择小粒度的磨料,从而提高清理效率,同时还可减少涂料的消耗量,节约成本。

2)磨料添加方面要精细化管理:根据磨料筛分的情况制定添加的频率及单次添加量,尽量以少量多次的原则,单次补充新磨料的量不能超过总仓量的10%~15%,以免打破各种丸粒大小分布的平衡,以保持抛

丸磨料颗粒大小的相对稳定,从而保证金属表面抛丸清理后外观质量、粗糙度的稳定。

3)磨料用量的管理要系统思维:磨料用量是抛丸成本的一个直观的指标,一般都会制定消耗量定额。消耗量异常时,要分析原因,切不可简单化管理。某生产现场出现的案例,月末盘点时现场管理人员发现磨料消耗量超过定额且大幅增加,现场管理人员在次月采取限制物料的领用量、减少添加量等简单化的管理举措,从而导致出现产品抛丸质量变差,引发质量异常。消耗异常管理无可非议,但必须进行系统性的原因分析,找出引起消耗量增大的真实原因。因为导致磨料消耗量增加的可能因素很多,比如磨料来料质量不合格(粒径变小、硬度过大、化学成分不合格、晶相组织不均匀),易破碎,抛丸机的抛头挡板磨损严重导致抛射方向角度变化、形成无的放矢的抛射状态,从而增加无效的损耗,金属基材表面状态变差(氧化生锈严重)等诸多可能因素。

4)抛丸不能除油:抛丸前基材表面有轻微油污时,少数操作人员或现场管理人员重视度不够,甚至认为轻微油污可通过抛丸清除。抛丸前基材表面的油污会导致磨料污染,从而影响所有抛丸产品表面的清洁度,甚至影响涂层附着力及其他防腐性能。

5)预防性维保、禁止设备带病工作:坏了再修的做法还是不同程度存在,因此要有明确的设备维护保养标准并坚决落实执行。抛丸设备的磨损与日俱增,比如抛头导向板磨损到一定程度会导致磨料抛射的角度和方向发生变化,导致清理时间延长、产品局部清理不彻底、增加磨料的损耗。因此应制定合理的定期校准的频率和方法,并严格落实,进行预防性保养,确保角度和方向无变化,从而保护抛丸质量的稳定性和一致性。绝不能以减少设备维护成本为理由,直至彻底磨坏才更换配件的标准。

参考文献:

- [1] 王健,刘会成,刘新.防腐涂料与涂装工[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [2] 刘新.防腐涂料与涂装应用[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [3] 李慧娟,吴丽霞.基于抛丸钢板油漆附着力分析与研究[J].湖北科技学院学报,2015(9):60-62.
- [4] 曹晓东,张平,季小沛.涂层耐中性盐雾试验的划线方法及试验后的评定[J].涂料工业,2007(3):61-62.
- [5] 赖春晓.涂膜起泡和剥离的形成机理及防止方法[J].全面腐蚀控制,2002(2):15-18.