

# 浅谈涂层附着力的影响

毛爱姣, 彭沁湖

(国营长虹机械厂, 广西 桂林 541003)

**摘要:** 涂层材料通过涂装的方法使之附着在基底材料上, 起到保护、装饰和其他功能性作用。本文探讨了涂层附着力的理论, 包括锚固理论、吸附理论和化学理论, 并通过实例验证理论的作用效果, 同时还分析了施工方法和环境因素对涂层附着力的影响。

**关键词:** 涂层; 附着力; 原理; 措施

中图分类号: TQ639

文献标志码: B

文章编号: 1007-9548(2025)03-0067-03

## Influence of Coating Adhesion

MAO Ai-jiao, PENG Qin-hu

(State-owned Changhong Machinery Factory, Guilin 541003, Guangxi, China)

**Abstract:** The coating material is attached to the substrate material by the method of coating, which plays a protective, decorative and other functional role. In this paper, the theory of coating adhesion is discussed, including anchoring theory, adsorption theory and chemical theory, and the effect of the theory is verified by examples, and the influence of construction methods and environmental factors on coating adhesion is also analyzed.

**Key words:** coating; adhesion; principle; measures

## 0 引言

涂料作为一种古老的材料与人类的生活息息相关, 随着航空航天、汽车等行业的快速发展, 涂装行业也进入到红利期。涂料是一种起到保护、美化、特种功能作用的材料, 同样渗透到我们生活的方方面面。但是要想实现这些功能, 涂层需要附着在基材表面, 所以附着力一直都是评价涂层好坏的一项重要指标。涂层作为一种混合物, 包括成膜物质、颜料、溶剂和助剂等, 成膜物质是涂层最主要的成分, 通常为高分子材料, 对涂层性能起主要作用; 颜料赋予涂层颜色, 溶剂主要保持涂料的均匀程度, 助剂主要稳定涂料, 各类成分相互作用配合, 形成相对稳定的悬浊液, 后续涂装才能表现出最好的效果。附着力不仅与涂层成分配合度有关, 还与涂层与基材的相互作用有关, 同时还与施工方法和所

处环境有关。故分析涂层的附着力往往从涂料本身、涂层与基材作用进行初步判断, 再根据涂料的情况对其涂装方法和环境进行合理选用以获得附着力优良的涂层。本文介绍了3种附着力理论, 主要分析了涂层与金属基材的相互作用机理和适用范围, 同样也分析了涂装方法和环境因素对涂层效果的影响。

### 1 附着力

涂层的附着力是指涂层与基材通过各种方式相互粘接在一起的能力, 其强度可直接影响涂层的实用性和耐久性。附着力越强, 涂层在基材上的粘接越牢固, 相反则容易脱落, 甚至促使材料老化、腐蚀与磨损加剧。

#### 1.1 锚固理论<sup>[1-2]</sup>

在涂装过程中, 需要对基底打磨粗化, 一方面增大涂层与基底的接触面积, 另一方面粗化过程形成无数嵌合点, 这些嵌合点像锚一样将涂层固定在基底上, 增强表面机械嵌合作用, 从而增强涂层与基底材料的附着力, 这样的嵌合锚定称为“锚固理论”。

收稿日期: 2024-07-10

作者简介: 毛爱姣(1996—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事涂层相关技术研究工作。E-mail: 502162365@qq.com。

基材的表面粗糙度不宜过大,根据理论计算和实际经验,最大粗糙度应控制在干膜总厚度的 1/3 以下,否则会降低涂层的使用性能和整体涂层厚度的均匀性。基材表面微观结构影响涂层附着性,过大或过多的微孔或峰谷导致涂层渗透困难,形成空隙,降低附着力。粗糙度对涂层附着力有显著影响<sup>[3]</sup>,当粗糙度变化数  $\mu\text{m}$  时,附着力可发生几 MPa 的变化。有试验证明,就硅烷环氧杂化树脂涂层涂覆于 LY12 铝合金结构而言<sup>[4]</sup>,涂层厚度为  $(30\pm 2)\mu\text{m}$ 、表面粗糙度  $R_a=4.75\mu\text{m}$  时,涂层的附着力最高,为 8.84 MPa。理论计算也表明当  $R_a=4.8\mu\text{m}$  时,附着力最高,为 17 MPa。同时,涂层粗糙度不是越高越好,存在一个最佳值,需要试验和理论探索。同样地,采用不同的粗化方法、选用合适的粗化时间进行前处理,形成基材形貌纹理也会影响涂层的附着力<sup>[5]</sup>。综上所述,前处理粗化过程对涂层的附着力有重要影响,根据所要涂覆厚度设计相对应的粗糙度及纹理,可优化涂层附着力。

## 1.2 吸附理论

壁虎能在墙上爬行不是依赖所谓的“吸盘”,而是由其特殊的脚掌结构所产生的分子引力,这种分子引力被称为分子间作用力。研究发现,分子间作用力分为范德华力和氢键(如表 1 所列)。其中,范德华力可以分为色散力、诱导力和色散力 3 种类型。一些附着力较好的漆料,如环氧涂料、丙烯酸涂料和聚氨酯涂料中具有  $-\text{OH}$ 、 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{NH}_2$  基团,这些基团易与基底材料形成相互作用力。吸附理论认为吸附分为两个阶段,首先是涂层分子迁移至基底表面并靠近作用基团,然后在距离小于引力范围时吸附在基底上。

表 1 不同类型作用力及作用情况

作用类型	作用范围/nm	作用力种类	作用能/( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )
化学键	0.1~0.3	离子键	600~1 000
		共价键	60~700
		金属键	110~350
氢键	<0.4	氢键	<50
范德华力	<1.0	静电力	<20
		诱导力	<2
		色散力	<40

有研究表明<sup>[6]</sup>,对于环氧树脂而言,增加环氧含量在一定程度上增大了基材与涂层的相互作用力,其附着力大幅提高,当环氧含量为 30% 时,其附着力达到 3.6 MPa,但是继续增加环氧含量,会导致内部环氧涂层的相互作用,造成涂层内聚力增大,导致附着力下降。

由于分子间作用力广泛存在于自然界中,故吸附理论可以分析几乎所有涂层与基底之间的附着力,可

以解释大多数涂层与基底材料的相互作用,但在考虑具体哪种作用力为主要影响因素时,需要掌握涂层与基材的具体信息,并且根据作用力的大小以及内外因素进行具体分析。

## 1.3 化学理论

涂层与基底材料之间会发生化学反应形成化学键,或与基底金属表面熔融,与之形成金属间化合物,增强两者牢固性,比较典型的例子是偶联剂的应用以及高分子涂层的支链官能团与基底材料表面形成化学键合。有研究发现极性单体接枝链的引入能够显著提高涂层与铝基材的附着力,改善的程度取决于接枝链中所带的功能基团种类和密度。功能基团密度越高,附着能力越强;在功能基团密度一致的情况下,其功能基团的极性越大,对金属基材的附着力越强。

有研究表明<sup>[7]</sup>,组胺接枝活性环氧树脂是一种具有特殊化学结构的树脂,其分子内含有的活性基团能够与金属表面形成牢固的化学键。将其用作涂层材料的成膜物,可以有效增强涂层与金属基材之间的结合力,提高抗腐蚀性能和耐磨损性能,使涂层在深海等恶劣环境下具有更长久的保护效果。

化学理论需要涂层与基材形成化学键或离子键,这些键能大,作用力强,当涂层与基材以化学吸附为主导时,往往表明涂层具有较好的吸附性。一般地,对于金属基材,涂层需要具备大量的极性基团才能形成良好的吸附作用。

以上 3 种吸附理论都只能解释部分现象,具有一定的适用范围和局限性。对于具体涂层与基底,不是单一理论就能解释的,需要充分考虑这 3 种理论的适用性,具体分析主要影响因素,进而找到改进措施。

## 2 施工方法及环境因素

### 2.1 施工方法

涂装方法更多影响涂层的均匀性,而涂料内部结构的不均匀固化和涂层内部的缺陷是导致涂层强度下降的主要原因之一。这种不均匀固化和缺陷会导致应力集中,从而引起微裂纹的产生。当这些微裂纹扩展到基材与涂层界面时,涂料与基材的粘接点会被破坏,导致附着力明显下降。因此,为了提高涂层的质量和性能,需要注意涂料的均匀固化和内部缺陷的控制。

有研究发现<sup>[8]</sup>,浇涂获得涂层出现了大面积的起皮、皲裂,在固化过程中受到应力作用导致裂纹出现;而刷涂的涂层未有裂纹,但是有明显的刷痕,表明涂料的整体流平性不佳;浸涂获得涂层成膜性良好,但是可明显看出整体厚度均一性较差,并且有部分流平痕迹;喷涂获得涂层整体效果最佳,未有裂纹、起皮、流挂痕迹等不良外观,且整体的厚度均一性良好。

## 2.2 环境

在喷涂过程中, 涂料需要迅速湿润基材表面并且均匀地流动开来, 通过加热基材, 涂料的黏度会降低, 活化涂料分子的运动能力, 使其更容易在基材表面扩展和渗透, 形成均匀的涂膜。尤其是当一定条件下(例如温度高于涂层  $T_g$ ), 涂层更易扩散到基材中。这种扩散导致在局部区域形成了高分子互容的共混物, 从而使涂层与基材之间的界面层模糊甚至消失, 这种现象可以显著提高涂层在基材上的附着力。

湿度对涂层有重要的影响, 在高湿度环境下, 涂层固化过程中可能会受到水分的影响而导致附着力不佳。特别是对于一些水性漆来说, 高湿度环境下会使其固化速度变慢, 增加涂层与基材之间的界面张力, 降低附着力。此外, 在极端干燥的低湿度环境下, 涂层固化过快可能导致脆化和开裂, 进而影响附着力。

## 3 结语

喷涂技术是工业重要的组成部分, 附着力的强弱直接影响着涂层功能性的发挥, 本文介绍了几种涂层与基底材料附着力的理论及其使用案例, 实际操作中, 面对不同涂层与基材的情况, 分析其中最主要的影响因素, 采取相应的措施, 高效改善涂层的附着力。涂层与基底材料之间的相互作用情况较为复杂, 本文总结的 3 种理论只能在一定程度上解释它们之间的作用力。此外, 涂层干燥过程和干燥后的使用环境也会影响涂层的附着力, 所以需要综合考虑界面因素与环境因素, 以提高附着力。

## 参考文献:

- [1] 汤朋, 刘兰轩, 曹东萍, 等. 有机涂层附着机理及附着力提高方法综述[J]. 材料保护, 2020(2): 126-135.
- [2] ABHINAV, KUSTAGI H K, SHANKAR A R. Adhesion strength of plasma sprayed coatings—a review [J]. Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability: Proceedings of ICIMES, 2019, 2020: 77-83.
- [3] LEE H Y, QU J M. Microstructure adhesion strength and failure path at a polymer/roughened metal interface[J]. Journal of Adhesion Science & Technology, 2003, 17(2): 21.
- [4] 慕仙莲, 何卫平, 张雪原, 等. 粗糙度对硅烷环氧杂化树脂涂层附着力影响[J]. 环境技术, 2024(2): 49-57
- [5] ZHAN X, YI P, LIU Y, et al. Effects of texture spacing and bulges of bionic sinusoidal texture on the adhesion properties and fracture mechanism of plasma-sprayed coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 393: 125772.
- [6] WADDINGTON S, BRIGGS D. Adhesion mechanisms between polymer coatings and polypropylene studied by Xps

and SIMS[J]. Polymer Communications (Guildford), 1991 (16): 506-508.

- [7] 李志宝, 侯继宗, 宋欢欢, 等. 聚丙烯塑料表面涂料的研究[J]. 现代涂料与涂装, 2023(12): 1-3.
- [8] 陈宝, 张世龙, 张东亚, 等. 环氧改性聚硅氧烷污损释放涂层的制备及其力学性能研究[J]. 表面技术, 2024(6): 168-182.
- [9] 曹京宜, 李敬, 殷文昌, 等. 组胺改性环氧树脂及其对有机涂层性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024(1): 151-158.
- [10] 朱耿增, 杜宝帅, 姜波, 等. 不同制备方法对疏水涂层性能的影响[J]. 山东工业技术, 2023(6): 69-74. ◆

(上接第 54 页) 差符合标准, 目视效果良好, 判定合格。

## 5 注意事项

- 1) 超低温亚光黑粉在自动粉房喷涂, 在使用前, 参照换色的指导, 清理喷粉系统及粉房;
- 2) 超低温粉喷涂完成后, 不需要再清理粉房, 可直接切换普通低温黑色粉末继续生产;
- 3) 超低温亚光黑粉使用完成后, 放置到 23 °C 以下的干燥环境中存储。

## 6 应用情况

- 1) 生产厚板件时, 粉房需要换粉, 经过验证, 超低温粉混入产线现有低温粉末中, 涂层外观几乎没有影响, 所以只需要在换粉前简单吹扫粉房, 更换粉末, 2 人同时作业耗时约 10 min。
- 2) 厚板件使用超低温粉末涂料, 可以实现与薄板件同炉烘烤, 但需要换粉作业, 为避免频繁换粉造成工时浪费, 每天会集中生产含有厚板件的车型, 但可以实现成套生产。

3) 超低温粉末已经量产投入使用半年之久, 使用过程中, 光泽、膜厚、色差均符合公司标准。

4) 成本方面, 节省的电能和天然气的费用, 再扣除涂料成本上涨的成本后, 使用半年成本节省 15 万元以上, 年节省成本保守推测 30 万元以上, 厚板件产量越高, 成本节省效果越大。

## 7 结语

使用 2 种不同固化窗口粉末涂料实现薄厚板共线同炉生产的前提是最薄和最厚工件的升温曲线分别满足粉末涂料干燥条件, 工件的升温曲线又很难通过理论计算得出, 所以在设计产线之初想要论证是否可以采取这种模式生产, 必须借用干燥设备实测工件的升温曲线。根据最薄和最厚工件的升温曲线计算, 如果采用 2 种不同固化窗口粉末涂料, 仍然不能满足同炉共线生产, 根据产能和预算, 可以考虑建造 2 条干燥炉并行的方案或是厚板件单独烘烤的方案。 ◆