

# 涂料耐沾污性能的机理及其改善方法

夏志宇, 淳 华, 杨鹏飞, Nistratov Andrian  
(瑞通高分子科技(浙江)有限公司, 浙江 湖州 313019)

**摘要:** 耐沾污性及耐久性是影响涂料性能的关键指标,也是涂料应用过程中尚待改善的问题。本文对沾污过程的机理、影响因素以及耐沾污的测试方法和测试标准进行了总结和分析,阐述了涂膜污染的类型、机理以及影响耐沾污性能的因素,包括成膜物质、玻璃化转变温度( $T_g$ )、颜料体积浓度(PVC)、助剂、微观结构及表面粗糙度等。对提高涂料耐沾污性能的方法进行了探讨,为涂料耐沾污性能进一步提升和相关产品的研发提供参考。

**关键词:** 涂料; 耐沾污性; 耐久性

中图分类号:TQ630 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2025)11-0037-04

## Mechanism of Stain Resistance in Coatings and Approaches for Its Improvement

XIA Zhi-yu, CHUN Hua, YANG Peng-fei, Nistratov Andrian  
(Ruitong Polymer Technology (Zhejiang) Co., Ltd., Huzhou 313019, Zhejiang, China)

**Abstract:** Stain resistance and durability are key performance indicators for coating improvement. This article summarizes the mechanisms of the staining process, influencing factors, testing methods, and relevant standards. It elaborates on the factors affecting stain resistance, including film-forming resin, glass transition temperature ( $T_g$ ), pigment volume concentration (PVC), and additives. surface morphology, and roughness, etc. Methods to improve the stain resistance of coatings are also discussed for reference in the continued product development of paints and coatings with improved stain resistance.

**Key words:** coating; stain resistance; durability

## 0 引言

涂料作为一种重要的防护和装饰材料,在实际使用过程中,不可避免地会接触到各种污染物,如灰尘、油污、水渍、微生物,甚至是具有腐蚀性的化学品。这些污染物的附着不仅会影响涂层的美观性,还可能降低涂层的防护性能,缩短其使用寿命。例如,沾污可以影响涂层的隔热或热反射效果、抗菌效率、自清洁性能,还可能导致变色问题。保持涂料的耐久性及其装饰性是涂料品质的一个重要指标,优良的耐沾污性可以保持涂料的美观,对基材提供长久的保护。本文将对涂料耐

沾污性能的相关研究进行全面综述。

## 1 涂膜污染的类型及机理

### 1.1 涂膜污染的类型

涂膜污染主要分为附着性污染和吸入性污染两种类型。附着性污染是指灰尘、颗粒物等污染物通过范德华力、静电引力等物理作用附着在涂膜表面;吸入性污染则是由于涂膜存在孔隙,污染物在毛细管力的作用下以水蒸气或化学品为介质进入涂膜内部。相对于附着性污染,吸入性污染更难以去除,对涂膜的损害也更大。

### 1.2 涂膜沾污的机理

导致涂膜污染的原因较为复杂,主要与涂膜的表面性质和微观结构有关。从表面性质来看,涂膜的表面能、粗糙度、静电特性等都会影响污染物的附着。低表面能的涂膜表面,污染物不易附着;而表面粗糙的涂膜,更容易积聚灰尘等污染物。此外,涂膜表面若带有

收稿日期: 2025-07-03

作者简介: 夏志宇(1966—),男,博士后,国家级海外引才“启明计划”创新领军人才,具有30年涂料、黏合剂等化学材料的科研经验。E-mail: zyxia99@hotmail.com。

静电,会吸引空气中的带电粒子,增加污染的机会。从微观结构角度,涂膜不可避免地会存在孔隙,这种多孔结构为污染物的吸入提供了通道,从而降低其耐沾污性能<sup>[1]</sup>。

### 1.3 涂膜沾污过程

涂层表面沾污是一个复杂的动态过程,与涂膜表面性质和微观结构有关,包括一系列的粒子传输、附着和释放机制。环境中的污垢或灰尘可能包含多种成分,包括细固体颗粒(纳米到微米范围)、烟尘颗粒、灰分颗粒、有机或无机粒子及气体等。涂料沾污过程可以分为以下3个主要阶段<sup>[2]</sup>:

第1阶段为污垢、灰尘在表面上沉积并附着的过程。沉积可能由多种因素引起,例如:万有引力(重力)、范德华力、静电荷吸引等。范德华力仅作用在几十纳米范围内,而静电效应可以作用在毫米级以上。如果沉积由范德华力控制,则距离非常小,以至于很难看到表面之间的差异;而如果静电特性起作用,则会看到明显的沉积。

第2阶段为污垢、灰尘随时间在涂料表面上的黏附结合过程。外来污染粒子逐渐聚集,加上毛细作用,会进一步与表层涂料进行结合。此黏附结合在不同情况下可以是不可逆的,也可以是可逆的。影响黏附的因素包括:1)尘埃颗粒与涂料的亲性和反应性;2)细微颗粒(尤其是气溶胶状态的污垢)更容易结垢或融合;3)涂层由于内在化学性质或外部环境而软化并产生蠕变现象,促进捕获污垢,使污染颗粒逐渐渗透、迁移到涂层内部,甚至与涂料中的成分进行物理化学反应,比如氢键、螯合化学这种锚定效应,会令沾污更加明显,难以清除。

第3阶段为污垢、灰尘从涂料表面脱黏释放或颗粒脱落过程,这对涂料耐沾污性起着至关重要的作用。吸附于涂料表面的污垢颗粒受外界环境因素或涂料自身特性的改变,会打破表面力与黏附力的平衡。例如:风力、雨水冲击、物体碰撞等机械外力的作用,能够削弱污垢与涂料表面之间的黏附力,实现污垢的释放。环境温度的变化会引起涂料和污垢颗粒的热胀冷缩,两者之间产生内应力,并不断积累,最终会导致污垢颗粒与涂料表面的结合处出现裂缝,直至颗粒脱落,以此维持涂料表面的清洁。另外,涂料表面的化学基团发生变化。比如具有自清洁功能的涂料,光催化涂料在紫外线照射下,其表面成分发生化学反应,降低污垢与涂料表面的黏附力,最终实现污垢的释放,减少了表面的污垢残留,提升涂料的耐沾污性能。在污垢附着过程中,污垢颗粒会逐渐团聚变大,其自身重力加大,当颗粒团簇的重力和外界作用力(如风力、雨水冲击力)之和超过

其与涂料表面的黏附力时,整个团簇就会从表面脱落,从而减少涂料表面的污垢量。

## 2 导致涂料沾污的因素

导致涂料沾污的一些重要因素如下所述。

**范德华力:**通常比较弱,当污垢颗粒靠近涂料表面时(几十纳米范围内),会由范德华力作用被吸引到表面上。

**静电力:**污垢颗粒上的离子电荷和涂料的表面能相互作用而产生的静电吸引力,促进了污垢吸附。静电效应在毫米级以下距离发挥作用。

**毛细管作用:**沉积在涂料表面的污垢或灰尘颗粒,在毛细作用下,向内部迁移,导致污垢与涂料表层的黏合力变得更强。

**污垢颗粒的状态:**细颗粒悬浮液(包括烟灰、有机污染物和无机颗粒)与较大的颗粒相比,往往会更容易沉积和结合。有机物污垢通常更容易附着且难以脱落。

**环境条件:**污垢颗粒的吸附及脱落与环境因素有关。这些因素包括涂料中的助剂向表面迁移、污垢的局部过度累积、涂层粉化、开裂和冷热循环等。通常在高温下的热循环会促使污垢颗粒在涂层表面分散溶解并结垢,而涂料的蠕变行为(软化、局部的流动性)会促进与沉积污垢的结合,而在夜间或较低温度时会产生“锚固”效果。

**成膜物质的玻璃化温度 ( $T_g$ ):** $T_g$ 是影响耐沾污性的关键因素。较高的 $T_g$ 意味着涂膜硬度较高,分子链段活性较低,表面不易发黏,从而减少了污染物的附着,耐沾污性会明显改善。但 $T_g$ 过高可能导致涂膜韧性下降,易出现开裂等问题,因此需要在耐沾污性和其他性能之间找到平衡<sup>[3]</sup>。

**表面能:**涂膜的表面能对耐沾污性有重要影响。低表面能的成膜物质,如含有有机氟、有机硅成分的聚合物,能够使涂膜表面具有疏水性,减少污染物的黏附<sup>[4]</sup>。

**颜基比(PVC)及光泽:**当PVC超过临界颜料体积浓度(CPVC)时,涂膜会形成多孔结构,此时污染物容易进入涂膜内部,导致耐沾污性明显下降。与高PVC涂料相比,低PVC的涂料往往更能排斥污垢和灰尘,因为材料的滑爽度相对较高,表面能和孔隙性较低。而正确选择涂料的成分(包括树脂及颜填料种类和规格)对于耐沾污性能的影响也非常重要<sup>[5]</sup>。

**表面粗糙度:**粗糙的涂膜表面一般更容易积聚灰尘等污染物,为污染物提供更多的附着位点,在一定程度上影响耐沾污性。

**助剂:**乳化剂、成膜助剂等涂料添加剂可能会迁移到涂膜表面,使涂膜变软、回黏,增加灰尘等污染物的附着。

### 3 提高涂料耐沾污性能的方法

#### 3.1 选择合适的涂料成分,优化涂料配方体系

##### 3.1.1 选择合适的聚合物系统

采用改性聚合物体系,可以有效改善耐沾污耐候性能,比如有机硅改性树脂、含氟聚合物或氟硅改性树脂、聚氨酯聚合物、二苯甲酮改性乳液、核壳改性聚合物等,可制备出低表面能的疏水抗沾污涂料<sup>[6-8]</sup>。对聚合物进行适度的交联一般也会减少涂料表面的蠕变,有利于提升耐沾污性能。针对助剂可能带来的问题,采用新型添加剂也是一条有效路径,例如可聚合型乳化剂在乳液合成时参与聚合反应,成为聚合物的一部分,从而避免后期在涂膜中的迁移,提升涂料耐沾污性能。合理选择增稠剂对改善耐沾污性也很重要,比如聚乙烯醇(PVA)和纤维素会导致涂膜对水敏感,容易回黏,吸附灰尘。而采用改性聚丙烯酸钠保护胶(引入疏水链段)则可以避免这些问题,提高涂膜的耐沾污性。在配方中添加耐沾污剂也是一种有效方法,但需要平衡其他性能(比如附着力)及考虑成本。

##### 3.1.2 提高玻璃化转变温度( $T_g$ )

具有较高  $T_g$  的聚合物其分子链段的运动性较低,在成膜过程中会紧密排列堆积,形成更致密的涂层结构,减少涂层中的孔隙和缺陷,也会降低热循环时的蠕变行为,使污垢难以进入涂层内部,从而提升涂层的耐沾污性能。

##### 3.1.3 降低颜基比(PVC),增加涂层的滑爽度

降低 PVC 可以降低材料的孔隙率和粗糙度,抑制毛细作用,涂层表面更加光滑平整,污垢分子接触点减少,黏附力减弱,从而改善耐沾污性。适当添加功能助剂也可以进一步改善耐沾污性能,如含氟表面活性剂、改性有机硅、改性硅烷、纳米/亚微米级滑爽剂等<sup>[9-10]</sup>。

##### 3.1.4 仿生疏水自清洁涂料

仿生自洁涂料是模拟荷叶表面的凹凸微观结构设计的。在涂料中引入具有类似结构的材料,如纳米级的二氧化硅颗粒等,构建粗糙微观表面,并结合低表面能物质的修饰,可制备出仿生自洁涂料。这种涂料能够有效降低污染物与涂膜的接触面积,使污染物在涂膜表面难以附着,且在雨水冲刷等外力作用下容易脱落<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 亲水耐沾污涂层

##### 3.2.1 气球陶瓷理论

气球陶瓷理论认为,在涂膜中引入一些类似“气球”的特殊陶瓷颗粒,水分渗透入涂膜内部可使“气球”膨胀,将污染物挤出涂膜表面,达到耐沾污的效果。采用含硅无机成膜物,在成膜过程中,无机相迁移至表

面,赋予涂膜类似陶瓷的高硬度和表面亲水性,形成涂膜疏水表面层亲水,可以优化涂料的耐沾污性能<sup>[12]</sup>。

##### 3.2.2 光催化效应

光催化涂料,又称光触媒涂料,利用具有光催化活性的物质(如锐钛型纳米二氧化钛),在光照下持续产生具有高氧化性离子(比如:超氧负离子 $\cdot O_2^-$ 、羟基自由基 $\cdot OH$ 等),将涂膜表面的有机污染物分解为二氧化碳和水等小分子物质,使其产生脱黏及释放,从而可以轻易被雨水或人工清洁去除,实现自清洁和耐沾污的功能。同时,光催化过程还具有一定的抗菌、防霉性能,在建筑内外墙装饰、空气净化等领域具有广阔的应用前景<sup>[13]</sup>。

#### 3.3 双疏涂层

双疏涂层是一种兼具疏水和疏油特性的涂层,在耐沾污方面具有显著优势。双疏涂层的耐沾污性源于其特殊的表面微观结构和化学组成。从微观结构上看,双疏涂层具有微观粗糙的表面纹理,这种结构能够增加空气与液体之间的界面,使液体在涂层表面形成水珠或油珠,从而减少液体与涂层表面的接触面积。从化学组成角度,涂层表面通常含有低表面能的化学物质,如含氟、含硅的化合物等,使水和油等污染物难以在其表面附着和铺展。例如,在建筑外墙及木器涂料应用中,双疏涂层可以防止水渗透到基材内部,减少水渍残留,避免受潮发霉。双疏涂层应用于油烟机表面、墙面瓷砖等场景,能够防止油污附着,降低清洁难度和频率<sup>[14]</sup>。

#### 3.4 自分层技术

自分层涂料在成膜过程中能够自动分为两层,上层为低表面能、高耐沾污性的功能层,下层为具有良好附着力和机械性能的支撑层。通过控制涂料的配方和施工条件,使不同组成的聚合物在成膜过程中发生相分离,从而实现自分层。例如,在有机硅改性丙烯酸酯涂料中,有机硅组分倾向于迁移到涂膜表面,形成低表面能的疏水层,而丙烯酸酯组分则在下层提供良好的附着力和力学性能。这种自分层涂料能够在保证涂膜整体性能的同时,显著提高其耐沾污性能<sup>[15]</sup>。

### 4 评估耐沾污性能的标准方法

#### 4.1 中国标准

GB/T 9780—2013《建筑涂料涂层耐沾污性试验方法》,该标准规定了建筑涂料耐沾污性试验方法。

GB/T 1766—2008《涂层老化的评级方法》,适用于涂层在老化试验(如自然曝晒、人工气候老化等)后出现的缺陷(如粉化、开裂、起泡、锈蚀等)的评级。

#### 4.2 国际标准

ISO 4628-3:2024 Paints and varnishes – evaluation

of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance, Part 3: assessment of degree of rusting, 是关于色漆和清漆涂层老化评级方法的标准。

#### 4.3 美国标准

ASTM D 3274 Standard test method for evaluating degree of surface disfigurement of paint films by microbial (fungal or algal) growth or soil and dirt accumulation, 是通过真菌或藻类生长或土壤和污垢堆积评估涂膜表面缺陷程度的标准试验方法, 用于评估各类涂料在实际使用中耐沾污和保持清洁的能力。

ASTM D 3719 Standard test method for quantifying dirt collection on coated exterior panels, 是关于建筑涂料涂层耐沾污性的测试方法标准, 用于量化暴露在外的涂层面板上的污垢收集程度, 该标准在 2009 年已被撤销, 但在一些特定领域仍可能被参考使用。

ASTM D 7514 Standard test method for evaluating ink stain blocking of architectural paint systems by visual assessment, 是用目视评定法评定建筑涂料的油墨沾污性的标准试验方法, 用于评估建筑涂料防止记号笔墨渍渗入的能力。

#### 4.4 意大利标准

UNI 10792《色漆和清漆: 白色或浅色内墙漆的沾污测定》, 是一种评估室内涂料沾污性的加速沾污测试方法, 也可扩展到室外涂料。

#### 4.5 英国标准

BS EN 13523-18:2020《卷材涂层金属测试方法第 18 部分: 耐沾污性》, 针对金属卷材涂层的耐沾污性、抗污渍的测试方法。

BS EN 13523-29:2024《卷材涂层金属试验方法第 29 部分: 耐环境污染性(沾污和雨痕)》, 测试金属卷材涂层抗环境污染的能力, 包括耐沾污和耐雨痕。

#### 4.6 德国标准

DIN EN 13523-18:2020 与 BS EN 13523-18:2020 类似, 该标准是测试金属卷材涂层耐沾污性能的标准。

DIN EN 13523-29:2023 与 BS EN 13523-29:2024 类似, 是关于卷材涂层金属耐环境污染性(沾污和雨痕)的测试标准。

#### 4.7 韩国标准

KS M 5569—1984《钢材防污涂料耐沾污性的测试方法》, 是针对钢材防污涂料的耐沾污性测试方法。

KS K ISO 26987—2020《弹性地板覆盖物沾污性和耐化学品性的测定》, 适用于弹性地板覆盖物, 规定了其沾污性和耐化学品性的测定方法。

## 5 结语

涂料的耐沾污性能是影响其应用效果和使用寿命的重要因素。通过对涂膜污染机理的深入研究, 在了解影响耐沾污性能的各种因素基础上, 可以针对性开发出多种提高涂料耐沾污性能的方法, 如疏水自清洁、亲水耐沾污、双疏涂层、自分层技术等。这些方法应用前景广阔, 但目前耐沾污涂料仍存在一些问题, 如耐候性、耐磨性与耐沾污性的平衡及综合性能有待进一步改善, 一些新技术的高成本也限制了大规模应用等。

未来, 涂料耐沾污性能的研究可以从以下几个方向展开: 一是进一步深入研究涂膜与污染物之间的相互作用机制, 为开发更高效的耐沾污涂料提供理论基础; 二是加强对环保型、高性能耐沾污涂料的研发, 降低成本, 提高产品的性价比; 三是拓展耐沾污涂料的功能, 如开发兼具耐沾污、抗菌、抗病毒、自修复等多种功能的涂料产品, 以满足不同领域的多样化需求。相信随着研究的深入和技术的进步, 涂料的耐沾污性能将得到进一步提升, 为各行业的发展提供更有力的支持。

#### 参考文献:

- [1] KRAITER D, BROWN S, DIEBOLD M, et al. Development of an accelerated test method for dirt pick-up resistance [J]. *Journal of Coatings Technology & Research*, 2021, 18(5): 1413.
- [2] BROWN S, KRAITER D, JERNAKOFF P, et al. Process and apparatus for quantifying solid residue on a substrate: WO2020 180560A[P]. 2020-02-26.
- [3] WAGNER O, BAUMSTARK R. How to control dirt pick-up of exterior coatings [J]. *Macromolecular Symposia*, 2002, 187: 447-458.
- [4] KHAJANI J, PAZOLIFAND S, ZOHURIAAN-MEHR M. Improving dirt pickup resistance in waterborne coatings using latex blends of acrylic/PDMS polymers [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2017, 102(8): 151-166.
- [5] ZHOU S, YANG Y, WANG T, et al. A novel adsorption method to simulate the dirt pickup performance of organic coatings [J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2018, 15(1): 175-184.
- [6] VANDEZANDE G. Improved dirt pickup resistance critical to future coatings innovation [J]. *Paint & Coatings Industry*, 2008, 24: 96-100.
- [7] KHANJANI J, HANIFPOUR A, PAZOKIFARD S, et al. Waterborne acrylic-styrene/PDMS coatings formulated by different particle sizes of PDMS emulsions for outdoor applications [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 141: 105267.

(下转第 72 页)