

不饱和聚酯白底漆防开裂性能研究

文 飞¹, 杨善杰², 陈炳耀², 刘恩全²

(1.广东三和化工科技有限公司,广东 中山 528429; 2.广东顺德三和化工有限公司,广东 佛山 528325)

摘要: 由于不饱和聚酯白底漆的特殊结构,漆膜的柔韧性和附着力相对欠佳,应用于深沟槽或者造型复杂的木器产品涂装时,不同膜厚的漆膜在干燥过程中产生的收缩内应力偏差,导致家具在后期容易出现沟槽、造型处漆膜开裂的现象。本文就不饱和聚酯白底漆容易出现开裂的原因进行分析,对配方中各类材料选择进行试验验证,为涂料行业设计和开发不饱和聚酯白底漆,提升产品使用稳定性提供借鉴经验。

关键词: 不饱和聚酯白底漆; 家具漆; 开裂; 材料选择

中图分类号:TQ637 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2025)04-0017-04

Study on the Anti-cracking Performance of Unsaturated Polyester White Primer

WEN Fei¹, YANG Shan-jie², CHEN Bing-yao², LIU En-quan²

(1.Guangdong Sanvo Chemical Industry Technology Limited, Zhongshan 528429, Guangdong, China;

2.Guangdong Shunde Sanvo Chemical Co., Ltd., Foshan 528325, Guangdong, China)

Abstract: Due to the special structure of unsaturated polyester white primer, the flexibility and adhesion of the paint film are relatively poor. When applied to deep grooves or complex shaped wooden products, the shrinkage internal stress deviation generated by different film thicknesses during the drying process can easily lead to cracking of the paint film at the grooves and shapes in the later stage of furniture. This paper analyzes the causes of unsaturated polyester white primer, and tests and verifies the selection of various materials in the formula. For the coating industry design and development of unsaturated polyester white primer, improve the stability of product use to provide reference experience.

Key words: unsaturated polyester white primer; furniture paint; cracking; material selection

0 引言

不饱和聚酯漆俗称 PE 漆,其主要成膜物为不饱和聚酯树脂^[1]。由于 PE 白底漆主剂固含量高,主漆和稀释剂中的苯乙烯也参与聚合反应,所以 PE 白底漆的漆膜丰满度好、硬度高。传统 PU 白底漆和 NC 白底漆不能一次性厚涂,但是 PE 白底漆可以在施工时一次性厚涂,这样就能简化家具产品的施工工艺流程和缩短周期,提升生产效率,因此被广泛应用于木门、橱柜、卫浴和展柜^[2]。由于 PE 白底漆漆膜硬度高,柔韧性和附着力欠佳,在温差较大的情况下,成品家具的漆膜

受温度变化影响,产生收缩内应力偏差,后期很容易出现漆膜开裂的现象,对整个家具及涂装市场造成了比较大的影响。本文从 PE 白底漆开裂原理进行分析,进而从配方组成以及材料选择上进行试验验证。

1 试验部分

1.1 原材料和设备

不饱和聚酯树脂(简称 PE 树脂)、分散剂(防绿)、气相二氧化硅、膨润土、钛白粉、热塑性丙烯酸树脂、增塑剂、蓖麻油改性短油度醇酸树脂、消泡剂、填料(重质钛酸钙、制漆粉、滑石粉、硫酸钡)、硬脂酸锌粉、苯乙烯、流平剂、醋酸乙酯。

WGG61-EJ 漆膜光泽计,深圳三恩时科技有限公司;ES320 电子称,苏州金钻称重设备系统开发有限公司;BGD741/1 高速分散机、BGD152/1 数字式旋转黏度

收稿日期:2024-05-21

作者简介:文飞(1986—),男,本科,工程师,主要从事家具涂料产品的开发工作。E-mail:196381160@qq.com。

计、GDJS-250B 高低温交变湿热试验箱, 标格达试验室仪器用品有限公司; 涂-4 杯, 漆膜冲击仪, 附着力测试仪, 马口铁片。

1.2 PE 白底漆产品配方

PE 白底漆主剂基本原料配方如表 1 所列。

表 1 PE 白底漆主剂基本配方

原材料	质量分数/%	原材料	质量分数/%
不饱和聚酯树脂	35~45	钛白粉	7~12
功能性树脂	0~5	填料	30~50
防绿化分散剂	0.2~0.3	硬脂酸锌粉	2~5
阻聚剂	0.01~0.1	苯乙烯	2~3
消泡剂	0.3	流平剂	0.2~0.3
气相二氧化硅	0.5~1	醋酸乙酯	1~2
膨润土	0.5~1		

1.3 制备工艺

按照产品工艺配方, 将 PE 树脂、功能性树脂、分散剂、消泡剂按序投入分散罐中, 700 r/min 搅拌 6~8 min 至均匀状态; 再缓慢加入气相二氧化硅和膨润土, 中速 800~1 000 r/min 分散 10~15 min, 再投入钛白粉、重钙、制漆粉、滑石粉等, 高速 1 000~1 200 r/min 分散 20~25 min 至细度合格, 再投入硬脂酸锌粉、流平剂及醋酸乙酯, 800 r/min 分散 10~15 min 至均匀状态, 取样检测合格后, 过滤包装。

1.4 性能测试

光泽: 按 GB/T 9754—2007 制样, 喷涂在 30 cm×40 cm 三聚氰胺板上, 待干后使用光泽仪进行测试。

附着力: 在马口铁片上按 GB/T 9286—2021 进行测试, 划格间距 2 mm。

漆膜硬度: 按 GB/T 6739—2006 进行测试。

柔韧性: 在马口铁片上按 GB/T 1731—2020 要求制样, 以不引起漆膜裂损的最小轴棒直径来表示。

干性: 按 GB/T 1728—1979 测试漆膜干燥时间。

防开裂性能测试: 按 CNCIA-HG/T 0004—2012 进行测试, 试验底材为开槽的中密度纤维板 (尺寸 30 cm×40 cm, 沟槽深 8 mm, 宽 7 mm, 长 30 cm); 样板施工工艺: 喷涂 PU 封闭底漆, 待干 6 h 打磨, 喷涂头道 PE 白底漆 (涂布量 400 g/m²), 待干 12 h 时打磨, 再喷涂二道 PE 白底漆 (涂布量 500 g/m²), 待干 48 h, 漆膜彻底干透后, 将样板放置到高低温交变湿热试验箱, 进行冷热循环测试 (测试温度: 低温 -20 ℃ 下 2 h, 高温 50 ℃ 下 2 h, 一冷一热共计 4 h 为一个循环)。经过若干循环, 观察漆膜特别是沟槽部位是否有开裂现象, 记录漆膜初始开裂时经历的循环次数。经过的冷热循环次数越多, 漆膜防开裂效果越佳, 反之次数越少, 漆膜

防开裂性能越差。

2 结果与讨论

2.1 PE 白底漆开裂原理分析

不饱和聚酯白底漆的固化过程本质上是一个自由基引发的 PE 树脂与苯乙烯的聚合过程。体系内不饱和和双键的共聚反应具有显著的自动加速效应, 在 25 ℃ 环境下的凝胶时间仅为 15~25 min。快速固化的特性导致最终形成的交联网络呈现高度致密化特征。这种刚性网络结构虽然赋予了漆膜优异的铅笔硬度 (2H), 但其断裂伸长率仅 1.2%~1.8%, 显著低于木材基材的形变能力 (>5%), 这为界面应力失配埋下隐患。

当环境温度发生 10 ℃ 波动时, 不饱和聚酯白底漆漆膜内部会产生 12~15 MPa 的收缩应力。值得注意的是, 木材基材的线膨胀系数 (8.5×10⁻⁶/℃) 与 PE 漆膜 (3.5×10⁻⁷/℃) 存在显著差异, 这种热膨胀系数的差异在温差较大或者环境温度急剧变化过程中会导致界面剪切应力急剧增加。同时在直角雕花、沟槽等部位, 应力集中系数可达平面区域的 2~3 倍, 这解释了实际应用中复杂造型家具更易出现开裂的现象。此外, 木材含水率 (EMC) 在 8%~12% 区间波动时, 基材的横向收缩率可达 0.15%~0.25%, 而漆膜在同等湿度变化下的尺寸稳定性较差 (0.35%~0.45%), 这种形变差异直接导致界面结合强度下降。

施工工艺对界面应力分布的影响同样不可忽视。当采用一次性厚涂工艺 (湿膜厚度 >150 μm) 时, 固化过程的热量积聚会使局部温度升高, 引发“固化-收缩-应力累积”的正反馈循环, 漆膜收缩与木材收缩产生的内应力偏差会更大; 而喷涂过程中施工黏度过低时, 漆膜在复杂表面的流平时间会延长, 导致垂直面漆膜厚度差异偏大, 这种厚度梯度分布会形成区域性应力场, 使局部应力超过漆膜屈服强度, 后期的开裂风险也会相应增加。

PE 漆开裂本质上是刚性涂层与柔性基材在动态环境下的力学失配问题。尽管施工工艺优化 (如控制膜厚 ≤80 μm, 调整喷涂黏度至 25~30 s) 可降低开裂风险, 但根本解决途径仍需从木材本身与 PE 白底漆本征性能改进入手。以下从 PE 白底漆产品体系出发, 分析组成白底漆的材料对 PE 漆漆膜开裂性能的影响。

2.2 主要成膜物

PE 漆的主要成膜物为不饱和聚酯树脂 (简称 PE 树脂), PE 树脂的选择非常重要, 决定了家具漆成膜后漆膜的基本物性。家具漆用不饱和树脂一般为双环类 (双环戊二烯单体改性) 和烯丙基醚类 (三羟甲基丙烷二烯丙基醚改性) 两种类型^[9], 双环类树脂性价比比较高, 所以在市场上应用最为广泛, 烯丙基醚类树脂的低

温干燥性和附着力更好。试验采用单一变量法,测试两种不同类型树脂,同时对比漆膜性能,结果如表 2 所列。

表 2 不同类型树脂对漆膜开裂性能影响

项目	双环类 树脂 A	双环类 树脂 B	烯丙基醚 型树脂 C	烯丙基醚 型树脂 D	双环类 树脂 E
柔韧性/mm	10	10	5	5	10
铅笔硬度	2H	2H	2H	2H	2H
漆膜开裂循环次数	11	10	15	15	11

从表 2 可以看出,烯丙基醚类不饱和聚酯树脂在漆膜柔韧性方面比双环类树脂好,其原因在于烯丙基醚类不饱和树脂因分子链中醚键的旋转自由度较高,其断裂韧性较双环戊二烯型树脂优异得多,因此在同等内应力偏差时,漆膜应对变形的能力好很多,因此后期防开裂性能更优异。所以应优先选择烯丙基醚类树脂作为 PE 白底漆的主要成膜物,或者拼加一部分用以提升产品防开裂性能。

2.3 不饱和聚酯树脂

不同生产厂商的 PE 树脂由于材料和合成工艺不同,生产出来的树脂本身性能就有比较大的差异,进而对制备出来的 PE 漆漆膜后期开裂性能产生很大影响;同时树脂添加量的不同对漆膜性能影响也较大。试验采用单一变量法,测试不同厂家 PE 树脂,不同添加量对漆膜防开裂性能的影响,结果如表 3 所列。

表 3 不同添加量树脂对漆膜性能影响

项目	a 树脂 36%	b 树脂 36%	c 树脂 36%	c 树脂 40%	c 树脂 44%
柔韧性/mm	10	10	10	5	4
铅笔硬度	2H	2H	2H	2H	2H
漆膜开裂循环次数	11	10	12	16	19

由表 3 可以看出,不同公司生产的 PE 树脂对产品开裂性能影响较大,防开裂性能差异可达 40%~60%,这与其合成工艺中马来酸酐、苯酐的比例及端基封端率密切相关。设计配方时,需优选柔韧性好、防开裂性能好的树脂;同时 PE 树脂的添加量越高,防开裂效果越好,但是树脂含量提升会降低产品打磨性。所以在保证产品打磨性前提下,应尽可能提升产品配方中树脂的添加量。

2.4 功能性树脂

涂料生产厂家为了增加 PE 白底漆漆膜柔韧性和防开裂性能,一般会选择性添加一部分功能性树脂或者材料。对市面上常见的功能性材料(蓖麻油改性短油度醇酸树脂、热塑性丙烯酸树脂、增塑剂 DOP)按常见

添加比例进行试验测试,对比漆膜防开裂性能,结果如表 4 所列。

表 4 不同功能性树脂对漆膜防开裂性能影响

项目	2%蓖麻油 醇酸树脂	5%热塑性 丙烯酸树脂	2%增塑剂 DOP	空白
表干时间/min	33	30	31	28
流平性	好	良	好	好
打磨性	良	好	好	好
漆膜开裂循环次数	14	15	13	11

由表 4 可以看出,市面上常用的功能性材料均有助于防开裂性能的提升。引入热塑性丙烯酸树脂可构建“刚性-柔性”双连续相结构,使漆膜屈服强度提升同时断裂能提升,后期漆膜防开裂效果最佳,但严重影响漆膜的流平性^[9];蓖麻油改性醇酸树脂对于性和打磨性影响较大;增塑剂对漆膜整体影响较小,防开裂效果提升不及前两个。所以在设计配方时,需充分考虑产品的使用对象和施工环境,根据客户具体要求和性能侧重点来选择添加不同种类的功能性材料。

2.5 防流变体系

常用于 PE 白底漆的防流变防沉材料有:有机膨润土、气相二氧化硅等^[9],本文使用市面上最常见的有机膨润土与气相二氧化硅,表 5 为不同添加量的防流变体系对漆膜防开裂性能的影响。

表 5 不同防流变体系对防开裂性能影响

项目	0.5%气相 二氧化硅	1%气相 二氧化硅	0.8% 膨润土	1.5% 膨润土	0.5%气硅+ 0.5%膨润土
流平性	好+	良+	好	良-	好-
防流挂性	好	优	良	良+	好+
柔韧性/mm	4	4	4	4	4
漆膜开裂 循环次数	11	12	10	11	13

由表 5 可以看出,防流变助剂添加量越大,漆膜防开裂效果越好。其原因在于,防流变体系越强,漆膜防流挂效果相应增强,喷涂时由于漆膜流动性堆积到沟槽中的湿膜越少,后期内应力越弱,开裂风险降低。但是过量的防流变助剂会影响漆膜的流平性,所以需要在保证流平性的前提下,尽可能提升防流变助剂的添加量。不同类型防沉助剂对产品防开裂效果影响较大,相对而言,气相二氧化硅比膨润土更适合用于 PE 白底漆中,用于提升产品防开裂性能。其原因在于有机膨润土通过二维堆叠形成“网状结构”,而气相二氧化硅形成触变网络的三维结构更强,既能保证抗流挂性能,又可避免过度结构化导致的固化收缩率激增,影响漆

膜后期防下陷性能。

2.6 填料

为了提高不饱和聚酯白底漆的填充性、遮盖力以及打磨性,同时降低产品成本,一般在产品配方中会添加一定量的填料,常见的有滑石粉、重质碳酸钙、制漆粉、复合粉、硫酸钡等^[7]。同等添加量下不同填料对 PE 白底漆防开裂性能的影响如表 6 所列。

表 6 不同填料对防开裂性能影响

项目	重钙	滑石粉	制漆粉	复合粉	硫酸钡
光泽/%	48	12	30	29	53
流平性	好+	良+	好	好	好+
打磨性	良-	好+	好-	好-	良-
柔韧性/mm	10	4	4	4	10
漆膜开裂循环次数	6	12	11	11	7

由表 6 可以看出,不同填料对 PE 漆防开裂性能有很大影响。在 PE 白底漆的常用填料中,重钙和硫酸钡对于漆膜的流平性和光泽提升有很好效果,但是容易引起漆膜后期开裂;相较而言制漆粉、复合粉对开裂性能影响较小;滑石粉不容易引起漆膜开裂,但是影响漆膜流平性和光泽度。因此在设计产品配方时,在保证白底漆综合性能的前提下,应尽可能减少重钙、硫酸钡的添加量,适当增加滑石粉、制漆粉及复合粉的添加量,以降低 PE 白底漆后期漆膜开裂的风险。

2.7 蓝白水配比

蓝水(有机钴盐)和白水(过氧化物)作为 PE 白底漆成膜的促进剂与引发剂,对漆膜性能的影响也至关重要。蓝水中钴含量与白水中过氧化物的含量均会影响 PE 白底漆的成膜速度、漆膜硬度、颜色、打磨性等性能。同时蓝白水的配比会影响漆膜干燥速度与可使用时间^[8]。实际应用时,根据现场的施工温度与湿度,蓝白水的配比也会不一样。不同蓝白水对比对漆膜性能的影响如表 7 所列。

表 7 不同蓝白水对比对 PE 白底漆开裂性能影响

项目	蓝水:白水			
	1.0:1.2	1.3:1.5	2.0:2.5	2.5:3.0
表干时间/min	38	35	29	25
活化期/min	56	50	40	23
柔韧性/mm	4	4	5	10
铅笔硬度	H	H	2H	2H
漆膜开裂循环次数	12	12	10	8

由表 7 可以看出,不同蓝白水添加量对漆膜开裂性能有很大影响。蓝白水添加量越大,干性越快,活化

期(可使用时间)越短,漆膜硬度越高,柔韧性越差,漆膜开裂风险越高。因此,在保证漆膜干性和打磨性的前提下,应尽可能减少蓝白水的添加量,以降低产品后期开裂的风险。

3 结语

从 PE 白底漆原料配方分析,影响漆膜后期防开裂性能的因素包括:主要成膜物的类型、不饱和聚酯树脂添加量、功能性树脂、防流变体系、填料以及施工时蓝白水的配比。烯丙基醚类不饱和聚酯树脂防开裂性能优于双环类,应优选烯丙基醚类作为主要成膜物;不同厂家生产的树脂防开裂性能不一,应尽可能优选柔韧性好的树脂,提升产品漆膜后期抗下陷性能;树脂含量越高,防开裂性能越好,在保证打磨性的前提下,应尽可能提高树脂添加量;在满足客户需求的情况下,可以选择拼加部分功能性树脂来提升漆膜防开裂性能,增塑剂、热塑性丙烯酸树脂和蓖麻油改性短油度醇酸树脂均有助于漆膜防开裂,其中热塑性丙烯酸树脂提升效果最明显,但漆膜流平性会受很大影响;在保证产品流平性前提下,应加强防流挂体系,既能保证抗流挂性能,又可避免过度结构化导致的固化收缩率激增,影响漆膜后期防下陷性能,气相二氧化硅比有机膨润土更能有效提升产品防开裂效果;不同填料对产品防开裂性能影响较大,重质碳酸钙和硫酸钡相对更容易造成漆膜开裂,应优选滑石粉、制漆粉或者复合粉作为白底漆的原料;施工时蓝白水的添加比例对产品防开裂有较大影响,在保证漆膜干性和打磨性前提下,应尽可能降低蓝白水的添加比例,进而提升产品防开裂性能。

参考文献:

- [1] 涂料工艺编委会.涂料工艺[M].3版.北京:化学工业出版社,1997:594-597.
- [2] 胡平,史振翔,秦培中.家具涂装用不饱和聚酯漆的进展[J].涂料工业,2001(10):25-28.
- [3] 曾黎明.不饱和聚酯树脂的固化收缩机理与收缩应力分析[J].复合材料科学与工程,1993(4):13-16.
- [4] 王巍,罗先平.浅谈改善不饱和聚酯涂料气干性的方法[J].广东化工,2007(9):34-36.
- [5] 曾晋.用于复杂造型家具的不饱和聚酯底漆及其制备方法:CN202210847809.2[P].2024-05-15.
- [6] 李相权.不饱和聚酯漆防沉体系的探讨[J].上海涂料,2011(4):16-18.
- [7] 周晓君,陈炳耀.一种抗下陷 PE 白底漆的制备[J].现代涂料与涂装,2023(6):9-10.
- [8] 周晓君,陈炳耀.一种打磨性优异 PE 白底漆的制备[J].现代涂料与涂装,2024(1):1-3.