

# 低温固化聚酯粉末涂料的研究与应用

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2024.05.011

王正祥 卓远航 范淑红  
代文斗 刘思敏

湖南工业大学  
包装与材料工程学院  
湖南 株洲 412007

**摘要:**以热固性聚酯粉末涂料为研究对象,介绍了成膜物质中聚酯树脂和固化剂的特性及其在粉末涂料中的作用,并从制备、固化机理、改性、应用4个方面综述低温固化聚酯粉末涂料的研究进展。为改善聚酯粉末涂料出现缩孔的问题,将活性官能团丙烯酸酯引入聚酯树脂中进行表面改性,得到聚酯/丙烯酸混合型粉末涂料,并对耐候性聚酯/丙烯酸粉末涂料的耐候性及固化反应原理进行概述。为降低粉末涂料的固化温度,使其符合低温固化的发展要求,针对合成聚酯粉末涂料成膜物质的相对特性,在树脂合成过程中引入环氧型官能团作为功能单体或直接与环氧树脂混合。聚酯粉末涂料已在家具、汽车及家用电器领域得到广泛应用。未来,聚酯粉末涂料朝着节能环保、多样性和更广泛的适用性发展。

**关键词:**低温固化;聚酯树脂;粉末涂料;环氧;丙烯酸

**中图分类号:** TQ637.82

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2024)05-0083-10

**引文格式:** 王正祥,卓远航,范淑红,等.低温固化聚酯粉末涂料的研究与应用[J].包装学报,2024,16(5):83-92.

## 1 研究背景

涂料常被用于包装材料的表面涂装,防止包装材料受潮气、灰尘、污物、氧化等外部因素影响,以达到保护产品质量和安全的目的。另外,涂料能够改变包装材料的外观和质感,增加其美观度和触感性,提升品牌形象和市场竞争力。然而,部分涂料中含有的有毒物质,如挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)和甲醛,会对人体健康构成威胁。粉末涂料具有与一般涂料完全不同的形态,它是以固体树脂和颜料、填料及助剂等组成的固体粉末状合成树脂涂料。由于不使用溶剂,粉末涂料具有环保、高效率、对环境要求低、零挥发性等特点。

根据使用树脂种类的不同,粉末涂料可分为聚酯

粉末涂料、环氧粉末涂料、聚氨酯粉末涂料、丙烯酸粉末涂料四大类。按照成膜树脂性质的不同,粉末涂料可分为热塑性粉末涂料和热固性粉末涂料(主要特性见表1)。热塑性粉末涂料由热塑性树脂、颜料、填料、助剂等经熔融混合、粉碎、筛选所得,所用树脂分子量较高、熔融黏度高、成膜困难、耐溶剂性较差等。热固性粉末涂料以热固性树脂作为成膜物质,加入固化剂,在特定温度下熔融,发生固化交联反应,形成坚硬、致密、三维网络结构。热固性树脂含有反应性基团,经过交联固化反应后易形成高分子量等特征<sup>[1]</sup>。目前热固性粉末涂料大多是采用聚酯树脂作为基料制备成的粉末涂料。聚酯粉末涂料因其优良的综合性能、相对低成本等优势,从传统的木材、家电、铝型材到汽车、船舶等领域,都取得了很好的应用效果。

收稿日期:2024-02-23

作者简介:王正祥(1963-),男,湖南安化人,湖南工业大学教授,博士,主要研究方向为油墨涂料,

E-mail: wangzhengxiang@163.com

表 1 热塑性和热固性粉末涂料的特性比较

Table 1 Comparison of properties of thermoplastic and thermosetting powder coatings

项 目	热塑性粉末涂料	热固性粉末涂料
树脂分子量	高	低
涂装方法	以流化床为主	以静电粉末涂装为主
涂膜耐溶剂型	较差	好

## 2 聚酯粉末涂料

聚酯粉末涂料主要是由聚酯树脂与固化剂作为主要成膜物。与其他粉末涂料相比,聚酯粉末涂料耐候性较强,紫外光下较稳定,烘烤过程中不易泛黄、光泽度高、流平性好。

### 2.1 聚酯树脂

粉末涂料用聚酯树脂通常是由官能度不低于 2 的多元醇和多元酸经酯化缩聚反应,生成线型或轻微支链型高分子化合物(反应合成原理如图 1 所示)。聚酯树脂官能团的量可以根据羟基数和酸值来定量,且其直接影响树脂的分子量、黏度、玻璃化转变温度( $T_g$ )。

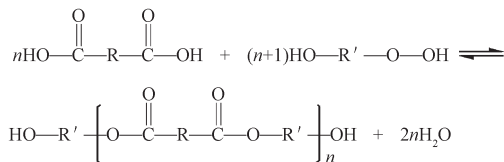


图 1 聚酯树脂反应原理

Fig. 1 Reaction principle of polyester resin

聚酯树脂合成中,主体酸大多采用对苯二甲酸(terephthalic acid, TPA)和间苯二甲酸(isophthalic acid, IPA)<sup>[2]</sup>。TPA 含有苯环对位结构,合成的树脂为直链对称结构,柔韧性优良。但分子链段自由体积大,对酯键的屏蔽保护作用不明显。在紫外光的作用下,分子主链受热易震动,酯键易发生水解,涂层易发生老化降解。IPA 含有苯环间位结构,能加大聚酯树脂分子链间距离,削弱分子间的范德华力,对酯键起到屏蔽保护作用。Li Y. 等<sup>[3]</sup>用 TPA、1,6-己二醇(1,6-hexanediol, HDO)和 IPA 合成半结晶聚酯树脂,并与新戊二醇(neopentyl glycol, NPG)、TPA 和 IPA 制备的无定形聚酯树脂对比,证实了半结晶聚酯涂层具有良好的流平性和较高的反应活性。钱仁君等<sup>[4]</sup>研究了 IPA 与 TPA 质量比( $m_{\text{IPA}}/m_{\text{TPA}}$ )对聚酯树脂性能的影响,发现  $m_{\text{IPA}}/m_{\text{TPA}}$  与粉末涂料

的耐候性呈正相关。陈闯等<sup>[5]</sup>采用两步酯化缩聚反应制备性能优异的聚酯树脂:第一步是多元醇过量,合成一定分子量的化合物;第二步是加入多元酸进行封端,并调整分子量。研究发现,引入的三羟甲基丙烷(trimethylolpropane, TMP)可提高聚酯树脂的反应活性,使分子链变成网状结构,提高支化度;但添加过量时,会导致涂层过硬,柔韧性降低,黏度上升,甚至产生凝胶。汤明麟等<sup>[6]</sup>以 IPA 为主体酸、TMP 为扩链剂,合成了超耐候聚酯树脂。研究发现,TMP 含量与涂层耐水性呈正相关;IPA 含量与涂层耐候性呈正相关。刘义等<sup>[7]</sup>研究不同反应活性的单体合成聚酯树脂,进而制备低温固化粉末涂料。研究发现,引入 IPA,可提高树脂反应活性和涂膜耐候性,消除涂膜起霜现象;引入 TMP,可提高树脂支化度及粉末涂料的耐水性、力学性能。

### 2.2 固化剂

固化剂又名硬化剂、熟化剂或变定剂,是一类增进或控制固化反应的物质或混合物。固化剂应具有好的反应性,它是与树脂反应形成膜的关键成分,且固化剂的用量需适中。固化剂过少,反应慢,固化不完全;固化剂过多,分子量下降,聚合反应中的链生长受阻,导致粉末涂料的冲击强度下降<sup>[8]</sup>。树脂与固化剂常见的配方参数如表 2 所示。

表 2 不同配方的粉末涂料

Table 2 Powder coatings with different proportions

固化温度 /℃	树脂质量 /g	固化剂质量 /g
110	100	25
110	100	30
110	100	35
110	100	40

#### 2.2.1 异氰脲酸三缩水甘油酯

异氰脲酸三缩水甘油酯(1,3,5-triglycidyl isocyanurate, TGIC)属于多环氧化合物(分子结构见图 2a),三嗪杂环结构上连接 3 个环氧基团。TGIC 因发生固化反应没有副产物产生,且涂膜烘烤耐泛黄性好,早期常被用于耐候型聚酯粉末涂料中。在聚酯/TGIC 粉末涂料中,TGIC 中的环氧基团与聚酯中的羧基可交联形成三维网状立体结构(分子结构见图 2b),当 TGIC 与聚酯树脂交联密度不断增大时,反应体系发生固化时交联密度越高,涂膜的耐热性越优异<sup>[9-10]</sup>。

然而, TGIC 固化需在高温下烘烤,耗能较大且

工件降温慢, 涂装效率低<sup>[11]</sup>。为克服这种缺陷, 固化时需加入合适助剂, 实现低温固化; 或者采用高活性聚酯树脂, 提升低温固化粉末涂料的装饰性、防护性和贮存稳定性。方俊等<sup>[12]</sup>引入促进剂, 提高反应速率, 减少分子间的碰撞阻力, 降低反应活化能, 实现粉末涂料的低温固化。程凯等<sup>[13]</sup>利用二元醇和酸解剂制备低酸值聚酯树脂。二元醇可提高树脂的折弯性能和耐冲击性。酸解剂可提供树脂良好的力学性能, 降低体系的表现活化能。

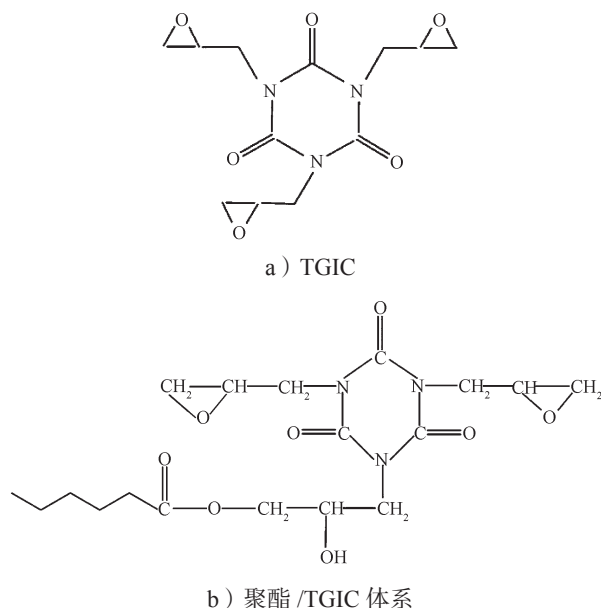


图2 TGIC 及聚酯/TGIC 体系的分子结构图

Fig. 2 Molecular structures of TGIC and polyester/TGIC systems

### 2.2.2 $\beta$ -羟烷基酰胺

$\beta$ -羟烷基酰胺 (beta-hydroxyalkylamide, HAA) 是含有 4 个羟基官能团的酰胺类化合物 (分子结构见图 3), 属于水溶性化合物, 与羧基聚酯树脂相容时反应活性较差。但 HAA 固化剂无毒、环保, 相比于 TGIC 固化体系, 固化温度低、用量少, 且 HAA 不会降低  $T_g$ , 贮存稳定性好。

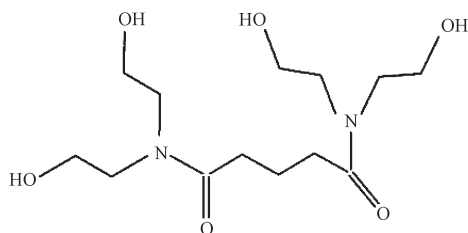


图3 HAA 分子结构图

Fig. 3 HAA molecular structure diagram

周伟明等<sup>[14]</sup>用高、低酸值聚酯树脂与 HAA 在 180 °C 下发生固化反应, 合成的干混消光粉末涂料表面流平性好。马志平等<sup>[15]</sup>通过加入光稳定剂合成出低温固化的低酸值聚酯/HAA 干混消光粉末涂料, 并研究聚酯配方中二元醇的作用及酸解剂对涂层性能的影响。结果表明, 涂层在 160 °C 固化, 具有良好的消光性和耐候性。

聚酯树脂的  $T_g$ 、黏度和反应活性是影响涂料成膜的关键性因素<sup>[16]</sup>。聚酯/HAA 体系在交联固化过程中会产生水分子, 水分子无法从涂层内排出, 薄膜冷却后表面收缩, 造成涂膜表面出现针孔<sup>[17-18]</sup>。袁仁能等<sup>[19]</sup>用硬脂酸对超支化聚酯进行端基改性, 利用支化结构增强粉末涂料的表面张力、降低熔体黏度、脱除小分子。朱新平等<sup>[20]</sup>从粉碎设备、工艺及后混合流动助剂三方面进行研究改进, 制备出薄涂高流平 HAA 粉末涂料。研究发现, 该粉末涂料粒径小、粒径分布窄、粉末流动性高、针孔产生少, 且涂层的抗冲击性和粉末喷涂的面积得到提升。

## 3 复合聚酯粉末涂料改性研究

### 3.1 聚酯粉末涂料表面改性

聚酯粉末涂料具有相对高的表面张力, 从而导致涂膜表面易出现缩孔。因此, 需对树脂进行改性, 降低表面张力 (改性后的树脂结构见图 4)。

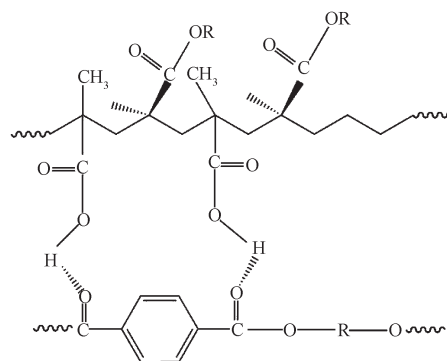


图4 共聚物与树脂相容

Fig. 4 Copolymers compatible with resins

陈唯等<sup>[21]</sup>合成端羧基聚酯树脂, 并接枝甲基丙烯酸缩水甘油酯 (glycidyl methacrylate, GMA), 引入不饱和双键作为活性热固化基团, 以实现自固化。树脂合成过程中易出现结晶, 这是影响表面性能的另一方面, 如在熔融共混时, 降低温度会出现残留的晶核。提高固化温度能够消除熔点较高的微晶; 淬冷也可使结晶来不及形成, 达到改善粉末涂料表



面性能的目的。Liu J. M. 等<sup>[22]</sup>制备新型超支化聚酯,引入丙烯酸酯进行改性,合成水性超支化树脂。研究发现,丙烯酸酯含量越高,树脂黏度越低。丙烯酸酯共聚物在表层形成有序的层状结构,且羧基官能团极性较大,与聚酯中的羰基相互作用,打乱聚酯链段间的有序性,提高共聚物与聚酯的相容性的同时,又能抑制结晶。但引入的量过多,不利于丙烯酸酯共聚物迁移到表面,使涂膜表面张力不均匀;引入的量较少,无法抑制结晶。周坚等<sup>[23]</sup>分析了低成本聚酯粉末涂料出现缩孔的原因,引入适量活性官能团来提高表面性能,制备出丙烯酸酯共聚物,进而将其应用到粉末涂料中,以改善缩孔现象。

### 3.2 耐候性聚酯/丙烯酸粉末涂料混合体系

聚酯/丙烯酸混合固化体系基本由含羧基的聚酯树脂和 GMA 型丙烯酸树脂组成。聚酯树脂具有优异的耐候性和力学性能,但会受到分子结构的限制,聚酯粉末涂料呈现出的耐候性较差,这主要因为:交联密度低,粉末涂料成膜物质含有大量酯键,易发生水解。而 GMA 型丙烯酸树脂具有优异的耐候性。丙烯酸树脂和聚酯树脂各自具有独特的性能优势,将二者结合,形成一种综合性能更好的聚酯/丙烯酸粉末涂料体系。G. Iwamura 等<sup>[24]</sup>介绍了一种新型的聚酯/丙烯酸粉末涂料体系,其由高 IPA 含量的双官能聚酯和双官能丙烯酸固化剂组成。曾定等<sup>[25]</sup>合成出含有羧基官能团的丙烯酸树脂预聚体以及含有羟基官能团的聚酯树脂预聚体,通过两种预聚体上的部分羧基与羟基发生酯化反应形成接枝共聚物,以改善聚酯与丙烯酸树脂之间的相容性。为了获得优异的耐候性和良好的力学性能,E. D. Dumain 等<sup>[26]</sup>对环氧型丙烯酸酯聚合物固化聚酯树脂热固性粉末涂料进行评价,并与聚酯/TGIC 体系进行比较,结果表明:用 GMA 型丙烯酸固化的聚酯树脂固化速率比 TGIC 更快。汪喜涛等<sup>[27]</sup>改变丙烯酸树脂间分子结构,引入 GMA 改善交联度,并加入多元酸来增加柔性侧链。研究发现,在 GMA 型丙烯酸体系中加入苯乙烯(styrene, St)易控制薄膜的光泽度,不会出现传统方法中消光等问题<sup>[28]</sup>。兰芬芬等<sup>[29]</sup>采用自由基聚合合成环氧型丙烯酸树脂,与聚酯、环氧树脂共混,合成消光树脂过程中引入 St 单体,制得低光泽粉末涂料。潘向东等<sup>[30]</sup>对 GMA 型丙烯酸树脂进行改性,并用二元羧酸固化,所制备的粉末涂料能在 120 ℃/8 min 低温条件下快速固化。

单官能聚酯/丙烯酸固化体系主要是利用丙烯酸树脂的缩水甘油基与聚酯的羧基结合(固化反应原理见图 5a),交联机制类似于聚酯/TGIC 固化体系。双官能聚酯/丙烯酸固化体系是基于双官能团聚酯中的羧基与环氧乙烷基团反应(固化反应原理见图 5b)。多交联聚酯/丙烯酸固化体系是环氧乙烷基团与聚酯中羧基产生固化反应,丙烯酸固化剂中的羟基与封端的异氰酸酯反应(固化反应原理见图 5c),使固化体系具有优异的力学性能和耐污性。

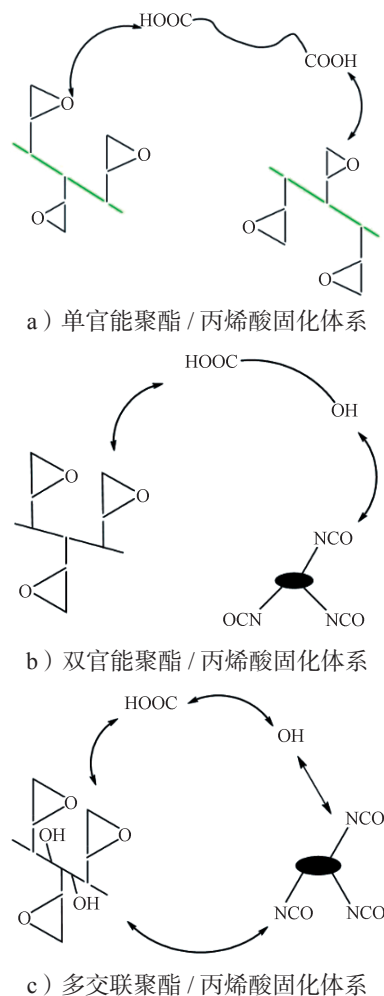


图5 聚酯/丙烯酸固化系统反应模型

Fig. 5 Reaction model of polyester/acrylic acid curing system

### 3.3 低温固化聚酯粉末涂料

热固性粉末涂料的固化过程包括两个阶段:一是形成弹性凝胶或无限交联的分子网络;二是自由分子结合形成交联距离缩短的致密网络后,弹性凝胶转化为刚性玻璃<sup>[31]</sup>。粉末涂料的固化通常在远高于  $T_g$  下进行,固化过程决定了涂膜的性能( $T_g$  对粉



末涂料性能的影响见表3)。热力学机理表明,分子间碰撞产生的能量将伴随温度上升而加大<sup>[32]</sup>。因此,高官能度、低 $T_g$ 的树脂能够快速熔融,更有利于低温固化。R. van der Linde 等<sup>[33]</sup>通过研究 TGIC 交联 TPA 和 IPA 基聚酯粉末涂料的物理老化、热应力、动态力学性能和热膨胀性能,发现 $T_g$ 越高,涂层分布越紧密、热膨胀能力越大、物理老化过程越慢。王文学等<sup>[34]</sup>运用差示扫描量热法分析粉末涂料的固化阶段,总结出在一定温度区间范围内,温度上升越慢,固化程度越大。对于低温固化粉末涂料而言,降低温度是降低反应活化能的唯一措施。Jiang R. 等<sup>[35]</sup>在现有低温粉末涂料各种性能试验的基础上,研究不同因素对低温固化粉末涂料性能的影响。结果表明:在 TMP 质量分数为 10%、固化条件为 150 °C /15 min 下制备的粉末涂料显示出最佳的性能。

表3  $T_g$  对粉末涂料涂膜性能的影响

Table 3 Effect of  $T_g$  on coating properties of powder coatings

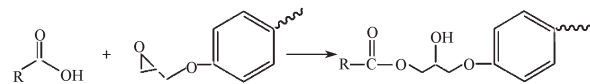
$T_g$	柔韧性	硬度	耐划伤性	耐盐雾性
低	好	低	差	差
高	差	高	好	好

在固化反应阶段,还可引入适宜的促进剂,以减小分子自由体积或提高反应活性,如加入柔性单体降低树脂黏度,或者加入活性较高的单体改变分子结构,实现低温固化。张剑飞等<sup>[36]</sup>通过改性改变树脂的分子结构,制备高羟值聚酯树脂,以平衡柔韧性与耐磨性,解决树脂黏度过大等问题。

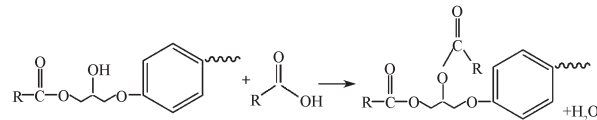
为降低粉末涂料的固化温度,在树脂合成中引入环氧型官能团作为功能单体或直接与环氧树脂混合。环氧/聚酯粉末涂料中,基料是聚酯树脂和环氧树脂。聚酯树脂中的羧基与环氧树脂中的环氧基能发生交联反应形成网状结构。环氧树脂分子含有至少两个环氧基团,要使聚酯/环氧粉末涂层成网状结构,每个聚脂分子应具有3个以上的羧基基团、适宜的 $T_g$ 、较低的熔融黏度,在常温状态下成粉末状态而不结团。传统的环氧/聚酯粉末涂料需在高温下进行固化,导致能量消耗大,耐热性较差的基材易发生变形。相比之下,粉末涂料用环氧树脂分子量小、 $T_g > 50$  °C、质脆、室温下易于机械粉碎且不易结块<sup>[37]</sup>。

环氧/聚酯粉末涂料固化反应原理如图6所示。由图可知,聚酯树脂中羧基与环氧树脂中的环氧基先发生开环加成反应;在化学加成反应之后得到的羟基

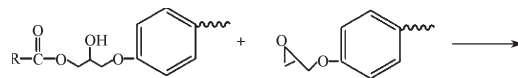
官能团,与聚酯树脂的羧基发生酯化或者与环氧树脂的环氧基发生开环加成反应。固化后的涂层表面较平整、针眼缩孔较少、不易产生裂纹,以及涂层的流平性较好。



a) 聚酯树脂和环氧树脂发生开环加成反应



b) 羟基和羧基发生酯化反应



c) 羟基和环氧基发生开环加成反应

图6 环氧/聚酯粉末涂料固化反应原理

Fig. 6 Curing reaction principle of epoxy/polyester powder coatings

## 4 聚酯粉末涂料的应用

表面涂装技术具有高效 (efficiency)、优良成膜性能 (excellency)、环保性 (ecology) 和经济性 (economy) 的“4e”特点。喷涂技术使得粉末涂料在木质家具、汽车、家用电器等领域取得广泛应用。

### 4.1 木质家具

在木质家具方面,国内的生产企业大多数采用中密度纤维板 (medium density fiberboard, MDF),并用脲醛喷漆等工艺方式进行装饰<sup>[38-39]</sup>。中密度纤维板是一种不导电的热敏基材。以往的水性涂料在使用时存在成本高、周期长等问题,烘烤时有机溶剂会与水一起排出,使涂膜硬度降低。聚酯粉末涂料采用静电喷涂技术应用于板材上。喷涂后的产品无溶剂挥发,无刺激性气味;漆膜表面外观质量好,适合现代简约风格木质家居。采用低温固化粉末涂装技术将粉末涂料喷涂在木质基材表面能形成一层均匀、致密的涂层,其对基材表面的孔隙起到良好的封闭作用,且基材静电吸附性能趋向越一致,涂层厚度越均匀。粉末涂料比传统涂料具有更好的耐化学性和持久性,

但在固化过程中应避免出现针孔、气泡等现象<sup>[40-41]</sup>。王晓军等<sup>[42]</sup>分析得出 MDF 静电粉末喷涂最佳工艺参数,提出一次性上粉的工艺方法,以减少喷涂距离,提高静电电压。一次上粉率和涂层厚度均匀性都随静电电压的升高而提高,对涂层光泽度的影响较小。

此外,节能减排背景下,MDF 粉末涂装向着工艺简化、低温固化、外观美化、原材料可再生发展,以 MDF 为代表的木质家具行业会迎来革命性的变化。

#### 4.2 汽车部件

我国粉末涂料以优异的涂层性能和环保性能替代液体涂料,应用于汽车工业中的零部件,如门窗组件、雨刷、保险杠等外用金属构件,但受产品结构和涂装技术的限制,在汽车工业的应用市场占比不到 10%。伴随高新技术的发展,聚酯粉末涂料在汽车领域的应用越来越广泛,如汽车铝轮毂、汽车保险杠、刹车片等,几乎包含汽车的所有零部件。聚酯粉末涂料产品常为低光泽黑色或深灰色,耐紫外老化性和美观性优异,这部分涂料几乎占汽车用粉末涂料的 15%。使用纯聚酯树脂作为成膜物质代替传统环氧型粉末涂料,可提高涂层的耐候性、降低生产成本<sup>[43-44]</sup>。

此外,汽车塑料零件耐热性差,只能采用低温固化的加工方式。但目前使用聚酯粉末涂料固化温度相对偏高,能耗大,并且高温涂装会对汽车部件的力学性能产生不利影响<sup>[45]</sup>。张胜超等<sup>[46]</sup>研发了铝轮毂专用低温固化粉末涂料,以降低固化温度,增加轮毂的韧性和耐冲击性,减少能量消耗。李惠生等<sup>[47]</sup>采用静电涂装法将聚酯粉末涂料喷涂到车轮上,然后低温加热使粉末熔融、流平、固化,在车轮表面形成坚硬的涂膜。

为建设资源节约型和环境友好型社会,汽车涂料也将朝向绿色环保方向发展。相关研究报道,在聚酯粉末涂料中加入固化促进剂能够成功克服常规低温固化的缺点,有望在工业上实现汽车部件的粉末喷涂,拓展应用范围。进一步提高耐候性、抗紫外线性、装饰性以及低温固化、薄膜化将成为汽车用粉末涂料的发展趋势。

#### 4.3 家用电器

在家用电器领域,粉末涂料不仅可以保护金属表面,还在装饰、耐腐蚀、耐高温等方面发挥着重要作用。家用电器粉末涂料用量约占整个粉末涂料用量的 60%。目前,以聚酯类为主要成膜物质的粉末涂料因色彩鲜艳、坚固耐用的特点在家电应用中最广泛,如

空调、冰箱、洗衣机、厨具等。

聚酯/TGIC 体系粉末涂料使用量较大,是国内占据绝对优势的粉末涂料品种。家用电器用聚酯/TGIC 固化体系的成膜物表现出优异的附着力及柔韧性,但仍存在一定的工艺问题。为了解决边角上粉困难、降低加工成本的问题,吴宗栓等<sup>[48]</sup>以聚酯/TGIC 固化体系制备的家用电器的用高韧性粉末涂料产品能够满足在钣金工艺下拥有优异的附着力及柔韧性等性能方面的需求。程坚等<sup>[49]</sup>为了提高涂层交联度,合理搭配树脂与固化剂用量,使涂层满足柔韧性、耐划痕硬度和耐冲击性等性能要求,实现在同样工作环境下对溶剂型涂料的替代。

面对家电行业的高速发展,市场中各企业也会不断创新,通过新技术降低产品生产过程中消耗的成本。此外,家用电器用低温固化粉末涂料成为新的发展趋势。

## 5 展望

目前,聚酯粉末涂料应用越来越广泛,但更深层次的应用还有待开发。结合我国目前粉末涂料发展现状,未来的发展趋势将朝向:利用低温固化对热敏性底材进行涂装;无毒化、低温固化将会是粉末涂料的发展方向之一;对树脂结构进行改性是混合型低温固化粉末涂料必然发展趋势。从节能环保方面考虑,低温固化粉末涂料发展趋势明显。在全球绿色涂装的背景下,粉末涂料将迎来更广阔的发展机遇。

#### 参考文献:

- [1] WANG W X, WANG Y J, LIU Z L, et al. Study on Application Performance of Oxidized Polyethylene Wax in Powder Coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 136: 105294.
- [2] 王伟跃, 李小强, 李 勇, 等. 粉末涂料用聚酯树脂合成工艺的研究[J]. 现代涂料与涂装, 2021, 24(4): 1-3, 10.  
WANG Weiyue, LI Xiaoqiang, LI Yong, et al. Study on the Synthetic Process of Polyester Resin for Powder Coatings[J]. Modern Paint & Finishing, 2021, 24(4): 1-3, 10.
- [3] LI Y, LIU L, GU Y X, et al. Improve Surface Levelling of Powder Coating with Semi-Crystalline Polyester Resin[J]. Progress in Organic Coatings,

- 2016, 99: 191-196.
- [4] 钱仁君, 杨 栋, 廖 萍, 等. 具有优异耐候性粉末涂料用聚酯树脂的合成及应用研究 [J]. 中国涂料, 2021, 36(12): 34-39.
- QIAN Renjun, YANG Dong, LIAO Ping, et al. A Study on Synthesis and Application Properties of Excellent Weather-Resistant Polyester Resin for Powder Coatings[J]. China Coatings, 2021, 36(12): 34-39.
- [5] 陈 闯, 李 勇, 刘 亮, 等. 户外粉末涂料用聚酯树脂的制备与性能研究 [J]. 涂料技术与文摘, 2015, 36(2): 7-9, 17.
- CHEN Chuang, LI Yong, LIU Liang, et al. Study on Preparation and Performance of Polyester Resin for Outdoor Powder Coatings[J]. Coatings Technology & Abstracts, 2015, 36(2): 7-9, 17.
- [6] 汤明麟, 应明友. 超耐候粉末涂料用聚酯树脂的研究 [J]. 涂料工业, 2017, 47(8): 38-44.
- TANG Minglin, YING Mingyou. Preparation and Properties of Superdurable Polyester Resin for Powder Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2017, 47(8): 38-44.
- [7] 刘 义, 应明友, 邵盛君, 等. 低温 TGIC 固化耐候性粉末涂料用聚酯树脂的合成及性能研究 [J]. 涂层与防护, 2020, 41(3): 41-47, 51.
- LIU Yi, YING Mingyou, SHAO Shengjun, et al. Preparation and Properties of Polyester Resin for Low Temperature Curable TGIC-Based Weatherable Powder Coatings[J]. Coating and Protection, 2020, 41(3): 41-47, 51.
- [8] 王 泼, 谢 静, 李 勇, 等. 聚酯/TGIC 型与聚酯/HAA 型粉末涂层机械性能对比研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2018, 47(3): 33-35, 59.
- WANG Po, XIE Jing, LI Yong, et al. Comparative Studies on Mechanical Properties of Coatings from Different Curing Agents Between TGIC and HAA[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2018, 47(3): 33-35, 59.
- [9] MONTSERRAT S, CALVENTUS Y, HUTCHINSON J M. Physical Aging of Thermosetting Powder Coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2006, 55(1): 35-42.
- [10] 徐红玲, 徐英黔, 郭爱强, 等. TGIC 制粒方法对聚酯粉末涂料漆膜性能的影响 [J]. 辽宁科技大学学报, 2018, 41(3): 200-204.
- XU Hongling, XU Yingqian, GUO Aiqiang, et al. Effect of Granulation Method of TGIC on Paint Film Performance of Polyester Resin Powder Coating[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2018, 41(3): 200-204.
- [11] 师立功, 孙英才. 聚酯/TGIC 粉末涂料的贮存稳定性与性能退化 [J]. 涂料工业, 2021, 51(3): 46-50.
- SHI Ligong, SUN Yingcai. Storage Stability and Deterioration of Polyester/TGIC Powder Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2021, 51(3): 46-50.
- [12] 方 俊, 潘向东. 低温固化型粉末涂料开发及促进剂的应用 [J]. 涂料技术与文摘, 2017, 38(2): 9-15.
- FANG Jun, PAN Xiangdong. A Study on Catalyst and Its Application in Low Temperature Curable Powder Coatings[J]. Coatings Technology & Abstracts, 2017, 38(2): 9-15.
- [13] 程 凯, 张恩赐, 顾远锋, 等. TGIC 体系高韧性干混消光粉末涂料用低酸值聚酯树脂的制备与性能研究 [J]. 涂料工业, 2023, 53(3): 14-20.
- CHENG Kai, ZHANG Enci, GU Yuanfeng, et al. Preparation and Properties of Low Acid Value Polyester Resin for High Flexible Dry-Blended Matt Powder Coatings Based on TGIC[J]. Paint & Coatings Industry, 2023, 53(3): 14-20.
- [14] 周韦明, 翟春海, 吴德清. 户外用羟烷基酰胺固化干混消光粉末涂料用聚酯树脂的合成与应用 [J]. 涂料工业, 2018, 48(10): 25-29.
- ZHOU Weiming, ZHAI Chunhai, WU Deqing. Synthesis and Application of Outdoor Polyester for Dry-Blended Matt Primid Curing Powder Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2018, 48(10): 25-29.
- [15] 马志平, 谢 静, 李 勇, 等. HAA 体系低温固化干混消光粉末涂料用低酸值聚酯树脂的合成及性能研究 [J]. 涂料工业, 2020, 50(4): 46-51.
- MA Zhiping, XIE Jing, LI Yong, et al. Study on Synthesis and Properties of Low Acid Value Polyester Resin for Low Curing Temperature Dry-Blended Matt Powder Coatings Based on HAA[J]. Paint & Coatings Industry, 2020, 50(4): 46-51.
- [16] 曾浩航, 曾 定, 顾远锋, 等. 耐候型聚酯粉末涂料固化剂的研究进展 [J]. 现代涂料与涂装, 2022, 25(4): 16-18.
- ZENG Haohang, ZENG Ding, GU Yuanfeng, et al. Research Progress of Curing Agents for Weather Resistant Polyester Powder Coatings[J]. Modern Paint & Finishing, 2022, 25(4): 16-18.
- [17] 胡宁先. HAA 在耐候粉末涂料中的应用 [J]. 现代涂料



- 与涂装, 2014, 17(10): 18–22, 38.
- HU Ningxian. Application of HAA in Weathering Resistance Powder Coating[J]. Modern Paint & Finishing, 2014, 17(10): 18–22, 38.
- [18] 李 勇, 顾宇昕, 何 涛, 等.  $\beta$ -羟烷基酰胺低温固化粉末涂料用聚酯树脂的合成研究 [J]. 现代涂料与涂装, 2012, 15(5): 1–3, 6.
- LI Yong, GU Yuxin, HE Tao, et al. Study on Synthesis of Polyester Resin for Low Curing Temperature Powder Coatings for  $\beta$ -Hydroxylalkyl Amide[J]. Modern Paint & Finishing, 2012, 15(5): 1–3, 6.
- [19] 袁仁能, 刘 丹, 曾志翔, 等. 超支化聚酯改善聚酯粉末涂料表现性能的研究 [J]. 涂料工业, 2011, 41(10): 34–37.
- YUAN Renneng, LIU Dan, ZENG Zhixiang, et al. The Study on Improvement of Appearance of Polyester Powder Coatings Modified with Hyperbranched Polyesters[J]. Paint & Coatings Industry, 2011, 41(10): 34–37.
- [20] 朱新平, 刘 卫, 黄焯轩, 等. 薄涂高流平 HAA 固化聚酯粉末涂料的制备及性能研究 [J]. 涂层与防护, 2023, 44(2): 39–44.
- ZHU Xinping, LIU Wei, HUANG Zhuoxuan, et al. Preparation and Properties of High Leveling Thin-Film HAA-Based Polyester Powder Coatings[J]. Coating and Protection, 2023, 44(2): 39–44.
- [21] 陈 唯, 顾宇昕, 许振阳, 等. 热固性粉末涂料用端双键聚酯树脂的合成 [J]. 涂料工业, 2014, 44(10): 19–21, 25.
- CHEN Wei, GU Yuxin, XU Zhenyang, et al. Preparation of Double Bond-Terminated Polyester Resin for Powder Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2014, 44(10): 19–21, 25.
- [22] LIU J M, WANG S S, SU Q P, et al. Synthesis of a Novel Hyperbranched Polyester with Carboxyl End Groups Applied to UV-Curable Waterborne Coating[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2021, 18(1): 259–269.
- [23] 周 坚, 王胜鹏, 钟明强, 等. 低成本聚酯粉末涂料表面改进的研究 [J]. 涂料工业, 2017, 47(1): 55–60.
- ZHOU Jian, WANG Shengpeng, ZHONG Mingqiang, et al. Surface Modification of Low-Cost Polyester Powder Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2017, 47(1): 55–60.
- [24] IWAMURA G, AGAWA T, MARUYAMA K, et al. A Novel Acrylic/Polyester System for Powder Coatings[J]. Surface Coatings International, 2000, 83(6): 285–288.
- [25] 曾 定, 马志平, 谢 静, 等. 粉末涂料用丙烯酸改性聚酯树脂的合成研究 [J]. 涂层与防护, 2018, 39(2): 30–34.
- ZENG Ding, MA Zhiping, XIE Jing, et al. Preparation of Acrylate Modified Polyester Resin for Powder Coatings[J]. Coating and Protection, 2018, 39(2): 30–34.
- [26] DUMAIN E D, AGAWA T, GOEL S, et al. Cure Behavior of Polyester-Acrylate Hybrid Powder Coatings[J]. Journal of Coatings Technology, 1999, 71(893): 69–75.
- [27] 汪喜涛, 都魁林, 刘亚康. 丙烯酸粉末涂料耐冲击性影响因素的研究 [J]. 涂料工业, 2011, 41(2): 29–32.
- WANG Xitao, DU Kuilin, LIU Yakang. Study on Factors Influencing Impact Resistance of Acrylic Powder Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2011, 41(2): 29–32.
- [28] 贾仕奎, 齐锦辉, 赵兴越, 等. 丙烯酸酯光固化改性树脂及其应用研究进展 [J]. 塑料工业, 2022, 50(11): 1–6, 51.
- JIA Shikui, QI Jinhui, ZHAO Xingyue, et al. Research Progress of Light-Cured Modified Acrylate Resin and Its Application[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(11): 1–6, 51.
- [29] 兰芬芬, 丁 冉, 田 振, 等. 聚酯/环氧/丙烯酸树脂低光泽粉末涂料的制备与性能 [J]. 塑料工业, 2020, 48(6): 24–28.
- LAN Fenfen, DING Ran, TIAN Zhen, et al. Preparation and Performance of Polyester/Epoxy/Acrylic Resin for Low Gloss Powder Coatings[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(6): 24–28.
- [30] 潘向东, 巴旭民. 低温固化 GMA 丙烯酸粉末涂料的开发与应用 [J]. 涂料工业, 2018, 48(10): 15–19.
- PAN Xiangdong, BA Xumin. Development and Application of Low Temperature Curable GMA Acrylic Powder Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2018, 48(10): 15–19.
- [31] ROMAN F, MONTSERRAT S. Thermal and Dielectric Properties of Powder Coatings Based on Carboxylated Polyester and  $\beta$ -Hydroxyalkylamide[J]. Progress in Organic Coatings, 2006, 56(4): 311–318.
- [32] 韩要星, 吴秋芳. 粉末涂料的固化行为研究及其应用 [J]. 涂料工业, 2003, 33(6): 43–45.
- HAN Yaoxing, WU Qiufang. Study on Curing Behavior

- of Powder Coatings and Its Application[J]. Paint & Coatings Industry, 2003, 33(6): 43-45.
- [33] van der LINDE R, BELDER E G, PERERA D Y. Effect of Physical Aging and Thermal Stress on the Behavior of Polyester/TGIC Powder Coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2000, 40(1/2/3/4): 215-224.
- [34] 王文学, 王玉珏, 韩宇莹, 等. 聚酯/TGIC 粉末涂料固化动力学分析[J]. 涂料工业, 2019, 49(12): 41-46.
- WANG Wenxue, WANG Yujue, HAN Yuying, et al. Curing Kinetics Analysis of Polyester/TGIC Powder Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2019, 49(12): 41-46.
- [35] JIANG R, BI H P, ZHENG R H. Analysis of Preparation Conditions of Low-Temperature Curing Powder Coatings Based on Local Clustering Algorithm[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 1143283.
- [36] 张剑飞, 王立, 郭金山, 等. 高固体分、高羟值聚酯树脂的合成及性能研究[J]. 涂料工业, 2014, 44(11): 18-24.
- ZHANG Jianfei, WANG Li, GUO Jinshan, et al. Synthesis and Properties of Polyester Resin with High Solid and Hydroxyl Value[J]. Paint & Coatings Industry, 2014, 44(11): 18-24.
- [37] 万凯, 李昌诚, 赵海洲, 等. 带环氧基丙烯酸树脂改性环氧树脂防腐涂料的性能[J]. 合成树脂及塑料, 2015, 32(6): 39-44.
- WAN Kai, LI Changcheng, ZHAO Haizhou, et al. Properties of Epoxy Resin Anticorrosion Coating Modified by Acrylic Resin Containing Epoxy Group[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2015, 32(6): 39-44.
- [38] 吕一心, 周橙旻, 李臻瑜. 我国家具新材料发展现状综述[J]. 家具与室内装饰, 2020(7): 20-22.
- LÜ Yixin, ZHOU Chengmin, LI Zhenyu. A Review on China's Development of New Furniture Materials[J]. Furniture & Interior Design, 2020(7): 20-22.
- [39] 彭亮. 对全屋整装与定制家居发展趋势的再思考[J]. 家具与室内装饰, 2020(1): 9-10.
- PENG Liang. Thoughts on the Development Trend of Whole-House Assembly and Custom Furniture[J]. Furniture & Interior Design, 2020(1): 9-10.
- [40] 周伟. 家具用中密度纤维板粉末涂料静电喷涂边缘开裂分析[J]. 中国人造板, 2022, 29(8): 10-13.
- ZHOU Wei. Analysis of Edge Cracking of Medium Density Fiberboard as Furniture Board by Electrostatic Spraying of Powder Coating[J]. China Wood-Based Panels, 2022, 29(8): 10-13.
- [41] 李博, 吕斌, 张挺, 等. 粉末涂料静电喷涂技术在木质家居产品中的应用与展望[J]. 中国人造板, 2023, 30(3): 1-5.
- LI Bo, LÜ Bin, ZHANG Ting, et al. Application and Prospect of Powder Electrostatic Spraying Technology in Wooden Household Products[J]. China Wood-Based Panels, 2023, 30(3): 1-5.
- [42] 王晓军, 闫承琳. 中密度纤维板静电粉末喷涂工艺条件研究[J]. 中国人造板, 2011, 18(9): 14-18.
- WANG Xiaojun, YAN Chenglin. Processing Conditions of MDF Powder Coating[J]. China Wood-Based Panels, 2011, 18(9): 14-18.
- [43] 史国涛, 杨文迪. 户外耐久性粉末涂料在汽车轮毂上的开发应用[J]. 中国涂料, 2022, 37(3): 41-49.
- SHI Guotao, YANG Wendi. Development and Application of Weatherable Powder Coatings for Vehicle Wheel Hubs[J]. China Coatings, 2022, 37(3): 41-49.
- [44] 张海萍, 闫宝伟, 杨帅, 等. 超细粉末涂料在汽车涂装领域的应用研究[J]. 涂料工业, 2018, 48(10): 82-87.
- ZHANG Haiping, YAN Baowei, YANG Shuai, et al. Application of Ultrafine Powder Coatings in Automotive Industry[J]. Paint & Coatings Industry, 2018, 48(10): 82-87.
- [45] 高庆福. 汽车部件用粉末涂料概况[J]. 涂料工业, 2018, 48(10): 69-73.
- GAO Qingfu. Overview of Powder Coatings for Automotive Components[J]. Paint & Coatings Industry, 2018, 48(10): 69-73.
- [46] 张胜超, 高庆福, 张乐, 等. 低温固化粉末涂料在铝轮毂上的应用研究[J]. 涂料工业, 2015, 45(10): 60-64.
- ZHANG Shengchao, GAO Qingfu, ZHANG Le, et al. Research on Application of Low Temperature Curing Powder Coatings in Aluminum Hub[J]. Paint & Coatings Industry, 2015, 45(10): 60-64.
- [47] 李惠生. 纯聚酯粉末涂料在汽车车轮涂装中的应用[J]. 黑龙江科学, 2010, 1(2): 50-51, 54.
- LI Huisheng. Application of Pure Polyester Powder Coatings in Automobile Wheel Painting[J]. Heilongjiang Science, 2010, 1(2): 50-51, 54.
- [48] 吴宗栓, 罗绵生, 叶永权, 等. 家电用高韧性粉末涂料的研制[J]. 涂层与防护, 2020, 41(5): 52-56.

WU Zongshuan, LUO Miansheng, YE Yongquan, et al. Development of High Toughness Powder Coatings for Household Appliances[J]. Coating and Protection, 2020, 41(5): 52–56.

[49] 程 坚. 家电用耐温粉末涂料的配方设计 [J]. 涂料工业, 2019, 49(5): 69–72, 78.

CHENG Jian. Formulation Design of Heat-Resistant Powder for Household Appliances[J]. Paint & Coatings Industry, 2019, 49(5): 69–72, 78.

(责任编辑: 李玉华)

## Research and Application of Low Temperature Curing Powder Coatings

WANG Zhengxiang, ZHUO Yuanhang, FAN Shuhong, DAI Wendou, LIU Simin

( College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China )

**Abstract:** Taking thermosetting polyester powder coatings as the research object, the characteristics of polyester resins and curing agents in film-forming substances and their roles in powder coatings were introduced, and the research progress of low-temperature curing polyester powder coatings was reviewed from four aspects: preparation, curing mechanism, modification and application. In order to improve the shrinkage of polyester powder coating, the active functional group acrylate was introduced into the polyester resin for surface modification, and the mixed polyester/acrylic powder coating was obtained. The weather resistance and curing reaction principle of the weatherable polyester/acrylic powder coating were summarized. In order to reduce the curing temperature of powder coatings and meet the development requirements of low-temperature curing, epoxy functional groups were introduced as functional monomers or directly mixed with epoxy resin in the process of resin synthesis according to the relative characteristics of film-forming materials of synthetic polyester powder coatings. Polyester powder coatings are widely used in furniture, automobiles and household appliances. In the future, polyester powder coatings will develop towards energy saving, environmental protection, diversity and wider applicability.

**Keywords:** low temperature curing; polyester resin; powder coating; epoxy; acrylic acid