

聚氨酯快干漆在火工品喷涂中的应用前景分析

李晓升, 党文伟, 杨振兴

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 本文主要探讨了聚氨酯快干漆在火工品喷涂领域的应用前景。通过对聚氨酯快干漆催化快干机理的解析, 揭示了其快速固化的内在机制。同时, 系统介绍了喷涂参数、固化制度及贮存稳定性对快干漆涂层性能的影响, 并重点考察了快干漆在温度循环、温度冲击、湿热试验、老化试验等严苛环境条件下的适应性能力。研究表明: 采用传统三防漆喷涂工艺即可制备出性能优异的聚氨酯快干涂层, 快干漆成分中叔胺类与有机锡类催化剂相互之间存在显著的协同作用, 能够有效提升聚氨酯漆膜的固化速率, 其常温下固化时间较传统聚氨酯涂料可缩短 85%, 在 45 °C 烘干条件下固化时间可缩短 96%。同时, 快干漆表现出与配套底漆、硅橡胶热防护涂层等多型涂层优异的匹配性, 能够满足复杂环境条件下的应用需求, 为快干漆在火工品喷涂领域的应用提供了参考。

关键词: 快干漆; 火工品; 喷涂; 催化快干; 固化时间

中图分类号: TQ637 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2026)01-0037-04

Analysis of the Application Prospects of Polyurethane Quick-drying Paint in Pyrotechnic Product Coating

LI Xiao-sheng, DANG Wen-wei, YANG Zhen-xing

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, Henan, China)

Abstract: This paper primarily investigates the application prospects of polyurethane quick-drying paint in the field of pyrotechnic product coating. By analyzing the catalytic fast-drying mechanism of polyurethane quick-drying paint, this study reveals its internal mechanisms for rapid curing. Additionally, it systematically introduces the effects of coating parameters, curing regimes, and storage stability on the performance of quick-drying paint coatings. Furthermore, the study focuses on evaluating the adaptability of quick-drying paint under stringent environmental conditions such as temperature cycling, thermal shock, humidity-heat testing, and aging tests. The results indicate that: using traditional three-proof paint coating processes can produce high-performance polyurethane quick-drying coatings. In the formulation of quick-drying paint, tertiary amine and organic tin catalysts exhibit significant synergistic effects, effectively enhancing the curing rate of polyurethane coatings. Under normal temperature conditions, the curing time is reduced by 85% compared to traditional polyurethane paints, and under 45 °C drying conditions, the curing time is shortened by 96%. At the same time, quick-drying paint exhibits excellent compatibility with various types of coatings such as matching primers and silicone rubber thermal protection coatings, which can meet the application needs under complex environmental conditions and provide reference for the application of quick-drying paint in the field of pyrotechnic spraying.

Key words: quick-drying paint; pyrotechnics; spraying; catalytic fast drying; curing time

收稿日期: 2025-07-20

作者简介: 李晓升(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事非金属材料应用及热防护技术研究。E-mail: lxs2006@126.com。

0 引言

火工品作为一种在军事领域广泛应用的特殊产品, 其安全性和可靠性至关重要^[1]。在火工品的生产过

程中,表面防护涂层对于提高火工品的耐腐蚀性、稳定性以及延长其使用寿命起着关键作用。火工品的涂层加工过程对厂房内装药当量有严格限定,当厂房内产品数量达到装药当量上限后,影响其生产能力的主要因素为生产周期。通常,传统的三防漆在火工品喷涂过程中,由于火工品表面漆层不能采取高温及长时中温加热固化的方法,导致其漆层固化时间在生产周期中占较大比例,极大地影响火工品生产效率及产能。

快干漆作为一种新型涂料,具有常温干燥速度快的显著特点^[2]。将快干漆应用于火工品领域,能够有效提高火工品的生产效率,减少总体生产周期。目前,对于快干漆在一般工业领域的应用研究较多,但在火工品这种特殊产品上的应用研究还相对较少。此外,由于火工品对其常选用的聚氨酯漆在安全性、可靠性方面有严格要求,决定了其表面涂层的性能需要进一步深入研究和评估^[3-4]。

本文从催化快干角度来缩短漆层固化时间,并按照火工品相关要求对漆层性能及环境适应性考核验证,以得到能够用于火工品表面防护的漆层,为后续火工品喷涂选材、设计提供一定参考。

1 快干漆的催化快干机理

快干漆一般通过在配方中添加特殊助剂使得其在施工后能在较短时间内形成干燥的漆膜。目前,在加快漆层固化速度方面,除了提高固化温度以外,还可以通过添加催化剂的方式加快其反应速率。其中,催化剂作为漆料的添加剂组分,是一种能够改变固化反应速率但不改变反应总吉布斯自由能的物质,其特有的选择性促进正反应、抑制副反应的催化方式,能够显著缩短树脂与固化剂的反应时间。在聚氨酯快干漆体系中,催化剂作为一种重要助剂,不仅能缩短聚氨酯预聚合的时间,还能缩短聚氨酯涂层的固化时间^[5]。因此,选择合适的催化剂对聚氨酯体系从聚合到成膜都至关重要。

聚氨酯快干漆催化剂按成分可以分为叔胺类催化剂和有机金属类催化剂,较为常用的有2,4,6-三(二甲氨基甲基)苯酚(DMP-30)、二甲基环己胺、二月桂酸二丁基锡等。其中,叔胺类催化剂对聚氨酯反应催化活性主要取决于以下几个因素:1)叔胺基团的碱性越大,催化活性越高;2)氮原子上所带取代基的空间障碍越小,催化活性越高;3)催化剂的浓度越大,催化活性越高。而有机锡催化剂在反应过程中能与异氰酸根产生配位并使—NCO基团极化,从而使异氰酸酯分子中带正电荷的碳原子更加活泼,更容易受到多元醇聚合物端羟基的攻击^[6],达到聚氨酯快速反应成膜的目的。

在对催化剂的研究中,叔胺类催化剂与有机锡类催化剂之间存在明显的协同作用。由于异氰酸酯或羟

基化合物首先能够与催化剂生成不稳定的络合物,随后发生反应形成聚氨酯树脂^[7]。因此,在催化异氰酸根与羟基反应的活性方面,叔胺与有机锡催化剂复合使用时效果更佳,且可以抑制—NCO基团和水的副反应,从而明显提高涂料的贮存稳定性。

2 快干漆的工艺性研究

2.1 快干漆的基本性能

为了保证火工品表面涂层性能稳定性,本文主要选择有应用背景的WM-S08B聚氨酯快干漆作为研究对象,该聚氨酯快干漆主组分中含有叔胺与有机锡复合催化剂,其基本技术指标如表1所列。

表1 快干漆技术指标

项目	指标	测试方法
柔韧性/mm	≤1	GB/T 1731《漆膜、腻子膜柔韧性测定法》
耐冲击性/cm	≥50	GB/T 1732《漆膜耐冲击测定法》
附着力/级	≤1	GB/T 9286《色漆和清漆划格试验》
拉伸强度/MPa	≥8	GB/T 528《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》
断裂延伸率/%	≥50	GB/T 528《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》
颜色	白色	GB/T 1728《色漆和清漆 色漆的目视比色》
固化条件	常温≥18 h	GB/T 9761《漆膜、腻子膜干燥时间测定法》

2.2 快干漆的喷涂参数

按照传统三防漆的喷漆施工条件对聚氨酯快干漆进行工艺试验。同时,以漆层外观作为合格判断依据,兼顾考虑施工过程效率,最终确定了最佳的喷涂工艺参数。聚氨酯快干漆在空气喷涂条件下的最佳喷涂工艺参数如表2所列。

表2 快干漆的喷涂参数

项目	工艺参数条件
黏度(涂-4杯)/s	18~25
喷涂压力/MPa	0.2~0.4
相邻两遍喷涂时间间隔/min	≥10
适用期/h	2
熟化要求	无
A、B 配比	9:1
漆料过滤要求	喷漆前用100目滤网过滤
喷漆环境温湿度要求	15~35℃,相对湿度≤70%

按照表2喷涂工艺参数,分别在WF-02B配套底漆及WM-S06B硅橡胶热防护涂层表面进行喷涂,喷涂后的漆层外观如图1所示。覆于底漆之上的面漆漆

膜平整、光滑、清洁、色调一致、均匀遮盖,无漏喷、过喷、流挂、橘皮及剥落等缺陷(图 1a)。而覆于硅橡胶热防护涂层的面漆漆膜除表现出凹凸感外,其他外观指标与覆于底漆之上的面漆样本无区别(图 1b)。

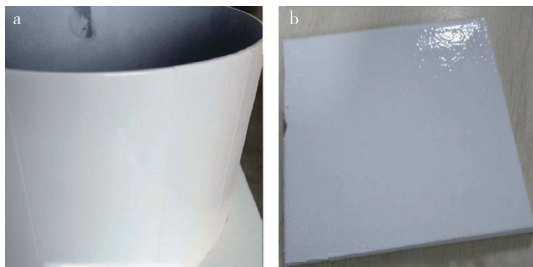


图 1 快干漆喷涂后的漆层外观

同时,对快干漆在配套底漆、硅橡胶防护涂层表面的性能进行测试,结果如表 3 所列。结果表明,快干漆与配套底漆、硅橡胶防护涂层复配形成的涂层结构各项指标均满足快干漆技术指标,而配套底漆表现出的性能参数略优于硅橡胶防护涂层,这主要与涂层粗糙度及结合能力有关。此外,快干漆匹配不同涂层结构表现出良好的附着性能,能够牢固地附着在多种基材表面。按照 GB/T 1768《色漆和清漆耐磨性的测定 旋转摩擦法》对复配涂层耐磨性进行测试,结果显示其涂层结构具有较高的硬度和韧性,能够有效抵抗外界摩擦、刮擦。复配涂层具有优异的耐腐蚀性,对酸、碱、盐等化学物质有较好的耐受性。

表 3 快干漆在配套底漆、硅橡胶防护涂层表面的性能测试结果

项目	WF-02B 配套底漆	WM-S06B 硅橡胶热防护涂层
柔韧性/mm	1	1
耐冲击性/cm	50	50
附着力/级	1	1
颜色	白色	白色
固化条件	常温,18 h	常温,18 h

2.3 快干漆的固化制度

按照聚氨酯快干漆最佳喷涂工艺参数,采用空气喷涂的施工方法制备了聚氨酯快干漆膜,并在常温及 45 °C 烘干条件下验证其固化条件。验证过程中,完全固化条件以固化后打磨标准确定,即以漆膜干燥后具备正常打磨条件视为完全固化,其固化条件验证试验结果如表 4 所列。

通常,传统聚氨酯漆室温固化时间为 120 h,45 °C 烘干固化时间为 72 h。由表 4 可知,聚氨酯快干漆的固化时间与传统聚氨酯漆相比,常温固化时间可缩短 85%,45 °C 烘干固化时间可缩短 96%,完全能够满足

火工品常温短时固化、中温短时固化的安全性要求。

表 4 快干漆固化条件试验结果

温度条件	固化时间
常温	≥18 h
加热((45±5) °C)	≥2.5
常温+加热	常温≥2 h+(45±5) °C≥2 h

2.4 快干漆的贮存稳定性

将聚氨酯快干漆分别在常温和 45 °C 环境条件下进行长期贮存、短期贮存,贮存后采用空气喷涂的施工方法制备快干漆层,并进行漆层固化性能及附着力测试,其测试结果如表 5 所列。结果表明,聚氨酯快干漆经过常温环境长时间贮存以及 45 °C 中温环境短时间贮存后,漆层固化状态均正常,划格法附着力均达到 1 级。

表 5 快干漆贮存稳定性测试结果

贮存条件	测试结果
室温贮存 1 个月	固化状态正常,附着力 1 级
室温贮存 10 个月	固化状态正常,附着力 1 级
室温贮存 10 个月+45 °C 贮存 5 d	固化状态正常,附着力 1 级

采用空气喷涂的施工方法将快干漆(室温贮存 10 个月+45 °C 贮存 5 d)喷涂在配套底漆、常用底漆、硅橡胶热防护涂层表面,并进行漆层固化性能及附着力测试,通过固化状态及附着力是否劣化判断快干漆与各种涂层的匹配性,其匹配性测试结果如表 6 所列。结果表明,聚氨酯快干漆经过常温环境长时间贮存以及 45 °C 中温环境短时间贮存后,其与配套底漆、常用底漆及硅橡胶热防护涂层配套喷涂后漆层固化状态均显示正常,划格法附着力均达到 1 级。

表 6 快干漆匹配性测试结果

涂层结构	测试结果
WF-02B 配套底漆+快干漆	固化状态正常,附着力 1 级
WF-17D 常用底漆+快干漆	固化状态正常,附着力 1 级
S06-N-2 常用底漆+快干漆	固化状态正常,附着力 1 级
TB06-9 常用底漆+快干漆	固化状态正常,附着力 1 级
WM-S06B 硅橡胶热防护涂层+快干漆	固化状态正常,附着力 1 级

经常温环境长时间贮存以及 45 °C 中温环境短时间贮存后,聚氨酯快干漆表现出优异的贮存稳定性,并且与配套底漆、常用底漆及硅橡胶热防护涂层有优异的匹配性,其能够满足火工品加工过程常温长期、中温短期贮存要求及各型涂层结构复合匹配

能力。

3 快干漆的环境适应性研究

根据火工品环境适应性要求的试验项目,对聚氨酯快干漆进行温度循环(GJB 1032A—2020《电子产品环境应力筛选方法》)、温度冲击(GJB 150.5A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第5部分:温度冲击试验》)、湿热试验(GJB 150.9A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第9部分:湿热试验》)、老化试验(GB/T 1766—2008《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》)等项目考核,其具体温度循环考核条件、温度冲击考核条件、湿热试验考核条件见图 2~3 和表 7,考核结果如表 8 所列。

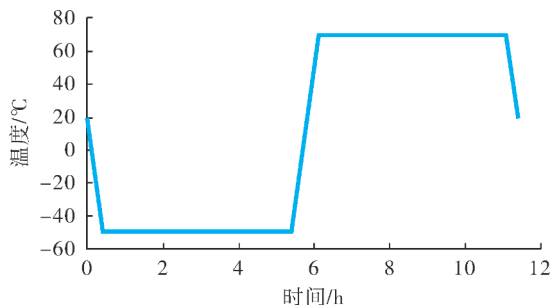


图 2 温度循环考核条件

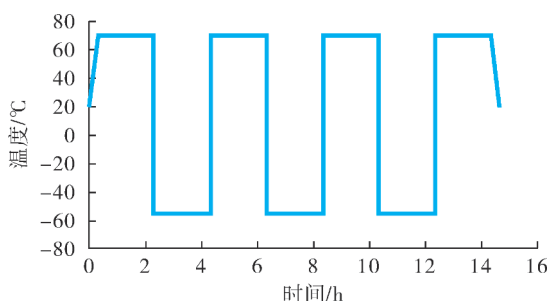


图 3 温度冲击考核条件

表 7 湿热试验考核条件

试验阶段	温度/°C	相对湿度/%	时间/h	试验周期/d
升温阶段	30→60	95	2	10
高温高湿阶段	60	95	6	
降温阶段	60→30	>85	8	
低温高湿阶段	30	95	8	

试验结果表明,聚氨酯快干漆经 3 个周期的温度循环、温度冲击,经 10 个周期的湿热考核,经 500 h 的紫外老化试验后,漆层无起泡、发黏、脱黏、变色、失光等异常现象,满足火工品使用过程中耐腐蚀性、全周期寿命使用要求。

表 8 快干漆环境适应性考核试验结果

项目	试验条件	考核结果
温度循环	高温 70 °C、低温-50 °C,各保温 5 h,温变速率 3 °C/min,共计 3 个周期	涂层无脱黏、鼓包等异常
温度冲击	高温 70 °C、低温-55 °C,各保温 2 h,温度转换时间≤1 min,共计 3 个周期	涂层无脱黏、鼓包等异常
湿热试验	10 个周期湿热考核	涂层无起泡、发黏、脱落、变色等
老化试验	500 h 紫外老化	无变色、失光、开裂现象

4 结语

本文围绕聚氨酯快干漆在火工品喷涂中的应用展开系统性研究,基于对快干漆干燥机理的深入分析,提出了一种有效的聚氨酯快干漆催化快干方法。通过开展喷涂参数、固化制度及贮存稳定性等工艺性研究发现,该快干漆在空气喷涂条件下制备的漆膜性能优异,其在室温条件下固化周期可缩短至传统聚氨酯漆的 15%,在 45 °C 烘干环境下固化周期可缩短至传统聚氨酯漆的 4%。

同时,温度循环、温度冲击、湿热试验、老化试验等环境适应性研究表明,该快干漆不仅具有良好的使用稳定性,而且能够满足复杂环境条件下的应用需求。此外,快干漆表现出与配套底漆、硅橡胶热防护涂层等多型涂层优异的匹配性,且各项性能均满足快干漆自身性能指标要求。综合来看,聚氨酯快干漆在火工品喷涂领域展现出广阔的应用前景,为提升火工品的喷涂效率提供了有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 袁嵩.过程安全管理在火工品生产中的实践[J].化工管理,2023(21):110-113.
- [2] 魏莉,熊瑜,梁璐,等.快干型高固体分环氧防腐底漆的研究[J].表面技术,2018(5):195-201.
- [3] 肖春霞.潜固化剂在单组分聚氨酯防水涂料中的应用效果研究[J].中国建筑防水,2024(2):14-16.
- [4] 黄嵘,林伟.轨道交通用水性聚氨酯底色漆的制备及研究[J].涂层与防护,2024(11):27-33.
- [5] 洪啸吟,冯汉保,申亮.涂料化学[M].北京:科学出版社,2023:250-251.
- [6] 王庭慰,陈存友,狄超,等.水性聚氨酯涂料催化剂研究进展[J].电镀与涂饰,2011(2):58-61.
- [7] 许戈文.水性聚氨酯材料[M].北京:化学工业出版社,2006:61-65.