

# 快干型高固体分环氧防腐底漆的研究

魏莉<sup>1</sup>, 熊瑜<sup>2</sup>, 梁璐<sup>2</sup>, 刘雪佳<sup>2</sup>, 张玉忠<sup>2</sup>, 万耀明<sup>2</sup>

(1.航空工业成都飞机(集团)有限责任公司产品研制部, 成都 610091;

2.中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** **目的** 研制高性能快干型高固体分环氧防腐底漆。**方法** 将低黏度高活性环氧树脂和普通环氧树脂进行复配, 得到可用于高固含涂料的树脂基料; 通过分子结构优化设计, 合成制备了以酚醛胺改性聚酰胺树脂为主体并结合柔性长链改性胺树脂复配的固化剂体系; 利用复配的环氧树脂基料、自制的固化剂体系和无铬防锈颜料等组分研制了快干型高固体分环氧底漆。根据国家标准, 进行了力学性能(包括柔韧性、耐冲击性和附着力)、耐环境性能(包括耐湿热、耐盐雾性能)和耐液体介质等涂层性能测试; 通过考核涂层耐丁酮擦拭 100 次是否露底, 来表征涂层的固化, 采用 FTIR 手段, 动态跟踪环氧固化过程。**结果** 新研制的环氧涂料具有优良的力学性能和防腐性能, 涂料的固含量 73%, 表干时间 40 min, 适用期 8 h, 耐盐雾和湿热均能达到 5000 h, 全面性能已达到国外现役先进材料水平, 且工艺性能良好。**结论** 以低黏度高活性环氧树脂为基体, 采用酚醛与柔性长链二聚酸改性的聚酰胺固化剂, 可制备高性能快干高固体分环氧防腐底漆, 在飞机的防护底漆领域具有良好的应用前景。

**关键词:** 快干型; 高固体分; 环氧; 酚醛胺; 无铬颜料; 防腐蚀; 底漆

**中图分类号:** TQ633.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)05-0195-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.030

## Quick-curing High-solid Epoxy Anti-corrosive Primer

WEI Li<sup>1</sup>, XIONG Yu<sup>2</sup>, LIANG Lu<sup>2</sup>, LIU Xue-jia<sup>2</sup>, ZHANG Yu-zhong<sup>2</sup>, WAN Yao-ming<sup>2</sup>

(1.AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd, Research&Development Department, Chengdu 610091, China;

2.AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**ABSTRACT:** The work aims to prepare quick-curing and high-solid anti-corrosive epoxy primer of high performance. Epoxy coatings were obtained by compounding low-viscosity and high-activity epoxy resin and common epoxy resin. Based upon optimum design of molecular structure, a curing agent system was synthesized by compounding phenolic amine modified polyamides resin (as principal part) and soft long-chain modified amine resin. Finally, the quick-curing and high-solid anti-corrosive epoxy primer was made from the synthesized epoxy resin substrate, homemade curing agent system, chromium-free anti-corrosive pigment, etc. In accordance with national standards, coating properties including mechanical properties (flexibility, shock resistance and adhesion), environmental resistance (heat and humidity resistance, salt spray resistance) and liquid medium resistance were tested. Coating curing was characterized by checking the coatings for base exposure after scrubbing them with butanone for a hundred times. The curing process of epoxy was dynamically monitored with FTIR. The as-prepared coatings showed excellent mechanical properties and corrosion resistance (solid content of 73%, surface drying time of 40 min, pot life of 8 h, salt fog and heat-humidity resistance of 5000 h), which reached worldwide advanced material level, and exhibited excellent

收稿日期: 2017-12-11; 修订日期: 2018-02-04

Received: 2017-12-11; Revised: 2018-02-04

通讯作者: 熊瑜(1975—), 女, 高级工程师, 主要从事特种功能涂料的研究。

Corresponding author: XIONG Yu (1975—), Female, Senior engineer, Research focus: advanced coating material.

processing property. With low-viscosity high-activity epoxy resin as the substrate, and the quick-curing and high-solid anti-corrosive epoxy primer of excellent performance can be made from phenolic aldehyde and flexible long-chain dimer-acid modified polyamide curing agent, which is of good potential application in the field of aircraft protective primer.

**KEY WORDS:** quick-curing; high-solid; epoxy; phenolic amide; chromate-free pigment; anti-corrosion; primer

飞机的金属和非金属内部防护底漆为底材和面漆的连接层,起着承上启下的关键性作用,是飞机整个涂料体系中用量最大的一类材料,直接关系到整机防护体系的有效性和结构材料的服役风险、使用寿命。新型飞机由于飞行速度的提高和服役环境的复杂性,对材料的防腐蚀性能提出了越来越高的要求,要求防护底漆具有更高的防腐蚀性能、更好的柔韧性、更高的附着力和较好的工艺性能,可用于多种金属及非金属底材表面,与多种涂层、胶粘剂及密封胶具有良好的相容性。现役飞机防腐底漆的耐盐雾、耐丝状腐蚀及柔韧性等方面均不满足新机的要求,亟需研制防腐蚀性能及力学性能更好的防腐蚀底漆。

综合国内外研究现状和研究趋势,防护底漆的发展方向主要有高固体分涂料、粉末涂料和水性涂料等方面,特别是无铬涂料<sup>[1-3]</sup>、高固体分涂料<sup>[4-6]</sup>和水性涂料研究较为活跃。高固体分涂料一方面降低了 VOC 的挥发,同时又保留一部分溶剂型涂料的特性,可以直接利用现有的涂装生产线进行施工。与传统的溶剂型涂料相比,高固体分涂料有以下优点:涂膜有效交联密度高,抗化学腐蚀介质渗透能力强,耐蚀性好;节约有机溶剂,减少环境污染,提高生产安全性;提高生产效率。防腐颜填料方面也尽量以无毒或低毒的成分代替底漆中常用的铬酸盐,而涂层依然具有防腐蚀性能且持久耐用<sup>[7]</sup>。国外对于无铬高固体分防护涂料的研究开始较早,荷兰已经研制出施工固含量高达 750 g/L 的高固体含量底漆以及符合 BMS 10-72 和 NT 10.113 标准的 CF37047 无铬聚氨酯底漆和 37076 高固体分环氧底漆,后两种底漆已用于不同机种的防护。美国已有高固体分涂料和水性涂料的应用<sup>[8]</sup>。MIL-PRF-23377J 溶剂型高固体分环氧底漆(包括含铬酸钡(C1 型)、含铬酸锶(C2 型)、非铬酸盐(N 型)防腐填料三种类型)和 MIL-PRF-85582D 水性高

固体分环氧底漆, VOC 含量均不超过 340 g/L<sup>[9]</sup>。我国无铬高固体分涂料的研究虽然起步较晚,但已经取得了很大进展<sup>[10-13]</sup>。

本研究通过将新型低黏度、高活性、耐腐蚀的环氧树脂和普通环氧树脂进行复配,合成了耐油耐溶剂、延长涂料适用期且能提高涂层防腐性能的新型固化剂体系<sup>[14-15]</sup>,突破了传统防护底漆低 VOC 设计与控制、高效防腐颜料体系设计与表面改性、涂层增韧等关键技术,研制出快干型高固体分环氧涂料。该涂料具有优异的防腐蚀性能(耐盐雾和耐湿热性能达到 5000 h)和良好的力学性能,且工艺性能良好,施工固体分含量达到 65%(现有涂料一般为 40%~50%),已取得较好的应用。

## 1 试验

### 1.1 原材料

环氧树脂: E-20, 无锡树脂厂。低黏度环氧树脂 A: 自制,邻苯二甲酸二缩水甘油酯,环氧值为 0.56~0.6。固化剂 B: 自制,酚醛胺改性聚酰胺树脂,胺值为 190~230 mg KOH/g。固化剂 C: 自制,长链柔性改性胺树脂,胺值为 55~70 mg KOH/g。磷酸锌: 上海铬黄颜料厂。三聚磷酸铝: 广西新品科技有限公司。

### 1.2 性能测试

按照国标中的方法进行力学性能(包括漆膜柔韧性、耐冲击性和附着力)、耐环境性能(包括耐湿热、耐盐雾性能)和耐液体介质等涂层性能测试,试验项目及参照标准见表 1。对涂层进行耐丁酮擦拭 100 次试验,检验是否露底,以此表征涂料的固化性能。采用 FTIR 手段,动态跟踪环氧固化过程。

表 1 涂料的性能试验方法  
Tab.1 Performance test method of coating

Test items	Test method	Test items	Test method
Viscosity	GB/T 1723—1993	Thermal-humidity resistance	GB/T 1740—2007
Flexibility	GB/T 1731—1993	Salt fog resistance	GB/T 1771—2007
Impact	GB/T 1732—1993	Adhesive	GB/T 5210—2006
Water resistance	GB/T 1733—1993	Liquid medium resistance	GB/T 9274—1988

### 1.3 研究过程

对自制的低黏度高活性环氧树脂 A 与环氧树脂 E-20 进行复配, 得到涂料的树脂基料, 添加无铬防锈颜料和填料、溶剂和助剂, 经过分散研磨, 制成无铬高固体分环氧底漆组分一; 将自制的固化剂 B 与自制的固化剂 C 复配, 制成组分二。经过性能和工艺研究, 研制出无铬高固体分环氧底漆, 通过应用研究和综合性能考核, 得以良好应用。

## 2 结果与讨论

### 2.1 树脂体系的改性

涂料的防腐蚀性能较大程度上取决于树脂基料的防腐蚀性能, 即应选用防腐蚀性能较高的树脂和固化剂体系。本研究为保证涂层的表干时间和涂层力学性能的平衡, 研制了以双酚 A 型环氧树脂为主体, 复配高活性低黏度环氧树脂 A 的复合树脂体系, 探索了不同含量的邻苯二甲酸二缩水甘油酯对涂料施工固体分和表干时间的影响。图 1 为低黏度环氧树脂 A 不同的加入量对施工固体分和表干时间的影响。随着低黏度环氧树脂 A 加入量的增加, 涂层的施工固体分含量提高, 同时表干时间也延长。综合涂层的性能, 当低黏度环氧树脂 A 占树脂的质量百分比为 25% 时, 涂层表干时间为 40 min 左右, 施工固体分含量为 65% 左右。

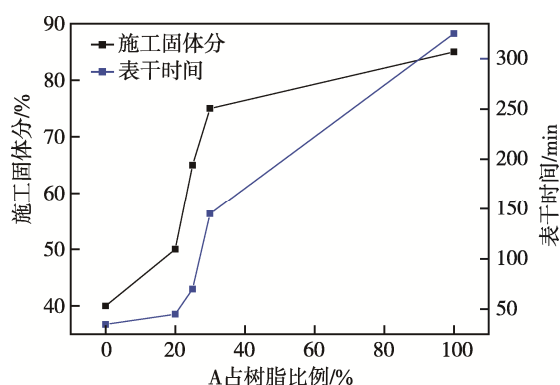


图 1 低黏度环氧树脂 A 加入量对施工固体分和表干时间的影响

Fig.1 Effects of low-viscosity epoxy resin A content on solid content and surface drying time

### 2.2 固化剂体系的研究

为确保涂层快速表干, 延长涂料的适用期, 提高

涂层的防腐蚀性能, 进一步满足涂层施工的各项指标, 本课题研制了新型树脂固化体系。新型树脂固化体系以酚醛胺改性聚酰胺树脂 (固化剂 B) 为主体, 通过与长链柔性改性胺树脂 (固化剂 C) 复配而得。

传统聚酰胺如图 2 所示, R1 为脂肪酸, R2 为多乙烯多胺。多乙烯多胺具有较高的交联密度, 为环氧树脂提供了良好的网状结构, 但本身仲胺基较多, 低温固化能力较差。脂肪酸提供了较好的耐水性和柔韧性, 改善了环氧树脂的脆性, 但由于长链脂肪酸易被油等介质溶胀, 体系在耐油环境中使用会引起硬度降低、腐蚀介质渗透性增加等缺陷。

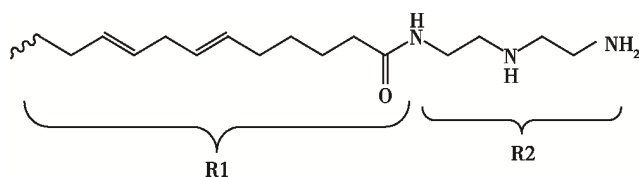


图 2 传统聚酰胺结构

Fig.2 Structure diagram of traditional polyamide

本研究以酚醛胺为前驱体 (B1), 如图 3 所示。结构中反应活性基团基本为伯胺结构, 酚羟基的存在虽然提高了分子中伯胺和仲胺的反应活性, 但是大大加快了环氧树脂与胺基反应的速度, 进而降低了涂料的适用期, 不利于现场的施工操作。

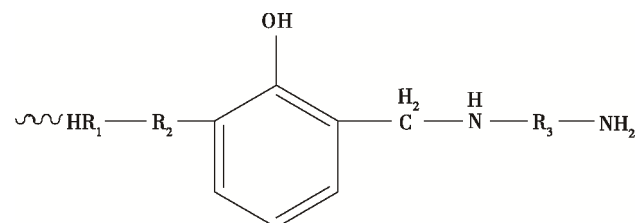


图 3 前驱体 B1 分子结构

Fig.3 Molecular structure of precursor B1

为了延缓胺基的反应速度, 延长涂料的适用期, 利用酮亚胺对前驱体 B1 进行封端合成反应得到固化剂 B, 反应式如图 4 所示。降低伯胺的反应活性, 即使与环氧树脂混合, 其反应速度也很慢, 适用期 8 h 后, 树脂仍没有发生凝胶。当与空气中的水接触后, 发生了解封的反应, 重新生成伯胺基, 酮亚胺与溶剂同时挥发, 伯胺与环氧基发生反应交联固化。因此, 固化剂 B 的使用既可提高固化剂与环氧树脂反应的速度, 又可延长涂料的适用期。

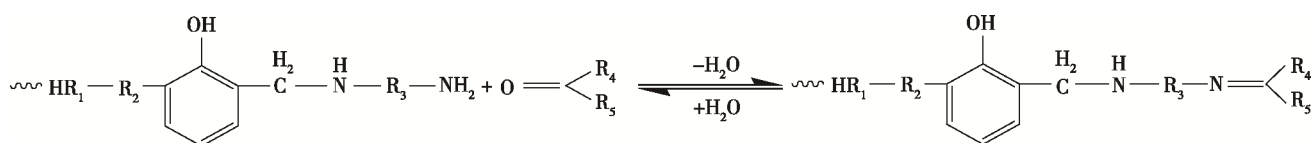


图 4 前驱体 B1 的封端反应

Fig.4 End-capping reaction of precursor B1

固化剂 B 最终结构如图 5 所示,桐油二聚酸结构是桐油的长链油二聚生成六元环,能够进一步保证涂层的耐油性和防腐蚀性能。酚醛胺被认为是防腐蚀性能较好的固化剂,在结构中采用了酚醛胺后,可以进一步加强固化体系的防腐蚀性能<sup>[16-18]</sup>。研究表明,固化剂 B 在耐水性和耐溶剂性能方面比常规的环氧固化剂有明显的提高,特别是在耐水方面显示出较好的性能,如表 2 所示。

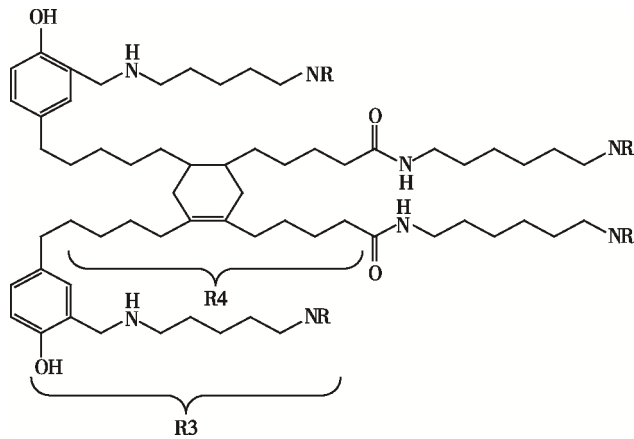


图 5 固化剂 B 结构示意图

Fig.5 Structure diagram of curing agent B

表 2 与其他固化剂的性能对比

Tab.2 Property comparison with other curing agents

Curing agents	Polyamide	Triethylene tetramine	Polyether amine	Curing agent B
Compatibility	Good	Bad	Good	Good
Curing time/h	168	24	168	24
Pot life/h	8	3	8	8
Flexibility/mm	2	2	1	1
Water resistance (50 ℃)/d	2	3	2	≥7
Solvent resistance	Moderate	Bad	Moderate	Good

通过测试不同温度条件下固化剂 B 与环氧树脂体系的固化反应时间和反应结果,确定了涂料的最佳固化条件。在不同温度的条件下,固化剂 B 与环氧树脂体系的固化反应结果是有差异的。如图 6 所示,在 25 ℃时,固化反应可以快速进行,但是反应完成程度不太高,稳定在 60%左右。固化反应在 60 ℃和 80 ℃条件下的反应曲线相似,60 min 固化反应程度达到 90%,说明该温度点的固化反应活性较高。

利用 FT-IR 图谱,动态跟踪了固化剂 B 与树脂体系的反应。如图 7 所示,随着反应时间的延长,915  $\text{cm}^{-1}$  处的环氧特征峰强度逐渐减弱,说明环氧发生了开环反应,60 min 时此处的特征峰消失了,进一步证明了固化反应完全。

由于固化剂 B 中六元环刚性结构的引入,影响了

涂层的柔韧性和耐冲击性能,为了进一步提高涂层体系的柔韧性和耐冲击性能,本研究加入耐腐蚀增韧固化剂 C 与固化剂 B 进行了复配。固化剂 C 是一种可与环氧树脂反应的长链柔性树脂,具有良好的抗化学腐蚀性和柔韧性,两种固化剂的配合使用极大地提高了固化体系的耐冲击性、柔韧性和耐化学腐蚀性能。通过性能测试确定固化剂体系的组成,见表 3。

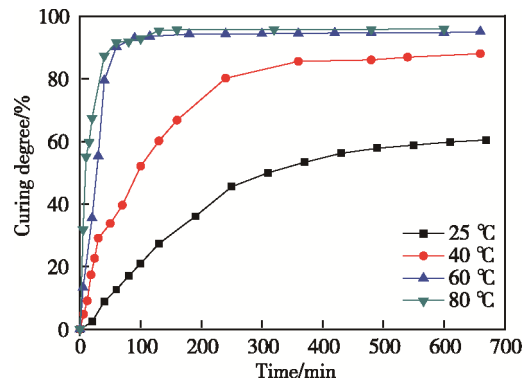


图 6 不同温度下固化反应程度随反应时间的变化

Fig.6 Variation of curing reaction degree as a function of reaction time at different temperature

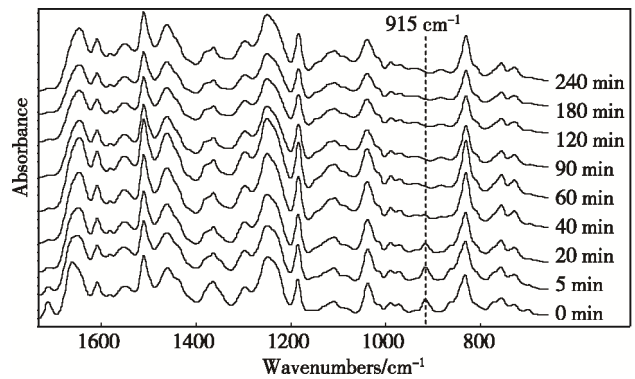


图 7 环氧树脂/固化剂 B 体系在 60 ℃ 固化不同时间后的 FT-IR 谱图

Fig.7 FT-IR spectrum of epoxy/curing agent B system after curing at 60 ℃ for different period

表 3 固化剂 C 对涂层性能的影响

Tab.3 Effects of curing agent C on coating properties

Content of curing C/%	15	20	25	30	35
Impact toughness/ cm	50	70	120	120	120
Pencil hardness (H)	6	6	4	2	1
Pencil hardness change after immersed in 4109 lubricating oil for 24 h	Decline 2 levels				

从表 3 来看,随着耐腐蚀增韧固化剂 C 加入量的增加,涂层的耐冲击性能明显提高,但硬度下降,耐 4109 润滑油后硬度下降逐渐增大。为了保证涂层的综合性能,采用耐腐蚀增韧固化剂 C 占固化剂 B 的质量百分比 25%的固化体系进行配方研究。

2.3 颜填料的确定

防腐涂料的颜填料及 PVC 对涂层的电化、防腐等性能有很大影响。化学防锈颜料主要有铅系颜料、锌系颜料、铬酸盐颜料、磷酸盐颜料等，考虑到环保要求，本研究中主要选用磷酸锌和三聚磷酸铝作为防锈颜料。磷酸锌主要对初期腐蚀起到抑制作用，其防锈能力优于铬酸锌，接近铬酸锶。三聚磷酸铝是白色颜料，微溶于水，在涂层下溶解时电离出  $\text{P}_3\text{O}_{10}^{5-}$ ，在阳极部位与金属离子结合成不溶的钝化膜，该钝化膜硬度高，附着牢固。三聚离子遇水分解成二聚或磷酸根离子，仍含有反应性基团  $\begin{smallmatrix} \text{—P—O—} \\ | \\ \text{—} \end{smallmatrix}$  和  $\begin{smallmatrix} \text{—P=O} \\ | \\ \text{—} \end{smallmatrix}$ ，也能形成类似的钝化膜。微细化的三聚磷酸铝特别适用于高固体分涂料。超细片状滑石粉和云母粉，可以提高底漆的防锈和耐湿能力，云母粉还有助于降低涂膜的吸水性和渗透性。

2.4 快干型高固体分防腐蚀底漆的工艺性能

工艺性能试验结果表明，涂料的施工工艺性良好，施工固体分含量达到 65% 以上，施工黏度 15 s 左右，适用期达到 8 h 以上，一次成膜厚度达到 30 μm 左右，成膜性良好。

在不同温度下，新研制的涂料与传统聚酰胺固化的环氧底漆相比，固化速度明显提高。如图 8 所示，新研制的快干型无铬高固体分环氧底漆固化速度较快，尤其是温度低时，在 40 ℃ 下 6 h 即可固化，而传统聚酰胺固化的环氧底漆在 40 ℃ 下需要 24 h 才可固化。试验表明，在室温条件下，快干型无铬高固体分环氧底漆 3 ~ 4 d 即可完全固化，而传统聚酰胺固

化的环氧底漆需要 7 d 才可完全固化。

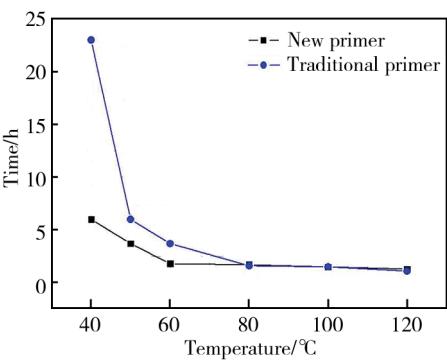


图 8 新研制底漆与传统聚酰胺固化的底漆在 40 ~ 120 ℃ 内的干燥/固化曲线对比

Fig.8 Drying/curing curves of newly developed primer and traditional polyamide-cured primer at 40~120℃

2.5 快干型高固体分防腐蚀底漆的性能

无铬高固体分防腐蚀底漆的性能及与国内外涂料的对比数据见表 4—6，用于性能对比的国内外涂料为现役的同类涂料，主要成分均为环氧聚酰胺防腐底漆。

研制的快干型无铬高固体分防腐蚀底漆工艺性能良好，施工固含量达到 65%，为中高固体分涂料的施工要求；固化速度快，尤其在低温阶段，比市售低分子聚酰胺固化剂的固化时间短；同时适用期长，可达 8 h 以上。由于固化剂 B 和固化剂 C 的复配作用，提高了涂料的柔韧性和耐冲击性等力学性能。耐盐雾和耐湿热等防腐蚀性能也有较大的提高（均达 5000 h 以上）。丝状腐蚀是测试涂层在破损时的防腐蚀性能，主要考核防锈颜料的缓蚀和钝化功能，从结果看，可

表 4 无铬高固体分防腐蚀底漆工艺性能测试结果

Tab.4 Performance test results of Cr-free high-solid anti-corrosive primer

Items		Technical index		Results	Test method
Solid content/%		Portion A: ≥60		73.06	GB/T 1725—2007
Processing solid content/%				65	GB/T 1725—2007
Viscosity (portion A)/s		15 ~ 60		20	GB/T 1723—1993
Processing viscosity/s				15	GB/T 1723—1993
Drying time	Surface dry	(23±2) °C	≤1 h	40 min	GB/T 1728—1989
	Totally dry	(23±2) °C	≤6 h	6 h	GB/T 1728—1989
		(23±2) °C	≤7 d	4 d	GB/T 1728—1989
	Cured	(60±3) °C	≤8 h	3 h	GB/T 1728—1989
		(100±3) °C	≤2 h	1 h	GB/T 1728—1989
Pot life/h		≥8	Viscosity increased 6 s after keeping still for 8 h	Viscosity increased less than 8 s after keeping still for 8 h	

表 5 无铬高固体分防腐底漆力学性能对比实测结果  
Tab.5 Mechanical properties measurements of Cr-free high-solid anti-corrosive primer

Items	Technical index	Results		Test method
		New developed primer	Other coatings	
Flexibility/mm	≤1	1	2	GB/T 1731—1993
Impact toughness (front, back)/cm	≥50	Front 120, Back 120	Front 50 pass, Back 50 failure	GB/T 1732—1993
Tap adhesive force (level)	≤1	0	1	GB/T 9286—1998
Adhesive force/MPa	≥16	Aluminium alloy: 24; Composite: 26; Steel: 18; Titanium alloy: 17	Aluminium alloy: 20	GB/T 5210—2006

表 6 无铬高固体分防腐底漆防腐性能对比实测结果  
Tab.6 Corrosion resistance measurements of Cr-free high-solid anti-corrosive primer

Items	5% Salt fog resistance (2000 h)	Thermal-humidity resistance (2000 h)	Filiform corrosion, 1000 h
Technical index	Coating film: no bubble, no exfoliation, no wrinkling	Level one	Corrosion area extend less than 6 mm, most area extend less than 3 mm
New developed primer	5000 h, Coating film: undamaged	Level one (5000 h)	Corrosion area extend less than 5 mm, most area extend less than 2 mm
Domestic coatings	312 h, Coating film: bubbling at crack	Level one	Corrosion area extend less than 20 mm, most area extend less than 10 mm
Foreign coatings	Coating film: undamaged	Level one	Corrosion area extend less than 4 mm, most area extend less than 2 mm
Test method	GB/T 1771—2007	GB/T 1740—2007	MIL-P- 23377J

达到铬酸盐防腐涂料的性能。与国外现役同类涂料的性能相比,本研究研制的涂料达到国外先进水平。此外,该涂料与多种金属底材(铝合金、钢、钛合金)和非金属底材(复合材料、密封剂、胶粘剂)具有较好的相容性,实现了涂料的通用性,减少了涂料的使用牌号。

3 结 论

- 1)高活性低黏度环氧树脂与 E-20 混合提高了涂料的固体分含量,达到了施工的高固体分。
- 2)研制的固化剂 B 具有良好的防腐和耐溶剂性能,固化速度快,同时涂料的适用期长,具有较好的施工应用性能。
- 3)固化剂 B 和固化剂 C 提高了涂料的柔韧性和耐冲击性等力学性能,同时具有优异的耐介质和防腐性能。
- 4)磷酸锌和三聚磷酸铝等无铬防腐颜料与超细片状滑石粉、云母粉的复配使用,提高了涂料的防腐和耐湿热性能。

5)研制的快干型高固体分防腐底漆具有优异的防腐性能和良好的力学性能,且工艺性能良好,可用于多种基材表面,达到国外先进涂料的水平。

参考文献:

[1] 傅敏,狄志刚,朱晓丰,等. 无铬环保磷酸盐高温防腐涂料[J]. 涂料工业, 2010, 40(12): 49-52.  
FU Min, DI Zhi-gang, ZHU Xiao-feng, et al. Chromium-free Environmental Friendly Phosphate-based High Temperature Anticorrosion Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2010, 40(12): 49-52.

[2] 欧文,谭伟民,郁飞,等. 无铬环保新型伪装涂料的研制[J]. 涂料工业, 2013, 43(12): 46-51.  
OU Wen, TAN Wei-min, YU Fei, et al. Development of Chromium-free Environmental Friendly Camouflage Coating[J]. Paint & Coatings Industry, 2013, 43(12): 46-51.

[3] 龚毅钊. 水性氟碳树脂与无铬型耐指纹涂料的防腐研究[J]. 涂料技术与文摘, 2010, 31(9): 27-30,34.  
GONG Yi-zhao. Study on Corrosion Protection of Wa-



- terborne Fluorocarbon Resin-based Chromium-free Finger Print Resistant Coatings[J]. Coatings Technology & Abstracts, 2010, 31(9): 27-30,34.
- [4] 勾运书, 陈斌, 王木立. 高固体分树脂研究进展[J]. 涂料工业, 2015, 45(12): 73-77.  
GOU Yun-shu, CHEN Bin, WANG Mu-li. Progress in High Solid Resins[J]. Paint & Coatings Industry, 2015, 45(12): 73-77.
- [5] 张耀根, 蒋海林. 高固体份含氟丙烯酸酯树脂的合成及性能研究[J]. 广东化工, 2012, 39(9): 80-82.  
ZHANG Yao-gen, JIANG Hai-lin. Study of Synthesis and Characteristics of the High Solids Fluorine-containing Acrylic Resin[J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39(9): 80-82.
- [6] 李军. 强附着力高固体分环保型环氧防腐涂料的研制[J]. 上海涂料, 2017, 55(1): 16-18.  
LI Jun. Development of Strong Adhesion and High Solid Environmentally-friendly Epoxy Anticorrosive Coatings[J]. Shanghai Coatings, 2017, 55(1): 16-18.
- [7] 虞兆年. 涂料工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.  
YU Zhao-nian. Coating Process[M]. Beijing: Chemical Technology Press, 2009.
- [8] JEHN G J M, CHEN C M. Amination of Polyethylene Glycol to Polyetheramine over the Supported Nickel Catalysts[J]. Catalysis Letters, 2001, 77(1/3): 147-154.
- [9] LELLEK V, STIBOR I. Dendrimers with Inherently Axially Chiral Units [J]. J Mater Chem, 2000(10): 1061-1073.
- [10] TANSUG G, TUKEN T, OZYLMAZ A T. Mild Steel Protection with Epoxy Top Coated Polypyrrole and polyaniline in 3.5% NaCl [J]. Current Applied Physics, 2007, 7(4): 440-445.
- [11] CHEN Y, WANG X H, LI J, et al. Long-term Anti-corrosion Behaviour of Polyaniline on Mild Steel [J]. Corrosion Science, 2007, 49(7): 3052-3063.
- [12] AZIM S S, SATHIYANARAYANAN S, VENKATACHAR G, et al. Anticorrosive Properties of PANI-ATMP Polymer Containing Organic Coating [J]. Progress in Organic Coatings, 2006, 56(2-3): 154-158.
- [13] GRGU B N, MC GVOZDENOV M, MISKOVIC-STANKOVIC V B. Corrosion Behavior and Thermal Stability of Electrodeposited PANI/Epoxy Coating System on Mild Steel in Sodium Chloride Solution [J]. Progress in Organic Coatings, 2006, 56(2-3): 214-219.
- [14] NEWKOME G R, MISHRA A, MOOREFIELD C N. Improved Synthesis of an Etheral Tetraamine Core for Dendrimer Construction [J]. J Org Chem, 2002, 67(11): 3957-3960.
- [15] 夏建陵, 王定选, 聂小安, 等. 由桐油制备低分子聚酰胺的方法: 中国, 1631938 [P]. 2005-06-29.  
XIA Jian-lin, WANG Ding-xuan, NIE Xiao-an, et al. Method to Prepare Low Molecular Polyamide by Tung Oil: China, 1631938 [P]. 2005-06-29.
- [16] 毛伟, 李守海, 杨雪娟, 等. 桐油三酸环氧固化剂的制备及其固化反应动力学[J]. 热固性树脂, 2016, 31(6): 1-7.  
MAO Wei, LI Shou-hai, YANG Xue-juan, et al. Study on the Preparation and Curing Reaction Kinetics of Tung Oil Ternary Acid Epoxy Curing Agent[J]. Thermo-setting Resin, 2016, 31(6): 1-7.
- [17] 杨小华, 夏建陵, 张燕. 低粘度酚醛改性胺环氧固化剂的性能研究[J]. 热固性树脂, 2011, 26(6): 39-43.  
YANG Xiao-hua, XIA Jian-lin, ZHANG Yan. Study on Properties of Phenolic Modified Amine with Low Viscosity for Epoxy Resin Curing Agent[J]. Thermo-setting Resin, 2011, 26(6): 39-43.
- [18] 常征. 聚酰胺与腰果酚改性胺环氧固化剂的耐黄变性能比较[J]. 现代涂料与涂装, 2011, 14(5): 38-40.  
CHANG Zheng. Comparison of Anti-yellowing Polyamide and Cardanol Modified Amine Ring Ammonia Curing Agent Performance[J]. Modern Paint and Finishing, 2011, 14(5): 38-40.