

隔热涂料在高功率重型车辆上的应用

张静元¹, 邱伟¹, 付扬帆¹, 钟军¹, 吴秀英¹, 刘正涛¹, 孙丽华²

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.北方华安工业集团, 黑龙江 齐齐哈尔 161046)

摘要: **目的** 开发一种低导热系数的功能涂料, 应用于某重型车辆, 以阻隔动力舱与驾驶舱之间的热量传递。**方法** 研究聚酯多元醇树脂与多异氰酸酯固化剂的配比、低导热系数功能填料与成膜物的配比以及两种不同粒径的空心微珠复配比例对漆膜导热系数、附着力、断裂伸长率等性能的影响, 确定阻隔型隔热涂料的最佳配方。采用自制隔热测试装置对涂料的隔热性能进行测试。**结果** 选用多异氰酸酯作为固化剂, 实现漆膜常温固化。聚酯多元醇中羟基(—OH)与多异氰酸酯(—NOC)的最佳物质的量的比为0.8~1.0, 低导热系数功能填料与成膜物的最佳质量比为1.5~2.0。漆膜附着力不小于4 MPa, 断裂伸长率不小于50%, 导热系数小于0.06 W/(m·K), 漆膜密度小于0.5 g/cm³。隔热涂层经120 °C/2 h的测试, 涂层冷面温度未超过45 °C。**结论** 研制的阻隔型隔热涂料具有优异的隔热性能, 在某型车辆动力舱与驾驶舱之间进行应用与隔热性测试(涂层厚度1.5~2.0 mm、车辆持续工作3 h)。结果表明, 驾驶舱一侧隔板的表面温度未超过38 °C, 隔热效果显著。

关键词: 隔热涂料; 常温固化; 功能填料; 低导热系数; 动力舱与驾驶舱

中图分类号: TJ812; TQ637

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)11-0071-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.11.010

Application of Thermal Insulation Coatings to High-power Heavy-equipment

ZHANG Jing-yuan¹, QIU Wei¹, FU Yang-fan¹, ZHONG Jun¹, WU Xiu-ying¹, LIU Zheng-tao¹, SUN Li-hua²

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China;

2. Northern Hua'an Industrial Group, Qiqihaer 161046, China)

ABSTRACT: To develop a kind of functional coating with low thermal conductivity, and study the effect of preventing from heat transfer between engine cabin and cockpit of a heavy vehicle with the coating material. The high-elasticity polyester polyol and the low thermal conductivity functional filler were researched as main objects, the effects of the ratio of polyester polyol resin to curing agent were studied, and low thermal conductivity functional filler to film-forming and two kinds of hollow microsphere were blended on the thermal conductivity, adhesion and elongation at break of the film to determine the best formula of barrier heat insulation coating. The self-made heat insulation test device was used to test the thermal insulation performance of the coating. Experimental evaluation showed that painting film was cured at room temperature by using polyisocyanate as curing agent, the optimum mole ratio was determined that hydroxy (—OH) to polyisocyanate (—NOC) is 0.8~1.0 and the weight ratio of functional filler to film-forming was 1.5~2.0. Performance testing of paint film showed that the adhesion was not less

收稿日期: 2021-04-01; 修订日期: 2021-05-29

Received: 2021-04-01; Revised: 2021-05-29

作者简介: 张静元(1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为阴极电泳涂料及特种功能涂料的研发。

Biography: ZHANG Jing-yuan (1981—), Male, Senior engineer, Research focus: cathodic electrophoretic coatings and special functional coatings.

引文格式: 张静元, 邱伟, 付扬帆, 等. 隔热涂料在高功率重型车辆上的应用[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 071-076.

ZHANG Jing-yuan, QIU Wei, FU Yang-fan, et al. Application of thermal insulation coatings to high-power heavy-equipment[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(11): 071-076.

than 4 MPa, and the elongation at break was not less than 50%, furthermore, thermal conductivity of film was less than 0.06 W/(m·K), and the density is only 0.5 g/cm³; When one side of paint film was kept for 2 h under the condition of 120 °C, the temperature of another side that didn't touch heat source was less than 45 °C and the temperature difference reached 75 °C. The barrier heat insulation coating developed in this paper has excellent heat insulation performance. When the coating was painted between the powering section and the driving compartment, the vehicle continued to work for 3 h and surface temperature of the driving cab was below 38 °C, and the film thickness was only 1.5 mm~2.0 mm.

KEY WORDS: thermal insulation coating; room-temperature curing; functional filler; low thermal conductivity; engine cabin and cockpit

隔热涂料^[1-3]是指具有绝热性能,能对热流起屏蔽作用的一种涂料。按隔热原理,隔热涂料可分为阻隔型隔热涂料、反射型隔热涂料和辐射型隔热涂料三种。目前,市场中的隔热涂料主要以阻隔型隔热涂料和反射型隔热涂料为主,广泛应用于建筑和工业设备设施^[4-5]中。

某些重型车辆通常配备有强劲的动力系统,在工作过程中会产生大量的热量,尤其是在炎热的夏季,动力系统产生的热量对驾驶室内作业环境的影响较大。为降低动力系统产生的热量对驾驶室的影响,通常在动力舱与驾驶舱之间使用隔热棉进行隔热,但受设备结构等因素的影响,隔热效果并不理想。为此,笔者通过优选高弹性聚酯多元醇树脂作为成膜物,辅助低导热特性的功能填料,制备一种隔热性能优异的阻隔型隔热涂料。其施工方式灵活,漆膜能满足轻质、高效隔热的要求,在某型重型车辆的动力舱与驾驶舱之间使用,获得的隔热效果良好。

1 实验

1.1 实验材料

实验所用原材料包括聚酯多元醇树脂(新西兰纽佩斯,工业级)、多异氰酸酯 HI100(德国巴斯夫,工业级)、R-996 钛白粉(四川龙蟒集团,工业级)、滑石粉(广西龙广滑石开发股份有限公司,工业级)、海泡石(河北宏利化工有限公司,工业级)、空心微珠(美国 3M,工业级)、SiO₂ 气凝胶(山西天一纳米科技有限公司,工业级)、分散润湿剂、流变剂、消泡剂(台湾德谦,工业级)。阻隔型隔热涂料配方见表 1。

A 组分中除空心微珠外,各物料按比例混合,使用高速分散机搅拌分散 0.5 h 后,再采用篮式砂磨机研磨分散,当混合物料粒度小于 50 μm 时,停止研磨,过滤出料。使用低速分散设备将空心微珠分散到研磨好的漆料中,制成 A 组分。制板时,将 A 组分与 B 组分按比例混合均匀,加入涂料总质量的 10%~30% 的稀释剂,使用分散设备低速搅拌分散 5 min,可进行喷涂或刷涂。

表 1 隔热涂料基本配方
Tab.1 The basic formulation

	原材料	质量分数/%
A 组分	聚酯多元醇树脂	20.0~50.0
	分散剂	0.15~0.3
	流变剂	0.7~1.5
	消泡剂	0.5~1.0
	R-996 钛白粉	2.0~5.0
	滑石粉	2.0~5.0
	SiO ₂ 气凝胶	5.0~10.0
	海泡石	5.0~10.0
	空心微珠	10.0~20.0
B 组分	分散润湿剂	5.0~10.0
	HI100	3.0~5.0

1.2 性能测试

测试样板按 GB/T 9271—2008 制备,漆膜厚度为 1.5~2.0 mm。对漆膜的干燥时间、密度、附着力、断裂伸长率、抗拉强度、耐水性、耐油性、耐盐水性、耐低温性、导热性、等基本物理性能进行测试。由于目前针对阻隔型隔热涂料的隔热性能测试尚无统一标准,笔者借鉴相关文献^[6-9],结合隔热涂料的实际应用,自制一套隔热性能测试装置(其装置原理如图 1 所示),采用该装置对漆膜进行隔热性能测试。热

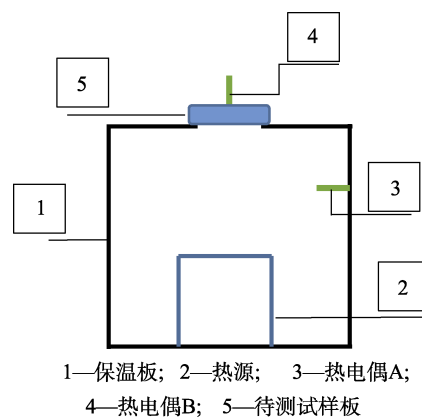


图 1 自制隔热测试装置原理
Fig.1 Self-made insulation test device

源温度为 (120 ± 10) °C, 环境温度为 (25 ± 1) °C, 空气无明显对流, 当热电偶 A 反馈结果为 120 °C 时, 将测试样板置于图 1 中 5 号位, 每 5 min 记录一次热电偶 B 的反馈结果。

1.3 应用考核

采用高压无气喷涂, 将隔热涂料涂装在某型车辆的动力舱与驾驶舱之间的隔板上, 涂装面为动力舱一侧的隔板。在车辆涂装隔热涂料前后, 使用红外测温仪对车辆路试过程中驾驶舱一侧隔板表面的温度进行检测。测试条件: 涂层施工厚度为 1.5~2.0 mm,

路试速度为 60~100 km/h, 环境温度为 36.2~39.5 °C, 路试过程中驾驶舱内空调温度设置为 25 °C, 每 15 min 测试一次温度。

2 结果与分析

2.1 漆膜的基本物理性能

研制的阻隔型隔热涂料的基本物理性能见表 2。可知, 涂料具有良好的力学性能及耐水、耐油、耐盐水等性能。

表 2 阻隔型隔热涂料性能指标

Tab.2 Performances of obstructing thermal insulation coatings

测试项目	测试结果	测试方法
表面干燥时间	1.0 h	GB/T 1728—1979
实际干燥时间	72.0 h	GB/T 1728—1979
漆膜密度	≤ 0.50 g/cm ³	GB/T 533—2008
附着力 (拉开方法)	≥ 4 MPa	GB/T 5210—2006
断裂伸长率	$\geq 50\%$	GB/T 528—2009
抗拉强度	≥ 1.0 MPa	GB/T 528—2009
耐水性 (240 h)	无明显变化	GB/T 1733—1993
耐油性 (120 h)	无明显变化	GB/T 9274—1988
耐盐水性 (96 h)	无起泡、无腐蚀	GJB 150.11A—2009
低温测试 (-55 °C $\times 24$ h)	无裂纹、无起皮	GJB 150.4A—2009
导热性 (25 °C)	< 0.06 W/(m·k)	GB/T 10297—2015

2.2 成膜物与固化剂的配比对漆膜性能的影响

成膜物为聚酯多元醇树脂^[10-11] (stetal 168), 是由多元醇和二元羧酸化合物经缩聚反应制备的线型聚合物, 具有良好的柔韧性与机械性。但线性结构聚合物作为成膜物时, 交联密度低, 致密性差, 耐化学介质和耐水性较差。为解决这一问题, 优选具有三官能度的多异氰酸酯 (—NCO) HI100 (六亚甲基二异氰酸酯聚合而成的聚异氰酸酯) 作为固化剂, 在成膜过程中与聚酯多元醇中的羟基 (—OH) 反应, 形成网络状交联结构, 从而提高漆膜的致密性。通过调整成膜物中异氰酸酯 (—NCO) 与羟基 (—OH) 的物质的量的比, 结合成膜物的耐水性、耐机油性及断裂伸长率等性能的考察, 确定聚酯多元醇树脂与 HI100 的配比, 试验结果见表 3。

由表 3 可知, 随着异氰酸酯 (—NCO) 基团比例的增加, 成膜物中交联点间的距离缩短, 交联密度增强, 漆膜致密性提高, 其耐水性与耐机油性也随之显著提高。成膜物交联密度增加后, 链段的自由度受到限制, 致使成膜物韧性与断裂伸长率下降。通过对成膜物性能的综合评价, 确定成膜物中异氰酸酯 (—NCO) 与羟基 (—OH) 物质的量的比在 0.8~1.0 为宜。

表 3 异氰酸酯 (—NCO) 与羟基 (—OH) 不同物质的量的比时漆膜性能

Tab.3 Properties of film-forming materials at different ratios of isocyanate (—NCO) and hydroxyl (—OH)

—NCO/—OH	耐水性/h	耐机油性/h	断裂伸长率/%
0.6	≤ 168	≤ 72	≥ 120
0.8	≥ 240	≥ 120	≥ 90
1.0	≥ 360	≥ 168	≥ 75
1.2	≥ 360	≥ 240	≥ 60

2.3 功能填料与成膜物的配比对漆膜性能的影响

实践证明, 作为阻隔型隔热涂料, 漆膜的低导热化主要是通过添加导热系数低的功能填料实现的^[12-14]。因此, 选择低导热性的功能填料是实现漆膜隔热的关键。阻隔型隔热涂料中常用的功能填料见表 4。

膨胀珍珠岩与膨胀蛭石的粒径较大, 不易进行涂料的生产与施工, 并且易导致漆膜外观粗糙。石棉与矿岩棉呈纤维状, 加量低于配方总质量的 5% 时, 涂料隔热效果不明显, 且流动性较差, 不宜在涂料产品中大量使用。六晶须钛酸钾具有负温度系数的特性, 其特性通常在 300 °C 以上的高温环境中才会表现明

表4 常用功能填料的导热系数对比

Tab.4 Comparison of materials thermal conductivity

材料	导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	材料	导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
海泡石	0.041~0.060	SiO ₂ 气凝胶	0.012~0.016
膨胀珍珠岩	0.024~0.048	空心微珠	0.028~0.120
膨胀蛭石	0.034~0.058	石棉	0.038~0.043
六晶须钛	0.053	矿岩棉	0.044~0.082
酸钾			

显, 在 300 °C 以下, 负温度系数变化不大。因此, 采用海泡石、SiO₂ 气凝胶^[15-19]、空心微珠^[20-22] 三种低导热系数材料为功能填料, 再辅以一定的钛白粉与滑石粉共同构成该配方的颜填料体系。本试验侧重考察配方中功能填料与成膜物在不同配比(质量比)时, 漆膜的导热系数、断裂伸长率、附着力等性能指标的变化, 综合整体性能优化出最佳配方, 试验中漆膜各项主要性能指标见表 5。

表5 功能填料与树脂在不同比例时漆膜性能变化

Tab.5 Effects on film properties at different proportions of functional filler

质量比	导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	附着力/MPa	断裂 伸长率/%
1:2	≤1.8	≥8.0	≥80
1:1	≤1.3	≥8.0	≥80
1.5:1	≤0.09	≥6.0	≥60
2:1	≤0.05	≥4.0	≥50
2.5:1	≤0.03	≥2.0	≥30

从表 5 中可见, 随着功能填料比例的升高, 漆膜导热系数明显降低, 这与功能填料的作用一致。但随着功能填料比例的升高, 漆膜中成膜物的含量降低, 由成膜物决定的附着力、断裂伸长率也在同步下降。所以, 在确保漆膜具有低导热性能的同时, 还要考虑漆膜的使用性能及环境适应性等。因此, 在兼顾漆膜综合性能的前提下, 配方中功能填料与树脂最佳质量比范围为 1.5~2.0。

2.4 空心微珠的粒径分布对导热性能的影响

空心微珠是由含硅、铝、铁的氧化物经特殊工艺制成的一种薄壁、中空、微小球体, 具有质轻、低导热的特性, 已广泛应用于隔热涂料中。把微珠引入到涂料中, 相当于在漆膜中形成了大量的中空结构。因此, 微珠在漆膜中的用量及分布情况, 将显著影响漆膜的导热性。为兼顾涂料的涂装施工性能和漆膜外观, 通常隔热涂料中的微珠粒径小于 100 μm。本实验采用平均粒径为 80 μm 与 40 μm 的两种微珠进行应用测试。当微珠总量不变, 且平均粒径为 40 μm 的微珠占微珠总量的质量百分比不同时, 漆膜隔热性能的测试情况如图 2 所示。

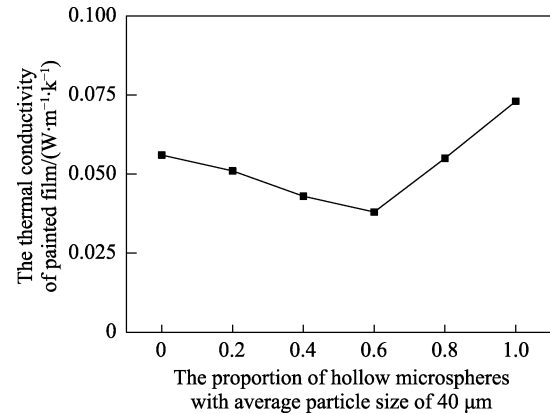


图2 平均粒径为 40 μm 的空心微珠在不同用量下对导热性能影响

Fig.2 Effects on film properties at different proportions of hollow microsphere with an average particle size of 40 μm

由图 2 可知, 对于两种不同粒径的微珠, 粒径越大, 隔热性能越好。但当两种微珠按一定比例混合时, 漆膜的导热系数并不一定在两个导热系数之间成线性变化。如图 2 所示, 在 0.2~0.8 这个比例范围内, 漆膜的导热系数低于两种微珠单独使用时的导热系数。这一现象可能主要受微珠粒径的分布宽度影响, 当微珠粒径分布较窄时, 漆膜中热量传递到微珠表面, 由于微珠的导热系数较低, 热量沿着微珠之间的孔隙传递较快, 微珠之间孔隙越大, 热量传递越快。反之, 当微珠粒径分布较宽时, 粒径小的微珠可以填充到粒径大的微珠之间, 增大微珠孔隙间热量传递的阻力, 导致漆膜隔热性增强。因此, 通过将不同粒径的微珠进行复配应用, 可以显著提高漆膜的隔热性能。

2.5 涂装隔热性能测试及应用分析

采用图 1 所示的自制隔热装置对漆膜样板进行隔热性能测试, 漆膜与热源接触的一侧称为热面, 另一面则称为冷面。在持续 2 h 的测试过程中, 样板冷面温度未超过 45 °C, 漆膜隔热效果较好。测试过程中样板冷面温度变化曲线如图 3 所示。

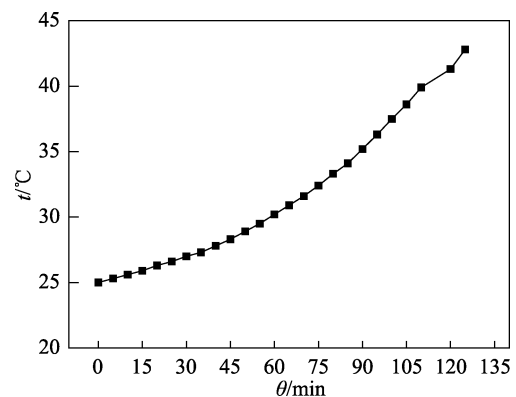


图3 漆膜隔热性能测试

Fig.3 Thermal insulation test curve of painting film

图 4 为某重型车涂装前后驾驶舱一侧隔板的表面温度对比。在车辆启动的 15 min 之内, 驾驶舱内温度均略有下降, 主要是由于动力系统刚开始工作, 产生热量较少, 对驾驶舱温度影响不大, 受车内致冷系统影响, 隔板表面温度有所下降。但随着动力系统持续工作, 产生的热量不断聚集, 未涂装隔热涂层的隔板表面温度快速上升, 在 1 h 内, 隔板表面温度达到 52 °C, 驾驶人员无法正常作业, 测试试验停止。而在有隔热涂层的隔板表面, 整个测试过程中温度虽有一定程度的上升, 但上升速度比较缓慢, 发动机持续工作 3 h, 隔板表面温度未超过 38 °C。试验结果表明, 隔热涂层可有效阻隔动力舱一侧的热量向驾驶舱传递。

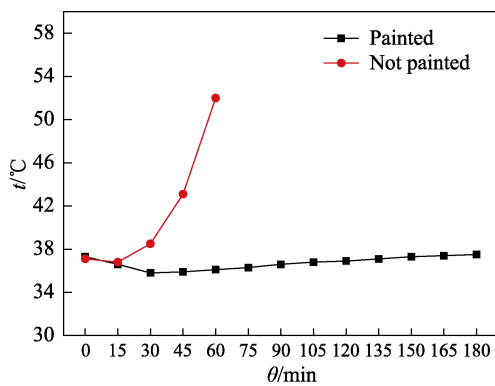


图 4 涂装前后驾驶舱一侧隔板表面温度对比

Fig.4 Temperature contrast curve of surface of the driving cab under the condition of coating and uncoating

3 结论

1) 以柔韧性和机械性能极佳的聚酯多元醇树脂作为成膜物, 配合具有异氰酸酯(—NCO)活性基团的 HI100 为固化剂, 实现漆膜的常温固化, 当异氰酸酯(—NCO)与羟基(—OH)的物质的量的比为 0.8~1.0 时, 可以得到性能优异的成膜物。

2) 通过对漆膜的导热系数、拉伸强度、断裂伸长率等综合性能的研究, 确定配方的最佳颜基比范围为 1.5~2.0, 此时漆膜密度不大于 0.5 g/cm³, 导热系数小于 0.06 W/(m·K), 具有轻质、高效的特性。

3) 使用自制隔热装置对隔热涂层进行测试, 热源温度为 120 °C、测试时间为 2 h, 隔热涂层冷面温度低于 45 °C。

4) 将该涂料在某重型车辆上进行涂装应用, 车辆涂装前后路试测试结果表明, 该阻隔热涂料具备显著的隔热性能。

参考文献:

[1] 仲晓萍. 我国特种涂料发展现状及未来趋势[J]. 现代化工, 2019, 39(12): 7-10.

- ZHONG Xiao-ping. Status and development trends of specialty coatings in China[J]. Modern chemical industry, 2019, 39(12): 7-10.
- [2] 蔡森, 张松, 李永. 军用装备用太阳热反射涂料发展现状及趋势[J]. 装备环境工程, 2009, 6(2): 9-13, 26.
CAI Sen, ZHANG Song, LI Yong. Current status and development trend of solar heat reflective coating for military equipment[J]. Equipment environmental engineering, 2009, 6(2): 9-13, 26.
- [3] 施伟, 谭毅, 曹作暄. 隔热材料研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2012, 26(S1): 344-347.
SHI Wei, TAN Yi, CAO Zuo-xuan. Research status and development trend of thermal insulating materials[J]. Materials review, 2012, 26(S1): 344-347.
- [4] 姚梦佳, 李春福, 何俊波, 等. 隔热保温涂料的研究发展及应用[J]. 表面技术, 2015, 44(7): 61-67.
YAO Meng-jia, LI Chun-fu, HE Jun-bo, et al. Research development and application of heat insulation coating[J]. Surface technology, 2015, 44(7): 61-67.
- [5] LEVINSON R, BERDAHL P, AKBARI H, et al. Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials[J]. Solar energy materials and solar cells, 2007, 91(4): 304-314.
- [6] 刘成楼, 刘昊天. 环氧改性有机硅耐高温防腐隔热涂料的研制[J]. 上海涂料, 2014, 52(5): 6-10.
LIU Cheng-lou, LIU Hao-tian. Development of high temperature resistant anticorrosive and thermal insulation coatings with epoxy modified silicone resin[J]. Shanghai coatings, 2014, 52(5): 6-10.
- [7] 李志强. 一种常温固化的耐高温隔热涂料[J]. 现代涂料与涂装, 2006, 9(9): 14-15.
LI Zhi-qiang. Ambient curing high-temperature resistant coating[J]. Modern paint & finishing, 2006, 9(9): 14-15.
- [8] 张建设, 乔冬平. 舰艇舱室隔热材料现状及性能测试方法的异同[J]. 材料开发与应用, 2012, 27(5): 71-74.
ZHANG Jian-she, QIAO Dong-ping. Status and test methods of ship cabin thermal-insulation materials[J]. Development and application of materials, 2012, 27(5): 71-74.
- [9] 李秀玲, 李萌, 刘立, 等. 隔热涂料隔热效果测试方法研究[J]. 现代涂料与涂装, 2011, 14(9): 32-36.
LI Xiu-ling, LI Meng, LIU Li, et al. Study on heat insulation effects test method of heat insulation coating[J]. Modern paint & finishing, 2011, 14(9): 32-36.
- [10] 李凤芹, 曹景思, 孙兆祥. 双组分聚氨酯弹性漆的开发[J]. 上海涂料, 2008, 46(4): 4-5, 25.
LI Feng-qin, CAO Jing-si, SUN Zhao-xiang. Development of 2-components polyurethane elastic coatings[J]. Shanghai coatings, 2008, 46(4): 4-5, 25.
- [11] 孙希鹏, 贾艳华. 双组分聚氨酯弹性涂料的研制[J]. 中国涂料, 2008, 23(8): 36-38.
SUN Xi-peng, JIA Yan-hua. Preparation of two-package PU elastic coatings[J]. China coatings, 2008, 23(8): 36-38.

- [12] 段晨, 国占东, 白宗良, 等. 舰船用隔热绝缘材料研究现状[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(19): 1-6.
DUAN Chen, GUO Zhan-dong, BAI Zong-liang, et al. Research status of thermal insulating materials for warships[J]. Ship science and technology, 2016, 38(19): 1-6.
- [13] 刘文涛, 元强, 谢宏, 等. 功能填料对反射隔热涂料隔热性能影响的研究[J]. 涂料工业, 2016, 46(12): 22-28.
LIU Wen-tao, YUAN Qiang, XIE Hong, et al. Effects of functional fillers on thermal isolation property of reflective thermal isolation coatings[J]. Paint & coatings industry, 2016, 46(12): 22-28.
- [14] 靳涛, 刘立强. 颜填料研究现状及其在隔热涂料中的应用[J]. 材料导报, 2008, 22(5): 26-30.
JIN Tao, LIU Li-qiang. Research status and application of pigments and fillers in thermal insulation coatings[J]. Materials review, 2008, 22(5): 26-30.
- [15] 夏立建, 王波, 卢伟, 等. 二氧化硅气凝胶的制备及其在隔热涂层材料中的应用进展[J]. 现代涂料与涂装, 2019, 22(12): 36-40.
XIA Li-jian, WANG Bo, LU Wei, et al. Progress in preparation of silica aerogel and its application in thermal insulation coating materials[J]. Modern paint & finishing, 2019, 22(12): 36-40.
- [16] 丁逸栋, 刘朝辉, 王飞, 等. SiO₂ 气凝胶涂料的制备及应用研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 153-160.
DING Yi-dong, LIU Zhao-hui, WANG Fei, et al. Research progress in preparation and application of silica aerogel coatings[J]. Surface technology, 2016, 45(6): 153-160.
- [17] HRUBESH L W. Aerogel applications[J]. Journal of non-crystalline solids, 1998, 225: 335-342.
- [18] WANG Jue, SHEN Jun, ZHOU Bin, et al. Cluster structure of silica aerogel investigated by laser ablation[J]. Nanostructured materials, 1998, 10(6): 909-916.
- [19] LIU Zhao-hui, DING Yi-dong, WANG Fei, et al. Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel[J]. Construction and building materials, 2016, 122: 548-555.
- [20] 靳涛, 刘立强, 李德华. 中空玻璃微珠等填料在弹性隔热涂料中的性能研究[J]. 化工新型材料, 2008, 36(11): 77-80.
JIN Tao, LIU Li-qiang, LI De-hua. Effect of hollow glass bead and the others in thermal insulation elastic coatings[J]. New chemical materials, 2008, 36(11): 77-80.
- [21] 郭鸿霖. 功能性中空微珠在工业防腐隔热涂料中的应用[J]. 现代涂料与涂装, 2007, 10(9): 11-15.
GUO Hong-lin. Application of functional hollow microspheres in the anti-corrosive heat-insulating coatings[J]. Modern paint & finishing, 2007, 10(9): 11-15.
- [22] 叶宏, 徐斌, 王军, 等. 陶瓷微球填充型隔热涂料的有效导热系数[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(4): 360-363, 382.
YE Hong, XU Bin, WANG Jun, et al. The effective thermal conductivity of the thermal insulation coatings incorporated with ceramic micro-spheres[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(4): 360-363, 382.