

# 一种多变色不可逆示温涂料的研究

张晏云, 田永丰, 于 丽, 胡进奔, 李建飞  
(中昊北方涂料工业研究设计院有限公司, 兰州 730101)

**摘要:** 示温涂料是工件测温的常用方法之一。对于示温涂料目前在低温段研究较少的问题, 本文通过添加低温变色颜料等方式制备出了 SW-M-6(80~550 ℃)多变色不可逆示温涂料, 以 GH3030 型高温合金材料为基材研究了变色趋势、色带数目、附着力和硬度等, 并对多变色不可逆示温涂料的变色机理进行了分析。结果表明: SW-M-6 多变色不可逆示温涂料产生了 9 种颜色变化, 形成了 9 条分界清晰的色带, 涂层附着力随着温度的上升先缓慢升高后快速升高, 涂层硬度也是随着温度的上升呈现上升的趋势。

**关键词:** 多变色不可逆示温涂料; 附着力; 硬度

**中图分类号:** TQ637      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-9548(2025)10-0012-05

## Research on A Multi-Color Irreversible Temperature-Indicating Paint

ZHANG Yan-yun, TIAN Yong-feng, YU Li, HU Jin-ben, LI Jian-fei

(North Paint & Coatings Industry Research and Design Institute Co., Ltd. of China Haohua, Lanzhou 730101, China)

**Abstract:** Temperature-indicating paint is a commonly used method for workpiece temperature measurement. To address the current issue of insufficient research on temperature-indicating paints in the low-temperature range, this paper developed a multi-color irreversible temperature-indicating paint, SW-M-6 (80~550 ℃), by incorporating low-temperature discoloration pigments. Using GH3030 high-temperature alloy as the substrate, the color change trend, number of color bands, adhesion, and hardness were investigated, and the discoloration mechanism of the multi-color irreversible temperature-indicating paint was analyzed. The results show that the SW-M-6 multi-color irreversible temperature-indicating paint exhibited nine distinct color changes, forming nine clearly demarcated color bands. The adhesion of the coating initially increased slowly with rising temperature and then accelerated, while the hardness of the coating also showed an increasing trend as temperature increased.

**Key words:** multi-color irreversible temperature-indicating paint; adhesion; hardness

## 0 引言

在现代工业中, 工件表面温度测量对于延长使用寿命、提高工件的热效率具有不可替代的重要意义。为了分析工件表面的温度分布, 需要用到温度传感器。现阶段温度传感器主要有热电偶、晶体测温、红外测温和示温涂料等<sup>[1-3]</sup>。在精确的单品温度测量方面, 热电偶和晶体测温的方法得到了广泛的应用并取得了良好

的效果, 但在温度场测量和无损伤测温方面存在明显的局限性。红外测试虽然在测温过程中不会损伤工件, 且有安装简单、反应迅速和分辨率高的优点, 但其对环境的要求较高, 并且无法在高温环境中长期使用<sup>[4]</sup>。

示温涂料(Temperature-indicating paint, 简称 TIP)是一种根据所经历的最高温度改变颜色的涂料, 根据其颜色变化数量的多少可以分为单变色不可逆示温涂料和多变色不可逆示温涂料<sup>[5]</sup>。单变色不可逆示温涂料主要用于表面温度分布单一的受热元件、仪器、设备等的温度测量或超温预警; 多变色不可逆示温涂料主要用于结构复杂、动态部件等受热不均匀的物体表面

收稿日期: 2025-06-06

作者简介: 张晏云(1998—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事示温涂料的研发工作。E-mail: yanyun\_zhang1227@126.com。

的温度及温度分布测量<sup>[6]</sup>。此外,多变色不可逆示温涂料还因其具有大面积测温、无损伤测温和异形部件测温的优势而被广泛应用于现代工业中零部件设计期间的温度场分布测量。英国罗.罗公司生产的 TP 系列多变色不可逆示温涂料,测温范围为 420~1 150 ℃;俄罗斯研制的多变色不可逆示温涂料主要为 TK 系列,测温范围为 110~1 520 ℃;美国制备的多变色不可逆示温涂料为 KN 系列,测温范围为 150~1 350 ℃。国内中昊北方涂料工业研究设计院有限公司在研发生产多变色不可逆示温涂料,主要为 SW-M 系列,测温范围为 150~1 350 ℃<sup>[5-11]</sup>。目前国际和国内都没有起始温度在 100 ℃以下的多变色不可逆示温涂料,在较低温度的测量方面有局限性。因此,本文采用耐高温树脂、有机颜料与无机填料相结合的方式制备出了一种 SW-M-6 (测温区间为 80~550 ℃)多变色不可逆示温涂料,填补了国内外示温领域的空白,并通过数字化判读系统对 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料进行判读,减小了测温误差。

## 1 试验部分

以 GH3030 型高温合金材料(化学成分见表 1 所列)为试验基材,将试样加工成蝶形板和 25 mm×17 mm×2 mm 的块状矩形,对试样进行预处理:通过喷砂机对试样表面进行喷砂,消除表面凹凸区域和锈迹,使其表面平整无缺陷,再用丙酮溶液在超声波清洗机中清洗除油并干燥,去除化学污染物。

表 1 GH3030 高温合金化学成分

元素	Cr	Al	Ti	Fe	Si	Mn	Cu	Ni
质量分数/%	19.0~22.0	≤0.15	0.15~0.35	≤0.15	≤0.8	≤0.7	≤0.2	余量

采用硫化镉、氧化铝、八羟基喹啉酮、靛蓝、碳酸镉、酞菁绿等药品为变色颜料,以自制 HW-28 树脂、25%虫胶树脂为黏合剂,以混合溶剂、无水乙醇等为溶剂制备 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料,具体数据见表 2 所列。

将各种化学药品按配方量称取至快速分散试验瓶中,并在瓶中加入 100 g 分散珠,进行密封,最后将其放置在快速分散试验机上进行分散,频率 500 Hz,时间 3 h,3 h 后采用量程 50 μm 刮板细度计检测 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料细度,待细度低于 30 μm 后过滤出料。采用空压机和喷枪将所制备的涂料喷涂于蝶形板和标准比色板表面,喷枪移动速率 10~15 cm/s,空压机压强 0.3~0.5 MPa,喷涂厚度 20~30 μm,喷涂完成后常温干燥 12 h 备用。如图 1 所示,SW-M-

6 多变色不可逆示温涂料喷涂后的原色为黑色。

表 2 所用药品成分

名称	规格型号	产地或供应商
硫化镉	工业	天津市北辰方正试剂厂
氧化铝	工业	天津市北辰方正试剂厂
八羟基喹啉酮	工业	自制
靛蓝	试剂	郑州金海福利化工有限公司
碳酸镉	试剂、AR	北京海贝思科技有限公司
酞菁绿	工业	济南新宇化工有限公司
钛白粉	TR-33	中核华原钛白股份有限公司
HW-28 树脂	50%	自制
虫胶树脂	25%	自制
混合溶剂	工业	自制
无水乙醇	试剂、AR	天津富宇精细化工有限公司

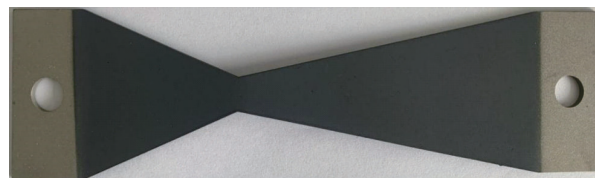


图 1 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料喷涂后的蝶形板

采用电烧仪对 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料的变色趋势进行标定,电流 100 A,时间 3 min;采用 WX-LD-1200 立式高温炉对 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料的变色情况进行 20 ℃间距标定;采用附着力测定仪对 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料变色前后的附着力进行测定,进行 5 次试验并取平均值;采用铅笔硬度法对 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料变色前后的硬度进行测定,进行 5 次试验并取平均值;采用数字化判读系统对变色后的 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料进行数字化判读与分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料耐温性能与基本性能分析

SW-M-6 多变色不可逆示温涂料耐温及基本性能见表 3~4 所列。

从表 3~4 可以看出,SW-M-6 多变色不可逆示温涂料耐温性能和各项物理机械性能表现良好,其中漆膜在 550 ℃烘烤 10 min 条件下仍保持完整、不起泡、不脱落,表明 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料在所能测量的最高温度下可以满足各种设备试车过程中的测温要求。

表3 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料耐温性能

项目	测试温度/℃						
	80	100	200	300	400	500	550
测试时间/min	10	10	10	10	10	10	10
漆膜状态	完整、不开裂	完整、不开裂	完整、不开裂	完整、不开裂	完整、不开裂	完整、不开裂	完整、不开裂

表4 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料基本性能

检测项目	常规指标	检测结果	检测标准
外观	均相液体, 无机机械杂质	均相液体, 无机机械杂质	GB/T 1721
黏度(25℃, 涂-4杯)/s	≤60	24	GB/T 1723
表干时间/h	≤1.0	0.3	GB/T 1728
实干时间/h	≤24	9	GB/T 1728
细度/μm	≤30	23	GB/T 1724
厚度/μm	20~30	27	GB/T 13452.2
固体含量/%	≥50.0	59.6	GB/T 1725
柔韧性/mm	1	1	GB/T 1731
耐冲击性/cm	50	50	GB/T 1732

2.2 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料变色趋势分析

蝶形板在施加高电流、低电压的条件下,会随着基材宽度的减小电阻逐渐增大,根据热量公式  $Q=I^2Rt$ ,在相同时间下,电流越大、电阻越大,即所产生的热量越高,使得在相同条件下,同一种涂料蝶形板表面会显示不同的颜色。

图2~4为SW-M-6多变色不可逆示温涂料电烧时蝶形板的变色照片。可以看出,30s时蝶形板中间部位开始逐渐变为墨绿色,并有向两侧延伸的趋势(图2);90s时中间部位为灰绿色,两侧依次为苹果绿和墨绿色,并持续向蝶形板两侧延伸(图3);180s时蝶形板中间部位为灰白色,且两侧有一条黄白色色带,肉眼观察两侧依次为灰黑色、灰绿色、苹果绿和墨绿色(图4)。从图5数字化判读可以看出蝶形板共分出了9条不同颜色的色带,按温度由低到高依次为:墨绿色→灰绿色→苹果绿色→灰绿色→中灰色→黑灰色→浅黑色→灰白色→棕白色,代表SW-M-6多变色不可逆示温涂料在80~550℃的温度区间内总共产生了9种颜色变化,这也可以从图7看出。图6为数字化判读20℃间距的炉烧标准比色板数据,可以看出在温度间隔为20℃时各标准色板之间颜色变化明显,在大面积测温过程中可直观地观察设备运行过程中的温度场分布。另外,通过电脑对标准比色板颜色的L、a、b值分析,可以将SW-M-6多变色不可逆示温涂料的测温误差缩小到±5℃,对测温精度的提高有直观的作用。

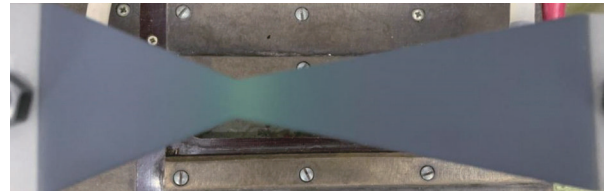


图2 电烧 30 s 变色

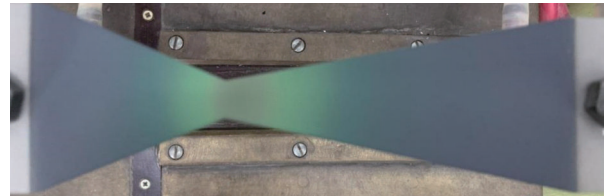


图3 电烧 90 s 变色

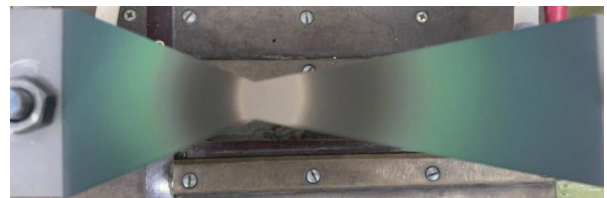


图4 电烧 180 s 变色

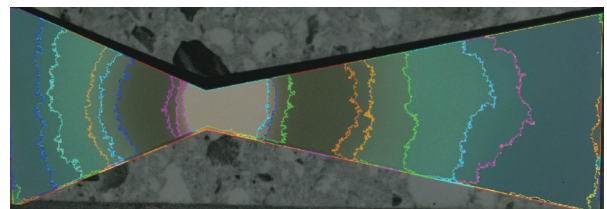


图5 蝶形板数字化判读划分区域

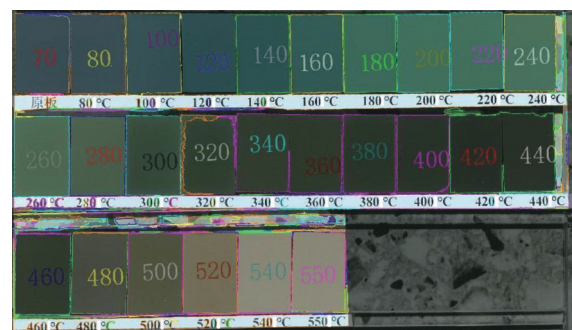


图6 标准比色板数字化判读

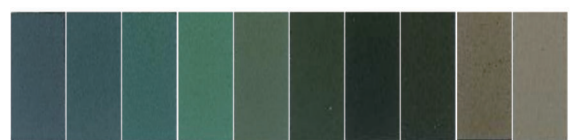


图7 60℃间距标准比色板

### 2.3 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料变色前后附着力与硬度分析

附着力是多变色不可逆示温涂料非常重要的性能之一, 因为其主要应用在发动机的测温方面, 关乎其在测温过程中能否一直存在直至测温结束, 若附着力较差, 则有可能在发动机高速旋转过程中脱落, 影响测温结果且有安全隐患。图 8 为 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料的附着力测试数据, 可以看出原涂料附着力为 2.36 MPa, 随着温度的升高, 附着力逐渐缓慢上升, 在 280 °C 后快速升高, 至 550 °C 时达到 11.28 MPa。这是由于 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料在制备过程中所用的自制环氧有机硅树脂物理机械性能优异, 其在低温段短时间内可与基材牢固结合而不被气流等冲刷。另外在 300 °C 左右时, 环氧有机硅树脂开始软化分解, 逐渐渗透至基材表面的微小孔隙中, 这种渗透增加了涂层与基材之间的接触面积, 从而增强了附着力; 而后期附着力的持续升高可能是由于随着温度的升高涂层中的某些成分与基材表面发生化学反应, 形成更牢固的化学键, 从而增强了附着力; 另外, 在高温下涂层内部的内应力更容易释放, 减少了因内应力导致的涂层开裂或剥离现象, 这有助于保持涂层与基材之间的良好接触, 从而提高了附着力。

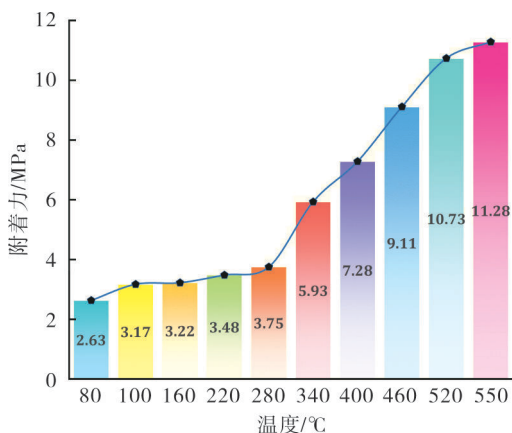


图 8 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料附着力测试

硬度也是多变色不可逆示温涂料不可或缺的性能之一, 高硬度可以有效地防止涂层在喷涂固化后因磕碰或摩擦而导致缺失。SW-M-6 多变色不可逆示温涂料涂层硬度测试结果见表 5 所列。

表 5 SW-M-6 多变色不可逆示温涂料涂层硬度测试

温度/°C	80	100	160	220	280	340	400	460	520	550
铅笔硬度	6B	4B	3B	2B	HB	HB	2H	3H	5H	6H

从表 5 可以看出, 随着温度的升高, 涂层的铅笔硬

度逐渐升高。这主要是由于附着力的增强间接影响; 另外温度升高会降低涂层内部的分子热运动, 使得涂层中的原子和分子的热振动减小, 从而增强了涂层的硬度。

### 2.4 多变色不可逆示温涂料的变色机理分析

多变色不可逆示温涂料的变色机理主要涉及颜料的物理和化学变化。这些变化导致颜料的分子结构和形态发生改变, 从而引起颜色的变化。具体来说, 这种示温涂料包含的变色颜料在受热时会经历以下一系列变化。

**升华:** 具有升华性质的某些物质与填料混合显示一种颜色, 当加热到一定温度时, 其由固态分子直接转变为气态分子逸出基料, 此时涂层只会显示填料的颜色。例如: 靛蓝+TiO<sub>2</sub>  $\xrightarrow{\text{靛蓝升华}}$  TiO<sub>2</sub>。

**熔融:** 有些有机物结晶时看起来是“白色”的, 当加热到熔融温度时, 变成无色透明液体, 利用其熔融的过程来起到指示温度的作用。

**晶型转化:** 当温度升高到一定程度时, 颜料的晶体结构可能会发生转变, 从一种晶型变为另一种, 这种变化通常是不可逆的。晶型的变化直接影响颜料对光的吸收和反射特性, 从而导致颜色改变。

**氧化还原反应:** 在高温下, 颜料可能经历氧化或还原反应, 这些化学反应会导致颜料分子结构的永久性改变, 从而引起颜色变化, 并且这种变化是不可逆的。例如: CdS+2O<sub>2</sub>  $\xrightarrow{\Delta}$  CdSO<sub>4</sub>, 颜色由黄色转变为白色。

**分解和化合反应:** 随着温度的升高, 某些颜料可能会发生分解或与其他化合物发生化合反应, 这些反应同样会导致颜料的分子结构发生根本性变化, 产生的新物质具有不同的颜色, 且这种变化也是不可逆的。例如: CdCO<sub>3</sub>  $\xrightarrow{310\text{ }^\circ\text{C}}$  CdO+CO<sub>2</sub> ↑, 颜色由白色转变为黄色。

**固相反应:** 在高温下某些颜料之间可能会发生固相反应, 从而导致颜色发生变化。例如: CoO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\xrightarrow{960\text{ }^\circ\text{C}}$  CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, 颜色由灰色转变为蓝色。

**连续变色:** 某些物质在不同的温度下可发生好几次化学变化, 从而使得颜色发生变化。例如: CdS  $\xrightarrow{650\text{ }^\circ\text{C}}$  CdSO<sub>4</sub>  $\xrightarrow{700\text{ }^\circ\text{C}}$  CdO+SO<sub>3</sub> ↑, 颜色由黄色变为白色再到棕色<sup>[12-17]</sup>。

## 3 结语

本文所制备的多变色不可逆示温涂料有 9 种颜色变化, 涂层附着力与硬度随着温度的升高均有所增加, 另外对多变色不可逆示温涂料的变色机理进行了分析, 但多变色不可逆示温涂料的变色是物质间多种作用的结合, 机理十分复杂, 后续还需从微观结构层面继续深入研究。

## 参考文献:

- [1] SHEN XIAOJUN, YU XINLE, WANG YUANDONG, et al. Three-dimensional visualization scheme of infrared thermal temperature measurement data for substaition electric power equipment[J].High Voltage Engineering,2021,47(2): 387-395.
- [2] Y DING,X DAI,T ZHANG.Low-cost fiber-optic temperature measurement system for high-voltage electrical power equipment [J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2010,59(4):923-933
- [3] J JI, B YAN, B WANG,et al.Error of thermocouple in measuring surface temperature of blade with cooling film [J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2022,71: 1-12.
- [4] 周舟,龚尚昆,蒋锐,等.电气设备发热故障诊断方法与示温涂料应用展望[J].湖南电力,2019(6):42-44.
- [5] 郭丽君,宫晋英.几种示温涂料的研制[J].青岛大学学报(工程技术版),2011(4):78-81.
- [6] 张建英,秦颖,邱家浩,等.不可逆示温涂料的研究进展[J].中国涂料,2020(4):45-49.
- [7] LEMPEREUR C, ANDRAL R, PRUDHOMME J Y.Surface temperature measurement on engine components by means of irreversible thermal coatings [J].Measurement Science and Technology,2008,19(10):105-501
- [8] 刘正堂,张新歧,李淑杰,等.新型 350~700℃多变色不可逆示温涂料的研制[J].涂料工业,2006(12):51-54
- [9] 田永丰,丁渊文,李建飞,等.一种高温多变色不可逆示温涂料的制备与表征[J].现代涂料与涂装,2018(11):1-4
- [10] CHANG T, CAO X, DEDON L R, et al.Optical design and stability study for ultrahigh-performance and long-lived vanadium dioxide-based thermochromic coatings [J].Nano Energy, 2018,44:256-264.
- [11] KATSUYUKI F, YOSHIKI O.High temperature sensitive thermopaint by electronmigration:EP 873-881[P].1998.
- [12] GENG X, LI W, WANG Y, et al.Reversible thermochromic microencapsulated phase change materials for thermal energy storage application in thermal protective clothing[J].Applied Energy,2018,217:281-294.
- [13] 康永.浅析示温变色涂料的机理及发展趋势[J].上海建材, 2012(3):24-26.
- [14] 李昕.示温涂料的变色原理及应用进展[J].现代涂料与涂装,2010(7):15-17.
- [15] 陈媛媛.电力系统热故障检测的示温涂料研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [16] 贺乾元.汽车传动轴防腐涂料及变压器配件可逆示温涂料的研究[D].武汉:湖北大学,2016.
- [17] 熊庆荣,李杨,钟明.示温涂料显色试验研究[C].第十五届中国科协年会第 13 分会场:发动机设计、制造与应用技术研讨会论文集,2013:714-718.
- [18] 徐润斌,刘芳,田永丰,等.示温涂料的研究现状和发展趋势[J].现代涂料与涂装,2016(10):26-30. ◆

~~~~~

(上接第 11 页)

## 参考文献:

- [1] 魏超,顾剑东,李斌,等.有机-无机杂化超薄型防火涂料的研究制备[J].现代涂料与涂装,2020,23(11)23-25.
- [2] 孙志勇,王志宽,高昊超,等.薄膨胀型防火涂料:CN112029 367A[P].2020-08-28.
- [3] 曹宽,张宏涛,王俊鹏.超薄型防火涂料试验研究[J].消防论坛,2016(9):5-10.
- [4] 李崇文.膨胀阻燃体系对钢结构防火涂料性能的影响与研究[J].四川建材,2021,47(4): 232-233.
- [5] 张爱元,刘寿兵,徐祥麟,等.室内钢结构水性超薄型防火涂料的研制[J].现代涂料与涂装,2018,21(11):12-15.
- [6] 何世家,张泽江.水性膨胀型钢结构防火涂料的应用及其发展现状[J].涂料技术与文摘,2015,36(9):18-21.
- [7] 熊家锦,师华,王富森,等.水基薄膜型膨胀防火涂料的研究[J].涂料技术与文摘,2016,37(11):2-8.
- [8] 张仁忠,但建明,洪成林,等.新型水性无机膨胀体系钢结构防火涂料的研制[J].化工新型材料,2016,44(7):240-242.
- [9] 武珊羽,黎子昂,彭洪均,等.水性膨胀型钢结构防火涂料的设计与耐火性能研究[J].中国涂料,2022,37(3):36-40.
- [10] 朱远.水性膨胀型钢结构防火涂料的制备与性能研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [11] 黄雅婷,李连良,张翼,等.水性膨胀型钢结构防火涂料研究进展[J].中国塑料,2023,37(2):77-89.
- [12] 张文喜,蔡宇武,魏成龙,等.钢结构防火涂料烟气毒性定量分析研究[J].广东化工,2023,50(23):40-42.
- [13] 杨鑫,霍冀川,邓跃全,等.硅酸铝在膨胀型钢结构防火涂料中的应用研究[J].非金属矿,2023,46(2):26-29.
- [14] 秦汝祥,葛小丽,滕丽影,等.膨胀型钢结构防火涂料的制备及性能[J].电镀与涂饰,2023,42(12):63-70.
- [15] 要如磊,翟现明,王小建,等.水性聚脲基膨胀型钢结构防火涂料的研究[J].涂料工业,2022,52(10):24-29.
- [16] 李严,高志宏,彭洪均,等.纤维改性水性膨胀型钢结构防火涂料[J].涂层与防护,2023,44(9):26-32. ◆