doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20240167

滤袋超温色标涂层技术与材料

柳静献，张 鑫，周肖童
（东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：为了方便判定滤袋超温失效，对能通过颜色变化反映温度变化的超温色标涂层进行了研究. 以$CuSO_4·5H_2O$和硫酸锰为变色颜料，以环氧改性有机硅树脂作为成膜物，制备了一种可用于滤袋监控60~200 ℃具有多种热致变色行为的不可逆示温涂层，并对其物理性能、机械性能进行测试，通过XRD和热重-差热分析法对变色颜料进行变色机理探究. 结果表明，涂层的物理性能和机械性能均满足常规涂层国家标准，在温度变化时能呈现出显著色差，实现了蓝色—浅绿色—黄色—棕黄色的颜色变化，并建立了颜色-温度函数，避免了人工监测温度判读误差.

关 键 词：滤袋；超温；热致变色；不可逆示温；涂层
中图分类号：X 701.2 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026(2026)02-0102-06

Overtemperature Colour Coded Coating Technology and Materials for Filter Bag

LIU Jing-xian, *ZHANG Xin*, *ZHOU Xiao-tong*
（School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Jing-xian, E-mail: liujingxian@mail.neu.edu.cn）

Abstract: In order to facilitate the determination of the overtemperature failure of filter bags, the overtemperature color changing coating that can reflect temperature changes through color changes is studied. Using $CuSO_4·5H_2O$ and $MnSO_4·H_2O$ as color changing pigments and epoxy modified organosilicon resin as the film-forming agent, an irreversible temperature indicating coating with multiple thermochromic behaviors for monitoring filter bags at 60~200 ℃ was prepared. The physical and mechanical properties of the coating were tested, and the color changing mechanism of the color-changing pigments was explored by XRD and thermogravimetric differential thermal analysis. The results show that the physical and mechanical properties of the coating meet the national standards for conventional coatings. It can present significant color differences when the temperature changes, achieving a color change from blue to light green to yellow to brownish yellow, and a color-temperature function was established, avoiding the error of manual temperature monitoring and interpretation.

Key words: filter bag; overtemperature; thermal discolouration; irreversible temperature indication; coating

随着环境保护标准的提高和完善，国家对各种重污染产业超低排放的要求也在逐渐提高. 许多电除尘器、湿式除尘器都在向脉冲袋式除尘器方向发展. 目前各种除尘装置中，袋式除尘器所占比例约为60%~70%[1]. 滤袋是袋式除尘器的核心组成部分，随着生产运行条件的日益复杂以及环境保护要求的日益严苛，极易造成滤袋机械损坏、氧化腐蚀及高温破坏，严重降低了滤袋的服役寿命. 同时，工艺参数异常或设备故障也经常导致滤袋超温情况发生[2].

收稿日期：2024-09-12
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52304210）；中国博士后科学基金资助项目（2023M740545）；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（N2301022）.
作者简介：柳静献(1966—)，男，河北元氏人，东北大学教授，博士生导师.
通信作者：柳静献，E-mail:liujingxian@mail.neu.edu.cn.

超温现象的发生容易造成滤袋失效.当持续使用温度或者瞬间温度超过滤袋的正常使用温度时,将会对滤袋的基布、覆膜和缝线造成破坏,出现烧袋、氧化腐蚀、爆燃和高温收缩等问题.同时,滤袋的灼伤或高温烤灼会导致其性能受损,甚至发生烧穿现象.这会使滤袋失去过滤功能,烟气中的有害物质无法被有效过滤,而直接排放到环境中,对工业生产和环境保护造成严重不良影响.因此,必须采取有效措施对滤袋的热故障进行检测,基于检测结果采取相应预防和应对措施以确保生产设备的安全稳定运行.

目前针对滤袋超温情况的监测主要依赖于温度传感器,存在监测手段单一、反应速度慢、准确性不高等问题[3-4],无法实现动态连续监测,无法记录滤袋所经受的最高温度.异常部位能够被人员及时发现并采取措施非常重要,因此有必要寻求一种价廉、简单、快速、准确、适用性强且操作便捷的超温排查新方式[5-6].随着科学技术的不断发展和创新,示温涂层由于具有良好的热致变色性能,已经扩展到了纺织服装[7]、墨水印刷[8]、电子线路的无损检测、医学影像等领域.示温涂层是测量设备大面积动态温度的最具成本效益的非干涉测量方法,将涂层刷涂在滤袋表面形成示温涂层后,维护人员能够及时确定滤袋超温的位置,提高故障定位的准确性,减少检查时间和成本.

本文自制了可用于滤袋超温监控不可逆热致变色超温涂层,该涂层在 60~200 ℃以 10 ℃为间隔具有多个变色点,通过XRD表征了热致变色前后变色颜料的化学结构变化,通过热重-差热分析表征了材料的热稳定性,并对变色颜料的变色机理进行探究.通过计算颜色值,建立了颜色-温度的函数.

1　试　　验

1.1　药品与仪器

本试验用药品包括:$CuSO_4·5H_2O$,$CoSO_4$,$MnSO_4·H_2O$、氧化铝、二氧化钛、高岭土、滑石粉、环氧改性有机硅树脂、二甲苯[9].仪器包括:球磨机、DJ1C-100增力电动搅拌器、SZQ涂膜器、BY-1515加热台、SZQLS170色差仪、QXD单槽细度板、QFH旋转式漆膜划格器、QHQ-A铅笔硬度计、QCJ-100涂层冲击器、热重分析仪、Rigaku Ultima IV X射线衍射仪.

1.2　涂层的制备

将变色颜料、填料经过研磨分散、按比例混合、电动搅拌1 h后,使用35 μm涂膜器涂覆在马口铁板(120 mm×50 mm×0.28 mm)上制得样品.具体组成及比例如表1所示,制备流程如图1所示.

表1　涂层组成及比例

Table 1　Composition and proportion of overtemperature coatings

组成	质量分数/%
变色颜料 $w(CoSO_4):w(CuSO_4·5H_2O):w(MnSO_4·5H_2O)=1:1:1$)	35
填料(氧化铝:二氧化钛:高岭土:滑石粉=1:1:1:1)	20
树脂(环氧改性有机硅树脂)	30
溶剂(二甲苯)	15

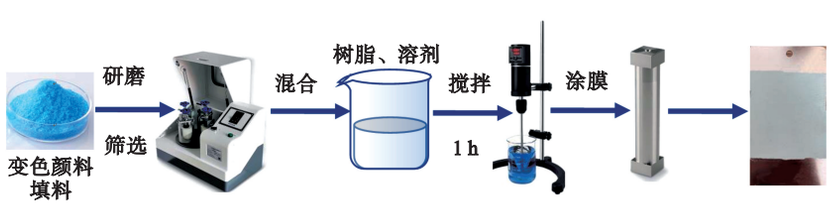


图1　不可逆示温涂层样品制备流程

Fig. 1　Flow chart of sample preparation for irreversible thermochromic coatings

1.3　涂层热致变色性能检测

待涂层样品干燥后,将样品裁剪成70 mm×30 mm的长方形,用加热台进行加热[6].温度间隔为10 ℃,加热时间为5 min,确保涂层在该温度下颜色不会变化,加热至200 ℃结束,冷却至室温后,使用色差仪记录涂层在对应温度下的颜色及RGB值.

1.4　测试与表征

使用XRD表征变色颜料热致变色前后的物相结构,扫描角度为10°≤2θ≤80°,扫描速度为

10(°)/min. 对变色颜料进行热重分析表征材料的热稳定性,在20~550 ℃内进行测试,升温速率为20 ℃/min. 涂层的基本物理性能和机械性能如表2所示[10]. 我国对多变色超温涂层规定的标准如下:表干时间≤30 h;实干时间≤30 h;厚度≤35 μm;细度≤40 μm;硬度级别≥H级;附着力≥3级. 考虑涂层与滤袋的适用性,还进行了耐磨性、耐冲击性能测试,测试结果良好. 该涂层的物理机械性能均能满足国家标准和基本技术指标.

表2 涂层的基本物理性能和机械性能

Table 2 Basic physical and mechanical properties of coatings

项目	检测结果	参考标准
外观	均相液体,无机械杂质	文献[11]
表干时间/h	≤1	文献[12]
实干时间/h	≤24	文献[12]
厚度/μm	35	文献[13]
细度/μm	35	文献[14]
硬度/H	≥2	文献[15]
附着力(划格法)/级	1	文献[16]
耐冲击性/cm	50	文献[17]
耐磨性/(g·cm^{-2})	0.01	文献[18]

2 结果与讨论

2.1 混合颜料的变色机理

在混合颜料组分中$CuSO_4·5H_2O$对温度节点的变色起主导作用;粉红色的$MnSO_4·H_2O$作为辅助变色颜料,改善$CuSO_4·5H_2O$随温度升高逐渐变为灰白色且变色效果不明显的状况. 因此着重对$CuSO_4·5H_2O$的变色机理进行研究.

采用XRD表征变色颜料的晶体结构及颜料变色前后的物相结构变化. 由图2可知,$CuSO_4·5H_2O$与标准卡片PDF#97-016-6103基本吻合,具有尖锐的衍射峰;加热至110 ℃左右时,材料发生脱水反应,化学键断裂又失去2个结晶水,生成了$CuSO_4·3H_2O$,其衍射峰位置和强度与$CuSO_4·3H_2O$的标准卡片PDF#97-016-6102基本一致;加热至130 ℃左右时,化学键断裂又失去2个结晶水生成了$CuSO_4·H_2O$,峰形与$CuSO_4·H_2O$的标准卡片PDF#97-016-6101基本一致,与文献报道的$CuSO_4·5H_2O$受热分解过程基本吻合[19-21].

利用热重-差热分析仪表征材料的热稳定性,得出材料质量和热效应随温度变化的关系. 由图3可知,$CuSO_4·5H_2O$从67.8 ℃开始持续地发生质量损失,到170 ℃左右质量损失速度减缓,在这个温度区间内质量损失了28.81%,与失去4个结晶水的质量损失理论值28.8%基本吻合,具体可以分为3个阶段:第1阶段,在105,126 ℃出现吸热峰,在105~126 ℃时质量损失14.37%,与$CuSO_4·5H_2O$失去2个结晶水的理论数值14.4%基本吻合. $CuSO_4·5H_2O$分解生成了$CuSO_4·3H_2O$,对应颜色由浅蓝色变为浅绿色;第2阶段,在135,154 ℃出现吸热峰,170 ℃吸热速率减小,质量损失为14.44%,与$CuSO_4·3H_2O$失去2个结晶水的理论值14.4%相接近,$CuSO_4·3H_2O$分解生成了$CuSO_4·H_2O$,对应颜色由浅绿色变为黄色;第3个阶段,在170 ℃左右4个结晶水完全失去,脱掉的水扩散到表面需要一段时间,水分随着温度的升高完全蒸发,黄色逐渐加深[22-25].

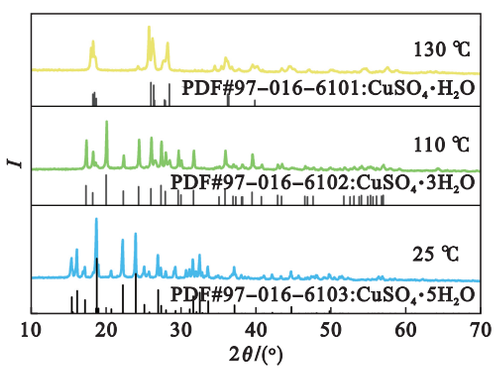


图2 $CuSO_4·5H_2O$加热前后XRD谱

Fig. 2 XRD spectra of $CuSO_4·5H_2O$ before and after heating

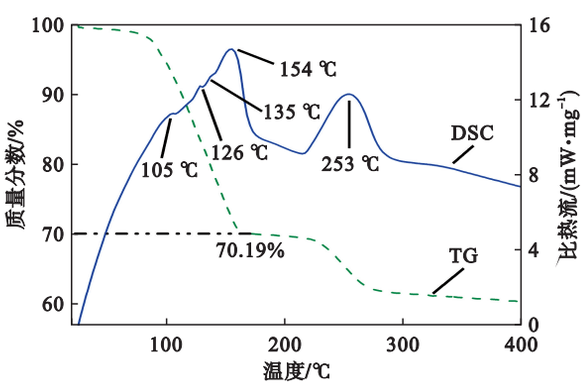


图3 $CuSO_4·5H_2O$的TG-DSC曲线

Fig. 3 TG-DSC curves of $CuSO_4·5H_2O$

2.2 示温涂层变色行为

示温涂层的主要成分如表3所示,对应的热致变色情况如表4所示[26]. 由表4可知,(4)号涂层变色效果最明显,变色点最优,涂层在80~110 ℃实现了从蓝色到浅绿色的变化,在120~

140 ℃时实现了从浅绿色到黄色的变化,在 170~　　200 ℃时实现了从黄色到棕黄色的变化.

表3　示温涂层的主要成分

Table 3　Main components of thermochromic coatings

编号	变色颜料	填料	树脂	溶剂
(1)	硫酸钴、$CuSO_4\cdot 5H_2O$,$MnSO_4\cdot H_2O$	氧化铝、二氧化钛	环氧改性有机硅树脂	二甲苯
(2)	硫酸钴、$CuSO_4\cdot 5H_2O$,$MnSO_4\cdot H_2O$	高岭土、滑石粉	环氧改性有机硅树脂	二甲苯
(3)	硫酸钴、$CuSO_4\cdot 5H_2O$,$MnSO_4\cdot H_2O$	氧化铝、二氧化钛、高岭土、滑石粉	环氧改性有机硅树脂	二甲苯
(4)	$CuSO_4\cdot 5H_2O$,$MnSO_4\cdot H_2O$	氧化铝、二氧化钛	环氧改性有机硅树脂	二甲苯
(5)	$CuSO_4\cdot 5H_2O$,$MnSO_4\cdot H_2O$	高岭土、滑石粉	环氧改性有机硅树脂	二甲苯
(6)	$CuSO_4\cdot 5H_2O$,$MnSO_4\cdot H_2O$	氧化铝、二氧化钛、高岭土、滑石粉	环氧改性有机硅树脂	二甲苯

表4　热致变色结果

Table 4　Thermochromic results

编号	温度/℃														
	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
(1)															
(2)															
(3)															
(4)															
(5)															
(6)															

2.3　建立颜色-温度函数模型

虽然可通过肉眼根据颜色对温度进行粗略判读,但此方法说服力不足且可靠程度较低.智能化的发展对判读的准确性提出了更高的要求,根据颜色值的测定和颜色与温度之间的定量关系进行曲线拟合,确定其函数关系.通过颜色分析获得更准确的温度数据,从而避免肉眼判读温度的误差,实现误差智能监测对涂层变色数据化处理极具意义[27-29].

以具有最佳变色效果的(4)号涂层为例,用色差仪提取5个点的数据求平均值,由式(1)计算得到对应的颜色值 Y,温度对应的 R,G,B 值与颜色值 Y 如表5所示.

$$Y=256^2R+256G+B. \tag{1}$$

式中:Y 为颜色值;R 为红色亮度值;G 为绿色亮度值;B 为蓝色亮度值.

根据表5建立的颜色与温度函数的拟合系数为0.99,拟合效果很好,可以准确测定60~200 ℃、每间隔10 ℃的颜色值变化,拟合函数见式(2),拟合曲线如图4所示.

$$Y=1.035\,9\times10^6e^{-1.866\,6\times10^{-4}t^2+0.056\,4t-4.254\,9}+1.344\,6\times10^7. \tag{2}$$

式中:Y 为颜色值;t 为温度,℃.

表5　不同温度对应的 R,G,B 值及颜色值 Y

Table 5　R, G, B values and colour values corresponding to different temperatures Y

t/℃	R	G	B	Y
60	208	221	221	13 688 285
70	209	221	221	13 753 821
80	210	221	220	13 819 356
90	212	221	220	13 950 428
100	214	224	216	14 082 264
110	216	224	215	14 213 335
120	218	223	214	14 344 150
130	219	220	212	14 408 916
140	220	220	211	14 474 451
150	220	219	209	14 474 193
160	219	218	208	14 408 400
170	219	215	206	14 407 630
180	218	214	202	14 341 834
190	217	208	190	14 274 750
200	214	199	185	14 075 833

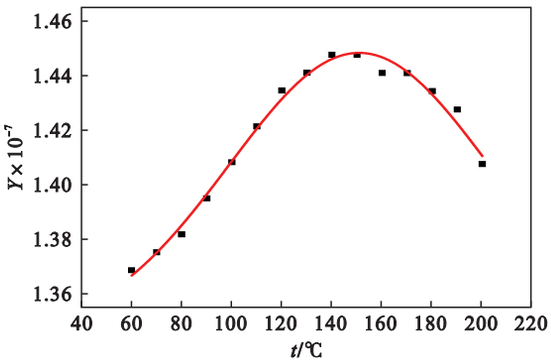


图4 颜色值随温度变化拟合曲线

Fig. 4 Fitted curve of colour values with temperature change

3 结 论

1) 本文成功制备了可用于滤袋超温监控60~200 ℃不可逆示温涂层,该涂层在60~200 ℃加热5 min条件下实现蓝色—浅绿色—黄色—棕黄色的变色效果.在实现热致变色性能的基础上,自制涂料的物理性能与机械性能满足国家标准的技术指标.

2) 通过对实时温度下涂层颜色的相关数据进行处理,建立了颜色值-温度函数,该函数能够通过颜色解析得到较精确的温度数据,避免了通过肉眼判读的误差,对涂层变色数据化处理极具意义,可用于滤袋超温故障识别与故障温度数据记录,实现对滤袋超温状态的实时监测和预警.

参考文献:

[1] 段超龙,乐文毅,任美桃,等.袋式除尘器滤袋失效原因分析[J].水泥工程,2017(4):43-46.
(Duan Chao-long, Le Wen-yi, Ren Mei-tao, et al. Filter-bag failure factor analysis of bag filter [J]. *Cement Engineering*, 2017(4):43-46.)

[2] 李东梅,田娱嘉,郭阳,等.布袋除尘器滤袋使用寿命的影响因素分析[J].热力发电,2013, 42(4):104-106.
(Li Dong-mei, Tian Yu-jia, Guo Yang, et al. Factors affecting the service life of filter bag [J]. *Thermal Power Generation*, 2013, 42(4):104-106.)

[3] 孙昊博,李凌汉,郑肇默.基于测温偏差机理的温度传感器结构优化设计[J].测控技术, 2024, 43(2):85-90.
(Sun Hao-bo, Li Ling-han, Zheng Zhao-mo. Structural improvement design of temperature sensors based on temperature deviation mechanism [J]. *Measurement & Control Technology*, 2024, 43(2):85-90.)

[4] 徐绍龙,李学明,成正林.温度传感器智能故障诊断和容错估计[J].自动化仪表,2021, 42(7):16-21.
(Xu Shao-long, Li Xue-ming, Cheng Zheng-lin. Intelligent fault diagnosis and fault tolerant estimation of temperature sensors [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2021, 42(7):16-21.)

[5] 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, 39(6):42-44,51.
(Zhou Zhou, Gong Shang-kun, Jiang Rui, et al. Diagnosis approach of fever fault for electric equipment and thermopaint application prospect [J]. *Hunan Electric Power*, 2019, 39(6):42-44,51.)

[6] 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.
(Chen Yuan-yuan. Study on temperature coatings for thermal system fault detection in power system [D].Harbin: Harbin Institute of Technology,2019.)

[7] 楼甜甜.温致变色材料在现代服装设计中的应用研究[D].上海:东华大学,2022.
(Lou Tian-tian. Research on the application of thermochromic materials in fashion design [D]. Shanghai: Donghua University, 2022.)

[8] Arulprakasajothi M, Susanth B, Naveen K K, et al. Thermal management on external surfaces by thermochromic materials [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 47: 4666-4670.

[9] 李煜阳,王隽祎.一种50~200 ℃多变色不可逆示温材料及其制备方法与应用:CN201911123302.7 [P] 2020-01-17.
(Li Yu-yang, Wang Jun-yi. A multi-color irreversible thermochromic material with a temperature range of 50 to 200 ℃ and its preparation method and application: CN201911123302.7 [P]. 2020-01-17.)

[10] 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, 2018,21(11):1-4,8.
(Tian Yong-feng, Ding Yuan-wen, Li Jian-fei, et al. Preparation and characterization of high temperature and multi color-changing irreversible temperature indicator coating[J]. *Modern Paint & Finishing*, 2018, 21(11):1-4,8.)

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.清漆、清油及稀释剂外观和透明度测定法: GB/T 1721—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
(General Administration of Qualily Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of appearance and transparency of varnishes boiled oils and thinners: GB/T 1721—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.)

[12] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.漆膜、腻子膜干燥时间测定法: GB/T 1728—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
(Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of drying time of coating and putty films: GB/T 1728—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.)

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.色漆和清漆 漆膜厚度的测定: GB/T 13452.2—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
(General Administration of Qualily Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Paints and varnishes—determination of film thickness: GB/T 13452.2—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.)

[14] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.色漆、清漆和印刷油墨 研磨细度的测定: GB/T 1724—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
(State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Paints, varnishes and printing inks—determination

of fineness of grind: GB/T 1724—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.)

[15] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 色漆和清漆 铅笔法测定漆膜硬度: GB/T 6739—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
(State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Paints and varnishes—determination of film hardness by pencil test: GB/T 6739—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.)

[16] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 色漆和清漆 划格试验: GB/T 9286—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
(State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Paints and varnishes—cross-cut test: GB/T 9286—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.)

[17] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 漆膜耐冲击测定法: GB/T 1732—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
(State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of impact resistance of coating films: GB/T 1732—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.)

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 色漆和清漆 耐磨性的测定 旋转橡胶砂轮法: GB/T 1768—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Paints and varnishes—determination of resistance to abrasion—Rotating abrasive rubber wheel method: GB/T 1768—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.)

[19] Salek G, Demourgues A, Jubera V, et al. Mn^{2+} doped $Zn_3(PO_4)_2$ phosphors: irreversible thermochromic materials useful as thermal sensors[J]. *Optical Materials*, 2015, 47: 323-327.

[20] Pareja-Rivera C, Solis-Ibarra D. Reversible and irreversible thermochromism in copper-based halide perovskites [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(15): 2100633.

[21] Zhang H, Li C, Chen D R, et al. Facile preparation of prussian blue analogue $Co_3[Co(CN)_6]_2$ with fine-tuning color transition temperature as thermochromic material [J]. *CrystEngComm*, 2017, 19(15): 2057-2064.

[22] Popescu M, Serban L, Popescu M. Thermo-indicating paint for damage warning [J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1996, 46(1): 317-321.

[23] 王晓菊,韵海鹰.五水硫酸铜的热分析[J].长春师范学院学报, 1997(2):14-16.
(Wang Xiao-ju, Yun Hai-ying. Thermal analysis of copper sulfate pentahydrate [J]. *Journal of Changchun Normal University*, 1997(2):14-16.)

[24] 刘德文.五水硫酸铜的失水实验[J].化学教育, 1983(4): 46-47.
(Liu De-wen. Water loss experiments with copper sulfate pentahydrate [J]. *Chinese Journal of Chemical Education*, 1983(4):46-47.)

[25] 周磊,何德良,潘蓉,等.钴基热致变色材料及多变色示温涂层的制备[J].表面技术, 2021, 50(11):179-186.
(Zhou Lei, He De-liang, Pan Rong, et al. Preparation of cobalt-based thermochromic materials and multi-color thermochromic coatings [J]. *Surface Technology*, 2021, 50(11):179-186.)

[26] Arulprakasajothi M, Rupesh P L. Surface temperature measurement of gas turbine combustor using temperature-indicating paint [J]. *International Journal of Ambient Energy*, 2022, 43(1): 2324-2327.

[27] 宋晓丽,李字明,闫康凯,等.多变色不可逆示温材料制备及其智能电网应用[J].材料科学与工艺, 2021, 29(1):9-16.
(Song Xiao-li, Li Zi-ming, Yan Kang-kai, et al. Preparation of multi-color irreversible thermochromic coatings and its application for smart grids [J]. *Materials Science and Technology*, 2021, 29(1):9-16.)

[28] 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): 105501.

[29] Rajadurai R S, Lee J H. High temperature sensing and detection for cementitious materials using manganese violet pigment[J]. *Materials*, 2020, 13(4): 993.