



## 输送带温敏改性方法及火灾早期预警指标气体研究

陆伟 叶文钢 李金亮 钱冠雨 张青松 李金虎

### 引用本文:

陆伟, 叶文钢, 李金亮, 等. 输送带温敏改性方法及火灾早期预警指标气体研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 170–182.  
LU Wei, YE Wengang, LI Jinliang. Research on advanced fire warning technology utilizing thermo-sensitive material modified conveyor belts[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 170–182.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1733>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 矿井火灾智能监测预警技术近20年研究进展及展望

Research progress and prospect of mine fire intelligent monitoring and early warning technology in recent 20 years  
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 154–177 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-2016>

#### 基于轻量化的输送带块煤实时监测方法

A lightweight-based method for real-time monitoring of lump coal on conveyor belts  
煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 285–293 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1217>

#### 钢丝绳芯输送带接头强度与预成型芯胶技术研究

Research on joint strength of steel cord conveyor belt and preformed core rubber technology  
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 336–345 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1014>

#### 基于双流融合网络的输送带跑偏检测方法

Conveyor belt deviation detection method based on dual flow network  
煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 259–267 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0215>

#### 输送带输煤采样技术研究现状及发展趋势

Research status and development trend of belt coal sampling technology  
煤炭科学技术. 2022, 50(9): 200–206 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/662f110f-ee8b-4c7b-ad39-6b5d1d490945>

#### 矿井煤层自燃程度精细划分与预警方法研究

Study on fine division and early warning methods of spontaneous combustion degree of coal seams in mines  
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 115–121 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ad0be831-505b-4445-ae26-078c36f8d349>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

陆 伟, 叶文钢, 李金亮, 等. 输送带温敏改性方法及火灾早期预警指标气体研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 170–182.

LU Wei, YE Wengang, LI Jinliang, *et al.* Research on advanced fire warning technology utilizing thermo-sensitive material modified conveyor belts[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 170–182.

## 输送带温敏改性方法及火灾早期预警指标气体研究

陆 伟<sup>1</sup>, 叶文钢<sup>1</sup>, 李金亮<sup>1</sup>, 钱冠雨<sup>2</sup>, 张青松<sup>1</sup>, 李金虎<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 黄陶勒盖煤炭有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017313)

**摘 要:** 矿用输送带火灾在发生过程中主要产生 CO 和烟雾等指标气体。然而, 以 CO 作为指标气体易受到干扰, 而烟雾产生时表明输送带已经达到较高温度, 此时往往容易错失最佳灭火及人员逃生时机。为此, 创新性地提出温敏改性输送带的方法: 通过在输送带覆盖层中添加温敏材料以进行物理改性, 再借助程序升温氧化炉、综合热重分析仪、输送带滚筒摩擦试验机等设备对输送带改性前后产生指标气体的初始温度、分解产气速率及体积分数变化进行测试。结果表明: 采用温敏材料物理改性的方法对输送带原有的结构强度影响较小, 也不会增加火灾发生和蔓延的危险性; 改性前, 输送带最早产生的指标气体 CO 的温度为 110 ℃ 左右, 但是其产生体积分数和释放速率较低且易受到矿井内不同来源 CO 的影响, 从而造成误判; 而改性后的输送带最早在 70~80 ℃ 时即可探测到覆盖层内的温敏材料分解产生矿井中不存在的指标气体, 与改性前相比, 不仅初始指标气体产生的温度提前了 30 ℃ 左右, 而且指标气体释放时速率快、体积分数高, 从而更容易被监测。此外, 从实际工程应用角度进一步证明了物理改性方法的可行性, 证实了温敏材料分解产生的指标气体不受矿井内其他材料氧化所产生气体的干扰, 因此保障了输送带火灾早期监测预警的及时性和精准性。

**关键词:** 输送带火灾; 温敏材料改性; 指标气体; 精准监测; 早期预警

**中图分类号:** TD528.1; TD752 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)01-0170-13

### Research on advanced fire warning technology utilizing thermo-sensitive material modified conveyor belts

LU Wei<sup>1</sup>, YE Wengang<sup>1</sup>, LI Jinliang<sup>1</sup>, QIAN Guanyu<sup>2</sup>, ZHANG Qingsong<sup>1</sup>, LI Jinhu<sup>1</sup>

(1. College of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Huangtaolegai Coal Co., Ltd., Ordos 017313, China)

**Abstract:** In the process of coal mine transport belt fire, CO and smoke are mainly produced, and CO as the indicator gas is susceptible to interference. When smoke is produced, it indicates that the conveyor belt has reached a high temperature, which risks missing the optimal time for extinguishing fires and ensuring personnel safety. To address this issue, an innovative method is proposed to modify the cover layer of conveyor belt using the thermo-sensitive material. This physical modification involves implanting the thermo-sensitive material to the belt. To evaluate the effectiveness of this modification, tests are conducted using a temperature-programmed oxidation furnace, a comprehensive thermogravimetric analyzer and the conveyor belt roller friction testing device to measure the changes in initial temperature, gas production rate, and volume fraction of indicator gases before and after the modification. Experimental results demonstrate that the physical modification with the thermo-sensitive material has minimal impact on the structural strength of the conveyor belt, and does not increase the risk of fire occurrence or spread. The unmodified transport belt produces CO as an early indicator gas at around 110 ℃, but its volume fraction and release rate are low, making it susceptible to misjudgment due to the presence of CO from other sources in the mine.

收稿日期: 2023-11-20

策划编辑: 宫在芹

责任编辑: 刘雅清

DOI: 10.12438/cst.2023-1733

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(2208085ME124); 安徽省重点研究与开发计划资助项目(2022m07020006); 国家自然科学基金资助项目(51974178)

作者简介: 陆 伟(1977—), 男, 四川广安人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: wei.lu@aust.edu.cn

通讯作者: 李金亮(1984—), 男, 山东寿光人, 讲师, 博士。E-mail: lijnliang2008@163.com

The modified transport belt, on the other hand, detects the decomposition of the thermo-sensitive material in the belt's cover layer, generating the indicator gas that do not naturally occur in the mine at temperatures of 70–80 °C. Compared to the unmodified belt, the modified belt enables earlier detection of the initial indicator gas by about 30 °C, with a higher release rate and volume fraction, making monitoring easier. Moreover, the feasibility of the physical modification method is further substantiated from the perspective of practical engineering application. The indicator gas produced by the decomposition of the thermo-sensitive material is not affected by gases generated through oxidation of other materials in the mine, ensuring timely and accurate monitoring and warning of potential fires in the conveyor belt.

**Key words:** conveyor belt fire; modified with thermo-sensitive material; indicator gas; precise monitoring; advanced fire warning

## 0 引言

矿用输送带是煤炭工业中最重要的运输设备之一<sup>[1]</sup>。当前我国井下输送带的使用长度已超过 1 800 万 m, 是煤炭运输系统的枢纽<sup>[2]</sup>。根据《煤矿安全规程》等相关规定, 我国煤矿井下带式输送机均要求使用阻燃输送带, 但由于输送带张紧力不足、负载过大、托辊卡死、煤炭自燃等原因, 易导致输送带发生火灾事故造成人员伤亡<sup>[3-5]</sup>。如 2015 年黑龙江省杏花煤矿发生了造成 22 人死亡的输送带火灾事故; 2020-09-27 重庆市松藻煤矿发生了一起输送带火灾事故, 造成 16 人死亡, 38 人受伤; 2023-09-24 贵州省山脚树煤矿又发生一起输送带火灾事故, 最终造成 16 人死亡。因此, 对输送带火灾早期进行有效监测预警, 将输送带火灾控制在萌芽之中, 是防止输送带火灾发生的关键。

输送带摩擦受热或者燃烧会产生大量的指标气体与烟雾<sup>[6-8]</sup>, 因此对气体和烟雾进行监测监控是预警输送带火灾的有效手段。蒋时才<sup>[9]</sup>通过输送带滚筒摩擦试验得出输送带产生 CO 的初始温度约在 100 °C 以上, 释放的体积分数在  $2.00 \times 10^{-6} \sim 2.35 \times 10^{-4}$ ; 羽田博宪等<sup>[10]</sup>指出输送带温度达到 230 °C 时开始急剧产生硫化碳酰基及 SO<sub>2</sub> 气体, 可以作为矿井输送带温度异常的标志; 傅培舫<sup>[11]</sup>得出 PVC 输送带在 150 °C 以下时主要表现为内部水分蒸发, 在 250 °C 时开始释放 HCl 等烟雾, 当达到 400 °C 以上时开始发生表面燃烧现象; 黄刚<sup>[12]</sup>对矿用输送带火灾产生烟气的温度和 CO 的分布规律展开研究, 结果表明当输送带点火 120 s 时, 巷道内的 CO 体积分数几乎忽略不计, 当点火 300 s 后输送带热解达到一定程度发生燃烧时 CO 体积分数才开始明显上升; 初昊<sup>[13]</sup>对 PVG 型矿用输送带热解产气进行测试, 发现 50 °C 时检测到 CO 气体, 但是在热解初期体积分数基本无变化, 只有当达到 416 °C 时体积分数才开始迅速上升; 王伟<sup>[14]</sup>对不同类型的输送带热解过程中产生气体进行了分析, 得出当温度达到 170 °C 后输送带开始逐渐产生 HCl 烟雾, 在 270 °C 左右 HCl 生成量达

到最大, 在 280 °C 前 CO 和 CO<sub>2</sub> 气体的产量较少, 在 460 °C 后 CO 和 CO<sub>2</sub> 产量才达到最大。

综上所述, CO、HCl、SO<sub>2</sub> 以及烟雾气体是目前常用的矿用输送带火灾预警指标气体。但 HCl、SO<sub>2</sub> 与烟雾被检测到时输送带已达到较高温度, 导致预警滞后, 因此不适合作为早期预警指标气体。而输送带火灾早期阶段的 CO 体积分数变化并不明显, 同时割煤机对煤体进行破碎加工时会使煤块积蓄热量<sup>[15]</sup>, 且煤块切割断面极易氧化, 使得采煤机割落的煤块经输送带运输时在常温下即可氧化产生 CO 气体<sup>[16]</sup>, 此外输送带在机械传动过程中与辊轴摩擦蓄热也会加速带体附近浮煤缓慢氧化产生 CO, 以上现象对利用 CO 气体预警输送带早期火灾产生干扰。

为此, 针对现有输送带火灾早期预警指标气体存在的滞后性及不精准性弊端, 笔者提出利用温敏材料改性输送带的方法, 具体步骤为: 先将温敏材料植入到输送带覆盖层中, 再利用输送带覆盖层硫化剂对植入温敏材料区域的覆盖层进行常温硫化修补, 最终实现输送带改性。在此基础上, 测试改性前后的输送带性能及覆盖层产生的指标气体差异, 建立温敏改性输送带的方法和火灾早期预警技术, 保障矿井输送带安全运行。

## 1 试样制备及试验方法

### 1.1 试验材料及制备方法

#### 1.1.1 试验材料

试验材料包括: 温敏材料(碳酸氢铵), 30 mm×30 mm×10 mm 规格的长方体型 PVC 试样(与矿用 PVC 整芯输送带覆盖层同组分的聚氯乙烯)及橡胶试样(与矿用 PVG 织物芯阻燃带覆盖层同组分的 CR 氯丁橡胶), 1 000 mm×150 mm×10 mm 规格的长方体型橡胶试样及同规格的 PVG 织物芯阻燃带, 输送带覆盖层专用硫化剂等。

#### 1.1.2 试样改性方法

在橡胶块中心植入温敏材料, 然后, 利用硫化剂进行定量硫化修补后制成改性橡胶试样, 最后, 进行力学性能、锥形量热、程序升温以及综合热重分析等

试验, 试样的制备具体步骤如图 1 所示。

1.2 试验方法及过程

1.2.1 力学性能测试试验

试验采用 UTM5305H 型拉力测试试验机。参照 MT/T 914—2019 煤矿用织物芯输送带拉伸强度测定标准, 用冲压设备和哑铃状 1 型 13 mm×152 mm 裁刀将矿用织物芯输送带压制成型; 同时按照改性橡胶制备方法在试样上覆盖层正中心处植入与上覆盖层近乎等深的温敏材料后硫化封闭修补制成改性输送带试样。

将改性前后的输送带试样以 100 mL/min 的恒速进行连续拉伸, 直到试样断裂为止, 每组试样重复 3 次后取均值以减少试验误差。

1.2.2 锥形量热试验

锥形量热试验可以用来分析测试试样的燃烧特性<sup>[17-19]</sup>。试验采用 ISO 5660-1 型锥形量热仪, 分别采用原橡胶、仅硫化橡胶、改性橡胶 3 组试样展开测试试验。将 3 组试样依次放置在 45 kW/m<sup>2</sup> 的热辐射通量和标准空气气氛下, 并参照 ISO 554 的测试要求, 将试样调至(23±2)℃, 相对湿度 50% 的环境启动

试验并纪录点燃时间、热释放速率、总释放热量、CO 与 CO<sub>2</sub> 气体释放速率等试验参数。

1.2.3 指标气体测试试验

煤低温氧化测试系统可以用来分析试样在升温过程中产生的指标气体<sup>[20-22]</sup>。采用 ZRD-6 型煤低温氧化测试系统进行指标气体测试试验, 试验装置由供气系统、氧化升温测试系统、气体分析系统、数据采集及监测系统 4 部分构成, 具体的试验装置如图 2 所示。

供气系统主要由高纯空气和质量流量计组成; 氧化升温测试系统主要由 ZRD-6 型程序升温氧化炉和精度为 0.1℃ 的热电偶组成; 气体分析系统主要由金属干燥管(内装用于去除水分的生石灰和去除 CO<sub>2</sub> 的碱石灰)、GC-2000 型气相色谱仪以及测定体积分数上限为 5×10<sup>-4</sup> 的 NH<sub>3</sub> 检测仪组成, 此系统可以去除测试过程中的水分和 CO<sub>2</sub>, 实现精准测试 NH<sub>3</sub> 气体以及氧化产生的其他指标气体; 数据采集及监测系统主要由工作站和数据采集卡组成, 可以对测试样品的温度和气体分析系统检测出的气体体积分数等数据进行监测和收集存储。

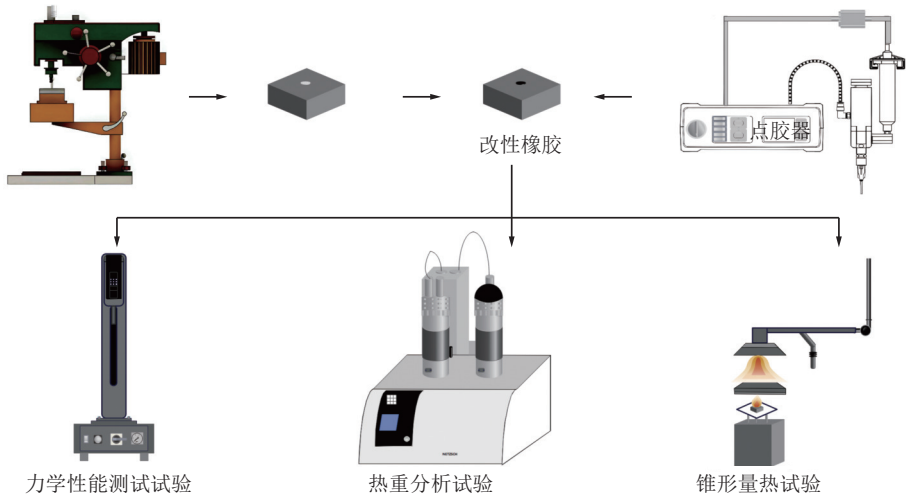


图 1 样品制备流程

Fig.1 Flow chart of sample preparation

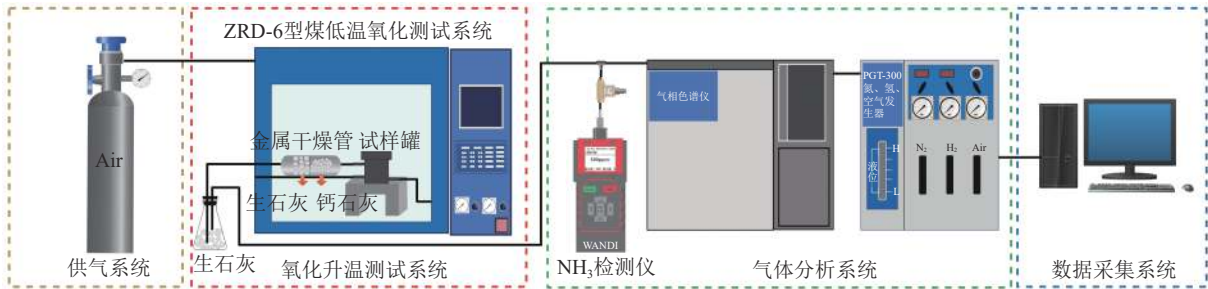


图 2 指标气体测试试验装置

Fig.2 Diagram of indicator gases test experiment



试验过程如下：首先，用空气对试验系统进行 30 min 的吹扫处理，清理系统内残留的干扰气体，减少试验误差从而保证试验的准确性；然后，将样品装入试样罐中，紧贴待测试样安装热电偶，同时在试样上、下均匀铺设石英砂来确保热电偶所测得样品温度准确稳定；最后，启动程序升温氧化装置按钮，并将产生的气体通过质量流量计均匀分流后分别通入  $\text{NH}_3$  检测仪和气相色谱仪中，通过数据采集系统收集检测到的气体体积分数变化规律。

#### 1.2.4 综合热重分析试验

热重分析试验可以用来分析试样在升温过程中的质量变化情况<sup>[23-25]</sup>。试验所用仪器为德国 NETZ-SCH STA-449-F5 型同步热分析仪。因热重试验试样规格限制，用冲压设备将改性橡胶加工成直径 4 mm，高度 3 mm，内装 5 mg 温敏材料的圆柱型橡胶试样，并用硫化剂修补后在室温下放置 12 h 以上充

分硫化后进行试验，圆柱型橡胶试样总质量约 30 mg。具体试验步骤为：在 50 mL/min 的空气流速下，以 5 °C/min 的升温速率从初始 30 °C 加热至 300 °C，同时记录在升温过程中的样品质量及热量变化情况。

#### 1.2.5 输送带滚筒摩擦试验

输送带滚筒摩擦试验可以用来模拟并记录矿用输送带在实际运行过程中与驱动滚筒异常打滑时的温度变化情况，试验所用仪器为 DKGM-03C 型输送带智能滚筒摩擦试验机。按照测试的规格标准用裁切设备依次加工制成 1 000 mm×150 mm×10 mm 规格的长方体型橡胶试样及同规格的织物芯阻燃带，并参考本文力学性能测试试验中改性试样的植入位置与深度，将温敏材料依次植入橡胶试样和织物芯阻燃带覆盖层中，最后用硫化剂分别对植入位置进行硫化封闭修补制成改性橡胶试样及改性输送带试样。本次试验装置如图 3 所示。

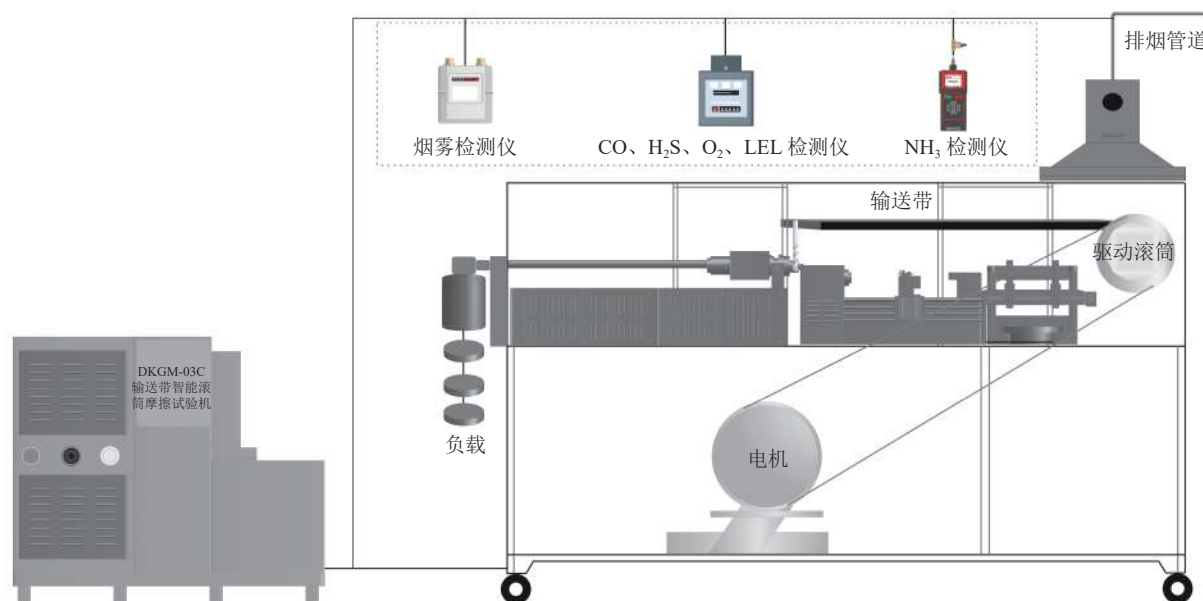


图 3 输送带滚筒摩擦试验装置

Fig.3 Diagram of conveyor belt roller friction test device

试验过程如下：首先，每次试验前将待测试样按照测试规定正确安装；其次，通过添加负载施加 343 N 张力并保持全程恒定，设置滚筒转速 200 r/min，维持系统内空气流速 2 m/s；最后，启动装置开关，通过安装在滚筒内部的热电偶来测量与之接触的试样表面温度，并由悬挂在装置顶部的气体监测装置对试样升温过程中产生的各类指标气体进行监测记录。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 力学性能测试试验结果分析

对原输送带和改性输送带试样各重复 3 次拉力

测试试验，获得改性前后输送带的力学性能变化差异，分析物理改性对输送带的结构功能和强度的影响。改性前后输送带试样的载荷-位移曲线如图 4 所示。

由图 4 可知，改性前的原输送带试样在拉伸断裂时的最大载荷均值为 5 979.25 N，拉伸强度均值为 38.97 MPa。改性后的改性输送带试样拉伸断裂时的最大载荷均值为 5 571.37 N，拉伸强度均值为 37.05 MPa。改性输送带试样的拉伸强度为原输送带试样的 95.07%，因此，对输送带覆盖层的改性处理并不会对其原结构强度产生较大影响。

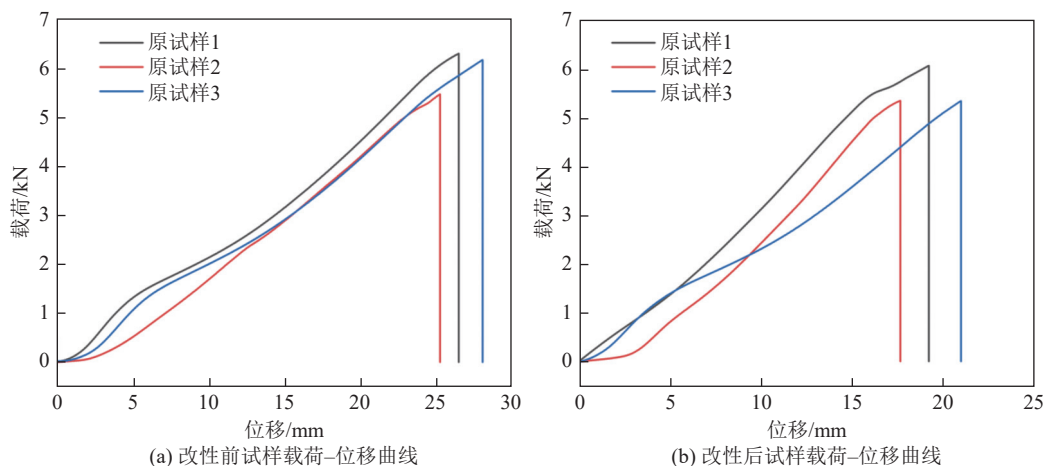


图 4 改性前后输送带的载荷-位移曲线比较

Fig.4 Load-displacement curves of conveyor belts before and after modification

## 2.2 锥形量热试验结果分析

温敏材料改性可能会对试样原有的化学性质产生一定的影响,为此,对原橡胶、仅硫化橡胶和改性橡胶三者进行锥形量热试验来比较改性前后的橡胶燃烧性能变化,从而分析改性方法对橡胶化学性质的影响。

### 2.2.1 热释放速率(HRR)和总释放热(THR)分析

试验测得的热释放速率曲线(HRR)和总热释放曲线(THR)分别如图 5a、图 5b 所示。

试验结果显示,原橡胶、仅硫化橡胶、改性橡胶 3 组试样的点燃时间分别为 19、17、18 s,三者的初始点燃时间基本一致。此外由图 5 可知,3 组试样的平均热释放速率和总释放热差别不大,改性橡胶的 HRR 全程一直低于同时刻原橡胶的 HRR,且最终 THR 低于原橡胶的 THR,这可能与改性橡胶内部所装温敏材料受热分解时吸热有关,从而在一定程度上减少了总热释放,降低了释热速率。

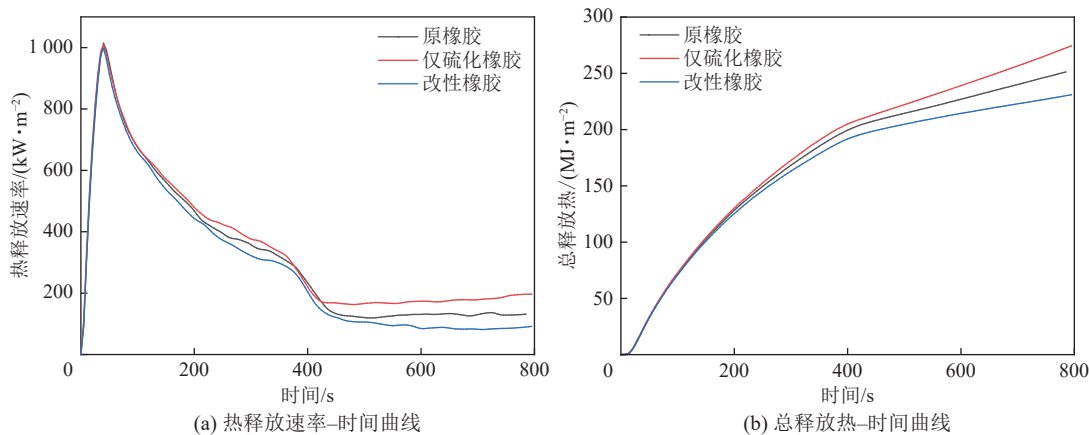


图 5 3 组试样的燃烧性能比较

Fig.5 Comparison charts of combustion performance of three groups of samples

### 2.2.2 CO、CO<sub>2</sub> 气体释放差异分析

矿井输送带火灾中生成的大量的 CO、CO<sub>2</sub> 气体同样会造成严重的矿井灾害事故,为此,分别测试 3 种橡胶,获得 3 组试样的 CO 与 CO<sub>2</sub> 气体释放速率如图 6 所示。

橡胶的主要成分是碳氢元素,发生燃烧时主要产生 CO 和 CO<sub>2</sub>,从图 6 可以看出 3 组试样的 CO 与 CO<sub>2</sub> 气体释放速率变化趋势一致,因此,通过改性不会对橡胶的基本组成及原有氧化产气造成明显的

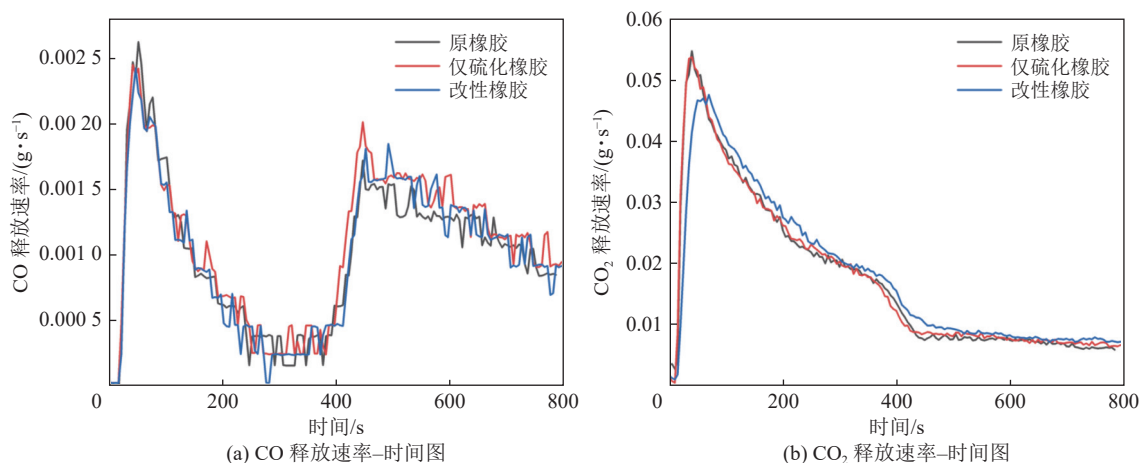
影响。

## 2.3 指标气体测试试验结果分析

### 2.3.1 矿井下煤氧化产生 CO 气体规律

由于 CO 气体反映煤层自然发火缓慢氧化阶段,是煤在氧化反应进程中较为敏感的气体产物,常用来监测煤层早期自然发火进程,因此对井下煤样在氧化升温过程中产生的 CO 气体体积分数变化规律进行分析。

本次试验依次称取 40 g 无烟煤、烟煤和褐

图 6 3 组试样的 CO 与 CO<sub>2</sub> 释放速率比较Fig.6 Comparison of CO and CO<sub>2</sub> release rates of three groups of samples

煤 3 种煤样, 设置升温速率 1 °C/min、气体流量 100 mL/min、升温区间 30 ~ 200 °C, 在标准空气气氛下进行程序升温氧化试验, 3 组煤样产生的 CO 体积分数随温度变化规律如图 7 所示。

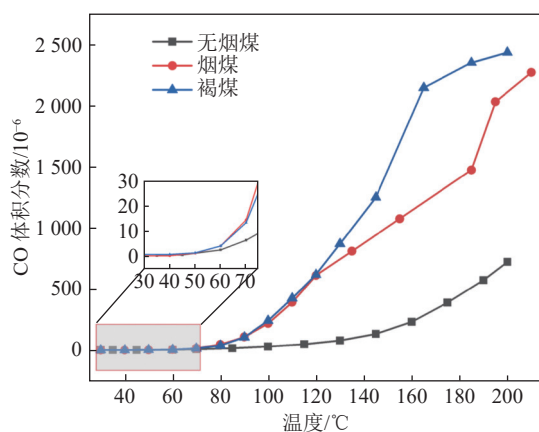


图 7 3 组煤样氧化产生 CO 气体规律

Fig.7 Rule of CO gas produced by oxidation of three groups of coal samples

从图 7 可以得知, 在 30 ~ 200 °C 温度内, 不同煤样氧化过程中产生的 CO 体积分数有所差异。同温度下褐煤产生的 CO 体积分数最高, 烟煤次之, 而无烟煤最低。3 组煤样产生 CO 的初始温度相差不大, 都在近 50 °C, 此后 CO 体积分数随着升温也逐渐稳定增长。试验结果表明煤在较低温度下即可氧化产生 CO 气体, 因此在输送带运输煤炭过程中由于机械传动产生热能的带体对煤炭的传热作用, 可能会加速煤炭氧化产气进程, 进而对利用 CO 气体预警输送带早期火灾产生较大干扰。

### 2.3.2 改性前试样产生指标气体规律

为了明确输送带覆盖层发生火灾时的早期预警边界温度以及硫化剂对指标气体的影响, 利用原

PVC 试样、原橡胶试样(PVG 试样)与仅硫化封胶试样进行程序升温氧化试验, 试验设置升温速率 1 °C/min、气体流量 100 mL/min、升温区间 30 ~ 200 °C, 3 组试样产生的气体体积分数随温度变化规律如图 8 所示。

从图 8 可以得知, PVC 塑料与 PVG 橡胶试样在温度达到近 110 °C 时都开始逐渐氧化产生 CO 气体, 随着温度升高气体体积分数也逐渐稳定增长, 当温度达到 140 °C 以后烷烃类气体 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 也开始逐渐产生, 气体体积分数随着温度增加也逐渐稳定增长, 因此, 可以选用 CO、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 作为输送带发生火灾的早期预警指标气体, 其产生的边界温度为 110 ~ 140 °C。由于 PVG 覆盖层是在 PVC 基础上加贴橡胶面, 即组成成分中包含 PVC, 且目前在煤矿井下使用更为广泛, 因此当确定 2 种材质在氧化升温过程中产气趋势近乎一致后, 后续试验仅选择 PVG 橡胶这一种材质作为温敏材料植入的载体以开展相关指标气体测试试验。

由图 8 还可知, CO 产生的体积分数随温度的变化较小, 尤其是在 140 °C 之前体积分数小于 2.4 × 10<sup>-5</sup> (低于矿井内 CO 报警值), 导致以 CO 作为指标气体时, 输送带温度至少要升至 140 °C 左右才开始报警。此外, 煤矿井下煤低温氧化也会产生 CO 和 CO<sub>2</sub> 气体<sup>[26-28]</sup>, 同时煤温超过 110 °C 之后也会产生 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 等烷烃类气体<sup>[29-31]</sup>。由于矿井输送带主要用于运输煤炭, 输送带由于机械传动产生的热量会加速紧贴于输送带上的煤炭氧化产生相同指标气体, 因此对利用指标气体预警输送带火灾发生发展产生了较大的干扰。

图 8 还阐明了当用硫化剂对橡胶进行硫化后, 其程序升温氧化产生气体的规律与原橡胶相比基本

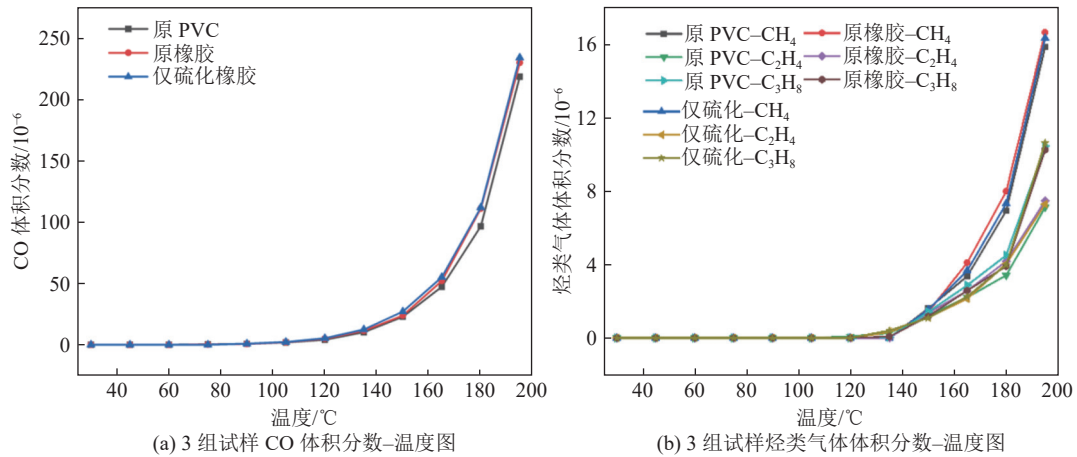


图 8 3 组试样总指标气体体积分数-温度图

Fig.8 Volume fraction-temperature diagrams of total indicator gases for three groups of samples

一致,这说明硫化剂主要成分与橡胶基本一致,对橡胶产生指标气体影响较小。

### 2.3.3 温敏材料受热释放指标气体规律

1) 温敏材料受热自然分解产气规律。称取 0.01 g 温敏材料,利用图 2 所示的试验装置对温敏材料进行不同升温速率及不同气体流量下的测试试验,得到温敏材料受热产气规律。具体结果如图 9 所示。

图 9a 显示出 1 °C/min 和 3 °C/min 升温速率下检测到 NH<sub>3</sub> 产生的初始温度分别为 53 °C 和 56 °C,说明升温速率的快速增加对温敏材料的分解初始温度影响不大,选用的温敏材料可以满足当摩擦时快速升温的需求。由图 9a 还可知,虽然升温速率对温敏材料的初始分解温度影响不大,但是对温敏材料分解速率和产生体积分数影响较大,升温速率越大, NH<sub>3</sub> 体积分数升高速度越快且存在超量程现象,这是因为快速升温致未充分反应的试样在热量积聚达到某一温度时大量分解产生 NH<sub>3</sub>,故产生 NH<sub>3</sub> 体积分数检测超限现象,这也说明选用的温敏材料当达

到一定的温度时,可以在短时间内迅速释放大量的气体,从而能够快速检测到气体体积分数的变化,进而实现及时预警。

由图 9b 可知,在 50、100、150、200 mL/min 流量下检测到 NH<sub>3</sub> 产生的初始温度分别为 54、53、51、50 °C,可以看出增大气体流量时,可以更迅速地将试验系统内试样分解产生的 NH<sub>3</sub> 气体吹入检测仪中,致使检测到 NH<sub>3</sub> 时的初始温度有所提前,但整体差距不大,因此,可以看出气体流速对指标气体产生的初始温度影响很小,也就是当矿井输送带中温敏材料分解产生 NH<sub>3</sub> 气体时,风流对其影响较小,保障预警的精准性。

因此,选用的温敏材料初始分解温度较低,且随着温度的升高分解速率极速增大,有利于监测设备快速检测到体积分数变化,从而快速发出预警。此外,初始分解温度基本不受矿井风流的影响,从而能够保证检测精度高,很好地满足矿井输送带火灾预警的需求。

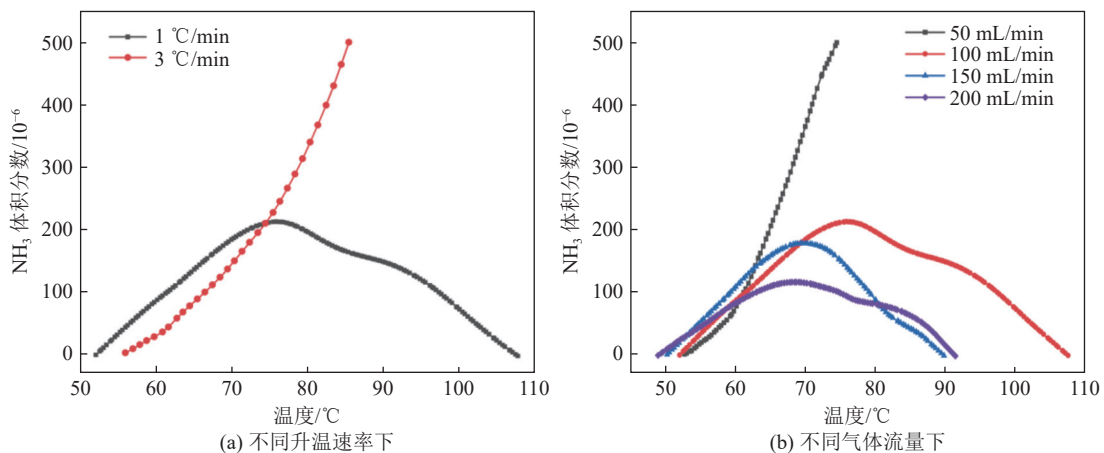


图 9 不同试验条件下 NH<sub>3</sub> 体积分数-温度图

Fig.9 Volume fraction-temperature diagrams of NH<sub>3</sub> under different experimental conditions



此外综合图 9 不同升温速率及气体流量下的  $\text{NH}_3$  体积分数变化趋势,考虑到在  $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  升温速率和  $100\text{ mL}/\text{min}$  气体流量下时检测到  $\text{NH}_3$  释放的温度区间最广,为充分探究  $\text{NH}_3$  在升温过程的体积分数变化情况决定统一所有指标气体测试试验的升温速率为  $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ,气体流量为  $100\text{ mL}/\text{min}$ 。

2) 硫化封闭对温敏材料分解产气影响。硫化封闭后温敏材料分解需要克服导热(橡胶是热的不良导体)和破孔 2 方面的障碍,需要明确这 2 方面对温敏材料分解产气的影响,为此,将温敏材料植入橡胶内,并分别进行敞孔、封闭以及不同植入位置试验。试验结果如图 10 所示。

由图 10a 可以看出敞孔未硫化试样检测到  $\text{NH}_3$  的初始温度为  $58\text{ }^\circ\text{C}$ ,此后温敏材料随温度的升高逐渐加速分解, $\text{NH}_3$  体积分数也随之逐渐升高;此外  $\text{NH}_3$

的初始释放温度与图 9 中温敏材料在自然状态下分解产生  $\text{NH}_3$  的温度相比略微升高,这说明橡胶导热性对温敏材料分解具有一定的影响,但是整体来看影响不大,这一结果也可以通过图 10b 得到证实。

由图 10a 还可知,硫化封闭改性试样检测到  $\text{NH}_3$  的初始产气温度为  $77\text{ }^\circ\text{C}$ ,与敞孔未硫化封胶试样相比初始产气温度延后  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,但是产生指标气体的体积分数极速上升。这是由于输送带覆盖层硫化剂的封堵作用,导致早期温敏材料分解产生的  $\text{NH}_3$  一直在橡胶内部积累,并没有及时逸出。当  $\text{NH}_3$  在内部积累到一定程度,导致内部压力骤增,同时超过硫化剂的最佳使用温度上限  $80\text{ }^\circ\text{C}$  时,硫化剂的黏结性能略有下降,两者共同作用导致内部积累的  $\text{NH}_3$  瞬间释放而出,故改性橡胶试样产生的  $\text{NH}_3$  释放速率相比于未硫化封胶试样显著增加。

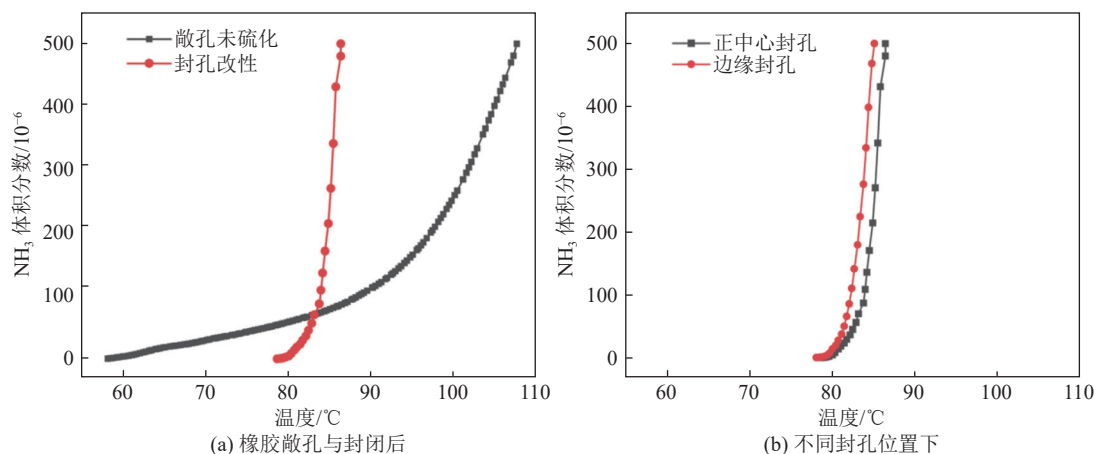


图 10 不同试验参数下的  $\text{NH}_3$  体积分数-温度图

Fig.10 Volume fraction-temperature diagrams of  $\text{NH}_3$  under different experimental parameters

### 2.3.4 改性前后橡胶产生指标气体规律

将改性后的试样进行程序升温氧化试验,对比改性前后产生指标气体的差异,进而建立温敏材料改性输送带的火灾早期预警指标体系,试验结果如图 11 所示。

对比图 8 与图 11a 可以得出,改性前橡胶和改性橡胶在达到近  $110\text{ }^\circ\text{C}$  时都开始逐渐产生指标气体  $\text{CO}$ ,  $140\text{ }^\circ\text{C}$  以后,改性前橡胶和改性橡胶都开始检测到烷烃类指标气体  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$  及  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,以上指标气体体积分数随着温度升高逐渐稳定增长;而相比于改性前橡胶,改性橡胶在  $70\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$  还可以检测到  $\text{NH}_3$  的瞬间释放,其气体体积分数在短时间迅速增长;相比于改性前橡胶,改性橡胶在受热时产生的  $\text{NH}_3$  的初始温度明显提前,且释放的气体体积分数更高;同时图 11b 所示的  $\text{CO}$  与  $\text{NH}_3$  生成速率对比

可知,改性后产生的新指标气体  $\text{NH}_3$  的释放速率大大加快,故气体检测仪可以更加灵敏快速地做出检测,同时指标气体的迅速释放也可以避免井下风流对指标气体体积分数的稀释影响,杜绝了风流中指标气体体积分数过低影响监测预警从而导致的预警滞后问题。

综合来看,温敏材料分解产生的  $\text{NH}_3$  气体可以很好区别于煤矿开采及运输过程中产生的其他指标气体,此外改性橡胶最早产生指标气体的初始温度比原橡胶提前了  $30\text{ }^\circ\text{C}$  左右,大大提前了输送带火灾预警气体的初始产气温度,且抗干扰能力强,提高了预警的精准性。

### 2.4 综合热重试验结果分析

利用综合热重分析仪对改性前后的橡胶进行测试,通过质量和热量的变化来验证改性方法的理论

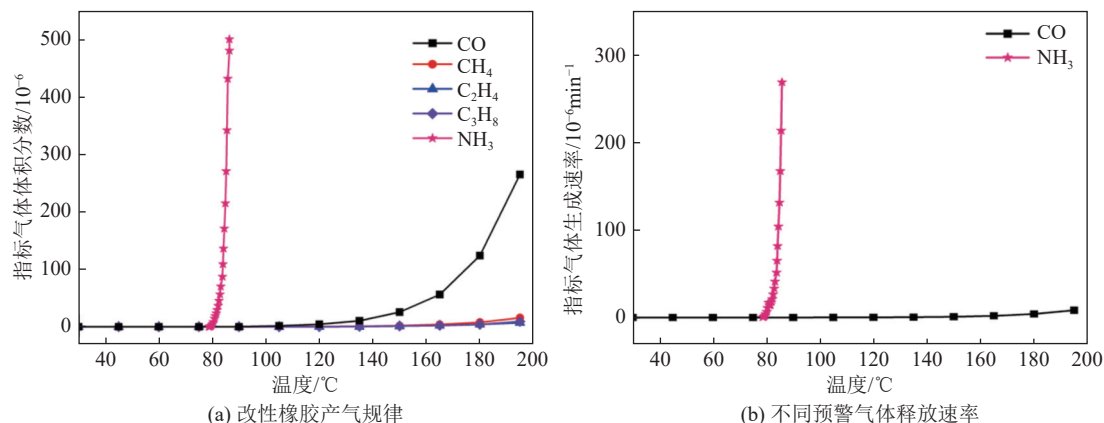


图 11 改性后不同指标气体体积分数及生成速率比较

Fig.11 Comparison charts of volume fractions and generation rates of different indicator gases after modification

可行性,试验结果如图 12 所示。

由图 12a 可知,温敏材料的起始分解温度为 57 °C (这与图 9 所示的温敏材料初始分解温度基本一致),且随着温度的升高,温敏材料的失重速率和吸热速率快速增加,此现象说明温敏材料在加快分解产生指标气体。

图 12b 得出改性橡胶试样开始失重的起始温度

为 80 °C,此后橡胶试样失重速率和吸热速率随温升不断增加,当达到 139 °C 时微分热重曲线峰值与图 12d 中相应差式扫描量热曲线峰值正对应,此时橡胶试样分解达到最大速率。在 80 ~ 160 °C 内橡胶试样共计失重 9.65%,此时主要是橡胶内部温敏材料受热分解失重所致;160 °C 后橡胶继续失重,此阶段曲线无明显峰值,说明橡胶并未发生剧烈氧化反应,

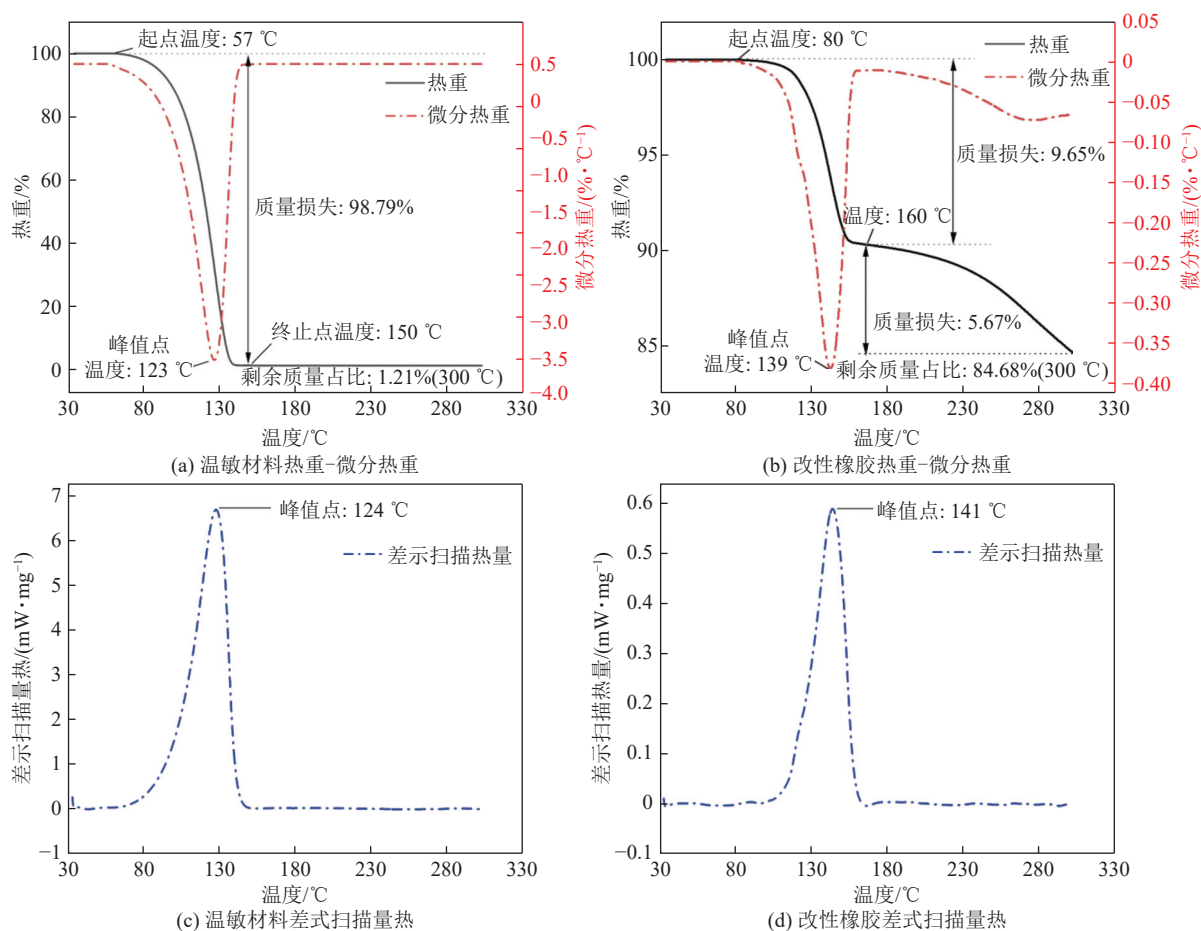


图 12 组试样的热重-微分热重-差示扫描量热对比

Fig.12 Comparison of TG-DTG-DSC for two groups of samples

由于煤矿开采过程中也会产生 CO 等干扰气体,因此通过监测烟雾更有利于预警输送带火灾,但是 160~300 ℃ 内橡胶反应较为缓慢,很难产生大量烟雾,因此,以烟雾为预警指标时,橡胶温度已经至少超过 300 ℃。

结合图 9、图 10 及图 12 可以发现,通过综合热重试验得出的温敏材料和改性试样在受热产气时的初始温度及产气速率变化规律与指标气体测试试验系统得到  $\text{NH}_3$  的变化趋势一致,从而可以从理论上验证

改性输送带覆盖层的可行性和测试结果的准确性。

## 2.5 输送带滚筒摩擦试验结果分析

为了从实际工程应用角度来验证改性输送带在异常升温阶段能否正常释放  $\text{NH}_3$  气体,从而实现输送带火灾早期指标气体预警的精准性和及时性。利用原橡胶和改性橡胶试样组、原输送带和改性输送带试样组分别进行滚筒摩擦试验。2 组试样和驱动滚筒摩擦过程中的温度变化及全程气体产出规律分别如图 13 和图 14 所示。

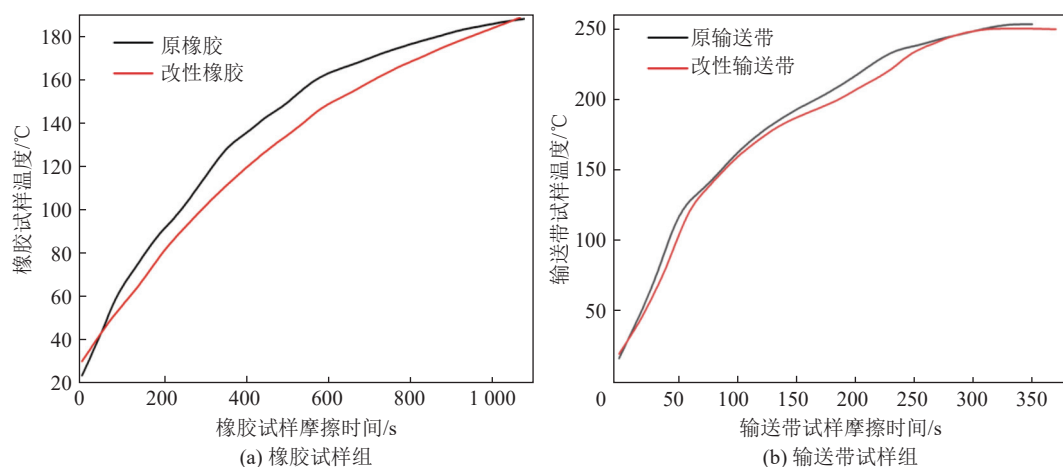


图 13 2 组试样温度-摩擦时间曲线图

Fig.13 Temperature-friction time curves of two groups of samples

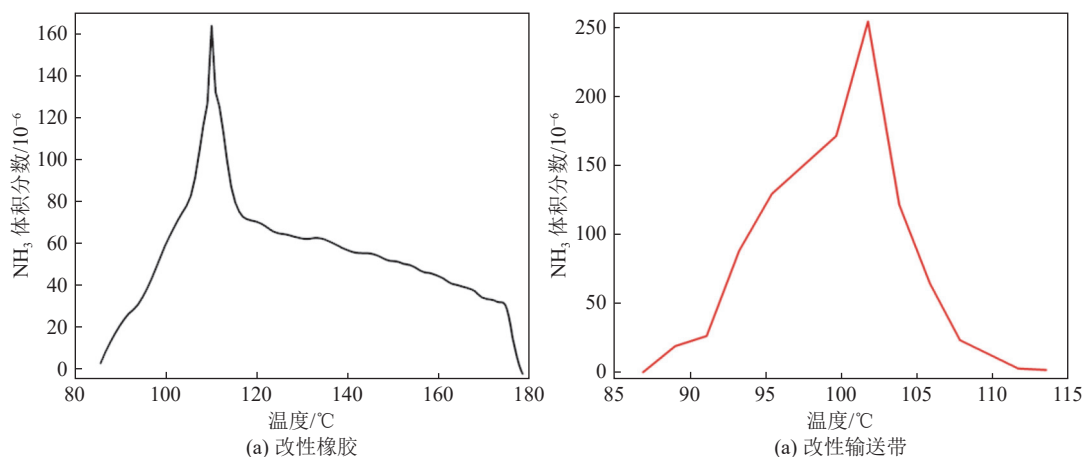


图 14 两组改性试样的  $\text{NH}_3$  体积分数-温度图

Fig.14  $\text{NH}_3$  volume fraction-temperature diagram of two groups of modified samples

由图 13a 易知,2 组橡胶试样在与滚筒摩擦过程中温度逐渐稳定增加。原橡胶试样在摩擦 1 070 s 后达到最高温度 189 ℃ 并发生熔断现象;而改性橡胶在摩擦 1 080 s 后发生熔断,此时达到最高温度 188 ℃。

由图 13b 可知,2 组输送带试样在与滚筒摩擦过程中温度也不断升高。原输送带和改性输送带试样分别在摩擦 350 s 和 370 s 后发生熔断,此时对应的

最高温度分别为 252 ℃ 和 249 ℃。

综合图 13 可知,橡胶试样组和输送带试样组由于组成材质不同导致摩擦因数存在差异,因此相同条件下与滚筒摩擦时达到熔断的时间及最高温度存在显著差异,即与滚筒发生打滑时的升温速率存在显著差异。同时又可以观察到,2 组试样在改性前后分别与滚筒摩擦达到熔断时的摩擦时间和最高温度

都近乎一致,这一现象也可以再次验证利用物理改性方法对输送带的原有结构强度影响不大。

图 14 反映出改性橡胶试样和改性输送带试样与滚筒打滑升温过程中的  $\text{NH}_3$  体积分数变化趋势,由于模拟实际应用场景下的空间、风流及输送带实际升温速率等因素与程序升温氧化装置下的指标气体测试试验存在较大差异,因此试样内部温敏材料在升温过程中分解释放的  $\text{NH}_3$  体积分数存在一定差异。

如图 14a 所示,改性橡胶试样在  $86\text{ }^\circ\text{C}$  时开始逐渐产生  $\text{NH}_3$ ,当达到  $110\text{ }^\circ\text{C}$  时  $\text{NH}_3$  达到最大体积分数  $1.64\times 10^{-4}$ ,此后气体体积分数逐渐降低,在  $178\text{ }^\circ\text{C}$  时试样内部的温敏物质消耗殆尽,相应的  $\text{NH}_3$  体积分数降为 0;由图 14b 可知,改性输送带试样在  $87\text{ }^\circ\text{C}$  时开始检测到  $\text{NH}_3$  产生,近  $102\text{ }^\circ\text{C}$  时  $\text{NH}_3$  达到最大体积分数  $2.54\times 10^{-4}$ ,在  $113\text{ }^\circ\text{C}$  后  $\text{NH}_3$  体积分数为 0。

以上 2 组试样产生  $\text{NH}_3$  体积分数的差异可能与温敏材料植入深度有关。当温敏材料植入橡胶试样时,植入深度近乎与橡胶试样厚度一致,而温敏植入同厚度的矿用输送带时,为确保物理植入方法不影响输送带的实际承载骨架-带芯的强度时,仅对输送带表面的覆盖层进行物理植入。因此当输送带与滚筒摩擦至其表面覆盖层完全磨损消耗后就使得温敏材料失去载体从而不再分解产生  $\text{NH}_3$ ,这也使得相比于改性橡胶试样,改性输送带试样产气的温度区间更为集中,因此也利于井下管理人员通过观察  $\text{NH}_3$  体积分数变化情况来判断输送带火灾发展至何种温度阶段,从而采取恰当的处置措施。

由图 14 又可知,虽然 2 组试样与滚筒发生打滑时的升温速率存在显著差异,但是产生  $\text{NH}_3$  时的初始温度近乎相同,且升温速率急速增大时, $\text{NH}_3$  的峰值体积分数相应增加。这一现象与图 9a 中不同升温速率下的温敏材料受热产气规律一致,从而可以验证试验的准确性,同时再次说明选取的温敏材料能够满足摩擦时快速升温产气的需求,做到及时预警。

此外,用实际矿用输送带模拟滚筒打滑试验时对输送带覆盖层单孔植入的温敏材料量为毫克级别;按照文中植入标准对井下输送带覆盖层植入的温敏材料经受热分解产生的  $\text{NH}_3$  体积分数也在井下规定的安全标准范围内,因此安全性足以得到保证。

值得注意的是,在输送带滚筒摩擦试验装置下检测到 2 组试样在升温过程中产生的  $\text{CO}$  体积分数

均偏低,且全程体积分数基本无明显变化,这一现象与程序升温试验系统下的指标气体测试试验结果相差较大。因此考虑到实际工作环境等因素,利用监测  $\text{NH}_3$  来预警输送带早期火灾更具精准性。

综上,基于温敏材料物理改性输送带覆盖层的火灾预警方法具有实际应用的可行性,能够满足及时、精准预警输送带早期火灾。

### 3 结 论

1) 现有矿井输送带火灾预警存在预警时间滞后、预警不精准的问题,容易导致重大安全事故的发生。为此,本文提出采用温敏材料改性输送带的新指标气体预警早期输送带火灾方法,并对输送带进行了温敏改性,通过试验验证了此改性方法对输送带原有结构强度影响不大且不会增加火灾发生的风险。

2) 通过程序升温氧化试验得出改性后的橡胶在  $70\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$  时可以迅速释放大量的  $\text{NH}_3$ ,相比于原橡胶最早释放的指标气体  $\text{CO}$  的初始温度提前近  $30\text{ }^\circ\text{C}$ ,实现了输送带火灾预警的及时性。

3) 与改性前橡胶氧化过程中产生的原有指标气体相比,改性后橡胶产生  $\text{NH}_3$  的速率和体积分数极速增加,且不受风流的影响,大大提高了监测的精准性。

4) 通过输送带滚筒摩擦试验验证了温敏材料物理改性输送带覆盖层的实际可行性,使得实际现场工程应用方面得以保证。

5) 综合来看,改性后的输送带在温度较低时就实现了精准预警,及时避免输送带火灾的发生,对矿井安全生产具有重大意义。

### 参考文献(References):

- [1] BAO H M, ZHANG R X. Study on optimization of coal truck flow in open-pit mine[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020(1): 8848140.
- [2] ZHANG D, LIU M X, WEN H, et al. Use of coupled TG-FTIR and Py-GC/MS to study combustion characteristics of conveyor belts in coal mines[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 148(11): 4779-4789.
- [3] 郭军, 刘荫, 金永飞, 等. 矿井胶带火灾巷道环境多参数时空演化规律[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(1): 21-27.  
GUO Jun, LIU Yin, JIN Yongfei, et al. Spatiotemporal evolution law of multiple parameters of roadway environment for rubber-belt fire in mine[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2019, 39(1): 21-27.
- [4] 岳宁芳, 蔡国斌, 高文静, 等. 矿井胶带蔓延火灾的细水雾抑制影响因素研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(4): 92-97.



- YUE Ningfang, CAI Guobin, GAO Wenjing, et al. Research on influencing factors of water mist suppression for belt spreading fire in mine[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(4): 92–97.
- [5] 张铎, 刘茂霞, 呼少平, 等. 煤矿运输胶带热解动力学参数研究[J]. *矿业安全与环保*, 2023, 50(2): 52–58.
- ZHANG Duo, LIU Maoxia, HU Shaoping, et al. Study on pyrolysis kinetic parameters of coal mine transport belt[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2023, 50(2): 52–58.
- [6] YUAN L M, SMITH A C. Numerical modeling of water spray suppression of conveyor belt fires in a large-scale tunnel[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 95: 93–101.
- [7] LITTON C D, PERERA I E, HARTEIS S P, et al. Some relevant parameters for assessing fire hazards of combustible mine materials using laboratory scale experiments[J]. *Fuel*, 2018, 218: 306–315.
- [8] LI L, SI J H, LI Z X. Characteristics of the spatial and temporal evolution of the environmental parameters for belt fire in underground coal mine roadway[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 49: 103346.
- [9] 蒋时才. 矿用运输胶带摩擦升温及其火灾气体发生规律的研究[J]. *煤矿安全*, 1990, 21(6): 12–18.
- JIANG Shicai. Study on the friction heating of mining transport tapes and its fire gas generation pattern[J]. *Safety in Coal Mines*, 1990, 21(6): 12–18.
- [10] 羽田博亮, 章远荣, 朱林. 井下燃烧物的燃烧气体研究[J]. *煤矿安全*, 1991, 22(3): 53–61, 28.
- HANEDA H, ZHANG Yuanrong, ZHU Lin. Research on combustion gas of underground combustor[J]. *Safety in Coal Mines*, 1991, 22(3): 53–61, 28.
- [11] 傅培舫. 实际巷道火灾过程热物理参数变化规律与计算机仿真的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2002.
- FU Peifang. Study on variation law of thermophysical parameters and computer simulation in actual roadway fire process[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2002.
- [12] 黄刚. 煤矿井下胶带火灾烟气流动及分布规律研究[D]. 廊坊: 华北科技学院, 2018.
- HUANG Gang. Research on smoke flow and distribution of conveyor belt fire in coal mine[D]. Langfang: North China Institute of Science and Technology, 2018.
- [13] 初昊. 煤矿胶带热解产物生成规律分析[J]. *煤矿现代化*, 2023, 32(5): 91–94, 90.
- CHU Hao. Analysis of the pyrolysis product generation law of coal mine belt[J]. *Coal Mine Modernization*, 2023, 32(5): 91–94, 90.
- [14] 王伟. 煤矿输送带热解及燃烧特性研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2023.
- WANG Wei. Pyrolysis and combustion characteristics of coal mine conveyor belt[D]. Beijing: Chinese Institute of Coal Science, 2023.
- [15] 王春华, 丁仁政, 李贵轩, 等. 截齿截割煤体变形破坏过程的红外热像研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(3): 449–454.
- WANG Chunhua, DING Renzheng, LI Guixuan, et al. Research on infrared hot image in deformation and destruction course under pick cutting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(3): 449–454.
- [16] 杨广文, 艾兴. 大雁二矿 250 综采工作面 CO 来源的分析及治理[J]. *煤矿安全*, 2003, 34(10): 41–43.
- YANG Guangwen, AI Xing. Analysis and control for CO source of fully-mechanized winning coal faces in No. 2 Dayan coal mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2003, 34(10): 41–43.
- [17] WANG X H, CHEN Q P, ZHOU T N, et al. In-depth analysis of burning process of binary blended fuel pool fires based on liquid–vapor equilibria[J]. *Fuel*, 2019, 256: 115918.
- [18] DING Y M, ZHANG W L, ZHANG X T, et al. Pyrolysis and combustion behavior study of PMMA waste from micro-scale to bench-scale experiments[J]. *Fuel*, 2022, 319: 123717.
- [19] CHEN Y G, HE H Z, LIU Z Q. Numerical modeling of flexible polyurethane foam combustion under two ignition modes[J]. *Fuel*, 2022, 309: 122204.
- [20] 秦波涛, 仲晓星, 王德明, 等. 煤自燃过程特性及防治技术研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 66–99.
- QIN Botao, ZHONG Xiaoxing, WANG Deming, et al. Research progress of coal spontaneous combustion process characteristics and prevention technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 66–99.
- [21] ZHAO J W, WANG W C, FU P, et al. Evaluation of the spontaneous combustion of soaked coal based on a temperature-programmed test system and in situ FTIR[J]. *Fuel*, 2021, 294: 120583.
- [22] CHEN J C, LI L, JIANG D Y, et al. Experimental study on the spatial and temporal variations of temperature and indicator gases during coal spontaneous combustion[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2021, 39(1): 354–366.
- [23] 张婉妮, 舒盼, 刘春辉, 等. 乙二醇四乙酸微胶囊阻化煤自燃性能研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(8): 108–117.
- ZHANG Yanni, SHU Pan, LIU Chunhui, et al. Study on inhibition of coal spontaneous combustion by ethylenedia mine tetraacetic acid microcapsule[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(8): 108–117.
- [24] 张玉涛, 杨杰, 李亚清, 等. 煤自燃特征温度与微观结构变化及关联性分析[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(4): 80–87.
- ZHANG Yutao, YANG Jie, LI Yaqing, et al. Correlation analysis between characteristic temperature and microstructure of coal spontaneous combustion[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(4): 80–87.
- [25] 王小令, 王绍清, 陈昊, 等. 不同镜惰比低阶煤燃烧特性及动力学分析[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(9): 302–309.
- WANG Xiaoling, WANG Shaoqing, CHEN Hao, et al. The combustion characteristics and kinetic analysis of low-rank coals with

- different vitrinite/inertinite ratio[J]. [Coal Science and Technology](#), 2023, 51(9): 302–309.
- [ 26 ] 肖旸, 王振平, 马砺, 等. 煤自燃指标气体与特征温度的对应关系研究[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(6): 47–51.
- XIAO Yang, WANG Zhenping, MA Li, et al. Research on correspondence relationship between coal spontaneous combustion index gas and feature temperature[J]. [Coal Science and Technology](#), 2008, 36(6): 47–51.
- [ 27 ] 陆浩, 赵亚东, 方中喜. 基于变氧条件的补连塔煤矿褐煤自燃发火规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(S2): 152–158.
- LU Hao, ZHAO Yadong, FANG Zhongxi. Study on spontaneous ignition of lignite in Bulianta Coal Mine based on various oxygen content[J]. [Coal Science and Technology](#), 2021, 49(S2): 152–158.
- [ 28 ] LU H, LI J L, LU W, et al. Variation laws of CO<sub>2</sub>/CO and influence of key active groups on it during low-temperature oxidation of coal[J]. [Fuel](#), 2023, 339: 127415.
- [ 29 ] 梁运涛. 煤炭自然发火预测预报的气体指标法[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(6): 5–8.
- LIANG Yuntao. Gas index method to predict coal spontaneous combustion[J]. [Coal Science and Technology](#), 2008, 36(6): 5–8.
- [ 30 ] LI J L, LU W, KONG B, et al. Mechanism of gas generation during low-temperature oxidation of coal and model compounds[J]. [Energy & Fuels](#), 2019, 33(2): 1527–1539.
- [ 31 ] MIAO G D, LI Z H, YANG J J, et al. Microstructure evolution and higher-molecular-weight gas emission during the low temperature oxidation of coal[J]. [Energy](#), 2023, 282: 128424.