

# 改性示踪阻化液的渗润-阻化性能研究\*

高志新<sup>1</sup>, 徐效栋<sup>1</sup>, 陈玉<sup>1</sup>, 李文林<sup>2</sup>, 孙路路<sup>2</sup>

(1.信发集团呼图壁县东沟煤炭有限责任公司, 新疆昌吉回族自治州 831216;

2.山东科技大学安全与环境工程学院, 山东青岛市 266590)

**摘要:**为解决阻化剂防火技术在使用过程中阻化材料渗透性差、渗流范围难以监测等技术难题,在研究的阻化材料中添加具有渗润作用及荧光示踪作用的罗丹明B。通过接触角测定试验、真三轴煤体渗流试验、热重分析试验,对增润-阻化材料进行了渗润性能和阻化性能的相关测定。研究发现:添加罗丹明B可提高原有阻化液的渗润性能,并且仍具有优良的阻化性能。当罗丹明B添加量在0.1‰时,其渗润、阻化性能最优,接触角相较于未经处理的煤样降低了40.56°,渗透率提高70%左右,干裂温度提升80.13℃,着火温度提高40.2℃。研究结果对渗润范围的快速表征及原位阻化工艺的发展具有积极的促进作用。

**关键词:**改性示踪阻化液;阻化机理;渗润性能;罗丹明B;遗煤自燃

**中图分类号:**TD752.2 **文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2763(2024)10-0000-07

## 0 引言

近年来,我国煤自燃事故成为威胁煤层开采的重大灾害之一,不仅会造成严重的经济损失,还会造成井下人员中毒、引起瓦斯、煤尘爆炸、设备损坏和煤炭资源损失等问题<sup>[1-2]</sup>。因此,有针对性地开展防灭火工作已成为目前防治煤自燃事故的关键。目前,抑制煤炭自燃的方法主要有灌浆、阻化液、注惰、三相泡沫和凝胶防灭火等<sup>[3]</sup>。阻化液防灭火是将阻化剂溶液喷洒在采空区煤炭的表面上来防治煤炭发火<sup>[4]</sup>,该方法主要对遗煤表面进行治理,而通过向未开采煤体预注阻化液是一种深部煤体阻化抑燃的有效手段。

我国煤层渗透率普遍较差<sup>[5]</sup>,阻化剂无法自发均匀地分布在煤的层理、节理以及微小的孔隙中,阻化率较低<sup>[6]</sup>,起不到良好的抑制作用,达不到预期的阻化防火效果。由于增润-阻化材料可以使煤发生改性,延长煤的自然发火期,改变煤的氧化特性,对煤起到冷却、

覆盖、抑制自燃的作用,且能提高煤与阻化剂表面的亲水性,因此,研究增润作用良好、阻化效果优良的增润-阻化材料便成为了重要的研究方向。

在煤层注液过程中,阻化液的润湿性是影响煤层注液的关键性因素,近年来,为了提高煤层注液的效果,国内外学者研究了诸如在液体中加入表面活性剂<sup>[7]</sup>、调节pH<sup>[8]</sup>以及添加纳米润湿反转材料<sup>[9]</sup>以改善煤与水的界面状态<sup>[10]</sup>的方法,增强液体对煤的亲和能力,提高煤层注液的效果。传统的润湿材料注液-风干后,煤层自燃危险性可能增大。而新型的增润-阻化材料可以将增润材料的渗润性能与阻化材料阻化性能相结合,一方面润湿煤体增强渗透性,另一方面又能发挥阻化效果,减少煤层自燃的风险,实现煤体的原位阻化,对于发展和完善煤矿防灭火技术基础理论体系具有重要的现实意义。

煤层钻孔注水的效果由注水后的润湿范围体现,但煤层中注水的流动范围难以量化测定。目前检测润湿范围的常用方法是在注水孔周围取煤样,将其在实验室中做含水率测定<sup>[11]</sup>,通过其含水量确定其润湿范围。在石油领域,有研究将化学示踪剂<sup>[12]</sup>、放射性同位素<sup>[13]</sup>、荧光物质<sup>[14]</sup>等作为示踪剂运用到井间示踪技术,其操作简易,检测灵敏,应用较广泛。而石油在砂岩储层孔隙中的流动,与液体在煤孔隙中的流动具有一定的相似性。因此,本文选用罗丹明B荧光示踪剂进行试验研究,探究在增润-阻化材料中加入罗丹明B后的增润、阻化效果。

## 1 试验研究

为了得到最优的增润-阻化材料配比,本文将在

\* 收稿日期:2023-11-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52274212);山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME108)。

作者简介:高志新(1986—),男,河北衡水人,中级工程师,主要从事矿山热动力灾害防治工作,E-mail:1003951597@qq.com。

通信作者:李文林(2000—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事矿山热动力灾害防治方面的研究,E-mail:wenlin0722@163.com。

优选的增润复配阻化剂中加入荧光示踪剂罗丹明 B, 探究加入荧光示踪剂罗丹明 B 后增润-阻化材料的效果, 并揭示其作用机理。首先进行加入罗丹明 B 的可注性检验, 通过接触角试验, 检验加入罗丹明 B 的润湿性; 而后进行渗透性能监测, 通过真三轴煤体渗流测试仪, 检验加入罗丹明 B 的渗流特性改变; 最后再进行阻化性能监测, 通过热重分析试验, 最终确定试验加入罗丹明 B 的可行性。试验过程如图 1 所示。

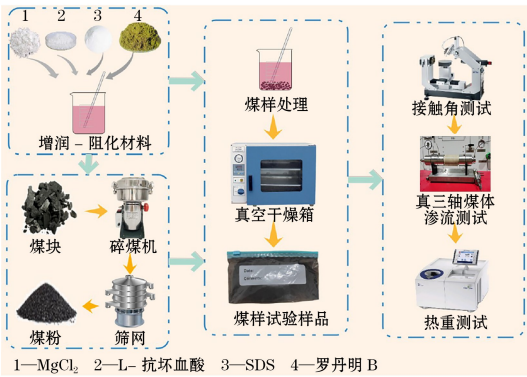


图 1 试验流程

Fig.1 Experimental flow

## 1.1 复配阻化材料的制备

基于  $MgCl_2$  物理阻化剂、L-抗坏血酸(以下简称 VC)化学阻化剂和十二烷基硫酸钠(以下简称 SDS)阴离子表面活性剂以及罗丹明 B 阳离子表面活性剂进行复配。具体试验试剂见表 1。

表 1 复配阻化液中添加的试剂的种类

Table 1 Types of reagents added to the compound inhibitor

| 试剂名称    | 分子式                    | 类别                 |
|---------|------------------------|--------------------|
| 无水氯化镁   | $MgCl_2$               | 物理阻化剂              |
| L-抗坏血酸  | $C_6H_8O_6$            | 化学阻化剂              |
| 十二烷基硫酸钠 | $C_{12}H_{25}SO_4Na$   | 阴离子表面活性剂           |
| 罗丹明 B   | $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ | 荧光示踪剂/<br>阳离子表面活性剂 |

具体的制备工艺为: 使用分析天平称取 VC、 $MgCl_2$ 、SDS 粉末缓慢加入盛有蒸馏水的烧杯中, 然后充分搅拌, 以确保各个药品均匀溶解在蒸馏水中, 重复上述流程共制备 6 组溶液, 而后使用分析天平称取 5 组不同量的罗丹明 B 依次加入上述 5 组溶液中, 充分搅拌, 另设置水对照试验组, 具体配方及编号见表 2。

表 2 不同混合溶液的配方

Table 2 Formulas for different mixed solutions

| 组别  | 混合物溶配置 | A                                  | B           | 蒸馏水  |
|-----|--------|------------------------------------|-------------|------|
| 组 1 | —      | —                                  | —           | 90 g |
| 组 2 | A      | 2.5 g VC+7.5 g $MgCl_2$ +25 mg SDS | —           | 90 g |
| 组 3 | A+B    | 2.5 g VC+7.5 g $MgCl_2$ +25 mg SDS | 罗丹明 B 3 mg  | 90 g |
| 组 4 | A+B    | 2.5 g VC+7.5 g $MgCl_2$ +25 mg SDS | 罗丹明 B 5 mg  | 90 g |
| 组 5 | A+B    | 2.5 g VC+7.5 g $MgCl_2$ +25 mg SDS | 罗丹明 B 10 mg | 90 g |
| 组 6 | A+B    | 2.5 g VC+7.5 g $MgCl_2$ +25 mg SDS | 罗丹明 B 15 mg | 90 g |
| 组 7 | A+B    | 2.5 g VC+7.5 g $MgCl_2$ +25 mg SDS | 罗丹明 B 30 mg | 90 g |

## 1.2 接触角试验

为了初步探究不同浓度罗丹明 B 混合溶液对煤的润湿性的影响, 需要得到上述各溶液的接触角值, 因此, 进行接触角测定试验。具体的试验操作如下: 首先, 选取经过干燥处理的 200 目煤粉, 并在  $60^\circ C$  条件下用真空干燥箱将煤粉干燥 5 h, 将煤粉中水分除去; 而后称取 500 mg 干燥后煤粉放入粉末压片机中, 在 12 MPa 的压力下, 压制 3 min 后取出并用橡胶球吹掉煤饼上多余的煤粉, 使煤饼表面光滑平整, 重复上述操作, 依次制得 7 个煤饼; 然后借助接触角测量仪, 将煤饼与不同配方溶液接触的过程拍摄下来, 观察其在一定的时间范围内液滴和接触角值的变化情况。为避免试验误差, 以上试验每个样品测量三次, 并取测试结果的平均值, 所有试验

均在室温( $20^\circ C$ )下进行。

## 1.3 真三轴煤体渗流试验

为了探究加入润湿剂之后阻化液对煤体渗流特性的影响, 需要对渗润性能最优的复配阻化溶液进行真三轴煤体渗流测试试验, 另设置水对照试验。通过自主研发的真三轴煤体渗流仪及计算公式, 获得其渗透率, 进而分析润湿剂对煤体渗透性的影响。具体试验操作如下: 首先将利用原煤压制成的  $25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  的煤柱, 置于干燥箱中恒温  $60^\circ C$  干燥 18 h, 以去除原煤柱中的水分, 并用保鲜膜包裹备用; 而后将其置入真三轴煤体渗流测试仪中, 固定轴压、围压不变, 依次变换注液压力开展渗流试验。具体的渗流试验设计数据见表 3。

表 3 真三轴煤体渗流试验的参数

Table 3 Parameters of true triaxial coal seepage test

| 序号 | 轴压/MPa | 围压/MPa | 注液压力/MPa |
|----|--------|--------|----------|
| 1  | 5      | 10     | 3        |
| 2  | 5      | 10     | 5        |
| 3  | 5      | 10     | 7        |
| 4  | 5      | 10     | 9        |
| 5  | 5      | 10     | 11       |
| 6  | 5      | 10     | 13       |

#### 1.4 热重分析试验

为了探究加入润湿剂之后阻化液的阻化性能,需要对渗润性能最优的复配阻化溶液进行热重分析试验。热重曲线表示被测量物质的质量随温度变化的关系曲线,用 TG 表示,微商热重曲线是热重曲线对温度采用一阶微商的方法获得的曲线,用 DTG 表示。通过 TG-DTG 曲线获得阻化液特征温度,进而分析其加入润湿剂后阻化性能的改变。具体的试验操作如下:首先,从现场采集煤样并在实验室进行粉碎筛分,制备成粒径为 100~200 目(粒径为 0.074~0.150 mm)<sup>[15]</sup>的煤粉样品,根据 1.2 节中接触角试验优选的最优配比阻化液,将煤粉浸泡在阻化溶液中 24 h;同时,保持其他条件不变,将等量煤粉浸泡在水中,以设置对照试验;而后将其放入干燥箱中恒温 60 °C 干燥 6 h,待干燥结束后,将阻化处理的煤样和水处理的煤样进行热重分析试验,本试验保护气为氮气,压力恒定为 0.05 MPa,流速恒定为 50 mL/min。所设计的热重分析试验参数见表 4。

表 4 热重分析试验的参数设置

Table 4 Parameters of TGA

| 煤样质量/mg | 粒径范围/目  | 温度范围/°C | 升温速率/(°C/min) | 空气流量/(mL/min) | 含氧量/% |
|---------|---------|---------|---------------|---------------|-------|
| 10      | 100~200 | 30~800  | 10            | 50            | 20.9  |

## 2 试验结果及分析

### 2.1 润湿性能测试

通过接触角试验,分别对滴加不同配方阻化液后 5 s、15 s、30 s 及终态进行了润湿性规律及其影响特性的研究。

如图 2、图 3 所示,随着时间的增加,接触角逐渐减小,其中组 1 的接触角在 5 s 时达到 72.36°,组 2 为 51.85°,而组 5 接触角为 31.80°,优于其他配比的阻化液接触角,且在各时间段,组 5 接触角均小于其余溶液配置的接触角。随着罗丹明 B 含量的增加,接触角呈现先减小后增大的趋势。究其原因,对于阴离子表面活性剂 SDS 而言,当溶液中含有罗丹明

B 时,两者存在着较强的阴阳离子静电吸引作用,因此表面张力显著降低,即产生了协同效应。当表面活性剂的浓度低于其临界胶束浓度(CMC)时,表面活性剂分子与染料分子由于静电作用相互吸引,使得聚集在溶液表面层的分子数增加,表面张力随之减小;当表面活性剂浓度增大到临界胶束浓度(CMC)时,表面活性剂分子将以罗丹明 B 为核,以憎水基吸附在核上面形成近似球型的胶束,罗丹明 B 被包裹在其中,形成了缔合物。SDS 是线型分子,空间位阻较小,可以与罗丹明 B 很好地结合,致使 SDS 溶液的表面张力在加入罗丹明 B 后明显降低。当罗丹明 B 增大到一定浓度后,阳离子表面活性剂罗丹明 B 与阴离子表面活性剂 SDS 完全形成胶束。此时,再增大罗丹明 B 含量,其表面活性剂的润湿性完全表现为罗丹明 B 阳离子表面活性剂的润湿性,而罗丹明 B 阳离子表面活性剂的增润效果小于阴离子表面活性剂 SDS 的增润效果<sup>[16]</sup>,导致接触角增大,但总体仍然表现为增润。

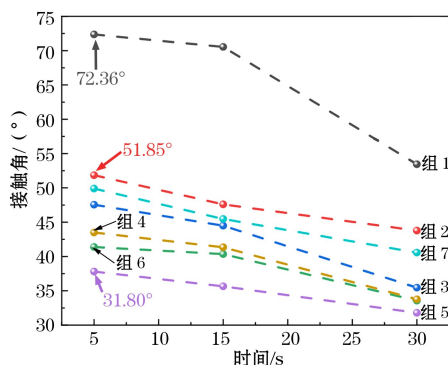


图 2 不同配比阻化液接触角值随滴加时间变化  
Fig.2 Changes in contact angle values of different ratios of inhibitor liquids with dripping time

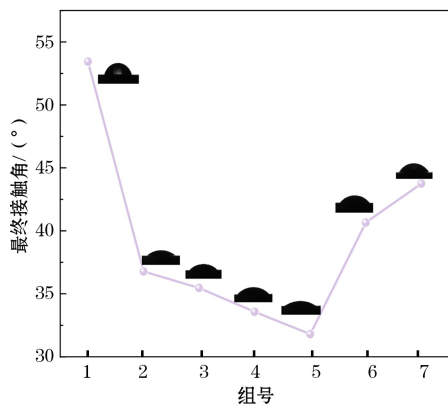


图 3 不同配比阻化液终态接触角  
Fig.3 Final contact angle of different ratios of inhibitor solution

综上所述,接触角试验证明了本试验添加的渗透材料可以提高煤层注液的润湿性,且组 5 的润湿性能最好,因此后续采用组 5 进行试验。

## 2.2 渗透性能测试

自主研发的真三轴煤体渗流仪的计算公式如下:

$$K = \frac{QL\gamma}{pA} \quad (1)$$

式中, $\gamma$  为液体容重,  $\text{kN/m}^3$ ;  $Q$  为单位时间内通过煤柱的水量,  $L$ ;  $L$  为煤柱长度,  $\text{m}$ ;  $A$  为煤柱截面积,  $\text{m}^2$ ;  $p$  为煤柱两端的压力差,  $\text{kPa}$ ;  $K$  为渗透率,  $\text{mD}$ 。

通过真三轴煤体渗流试验所测得的煤体渗透率与注液压力的关系如图 4 所示。

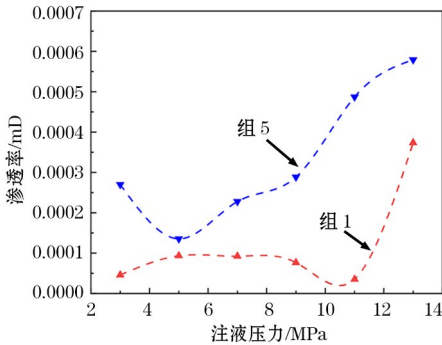


图 4 注液压力与渗透率关系

Fig.4 The relationship between injection pressure and permeability

在注液过程中,阻化液的运动受到液体动力压力、毛细管力和分子扩散的驱动,流动阻力和气体压力阻碍了阻化液的运动。注液压力作为阻化液流动的主要驱动力,对阻化液渗流速率和流速的变化有重要影响。由图 4 可以看出,随注液压力增大,组 1 和组 5 阻化液的渗透率都呈现出先减小后增大的趋势,组 5 的渗透率最低值出现在 5 MPa 左右,组 1 的最低值出现在 11 MPa 左右,这是因为阻化液注入煤体后,在注液压力较小时,微孔和过渡孔受到贾敏效应和毛细管力的共同阻碍,液体很难进入。继续提高注液压力,大量的阻化液由于注液的压力提高,克服了贾敏效应和毛细管力而进入小孔,而中孔、大孔和微裂隙由于具有更好的连通性、更小的毛细管力而构成了煤样的渗流通道。因此注入润湿剂阻化液可以使煤体的启动压力降低,在启动压力之后渗透率快速增长。真三轴煤体渗流试验证明了本试验添加的润湿材料具有增渗的作用。

## 2.3 阻化性能测试

两个煤样的 TG 和 DTG 曲线如图 5、图 6 所示。在氧化自燃过程中,煤分子中的不同结构在特定温度下参与了煤与氧气的反应<sup>[17]</sup>。它在宏观上表现为样品的失重率的变化,因此,可以通过质量变化确定两个煤样氧化燃烧的特征温度点,组 1 和组 5 的特征点温度对比见表 5;特征点的温度可以反应煤样所处的氧化阶段,因此可以通过特征温度点的变化去判断加入罗丹明 B 对阻化性能的影响。

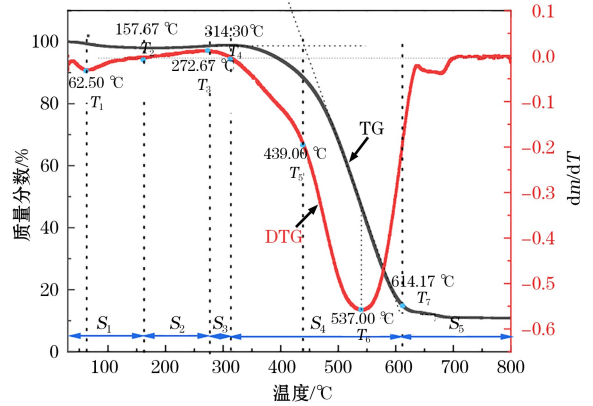


图 5 组 1 的 TG-DTG 曲线

Fig.5 The TG-DTG curve of group 1

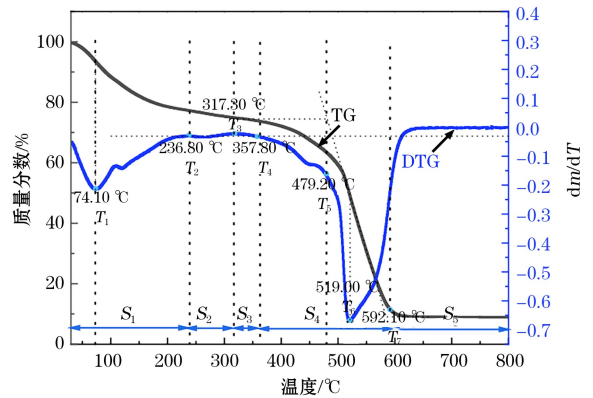


图 6 组 5 的 TG-DTG 曲线

Fig.6 The TG-DTG curve of group 5

表 5 特征点温度对比

Table 5 Comparison of characteristic point temperature

| 试样组别 | 特征点温度/°C |        |        |        |        |        |        |
|------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | $T_1$    | $T_2$  | $T_3$  | $T_4$  | $T_5$  | $T_6$  | $T_7$  |
| 组 1  | 62.50    | 156.67 | 272.67 | 314.30 | 439.00 | 537.00 | 614.17 |
| 组 5  | 74.10    | 236.80 | 317.30 | 357.80 | 479.20 | 519.00 | 592.10 |

根据本研究中煤样的增重和失重步骤以及特征温度点,氧化过程可分为 5 个阶段<sup>[18]</sup>:  $S_1$  水分蒸发和气体解吸阶段 ( $T_1 \sim T_2$ )、 $S_2$  吸氧和增重阶段 ( $T_2 \sim T_3$ )、 $S_3$  热分解和失重阶段 ( $T_3 \sim T_4$ )、 $S_4$  燃烧

阶段( $T_4 \sim T_7$ )和  $S_5$  燃尽阶段( $>T_7$ )。两个煤样的特征温度点见表 5。通过热重试验,获得原煤煤样的干裂温度  $T_2$  为 156.67 °C,着火温度  $T_5$  为 439.00 °C; 含有润湿剂的阻化液处理的煤样的干裂温度  $T_2$  为 236.80 °C,着火温度  $T_5$  为 479.20 °C。相较于原煤,煤样经过含润湿剂的阻化液处理后,其氧化燃烧的特征温度更高,说明具有明显的阻化效果。

组 5 处理的煤样经历吸氧,但不增重阶段,是由于罗丹明 B 作为螯合剂<sup>[19]</sup>对金属离子具有较强的螯合作用,可与煤中的  $Fe^{2+}$  和  $Cu^{2+}$  等金属离子螯合,抑制金属离子产生  $\cdot OH$  自由基的催化作用。同时罗丹明 B 在 220 °C 左右吸收氧气进行分解,导致加入罗丹明 B 之后煤吸氧量减少,罗丹明 B 分解吸收掉了更多的氧气,从而出现只吸收而不增重的阶段。物理阻化剂作用于煤自燃过程的低温阶段,化学阻化剂作用于煤自燃过程的高温阶段<sup>[20]</sup>。当温度达到 550 °C 左右时,L-抗坏血酸达到沸点开始分解<sup>[21]</sup>,不再具备化学阻化作用,且物质的燃烧是放热反应,故当临界温度达到  $T_6$ 、 $T_7$  时,组 5 的临界温度小于组 1 的临界温度。

综上,加入罗丹明 B 可以使临界温度  $T_1 \sim T_5$  明显升高,说明加入渗润材料可以使阻化液仍具较好的阻化效果。

### 3 讨论

在复配增润-阻化材料中添加罗丹明 B 可以提高其润湿效果,并且仍具有优良的阻化性能。

(1) 作为阳离子型表面活性剂的罗丹明 B,可以与阴离子表面活性剂 SDS 很好地结合,由于电荷中和及疏水基静电吸引力而排列十分紧密,正、负电荷作用更为强烈,相互作用更强,即产生了协同效应,表面活性更为显著,使其 CMC 趋向于更小。但当表面活性剂的浓度低于其临界胶束浓度(CMC)时,表面活性剂分子将以罗丹明 B 为核,以憎水基吸附在核上面形成近似球型的胶束,罗丹明 B 被包裹在其中,形成了缔合物。使两者复配的表面活性剂达到最大效率。其相关机理如图 7 所示。

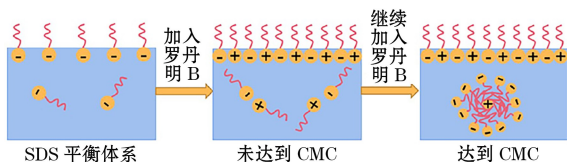


图 7 SDS 中加入罗丹明 B 机理

Fig.7 Mechanism of adding Rhodamine B to SDS

(2) 罗丹明 B 作为螯合剂对煤炭中金属离子具有较强的螯合作用,可与煤中的  $Fe^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $Cu^{2+}$  等金属离子螯合,抑制金属离子产生  $\cdot OH$  自由基的催化作用(见图 8),其机理与罗丹明 B 与其他物质相结合被当作金属探针的作用类似。

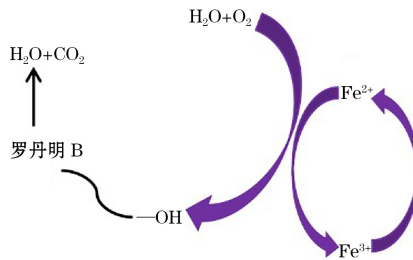


图 8 罗丹明 B 与  $Fe^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$  的转化机理

Fig.8 Conversion mechanism of Rhodamine B with  $Fe^{2+}$  and  $Fe^{3+}$

(3) 罗丹明 B 是一种性能优良的荧光示踪材料,通过对煤层中的煤样进行荧光分光光度试验,监测煤样中是否含有荧光,从而达到测定煤层注液渗润范围的目的。这一优势主要体现在加入罗丹明 B,可以排除水力切割取煤样导致煤的水分增加而对含水率测定所产生的影响。在煤层注液过程中应用该技术,可以达到快速表征渗润范围的目的。

### 4 结论

(1) 通过对加入罗丹明 B 后的增润-阻化材料的接触角进行测试后发现,随罗丹明 B 浓度的增加,渗润性能呈现出先增大后减小的趋势,得到了加入罗丹明 B 之后的最优配比,其质量分数组成为 2.5%VC+7.5%MgCl<sub>2</sub>+0.25%SDS+0.1%罗丹明 B,该配比阻化材料的渗润、阻化性能最优,接触角相较于未经处理的煤样降低了 40.56°。

(2) 真三轴煤体渗流试验的结果表明,在 3~13 MPa 的注液压力下,添加罗丹明 B 后,启动压力明显提前,且注液所测得渗透率比注水所测得渗透率提高 70%左右,证明了加入渗润材料后可以提高其润湿性。

(3) 通过热重分析试验研究发现,加入罗丹明 B 后其前 5 个临界温度明显提高,其中干裂温度提升 80.13 °C,着火温度提高 40.2 °C,阻化效果明显。

参考文献(References):

- [1] 邓军,张敏,雷昌奎,等.不同变质程度煤自燃特性及低温氧化动力学分析[J].安全与环境学报,2021,21(1):94-100.

- DENG Jun, ZHANG Min, LEI Changkui, et al. Kinetic analysis of the low temperature spontaneous oxidation combustion of the coal seams due to the different metamorphism extents [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(1): 94-100.
- [2] 袁亮, 吴劲松, 杨科. 煤炭安全智能精准开采关键技术与应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(5): 861-868.
- YUAN Liang, WU Jinsong, YANG Ke. Key technology and its application of coal safety intelligent precision mining [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(5): 861-868.
- [3] 秦波涛, 蒋文婕, 史全林, 等. 矿井粉煤灰基防灭火技术研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 329-342.
- QIN Botao, JIANG Wenjie, SHI Quanlin, et al. Research progress on fly ash foundation technology to prevent and control spontaneous combustion of coal in mines [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 329-342.
- [4] 王雪峰, 邓汉忠, 邓存宝, 等. 煤自燃阻化剂选择及喷洒工艺研究[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(10): 105-109.
- WANG Xuefeng, DENG Hanzhong, DENG Cunbao, et al. Research on selection of coal spontaneous combustion inhibitors and spraying process [J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(10): 105-109.
- [5] 李立功, 张晓雨, 李超, 等. 考虑孔径分布的低渗透煤层气体渗透率计算模型[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 1161-1168.
- LI Ligong, ZHANG Xiaoyu, LI Chao, et al. A computation model for gas permeability in low permeability coal seam considering the distribution of pore size [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 1161-1168.
- [6] 张延松, 解庆鑫, 孟祥豹, 等. 煤层预注阻化液防治煤自然发火的实验研究[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(11): 87-90.
- ZHANG Yansong, XIE Qingxin, MENG Xiangbao, et al. Experimental study on the prevention and control of coal spontaneous combustion by inhibitor solution pre-injecting [J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(11): 87-90.
- [7] 聂文, 牛文进, 鲍秋, 等. 基于 Dmol3 模块的不同表面活性剂对煤尘润湿性的影响[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(3): 1255-1266.
- NIE Wen, NIU Wenjin, BAO Qiu, et al. Effect of different surfactants on the wettability of coal dust based on dmol3 module [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(3): 1255-1266.
- [8] WANG M H, YANG Y L, MIAO G D, et al. An experimental study on coal damage caused by two-phase displacement of CO<sub>2</sub><sup>-</sup> alkaline solution [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 93: 104034.
- [9] 鲁义, 庞敏, 王海桥, 等. 一种防治储水采空区煤自然发火的复方芹菜素纳米乳材料及其制备方法: 201810110695.7 [P]. 2019-06-21.
- LU Yi, PANG Min, WANG Haiqiao, et al. A compound apigenin nanemulsion material and its preparation method for preventing coal spontaneous combustion in water storage goaf: 201810110695.7 [P]. 2019-06-21.
- [10] 郑超, 马东民, 陈跃, 等. 水分对煤层气吸附/解吸微观作用研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 256-268.
- ZHENG Chao, MA Dongmin, CHEN Yue, et al. Research progress micro effect of water on coalbed methane adsorption/desorption [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 256-268.
- [11] 张延松. 综放工作面煤层注水技术的研究[J]. *煤炭科学技术*, 2001(1): 33-35+42.
- ZHANG Yansong. Research on water injection technology of coal seam in fully mechanized discharge working face [J]. *Coal Science and Technology*, 2001(1): 33-35+42.
- [12] 蒲春生, 景成, 何延龙, 等. 裂缝性特低渗透油藏水窜水淹逐级调控多级井间化学示踪技术[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(4): 621-629.
- PU Chunsheng, JING Cheng, HE Yanlong, et al. Multistage interwell chemical tracing for step-by-step profile control of water channeling and flooding of fractured ultra-low permeability reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 621-629.
- [13] 沈传波, 刘泽阳, 肖凡, 等. 石油系统 Re-Os 同位素体系封闭性研究进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(2): 187-195.
- SHEN Chuanbo, LIU Zeyang, XIAO Fan, et al. Advancements of the research on Re-Os isotope system in petroleum system [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(2): 187-195.
- [14] 王楠, 刘常清, 李彦阅, 等. 荧光示踪微球研制及示踪性能[J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(2): 96-102.
- WANG Nan, LIU Changqing, LI Yanyue, et al. Preparation and tracing performance of fluorescent tracer microspheres [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(2): 96-102.
- [15] 肖旸, 尹岚, 吕慧菲, 等. 咪唑类离子液体处理煤热失重以及传热特性[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(2): 520-527.
- XIAO Yang, YIN Lan, LYU Huihui, et al. Characteristic of weight loss and heat transfer for the imidazolium-based ionic liquids treatment coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(2): 520-527.
- [16] 刘景林, 杨丽琨, 褚莹, 等. 罗丹明 B 对表面活性剂溶液表面张力的影响[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2006(2): 82-84.
- LIU Jinglin, YANG Likun, CHU Ying, et al. The effect of RB on surface tension in different surfactant solutions [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2006(2): 82-84.
- [17] GUO S, YAN Z, YUAN S, et al. Inhibitory effect and mechanism of l-ascorbic acid combined with tea polyphenols on coal spontaneous combustion [J]. *Energy*, 2021, 229: 120651.
- [18] 文虎, 陆彦博, 刘文永. 利用热重法研究不同氧浓度对煤自燃特性的影响[J]. *矿业安全与环保*, 2021, 48(1): 1-5+10.

WEN Hu, LU Yanbo, LIU Wenyong. Study on the effects of different oxygen concentrations on spontaneous combustion characteristics of coal with thermogravimetric method[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2021, 48(1): 1-5+10.

- [19] 雷亚南.基于罗丹明B与8-羟基喹啉衍生物的新型阳离子荧光分子探针的合成及性能研究[D].上海:上海应用技术大学,2017.  
LEI Ya'nan. Synthesis and properties characterization of new cation-sensitive fluorescent probes based on Rhodamine B and 8-Hydroxyquinoline derivatives [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2017.
- [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] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准管理委员会.化学试剂 L(+)-抗坏血酸:GB/T 15347—2015 [S].北京:中国标准出版社,2015.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Chemical reagent L(+)-ascorbic acid: GB/T 15347—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

### Research on the Infiltration-Inhibition Performance of Modified Tracer Inhibitor Solution

GAO Zhixin<sup>1</sup>, XU Xiaodong<sup>1</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>, LI Wenlin<sup>2</sup>, SUN Lulu<sup>2</sup>

(1.Xinfa Group Hutubi County Donggou Coal Co., Ltd., Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang 831216, China;

2.College of Safety and Environmental Engineering,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** In order to solve the technical problems such as poor permeability of inhibitor materials and difficult monitoring of seepage range in the process of technical application of inhibitor fire prevention, Rhodamine B with infiltration and fluorescence tracing effects was added to the studied inhibition material. Through contact angle measurement test, true triaxial coal seepage test, and thermogravimetric analysis test, the infiltration and inhibition properties of the infiltration-inhibition materials were measured. Research has found that adding Rhodamine B can improve the infiltration performance of the original inhibitor solution and still has excellent inhibition performance. When the amount of Rhodamine B added is 0.1%, its infiltration and inhibition performance is optimal. Compared with untreated coal samples, the contact angle is reduced by 40.56°, the permeability is increased by about 70%, the dry cracking temperature is increased by 80.13 °C, and the ignition temperature is increased by 40.2 °C. The research results have a positive promoting effect on the rapid characterization of infiltration range and the development of in-situ inhibition technology.

**Key words:** Modified tracer inhibitor solution, Inhibition mechanism, Infiltration performance, Rhodamine B, Spontaneous combustion of residual coal