

DOI: 10.13606/j.cnki.37-1205/td.2025.05.011.

# 矿用温敏性复合凝胶的仿真灭火实验研究

宋海洲<sup>1</sup>, 孙航<sup>1</sup>, 司宁<sup>1</sup>, 徐传亮<sup>1</sup>, 孙路路<sup>2,3</sup>, 吕新微<sup>2</sup>, 郭恒君<sup>2</sup>

(1. 兖矿能源集团股份有限公司 东滩煤矿, 山东 济宁 273500; 2. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590;  
3. 山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

**摘要:**为提高防灭火材料的灭火效果, 针对部分常用灭火材料的覆盖性差、粘度低等缺点进行优化。本文以甲基纤维素、过硫酸钾和 N,N'-亚甲基双丙烯酰胺为原料制备了温敏性复合凝胶, 并在东滩煤矿自行设计了大型仿真灭火实验台, 研究了温敏性复合凝胶的降温速率和阻燃性。研究发现, 温敏性复合凝胶的最佳注入量为煤质量的 20%, 在不同温度下均具有优异的灭火性能, 在煤温 600 °C 时, 温敏性复合凝胶的灭火效果更佳, 可使煤温在 8 s 内降至 50 °C, 使 CO 的浓度降至  $30 \times 10^{-6}$ 。温敏性复合凝胶能封堵煤裂隙并完整的包裹住煤块, 在其表面形成凝胶膜, 阻止煤氧复合反应的进行, 从而达到快速灭火的目的。

**关键词:** 温敏性复合凝胶; 降温速率; 灭火效果; 阻燃性能

**中图分类号:** TD75<sup>+</sup>3.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0797(2025)05-0055-05

## Study on fire extinguishing performance of temperature-sensitive intelligent gel

SONG Haizhou<sup>1</sup>, SUN Hang<sup>1</sup>, SI Ning<sup>1</sup>, XU Chuanliang<sup>1</sup>, SUN Lulu<sup>2,3</sup>, LV Xinwei<sup>2</sup>, GUO Hengjun<sup>2</sup>

(1. Dongtan Coal Mine, Yankuang Energy Group Co., Ltd., Jining 273500, China;

2. School of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of

Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. State Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of

Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** In order to improve the fire-fighting effect of fire-fighting materials, the defects of poor coverage and low viscosity of some commonly used fire-fighting materials were optimized. In this paper, the temperature sensitive composite gel was prepared with methyl cellulose, potassium persulfate and N,N'-methylene bisacrylamide as raw materials. A large-scale simulation fire extinguishing experimental platform was designed in a coal mine to study the cooling rate and flame retardancy of the temperature sensitive composite gel. It is found that the optimal injection amount of thermosensitive composite gel is 20% of the coal mass, and it has excellent fire extinguishing performance at different temperatures, but at the coal temperature of 600 °C, the fire extinguishing effect of thermosensitive composite gel is better, and the coal temperature can be reduced to 50 °C in 8 seconds, and the CO concentration can be reduced to  $30 \times 10^{-6}$ . The temperature-sensitive composite gel can seal the coal fissure and wrap the coal completely, forming a gel film on its surface to prevent the coal-oxygen composite reaction, so as to achieve the purpose of rapid fire extinguishing.

**Key words:** temperature-sensitive intelligent gel; cooling rate; fire extinguishing effect; resistance property

## 0 引言

煤炭是我国重要能源之一, 但煤矿开采时危险性较大, 易发生火灾事故。据统计, 我国煤矿每年发生的煤自燃火灾事故有 4000 余次<sup>[1-4]</sup>。煤矿火灾不仅会威胁井下人员的生命健康, 还会污染空气、水源和土壤, 破坏周边生态环境。

为保证煤炭资源的安全开采, 矿井一般采用灌浆、泡沫、惰气、胶体等防灭火技术防治煤自燃<sup>[5-7]</sup>。灌浆、泡沫、惰气防灭火技术对煤自燃的防治均具

有良好的效果, 但在扩散性或稳定性等方面存在不足。灌浆防灭火技术是防止煤炭自燃的传统措施, 其成本低、工艺简单, 但泥浆的扩散性和滞留性不足, 不能均匀覆盖煤体<sup>[8]</sup>。以三相泡沫为代表的泡沫灭火剂, 拥有覆盖性、窒息性和降温性, 且具有向高处堆积的特性, 可以有效治理高位隐蔽火源。但泡沫稳定性差、保水性差、作用时间短、易引发复燃等问题<sup>[9]</sup>。惰气防灭火技术成本低廉、容易制取, 但利用率低, 气体易扩散<sup>[10]</sup>。

为解决煤矿火灾防灭火材料扩散范围小、利用

收稿日期: 2024-07-02

作者简介: 宋海洲 (1989-), 男, 山东邹城人, 工程师, 研究生, 从事矿井一通三防工作。

率低等问题,国内外学者研究发现了可随温度变化发生溶胶-凝胶相变的温敏性水凝胶<sup>[11]</sup>。温敏性水凝胶的粘度对温度具有明显的敏感特性,其自身结构会随温度变化而重构,使之产生变化的温度称为转变温度,也叫临界溶解温度(LCST),温度低于LCST时,凝胶会迅速吸水膨胀;高于LCST时,凝胶大分子链会因为聚集而迅速收缩<sup>[12]</sup>。温敏性水凝胶的相变特性使其流动性优异且能长时间附着在着火点,隔离煤与氧的接触,达到灭火的目的。

甲基纤维素(MC)具有优良的温敏特性,但制作的MC凝胶成胶时间长,结构不稳定。为制备结构稳定,灭火效果优异的温敏性复合凝胶,用过硫酸钾(KPS)为交联剂,强化凝胶结构,用N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)为促凝剂,促进凝胶形成。通过大型仿真灭火实验和对不同灭火材料阻燃效果差异的分析,综合评判温敏性复合凝胶的灭火效果。

## 1 大型仿真灭火实验

为提高实验的可靠性、减少因煤样污染氧化、外界环境差异等因素造成实验误差,使实验结果更符合实际情况,在煤矿现场搭建了大型仿真灭火试验台,并取东滩煤矿部分煤样密封保存,放置阴凉处备用。使用带有搅拌机的注浆泵,以MC、KPS和MBA为原料制备温敏性复合凝胶,见表1。

表1 温敏性复合凝胶的制备

材料	甲基纤维素 %	聚乙二醇 %	氯化钠 %	NaHCO <sub>3</sub> %	过硫酸钾 %	N,N'-亚甲基 双丙烯酰胺 %
含量	1	5	3	0.5	0.3	0.15

### 1.1 煤样及实验装置

#### 1.1.1 实验煤样选取

大型仿真灭火实验煤样采自东滩煤矿3<sub>上</sub>煤层的采煤工作面,实验的煤样用塑料薄膜打包至实验场地,采用破碎机将煤样打碎,利用自动筛分机,筛分出1~3 cm粒径的煤样进行实验。

#### 1.1.2 仿真灭火实验台搭建

实验台主要包括:供风装置、炉体、测温装置、集气装置、凝胶制备装置和注凝胶装置,如图1所示。

### 1.2 温敏性复合凝胶制备

MC是制备温敏性水凝胶的常用胶凝剂之一,它在80℃~90℃的热水中迅速分散、溶胀,降温后迅速溶解,具有优良的润湿性、粘接性、增稠性、保水性和成膜性,所成膜具有优良的韧性、柔曲性

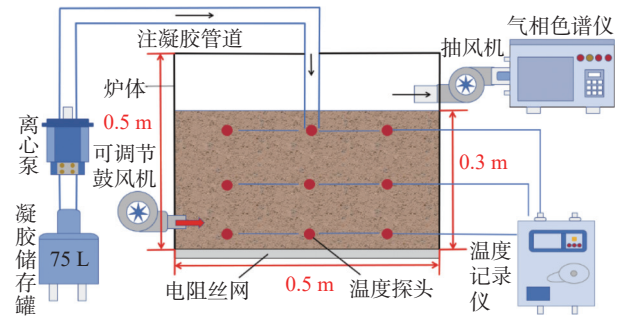


图1 大型仿真灭火实验台装置示意图

和透明度<sup>[13-16]</sup>。KPS是一种常用的无机物引发剂,拥有强氧化性<sup>[17]</sup>。MBA是一种高活性的高效交联剂,具有2个相同且活跃的官能团,能使高分子聚合物迅速高效地从线性结构转变成立体网络结构<sup>[18]</sup>。

使用该矿现有的热水器将配置凝胶所需水量的十分之一的冷水加热至80℃左右并注入到注凝胶装置中,将1%MC和5%聚乙二醇(PEG)溶于水中并混合均匀,然后加入剩余的冷水搅拌均匀后,静置1~2h,再加入3%氯化钠(NaCl)搅拌均匀,再静置12h,最后,向溶液中加入0.3%KPS、0.15%MBA、0.5%碳酸氢钠(NaHCO<sub>3</sub>),混合均匀后,静置24h。图2为凝胶的制备流程图。

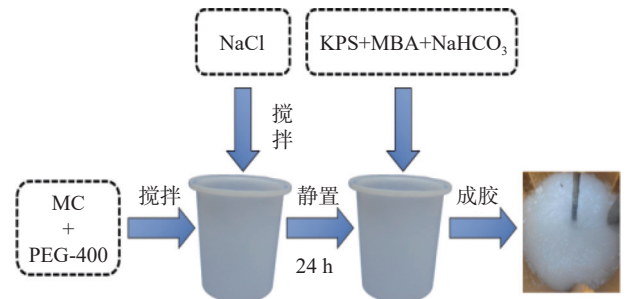


图2 制备工艺流程

## 2 温敏性复合凝胶降温速率研究

应用大型仿真灭火实验台,针对温敏性复合凝胶的不同注入温度和不同注入量进行灭火实验,研究经过不同注入温度和注入量温敏性复合凝胶处理后煤样的降温速率差异。

### 2.1 不同注入温度温敏性复合凝胶处理煤样的降温速率

#### 2.1.1 实验条件

等量的温敏性复合凝胶注入不同温度的煤体时,灭火性能会产生一定差异。本节设置温敏性复合凝胶的注入量为煤质量的20%,注入温度为400℃、600℃、800℃记录实验过程中煤体温度的变化见

表2。并通过公式(1)计算各组实验的降温速率。

$$\beta = \frac{T_0 - T_a}{t} \quad (1)$$

式中： $\beta$ 为凝胶处理煤样的降温速率； $T_0$ 为凝胶注入温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_a$ 为降温后煤样温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $t$ 为降温时间， $\text{min}$ 。

表2 温敏性复合凝胶不同注入温度的实验条件

注入温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	温敏性复合凝胶的注入量 (%)
400	20
600	20
800	20

### 2.1.2 煤体温度变化

实验结果表明，温敏性复合凝胶处于低温环境下时，失水率较小，故降温速率较慢；但随着温度的增高，其自由水和分子链降解排出水分的蒸发速率变快，失水率增加，降温速率逐渐变快；直至火灾被熄灭后，降温速率逐渐变慢<sup>[19]</sup>。当温敏性复合凝胶长期处于高温环境下时，温敏性复合凝胶水分蒸发所吸收的热量较少，故其降温速率会随煤温的增高而降低。综合而言，虽然温敏性复合凝胶在不同温度条件下注入都能有效治理煤自燃，但注入温度过高或过低时，温敏性复合凝胶的降温效果较差。表3和图3为温敏性复合凝胶不同注入温度的实验效果，通过对比分析，发现当注入温度为 $600^{\circ}\text{C}$ 时，温敏复合凝胶的降温速率较快，达 $125^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

表3 温敏性复合凝胶不同注入温度的实验结果

温度	凝胶注入量占煤质量分数	降至 $100^{\circ}\text{C}$ 时间 ( $\text{min}$ )	降至 $50^{\circ}\text{C}$ 时间 ( $\text{min}$ )	降温速率(降至 $100^{\circ}\text{C}$ ) ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )
400	20%	4	10	75
600	20%	4	8	125
800	20%	6	12	116.67

## 2.2 不同注入量温敏性复合凝胶处理煤样的降温速率

### 2.2.1 实验条件

为研究不同注入量温敏性复合凝胶的降温速率，本节设置相同的注入温度，不同凝胶注入量进行实验。2.1节研究发现注入温度为 $600^{\circ}\text{C}$ 时，凝胶的降温速率较快，故设置 $600^{\circ}\text{C}$ 为凝胶注入温度。分别设置凝胶注入量占煤质量分数10%、20%和30%的3组凝胶注入量进行实验，研究比较不同凝胶注入量的降温效果。

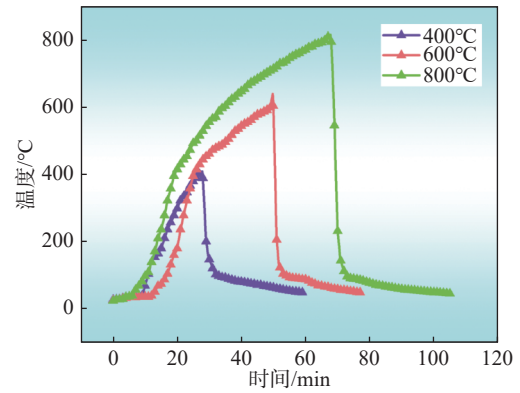


图3 不同注入温度变化曲线

### 2.2.2 煤体温度变化

在煤温 $600^{\circ}\text{C}$ 时，注入凝胶后的煤温变化如图4所示，当凝胶注入量占煤质量的20%时，降温速率最快，在3 min内，温度降低 $495^{\circ}\text{C}$ ；其次是占煤质量30%的凝胶，3 min内温度降低了 $446.8^{\circ}\text{C}$ ；最后是占煤质量10%的凝胶，3 min内温度降低了 $192.1^{\circ}\text{C}$ 。占煤质量30%的凝胶和占煤质量20%的凝胶的降温效果比占煤质量10%的凝胶灭火效果好，但结合经济成本考虑，凝胶的最佳注入量为占煤质量20%的凝胶。

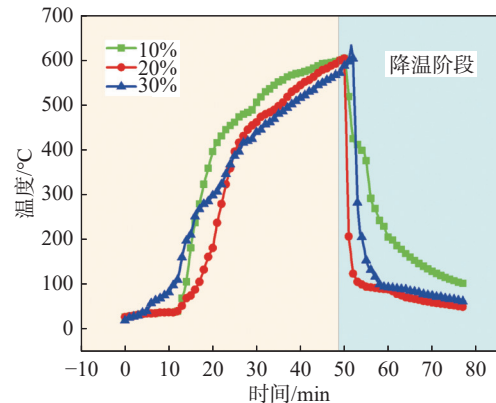


图4 煤温 $600^{\circ}\text{C}$ 注入不同量温敏凝胶的温度变化曲线

## 3 灭火材料灭火效果的实验研究

为进一步说明温敏性复合凝胶的灭火效果，本节研究了温敏性复合凝胶、水、水玻璃凝胶、氯化镁和乙醇胺(MEA)在相同注入温度下的降温速率；选择CO为指标气体，研究注入灭火材料后煤样中CO的浓度变化；比较加入灭火材料灭火后煤样的形态，进而比较分析温敏性复合凝胶的灭火效果。

### 3.1 实验条件

选用温敏性复合凝胶、水玻璃凝胶、氯化镁、

MEA、水5种材料分别进行大型仿真灭火实验,探究不同灭火材料对煤体温度变化的影响。2.2节中已经研究出温敏性复合凝胶的最佳注入量为20%煤质量,故本节实验中灭火材料的注入量均为20%煤质量。注入温度为600℃,各组的实验结果见表4,记录实验过程中的煤体温度和指标气体的变化。

表4 不同灭火材料的实验设计

材料	降至100℃时间 (min)	降至50℃时间 (min)	降温速率(降至100℃) (℃/min)
温敏性复合凝胶	4	11	125
水	42	140	11.90
水玻璃凝胶	33	65	15.15
氯化镁	17	78	29.41
MEA	37	85	13.51

### 3.2 煤体温度变化

图5为在煤温600℃时注入灭火材料后的温度变化。由图可知,降温阶段,温敏性复合凝胶的降温速率最快,通过分析煤温降至50℃时所需的灭火时间发现,温敏性复合凝胶降至目标温度仅需11min,而水玻璃凝胶需要65min、氯化镁需要78min、MEA需要85min、水需要140min。因为5种灭火材料降温初期皆通过水分蒸发吸热降低温度,故前期失水率较高的温敏性复合凝胶、氯化镁溶液和水玻璃凝胶的降温效果较好,但随着水分蒸发,汽化吸热量逐渐减小,降温速率也逐渐减慢。因为温敏性复合凝胶在持续高温的条件下,高分子链会降解排出水分,故温敏性复合凝胶的降温效果更优异。

### 3.3 指标气体浓度变化

收集实验过程中产生的CO,对其进行气相色谱分析,通过观察气体浓度的变化分析材料的灭火效果。

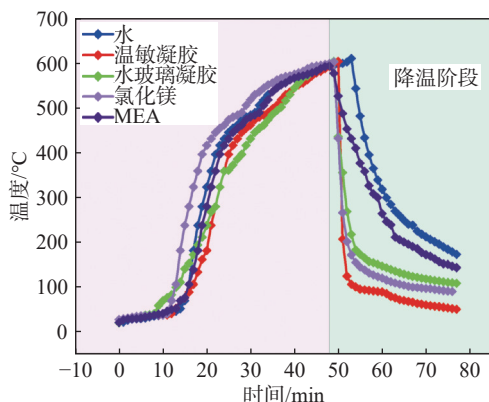


图5 煤温600℃加入不同灭火材料的温度变化曲线

图6表示在注入温度为600℃时,注入不同灭火材料后,CO浓度的变化曲线图。如图所示,注入温敏性复合凝胶后,CO下降幅度最大,3min内可降低 $5580 \times 10^{-6}$ ,降至 $30 \times 10^{-6}$ ;其次为水玻璃凝胶,可使CO的浓度降至 $320 \times 10^{-6}$ ;水的抑制效果最差,使CO的浓度降至 $1236 \times 10^{-6}$ 。5种灭火材料在灭火初期会附着在煤块表面形成隔氧膜,进而阻止煤氧复合反应的进行,降低CO浓度。但随着灭火时间的增长,灭火材料结构发生变化,阻化性逐渐减弱,对CO的抑制效果逐渐降低。因为温敏性复合凝胶在高温下会迅速膨胀,在煤表面形成凝胶膜,故温敏性复合凝胶可以更迅速的阻止煤氧复合反应,又因为其结构随温度增高而变化的幅度较小,故温敏性复合凝胶的阻燃效果最佳。

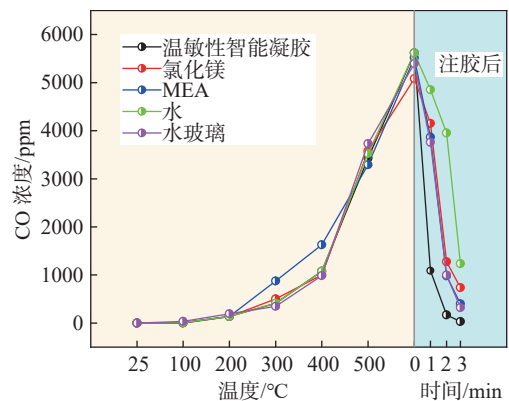


图6 CO浓度变化

### 3.4 温敏性复合凝胶的阻燃性

灭火材料对煤块的覆盖程度是影响其灭火效果的重要因素之一<sup>[20-22]</sup>。通过对比分析加入不同灭火材料后的煤体形貌来分析灭火材料的阻燃性。图7分别表示注入温敏性复合凝胶、水、水玻璃、氯化镁和MEA进行灭火后煤样的形态。

煤块的破碎程度由大到小排序为:图7(a)、图7(b)、图7(c)、图7(d)和图7(e)。水主要靠水分子蒸发吸热使温度低于煤的自燃点,以达到灭火的目的。MEA具有较强的吸附力,可在煤体表面形成凝胶膜,隔绝煤氧接触,以达到隔氧、阻化、降温灭火的目的<sup>[23]</sup>。水玻璃凝胶灭火时自由水分蒸发吸热和硅胶脱水使温度降低<sup>[24]</sup>。氯化镁溶液主要通过水分蒸发吸收热量来降低温度,在低温阶段可以增加煤的化学惰性,降低煤在低温时的氧化速度<sup>[25]</sup>。温敏性复合凝胶拥有LCST,低温阶段,流动性优异,粘度较低,高温阶段,温敏性复合凝胶迅速膨胀,填充煤孔隙,在煤块表面形成较完整

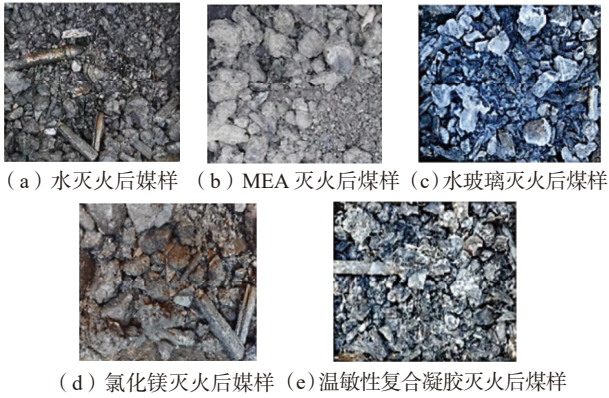


图7 灭火材料处理煤样

的凝胶膜，以隔绝煤氧复合反应。

综上所述，温敏性复合凝胶可以平衡粘度和流动性的关系，能在煤块表面形成凝胶膜，阻止煤氧复合反应，是一种阻燃性优异的灭火材料。

## 结 论

1) 本研究以 MC、KPS、MBA 为原料制备温敏性复合凝胶，并搭建大型仿真灭火实验台，研究其对矿井火灾的灭火效果。研究发现，在不同温度下注入温敏性复合凝胶均有良好的灭火效果，但注入温度为 600 °C 时，降温效果更佳，6 s 可以成胶，降温速率达 125 °C/min。

2) 通过大型仿真灭火实验研究 600 °C 下，不同温敏性复合凝胶注入量的降温速率差异。研究发现，温敏性复合凝胶的最佳注入量为 20 % 煤质量，降温速率最快，在 3 min 内，温度降低 495 °C，4 min 即可降至 100 °C。

3) 温敏性复合凝胶与水玻璃凝胶、氧化镁、水和 MEA 相比灭火效果更佳，11 min 使煤温降至 50 °C，3 min 使 CO 浓度降至  $30 \times 10^{-6}$ 。这是由于温敏性复合凝胶能完整的包裹住煤块，在表面形成凝胶膜，阻止煤氧复合反应的进行，从而达到快速灭火的目的。

## 参考文献:

[1] 朱红青,胡超,张永斌,等.我国矿井内因火灾防治技术研究现状[J].煤矿安全,2020,51(3): 88-92.  
 [2] 邓军,白祖锦,肖旻,等.煤自燃灾害防治技术现状与挑战[J].煤矿安全,2020,51(10): 118-125.  
 [3] 梁运涛,侯贤军,罗海珠,等.我国煤矿火灾防治现状及发展对策[J].煤炭科学技术,2016,44(6): 1-6,13.  
 [4] 邢舜博,鲁义,邵淑珍,等.防治煤自燃与瓦斯复合灾害的膏体速凝固结材料研制[J].中国安全生产科学技术,

2023,19(12): 23-30.  
 [5] 秦波涛,冯乐乐,蒋文婕,等.矿井泡沫防灭火技术研究进展[J].煤炭科技,2022,43(5): 1-12,26.  
 [6] 余明高,王亮,李海涛,等.我国煤矿防灭火材料的研究现状及发展趋势[J].矿业安全与环保,2022,49(4): 22-36.  
 [7] 朱立成,李军,路建军等.不同倾角俯采工作面煤自燃“三带”分布规律研究[J].煤炭技术,2023,42(12): 186-190.  
 [8] 张田录,李洪杰,杨冰.综放工作面未采回撤期间帷幕注浆防灭火技术研究[J].能源技术与管理.  
 [9] 蔡镇涛,胡东.矿用新型防灭火材料的制备研究[J].山东工业技术,2023(6): 87-90.  
 [10] 孟清华,白亚斌,燕利芳,等.浅埋近距离煤层群开采煤自燃发火防治技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2023(3): 8-10.  
 [11] 赵真诚.矿用温敏膨胀凝胶材料及其防灭火特性研究[D].中国矿业大学,2023.  
 [12] 张悦.抑制煤自燃温敏相变凝胶材料的研究[D].中国矿业大学,2023.  
 [13] 杨晓东,张文政.生物基高吸水温敏性水凝胶的制备及性能表征[J].煤炭科学技术,2022,50(S2): 411-416.  
 [14] 马建军.中温固体氧化物燃料电池的制备与表征[D].中国科学技术大学,2007.  
 [15] 沈娟莉,付时雨.纤维素基水凝胶的研究进展[J].化工进展,2022,41(6): 3022-3037.  
 [16] 沈杰.羧甲基纤维素基抗菌性高吸水树脂的制备与性能研究[D].东北林业大学,2020.  
 [17] Xia L W, Xie R, Ju X J, et al. Nano-structured smart hydrogels with rapid response and high elasticity[J]. Nature communications, 2013, 4(1): 2226.  
 [18] 邓正强.油基凝胶微球与水基高温交联凝胶堵漏及漏层裂缝宽度预测技术研究[D].中国石油大学(北京),2022.  
 [19] Sun L, Lv X, Liu N, et al. Spontaneous coal combustion prevention mechanisms of thermosensitive composite hydrogel: An experimental study[J]. Fuel, 2023, 331: 125796.  
 [20] 姬玉成.抗氧化凝胶泡沫防遗煤自燃机理研究[D].北京科技大学,2022.  
 [21] 田兆君.煤矿防灭火凝胶泡沫的理论与技术研究[D].中国矿业大学,2010.  
 [22] 李璐.煤中常见化学键的解离及分子结构的量子化学理论论研究[D].大连理工大学,2017.  
 [23] 陈洋.基于 MEA 胶体材料的煤巷高冒点煤炭自燃防治[J].煤矿安全,2015,46(2): 125-127.  
 [24] 聂士斌,邢时超,韩超,等.防治煤矿火灾的凝胶材料制备及其性能研究[J].中国安全科学学报,2020,30(9): 115-120.  
 [25] 舒森辉.干水阻化剂制备及防治煤自燃研究[D].安徽理工大学,2022.