

中文引用格式:吴芳华,施式亮,鲁义,等.磷石膏基自产气膨胀浆体防灭火性能研究[J].中国安全科学学报,2024,34(3):148-154.
英文引用格式:WU Fanghua, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Fire prevention and extinguishing performance of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 148-154.

磷石膏基自产气膨胀浆体防灭火性能研究*

吴芳华,施式亮 教授,鲁义 教授,谷旺鑫,谭嘉乐,刘蔚廷

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.03.0099

基金项目:国家自然科学基金资助(52274196, 52174180, 52374200);国家重大人才工程青年项目(2022QB06801);湖南省重点研发计划项目(2022GK2042)。

【摘要】 为防治煤矿顶煤和上分层遗煤自燃等高位火源灾害,以工业固体废物磷石膏为基料,加入碳酸氢钠和聚丙烯酰胺等成分,制备出一种自产气膨胀浆体。首先,应用热重(TG)分析仪研究浆体在不同升温速率下的热稳定性;然后,采用自行搭建的隔热性能测试系统测试浆体的隔热性;最后,通过灭火试验研究浆体的灭火降温性能。结果表明:磷石膏基自产气膨胀浆体在160℃以下时存在35%~46%的质量损失,当温度大于160℃时,浆体的质量分数不再发生改变;浆体堆积厚度达到30mm时,有效隔热时间超过139min,可实现对煤自燃危险区域较好的覆盖;浆体通过在煤堆裂隙中膨胀扩散,自下而上完全包裹碎煤,隔绝氧气,具有良好的降温灭火性能,注浆36min后,各点位温度已全部降低至50℃以下,未出现复燃现象。

【关键词】 磷石膏基自产气膨胀浆体; 煤自燃; 热稳定性; 隔热性能; 灭火降温; 有效隔热时间

Fire prevention and extinguishing performance of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry

WU Fanghua, SHI Shiliang, LU Yi, GU Wangxin, TAN Jiale, LIU Weiting

(School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: In order to prevent high-level fire hazards such as spontaneous combustion of top coal and upper layer residual coal, a self-produced gas expansion slurry was prepared by taking industrial solid waste phosphogypsum as the base material, adding components such as sodium bicarbonate and polyacrylamide. Firstly, a thermogravimetry (TG) analyzer was used to study the thermal stability of the slurry at different heating rates. Then, a self-built insulation performance testing system was used to test the thermal insulation performance of the slurry. Finally, the fire extinguishing and cooling performance of the slurry was studied through fire extinguishing experiments. The results show that when the temperature of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry is below 160℃, there is a mass loss of 35% to 46% in the slurry. When the temperature is above 160℃, the mass fraction of the slurry no longer changes. The thickness of the slurry accumulation reaches 30 mm, and the effective insulation time

exceeds 139 min, which can achieve good coverage of coal spontaneous combustion hazardous areas. The slurry expands and diffuses in the cracks of the coal pile, completely enveloping the broken coal from bottom to top, isolating oxygen, and having good cooling and fire extinguishing performance. After 36 min of grouting, the temperature at all points has been decreased to below 50 °C, and no reignition phenomenon has occurred.

Keywords: phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry; coal spontaneous combustion; thermal stability; thermal insulation performance; fire extinguishing and cooling; effective insulation time

0 引言

煤炭是重要能源,专家预测,到2025年,我国煤炭需求量将达到能源消费总量的一半以上^[1-3]。在煤炭开采中,瓦斯突出、煤自燃等事故时有发生,特别是煤自燃,严重影响了煤矿的正常回采。煤自燃火灾不仅会浪费大量煤炭资源,还会产生CO、CH₄等有害气体,诱发瓦斯爆炸,威胁井下工作人员的生命安全。因此,研究高效的煤自燃防治材料,对保证矿井安全生产具有重要意义^[4-5]。

研究表明^[6-7]:漏风是导致遗煤自燃的原因,通过封堵松散煤体,减少遗煤与空气接触,可有效防止遗煤自燃。煤矿现场多采用灌浆^[8]、喷洒阻化剂^[9]、注防火泡沫^[10-11]等技术或材料防治煤自燃,其中,防火泡沫因其扩散范围广,堆积性好等优点,受到了国内外学者的广泛关注^[12],相继研制出水基泡沫^[13]、三相泡沫^[14]和无机固化泡沫^[15-17]等材料。水基泡沫稳定时间短,泡沫消失后遗煤会重新与空气接触,从而发生煤自燃;三相泡沫则存在失水快、强度低、难以使煤体长期隔氧等问题,因此,研究人员开展了无机固化泡沫的研究,如胡相明等^[18]制备出一种经液态硅酸钠改性的无机固化泡沫,并分析了其抗压强度、胶凝时间、流动堆积性、防火性能,结果表明:其抗压强度、流动性能和防火性能等方面均得到了提高;金永飞等^[19]以复合水泥为基料研制了一种新型发泡水泥,并通过单因素试验和正交试验研究了其初凝时间、流动性能和膨胀性能;马砺等^[20]针对传统堵漏材料易干裂、流动性差的问题,研制了大掺量粉煤灰无机固化泡沫。目前,无机固化泡沫虽制备工艺简单,但其防治高位火源仍存在稳定性差,防治效果不佳的问题,限制了无机固化泡沫煤炭防火领域的大范围使用。

鉴于此,笔者拟以工业固体废物磷石膏为基料,加入碳酸氢钠和聚丙烯酰胺等成分,制备一种自产气膨胀浆体,研究其热稳定性、隔热性能和灭火降温性

能,以期实现防治煤矿高位火源和有效利用固废资源的双重目的。

1 浆体防火试验

1.1 磷石膏基自产气膨胀浆体的制备

开展磷石膏基自产气膨胀浆体防火试验,原材料包括磷石膏、碳酸氢钠、蒸馏水、粉煤灰、水泥、聚丙烯酰胺。

1.2 磷石膏基自产气膨胀浆体防火性能试验

1) pH检测。选取pH值范围为2~3、粒径为20~30 μm的磷石膏。

2) 固体物质混合。在烧杯内依次加入磷石膏、碳酸氢钠、水泥、粉煤灰和聚丙烯酰胺,搅拌装置转速设定为1 500 r/min,搅拌时间为3 min,形成均匀混合粉体。

3) 固液混合。固体物质混合结束后,向混合粉体中迅速注入蒸馏水,搅拌装置转速设定为2 000 r/min,搅拌时间为1 min,搅拌均匀后即形成磷石膏基自产气膨胀浆体。

随后静置观察其膨胀过程,制备过程如图1所示。

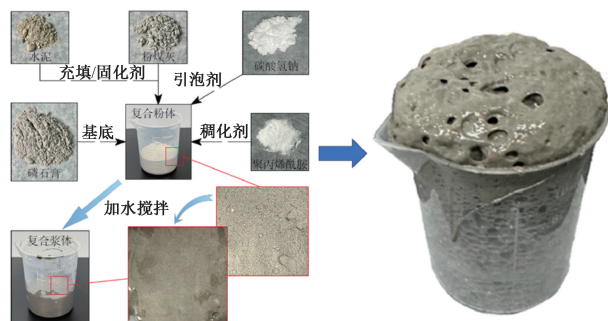


图1 磷石膏基自产气膨胀浆体制备流程

Fig. 1 Preparation process of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry

1.3 试验方法及条件

1) 热稳定性测试。采用热重(Thermogravimetry,

TG)分析仪分析磷石膏基自产气膨胀浆体的热稳定性,测试温度为30~800℃,升温速率分别为5、10、15和20℃/min,使用铝制坩埚盛放样品,样品添加量为8~10mg,试验过程中持续通入标准空气。

2) 隔热性能测试。试验系统包含温控系统和温度采集系统2部分。温控系统控制热辐射锥的温度,实现对不锈钢容器的升温控制,模拟高温点温度,试验过程中热辐射锥温度分别设置为100、200、300、400和500℃;不锈钢容器尺寸为100mm×100mm×50mm,侧面有5个小孔,孔间距为10mm,用于插入热电偶,从上至下依次为1、2、3、4和5号,1号孔距容器顶部的距离为10mm,向不锈钢容器中装填磷石膏基自产气膨胀浆体,并记录不同加热温度下5个热电偶的温度变化,进而分析温度和浆体厚度对浆体隔热性能的影响;温度采集系统主要由温度记录仪和热电偶连接而成,用于监控与采集浆体内部温度,试验系统如图2所示。

3) 灭火降温测试。试验装置主要包括模型柜和圆柱形网筐等。温度采集系统包括温度记录

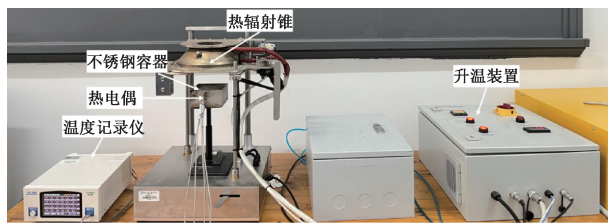


图2 隔热性能测试系统

Fig. 2 Insulation performance testing system

仪,用于碎煤燃烧时的温度采集。模型柜为六棱柱,边长为50cm,圆柱形网筐直径为40cm。注浆前点燃煤堆,使用温度记录仪同步捕捉着火过程的温度变化。为模拟磷石膏基自产气膨胀浆体防治高位火源的过程,当热电偶温度上升速度减缓或不再上升时,将磷石膏基自产气膨胀浆体沿着注浆管注入碎煤底部,观察其自膨胀和灭火降温过程。试验共布置3层测点,距离模型柜底部的距离分别为5(A层)、20(B层)和35cm(C层),每层测点分布如图3所示。测点呈环状分布在注浆管周围,内圈测点距注浆管中心5cm,外圈测点距注浆管中心15cm。

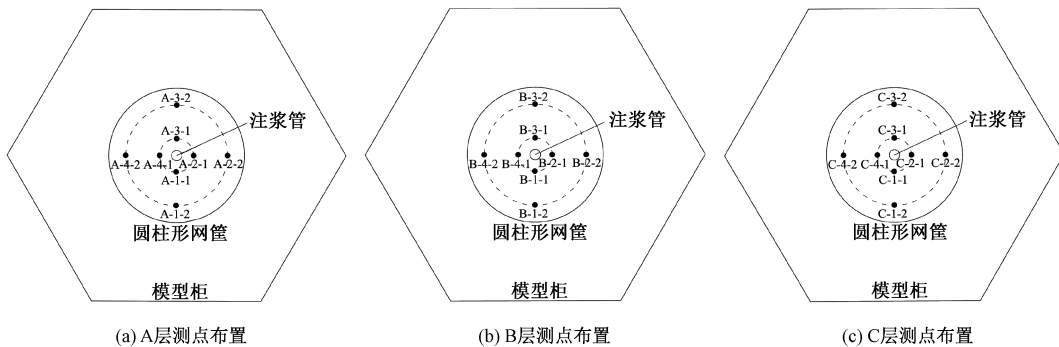


图3 温度测点布置

Fig. 3 Temperature measurement point layout

2 浆体防火性能分析

2.1 磷石膏基自产气膨胀浆体热稳定性

磷石膏基自产气膨胀浆体在不同升温速率下的TG和微分热重(Derivative Thermogravimetry, DTG)曲线如图4所示。

由图4可知:不同升温速率下的DTG曲线均存在2个失重速率峰,说明在自产气膨胀浆体热解的过程中存在着2个阶段。第1次失重是由于自由水分的蒸发,第2次失重是由于浆体骨料CaSO₄·2H₂O中的结晶水开始蒸发,分解为H₂O和CaSO₄,当温度为160℃时,CaSO₄·2H₂O中的结晶水全部蒸发完。当温度大于160℃时,几乎不发生失重,浆体质量分数不再发生改变。当温度为

160℃时,不同升温速率下的样品质量分数分别为65%、61%、58%和54%,因此,浆体在160℃以下的质量损失约为35%~46%,温度高于160℃时,材料稳定性较好,浆体的分解得到控制,说明在高温下,浆体材料具有较好的热稳定性能。

2.2 磷石膏基自产气膨胀浆体隔热性能

磷石膏基自产气膨胀浆体在不同热源条件下加热180min后热电偶温度变化如图5所示。

当热源温度分别为100和200℃时,1、2、3、4、5号热电偶全过程处于升温状态,但升温速率逐渐减小;当热源温度为300和400℃时,1、2号热电偶在升温过程中出现短暂的升温平缓期,继续加热后热电偶温度又快速上升,这是由于浆体表层所含自由水不断蒸发吸热,热电偶进入升温平缓期,随着加

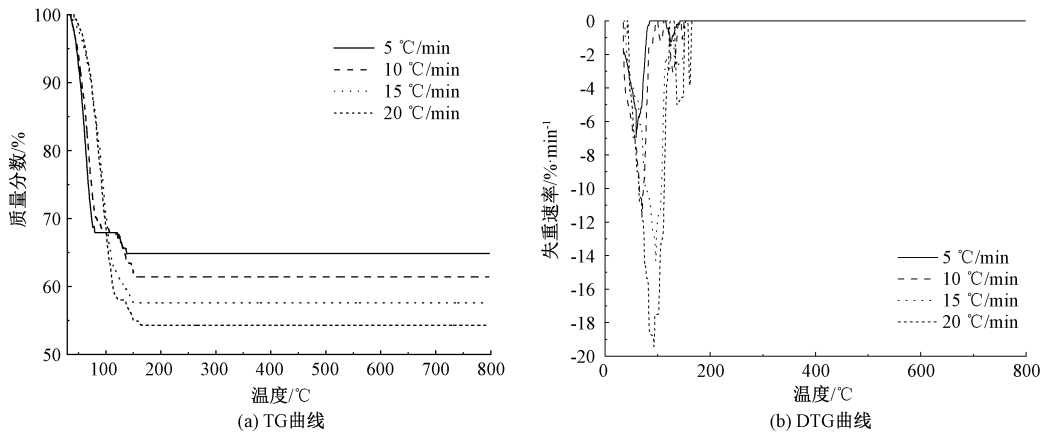


图4 磷石膏基自产气膨胀浆体 TG 和 DTG 曲线

Fig. 4 TG and DTG curves of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry

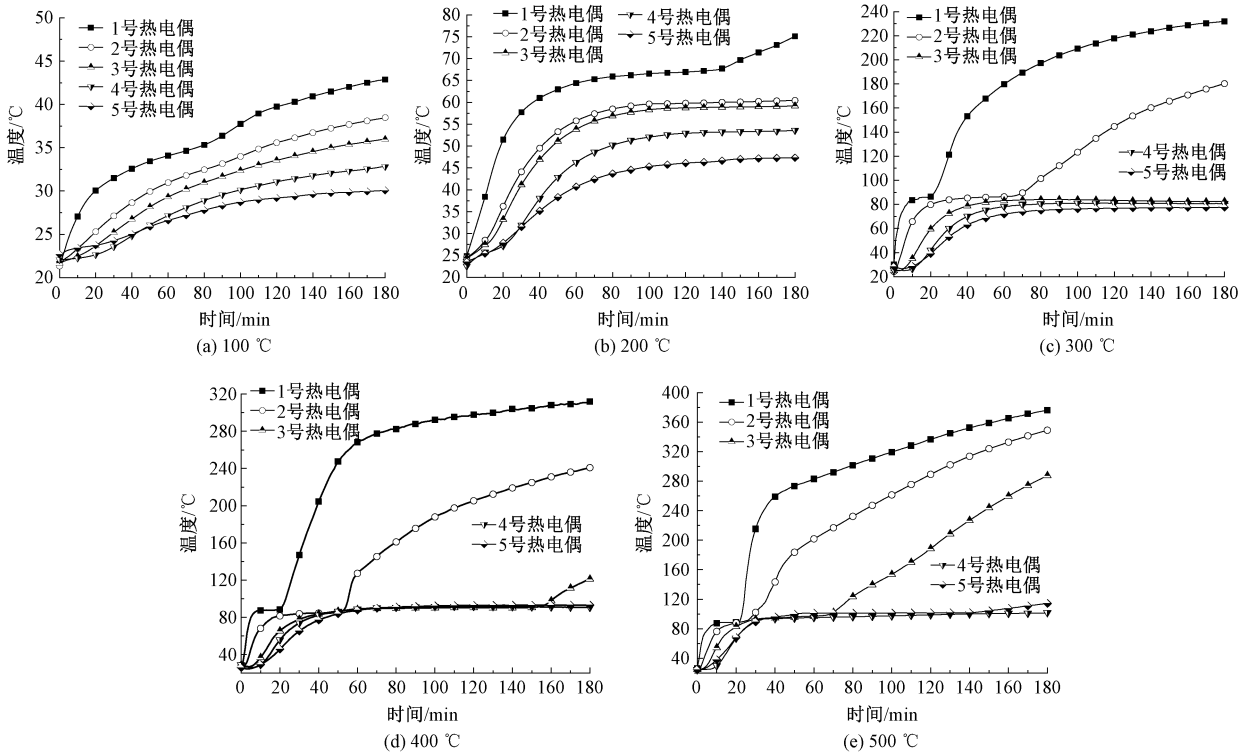


图5 不同热源条件下热电偶温度变化

Fig. 5 Temperature changes of thermocouples under different heat source conditions

热时间增长,浆体上层中游离的水分子含量越来越少,浆体逐渐固化,温度迅速上升,浆体上层进入迅速升温期。由于浆体内部反应产生的气体大部分集中于浆体上层,体系中所含的游离水分子受气体挤压作用和重力作用缓慢向下流动,同时,随着上层浆体含气量增加,垂直方向上热传递效率降低,3、4、5号热电偶在升温加速期之后一直处于升温平缓期。当热源温度为500℃时,1、2号热电偶升温平缓期更加短暂,3号热电偶也在加热70min后进入迅速升温期,浆体中上层温度急剧上升,4、5号热电偶依

旧处于升温平缓期,且温度相差不大。因此,磷石膏基自产气膨胀浆体在加热环境下,浆体温度通常会经历一个升温加速期、升温平缓期以及迅速升温期的过程。磷石膏基自产气膨胀浆体凝结过程如图6所示。在高温热源加热下,浆体表层温度迅速上升,由于膨胀浆体上层水化作用加强,磷石膏、水泥等颗粒物快速反应,生成钙矾石、水化硅酸钙等水化产物。

一般认为,60~80℃是煤自燃的临界温度,当煤温超过临界温度时,会进入加速氧化阶段直至发生自燃。因此,为进一步研究磷石膏基自产气膨胀

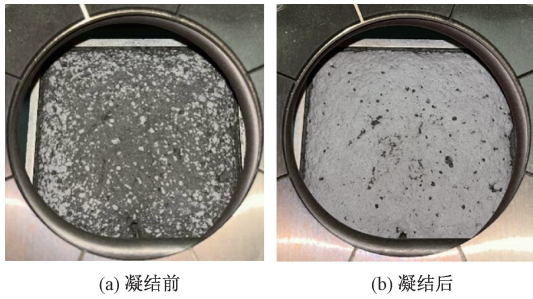


图 6 磷石膏基自产气膨胀浆体凝结过程
Fig. 6 Coagulation process of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry

浆体隔热效果,将浆体某处温度由初始温度升温至 60 ℃ 的时间作为有效隔热时间,评估热源和浆体厚度对其隔热性能的影响。在相同热源温度下,浆体厚度越大,其隔热效果越好,在相同时间内,浆体温度上升速率越慢。不同位置热电偶升温至 60 ℃ 所需时间见表 1。

表 1 不同位置热电偶升温至 60 ℃ 所需时间

Tab. 1 Time required for thermocouples at different positions to heat up to 60 ℃ min

厚度/mm	200 ℃	300 ℃	400 ℃	500 ℃
10	36.0	2.0	2.0	2.0
20	139.0	8.5	7.0	6.5
30	—	20.0	17.0	11.0
40	—	30.0	22.0	18.0
50	—	36.5	27.0	18.0

由表 1 可知:相同热源温度下,浆体厚度越大,其在垂直方向上表现出更优异的隔热效果。当厚度为 10 mm 时,在水蒸气压力下浆体四周温度上升较快,1 号热电偶在各热源温度加热下升温至 60 ℃ 用时最少,说明该厚度下浆体的耐热性能较差。当浆体厚度增大至 20 mm 时,浆体的耐热性能明显提高;当厚度超过 30 mm 时,浆体耐热效果进一步提高,在 200 ℃ 加热 180 min,3 号热电偶最终没有达到 60 ℃;厚度为 40 和 50 mm 的浆体隔热性进一步提高。因此,利用磷石膏基自产气膨胀浆体治理煤的氧化自燃区域时,浆体堆积厚度达到 30 mm 时能够实现较好的覆盖,有效隔热时间超过 139 min,可以达到治理煤自燃隐患和灾害的效果。

2.3 磷石膏基自产气膨胀浆体灭火降温特性

磷石膏基自产气膨胀浆体灭火降温过程如图 7 所示。碎煤开始燃烧后,磷石膏基自产气膨胀浆体材料通过注浆管从容器顶部注入,在重力作用下沿裂隙到达容器底部。磷石膏中含有磷酸离子,磷酸

离子与碳酸氢钠反应生成 CO₂,在高温区域该反应会加强,因此,浆体通过裂隙结构向上快速膨胀,形成大面积的包裹和覆盖,抑制煤表面与空气的接触熄灭火源,如图 8 所示。浆体中所包含的自由水也能够对高温热源处的煤体进行吸热降温,同时,磷石膏基自产气膨胀浆体释放的 CO₂ 为惰性气体,能够驱替裂隙中的氧气,进而持续抑制煤的氧化进程。

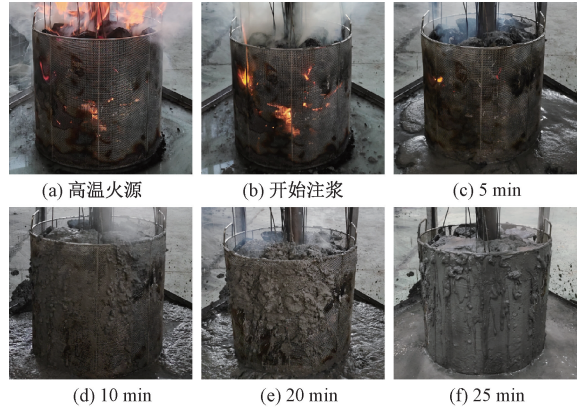


图 7 磷石膏基自产气膨胀浆体灭火降温过程
Fig. 7 Fire extinguishing and cooling process of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry

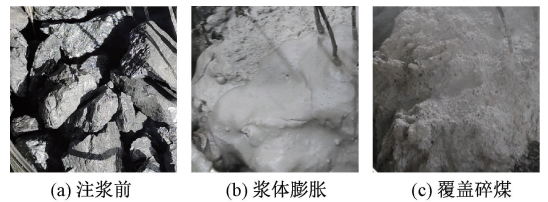


图 8 磷石膏基自产气膨胀浆体包裹煤体效果
Fig. 8 Effect of wrapping coal body with phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry

因浆体在碎煤裂隙中均匀扩散,所以取 A-1-1、A-1-2、B-1-1、B-1-2、C-1-1、C-1-2 点处的温度数据进行分析,研究浆体在裂隙中的扩散规律和降温特征。灭火试验过程中各点位温度变化如图 9 所示。从图 9 可以看出,点燃煤堆后,煤炭开始燃烧,一段时间后,煤堆底层和中层温度基本稳定在 800 ℃,煤堆上层温度基本稳定在 400 ℃ 左右。此时注入磷石膏基自产气膨胀浆体,浆体作用于煤堆底层,迅速扑灭底层火焰,在高温状态下,浆体表面凝结速度加快,内部产气加快,沿着碎煤缝隙向四周快速膨胀,煤堆底层温度骤降至 100 ℃ 左右。与此同时,浆体不断向上膨胀,其中,中心位置垂直高度增长最快,因此,该位置的浆体能够迅速向上覆盖燃煤,扑灭火焰,可以明显观察到热电偶 B-1-2 和 B-

2-2 温度骤降,随着时间的增长,煤堆中层四周温度也随之下降至 100 ℃ 左右。此外,浆体注入过程中由于高温作用蒸发形成的蒸汽增加了空气中的湿度,溢出的 CO₂ 降低了周围环境中的氧气含量,煤堆上层在浆体还未膨胀至此时也受此因素影响,煤氧接触受到阻碍,升温趋势难以维持。随着浆体不断膨胀,煤堆上层的温度也开始降低,直至浆体溢出煤堆,煤堆被其自下而上完全包裹,隔绝氧气,熄灭火

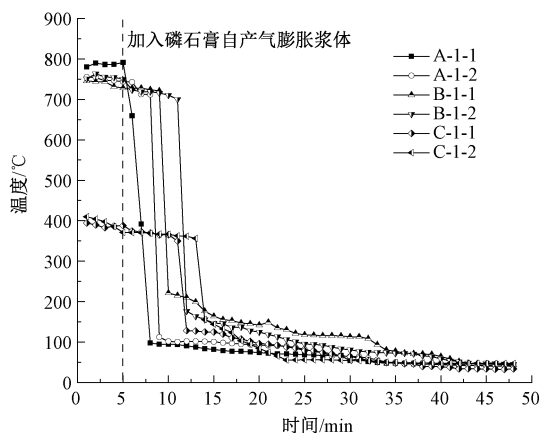


图9 各点位温度变化

Fig. 9 Temperature changes at various points

焰,注浆 36 min 后,各点位温度已全部降低至 50 ℃ 以下,未出现复燃现象。

3 结论

以工业固体废物磷石膏为基料,加入碳酸氢钠和聚丙烯酰胺等成分,制备出一种自产气膨胀浆体,研究其防火性能,主要结论如下:

1) 在 160 ℃ 以下时,浆体存在 35%~46% 的质量损失,当温度大于 160 ℃ 时,浆体的质量分数不再发生改变,说明浆体材料具有较好的热稳定性能。

2) 磷石膏基自产气膨胀浆体在遇到热源时,其温度存在升温加速期、升温平缓期以及迅速升温期 3 个过程。浆体堆积厚度达到 30 mm 时就能实现对煤自燃危险区域较好的覆盖,有效隔热时间超过 139 min,达到治理煤自燃隐患和灾害的效果。

3) 注入浆体后,浆体在煤堆裂隙中膨胀扩散,自下而上完全包裹碎煤,隔绝氧气,熄灭火焰,煤堆底层、中层和上层温度依次降低,注浆 36 min 后,各点位温度已全部降低至 50 ℃ 以下,未出现复燃现象,说明磷石膏自产气膨胀浆体具有良好的降温灭火性能。

参考文献

- [1] 赵真诚. 矿用温敏膨胀凝胶材料及其防火特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023. 5.
ZHAO Zhencheng. Study on mine thermosensitive expansion gel material and its fire prevention and extinguishing characteristics[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023. 5.
- [2] 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.
XING Shunbo, LU Yi, SHAO Shuzhen, et al. Development of paste rapid setting and solidifying material for preventing and controlling compound disaster of coal spontaneous combustion and gas[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(12): 23-30.
- [3] 谢和平,王金华,王国法,等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1 187-1 197.
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1 187-1 197.
- [4] 史全林,杨红旗,李洪彪. 成膜型胶体泡沫的制备及灭火降温特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(10): 121-126.
SHI Quanlin, YANG Hongqi, LI Hongbiao. Research on preparation of film-forming colloidal foam and its fire extinguishing and cooling characteristics[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(10): 121-126.
- [5] 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.
NIE Shibin, XING Shichao, HAN Chao, et al. Preparation and properties of gel materials for coal mine fire prevention[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(9): 115-120.
- [6] 王涛,鲁义,施式亮,等. 漏风裂隙内无机固化泡沫浆液扩散特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(10): 24-30.
WANG Tao, LU Yi, SHI Shiliang, et al. Research on diffusion properties of inorganic solidified foam slurry in air leakage fracture[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(10): 24-30.
- [7] 鲁义,陈健,邵淑珍,等. 再生顶板煤自燃漏风裂隙控制机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 795-805.
LU Yi, CHEN Jian, SHAO Shuzhen, et al. Control mechanism of air leakage cracks at regenerated roof with coal spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 795-805.

- [8] 许延辉,金永飞,李海涛,等. 浅埋煤层近距离采空区隐蔽火源探测及控制技术[J]. 煤矿安全,2014,45(9): 144-147.
XU Yanhui, JIN Yongfei, LI Haitao, et al. Hidden fire detection and control technology in shallow distance seam group gob[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(9): 144-147.
- [9] 张嫵妮,舒盼,刘春辉,等. 乙二胺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.
- [10] LU Yi, LIU Yilun, SHI Shiliang, et al. Micro-particles stabilized aqueous foam for coal spontaneous combustion control and its flow characteristics[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 139: 262-272.
- [11] 沈一丁. 防治煤自燃高效泡沫灭火剂的实验研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
SHEN Yiding. Experiment study on the high efficient foam extinguishing agent for coal spontaneous combustion[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [12] 鲁义,秦波涛,王海桥,等. 封堵高温裂隙的水泥基泡沫流体耐热性研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(5): 1 499-1 504,1 517.
LU Yi, QIN Botao, WANG Haiqiao, et al. Heat resistance of foam cement fluid for sealing high temperature fracture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(5): 1 499-1 504, 1 517.
- [13] 杨波,陈宝义,艾兴,等. 基液黏度对矿用 水基泡沫起泡性能和稳定性的影响研究[J]. 煤矿安全,2018,49(10): 34-36,40.
YANG Bo, CHEN Baoyi, AI Xing, et al. Effect of base fluid viscosity on foaming performance and stability of mine-used water base foam[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(10): 34-36, 40.
- [14] 边云朋,张雷林. 纳米氢氧化铝三相泡沫制备研究[J]. 中国安全生产科学技术,2021,17(9): 59-65.
BIAN Yunpeng, ZHANG Leilin. Study on preparation of nano aluminum hydroxide three-phase foam[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(9): 59-65.
- [15] XUE Di, HU Xiangming, LIANG Yuntao, et al. A study on the characteristics of a novel inorganic solidified foam for the prevention and control of the spontaneous combustion of coal[J]. Construction and Building Materials, 2022, 347: DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2022. 128516.
- [16] 靳磊. 无机固化泡沫防火材料及特性研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2020.
JIN Lei. Study on inorganic solidified foam fire-fighting materials and properties[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2020.
- [17] 鲁义. 防治煤炭自燃的无机固化泡沫及特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.
LU Yi. Study on the inorganic solidified foam and its characteristics for preventing and controlling spontaneous combustion of coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [18] 胡相明,王凯,薛迪,等. 防治煤自燃的高堆积固化泡沫的制备及应用研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-12. [2023-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231110.1132.001.html>.
HU Xiangming, WANG Kai, XUE Di, et al. Study on preparation and application of high accumulation solidified foam for preventing coal spontaneous combustion[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-12. [2023-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231110.1132.001.html>.
- [19] 金永飞,晏立,张典,等. 矿用防灭火发泡水泥固化充填材料优化配比研究[J]. 安全与环境学报,2020,20(5): 1 743-1 751.
JIN Yongfei, YAN Li, ZHANG Dian, et al. On proportionality optimization of curing filling for mining fire extinguishing foamed cement material[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(5): 1 743-1 751.
- [20] 马砺,杜素,张照允,等. 采空区大掺量粉煤灰无机固化泡沫制备及特性研究[J]. 煤田地质与勘探,2023,51(2): 243-251.
MA Li, DU Su, ZHANG Zhaoyun, et al. Preparation and characteristics of inorganic curing foam with large-volume fly ash in goaf[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 243-251.

作者简介: 吴芳华 (1988—),女,山西朔州人,博士研究生,主要研究方向为煤矿防火。E-mail: magickelly88@163.com。

