

## 粉煤灰基注浆灭火材料防火性能研究

安全<sup>1</sup>,宋慧平<sup>1</sup>,吴海滨<sup>1</sup>,程芳琴<sup>1</sup>,刘春晖<sup>1</sup>,狄子琛<sup>1</sup>,赵仲鹤<sup>1,2\*</sup>

(1.山西大学 资源与环境工程研究所,黄河流域资源增效减碳教育部工程研究中心,山西 太原 030006;

2.山西大地生态环境技术研究院有限公司,山西 太原 030012)

**摘要:**煤矸石山自燃是煤氧剧烈反应的过程,会随之产生大量的SO<sub>2</sub>、CO、H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>等有毒有害气体,严重影响矿区环境和人民生命财产安全。因此,急需通过新的科学技术治理相关问题。本文基于可注性实验,通过注浆灭火来实现隔氧降温堵漏,以达到灭火阻燃的目的,对比自制的粉煤灰基注浆材料、黄土注浆材料和石灰注浆材料在冷态和热态两种情况下灭火效果的差异、组分变化以及与煤炭界面的微观形貌来分析灭火效果。结果表明:(1)在冷态条件下,粉煤灰基注浆材料固水能力较好,与粒径为8 mm~18 mm 矸石颗粒粘结效果较好,其中固体长度可以达到38 mm,且成胶完全,形成的注浆材料比较稳定;同时粉煤灰基注浆材料的流动深度可达到323 mm,流动性最优,下渗速度也相对较慢。(2)在热态条件下,粉煤灰基注浆材料与煤炭界面的固化体呈现结构密实,孔隙和裂缝较少的稳固状态。(3)在冷态和热态条件下,粉煤灰基注浆材料的主要成分为Ca(OH)<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub>和硅线石,Ca(OH)<sub>2</sub>和CaCO<sub>3</sub>的衍射峰较强,冷态/热态条件变化前后粉煤灰基注浆材料的主要水化产物无明显变化,Ca(OH)<sub>2</sub>和CaCO<sub>3</sub>的衍射峰仍然较强,说明粉煤灰基浆液在灭火过程中较为稳定,生成的Ca(OH)<sub>2</sub>可以中和矸石燃烧过程中产生的SO<sub>2</sub>等酸性气体,而较多CaCO<sub>3</sub>的存在也可以有效围堵矸石块孔隙,减少空气通道,更有利于灭火。研究表明,利用粉煤灰制备注浆灭火材料不仅灭火效果较好,而且能够实现固体废弃物规模化利用,达到以废治废的目的。

**关键词:**煤矸石;自燃;注浆灭火;粉煤灰;灭火性能

中图分类号:X505

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2024)06-1297-10

## Fire Performance of Fly Ash-based Grouting Fire Extinguishing Materials

AN Quan<sup>1</sup>, SONG Huiping<sup>1</sup>, WU Haibin<sup>1</sup>, CHENG Fangqin<sup>1</sup>, LIU Chunhui<sup>1</sup>, DI Zichen<sup>1</sup>, ZHAO Zhonghe<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Resources and Environmental Engineering, Shanxi University, Engineering Research Center of Resource Efficiency Enhancing and Carbon Emission Reduction in Yellow River Basin, Ministry of Education, Taiyuan 030006, China;

2. Shanxi Land Ecological Environment Technology Research Institute Co., Ltd, Taiyuan 030012, China)

**Abstract:** The spontaneous combustion of coal gangue hills is a process of intense reaction between coal and oxygen, which generates a large amount of toxic and harmful gases, such as SO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, etc., seriously affecting the environment of mining areas and the safety of people's lives and property. Therefore, there is an urgent need to address related issues through new scientific and technological means. This article is based on injectability experiments to achieve oxygen isolation, cooling, and leak sealing through grouting fire extinguishing, in order to achieve the purpose of fire extinguishing and flame retardancy. The fire extinguishing effect is analyzed by comparing the differences, component changes, and micro morphology of the interface with coal between self-made fly ash based grouting materials, loess grouting materials, and lime grouting materials in cold and hot states. The

收稿日期:2023-03-08;接受日期:2023-09-04

基金项目:国家自然科学基金(22378241);山西省黄河实验室科技攻关项目(YRL-202112);山西焦煤集团公司横向项目(202210)

作者简介:安全(1997-),男,山西吕梁人,硕士,主要研究方向为固废资源化利用。E-mail:aq@sxu.edu.cn

\*通信作者:赵仲鹤(ZHAO Zhonghe),E-mail:zhaozhongheqh@163.com

引文格式:安全,宋慧平,吴海滨,等.粉煤灰基注浆灭火材料防火性能研究[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(6):1297-1306. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023127

results show that: (1) under cold conditions, the fly ash based grouting material has good water retention ability and good bonding effect with gangue particles with a particle size of 8 mm—18 mm. The length of the consolidated body can reach 38 mm, and the formation of the grouting material is complete, making it relatively stable; At the same time, the flow depth of fly ash based grouting material can reach 323 mm, with the best fluidity and relatively slow infiltration rate. (2) Under hot conditions, the solidified body at the interface between fly ash based grouting material and coal presents a stable state of dense structure with fewer pores and cracks. (3) Under both cold and hot conditions, the main diffraction peaks of fly ash based grouting materials are  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ , and sillimanite. The diffraction peaks of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and  $\text{CaCO}_3$  are strong, and there is no significant change in the main hydration products of fly ash based grouting materials before and after changes in cold/hot conditions. The diffraction peaks of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and  $\text{CaCO}_3$  are still strong, indicating that the fly ash-based slurry is relatively stable during the fire extinguishing process, The generated  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  can neutralize acidic gases such as  $\text{SO}_2$  generated during the combustion of gangue, and the presence of more  $\text{CaCO}_3$  can effectively block the pores of gangue blocks, reduce air channels, and be more conducive to fire extinguishing. The results indicate that using fly ash as a grouting fire extinguishing material not only has a good fire extinguishing effect, but also can achieve the large-scale utilization of solid waste, achieving the goal of treating waste with waste.

**Key words:** coal gangue; spontaneous combustion; fire extinguishing grouting; fly ash; fire extinguishing performance

## 0 引言

煤矸石是采煤和洗煤过程中产生的固体废物<sup>[1]</sup>,大量堆积氧化会产生热量,当热量积累到一定程度时会发生爆炸,释放出大量的 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 以及 $\text{H}_2\text{S}$ 等有毒有害气体<sup>[2]</sup>,同时煤矸石中含有Pb、Cd等多种重金属元素<sup>[3]</sup>,会对大气环境和人体健康造成严重危害<sup>[4-5]</sup>。因此,从安全和环保的角度考虑有必要预防和有效控制煤矸石山自燃<sup>[6]</sup>。

传统的矸石山灭火治理方法主要包括强夯压实法<sup>[7]</sup>、挖出火源法<sup>[8]</sup>、覆盖灭火法<sup>[9]</sup>、注浆法灭火等<sup>[10]</sup>,这些方法治理成本相对较低<sup>[11]</sup>,但治理效果不佳且复燃率极高<sup>[12]</sup>,其中灭火效果最明显的是注浆法灭火<sup>[13]</sup>,这种方法主要是利用阻燃、充填浆液中的水降低深部区域煤矸石的温度<sup>[14]</sup>,用泥浆、石灰浆包裹含硫可燃物、充填空隙隔绝氧气<sup>[15]</sup>,以达到阻断燃烧、降温、灭火的目的<sup>[16]</sup>,使得煤矸石不再具备燃烧条件<sup>[17]</sup>。常见的注浆灭火材料主要以黄土或者粉煤灰作为主要原料<sup>[18]</sup>,黄土和粉煤灰均具有一定的胶结性,其中的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 能够与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等碱性物质发生反应,生成水化铝酸钙和水化硅酸钙类凝胶物质,使得整体的耐水性和强度增加<sup>[19]</sup>,从而很好地达到隔绝氧气的作用<sup>[20]</sup>。相比于黄土作为注浆材料<sup>[21]</sup>,选用粉煤灰作为注浆材料更具优势,黄土材料由于颗粒性较大,会堵塞裂隙影响注浆效果,稳定性较差<sup>[22]</sup>。

传统的粉煤灰注浆材料一般仅以粉煤灰为

主要基体<sup>[23]</sup>,不同灰质的粉煤灰应用时受水灰比影响较大<sup>[24]</sup>,且注浆完成初期结石体强度过低<sup>[25]</sup>,钻孔区容易出现塌陷等并发问题。本研究在传统浆料中添加了少量激发剂和水泥,在改善凝结时间等性能的同时提高了浆液早期强度,可以有效阻止氧气进入矸石山,达到充填堵漏灭火的作用,降低自燃矸石山对环境的污染,实现区域性固废的综合治理。通过实验模拟,对冷态和热态两种情况下灭火效果的差异、组分变化以及与煤炭界面的微观形貌进行对比,讨论粉煤灰基灭火注浆材料的可行性。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

粉煤灰取自于太原市第一发电厂,具体微观形貌如图1所示,可以看出存在部分球状颗粒,这是因为粉煤灰在高温燃烧而融化形成的

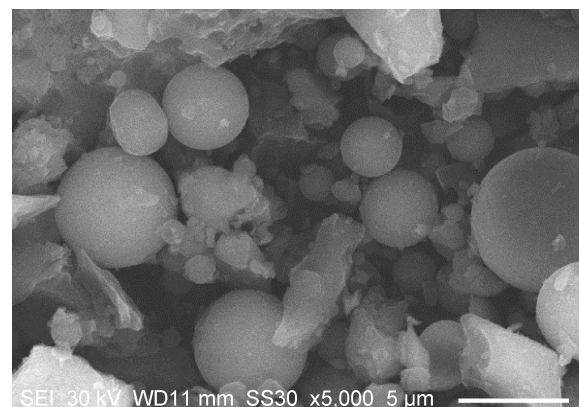


图1 原料粉煤灰的微观形貌图

Fig. 1 Micromorphology of raw fly ash

玻璃珠状,因此会在冷却后在其电镜图中存在大量的球状颗粒,这些球状颗粒尺寸大约在10微米以下。粉煤灰的化学成分见表1,其化学成分主要以 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为主,其硅铝质量分数高达77.02%,烧失量为7.99%。

水泥是市售的普通42.5硅酸盐水泥;水玻璃的模数为2.4~3.4;石灰是一般市售石灰;黄土取自于太原西铭;煤块取自于山西省晋城市无烟煤。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 灭火浆液的制备

课题组前期分别测定粉煤灰灭火注浆材料、黄土基灭火注浆材料和石灰基灭火注浆材料的析水率、流动度和黏度等相关指标,得出了三种灭火浆液稳定性指标的最佳原料配比见表2。按照配比要求分别称取原材料于烧杯中,并用玻璃棒搅拌均匀。将一定量的自来水按照相应的水灰比加入混合好的浆料中,并置于实验室分散机中搅拌制浆,搅拌速度为 $1500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,搅拌均匀备用。由表2可知,最佳配方下的三种注浆材料,2 h析水率最高为2.7%,均小于5%,浆液稳定性良好,且流动度均大于220 mm,具有一定的和易性,浆液黏度在 $1650\text{ MPa}\cdot\text{s}\sim 1750\text{ MPa}\cdot\text{s}$ 之间,适于运输。

### 1.2.2 模拟自燃矽石山实验装置

为探究在冷态条件下不同基体注浆材料灭火过程中的渗透性,特参考基马式渗透仪,制作了高20 cm、直径6 cm的塑料管作为渗透实验桶,如图2所示进行灭火渗透性试验,具体操作步骤为:拼接塑料管,使用胶带将接缝处粘结以固定牢固,防止浆液沿侧壁接缝处渗出,并使用标砖将实验桶夹住以防其倒落;向管内均匀装

入所需粒径为8 mm~18 mm的矽石颗粒,至管高约18 cm处;向塑料管中心附近处一次性连续注入50 mL浆液,使其以自然状态进行渗流扩散,并在注入浆液前测定流动度;将试样静置于室内3 d后拆模,在拆模过程中要避免剧烈震动,防止试样发生断裂;使用直尺量取固结体的纵向长度,以表征各种浆液的可注性。

为探究在热态条件下不同注浆材料的灭火实验效果,自主研发了一套矽石山自燃灭火注浆实验装置,实验装置如图3所示。即利用燃烧的煤块模拟矽石山高温起火环境,将三种注浆材料分别注入三套起火实验装置,实验装置是一个高30 cm,直径10 cm的上下开口的圆柱形实验桶,桶壁上的若干小孔均匀分布,一方面作用是模拟自燃矽石山表面空气流通的通道,另一方面作用是供热电偶测量不同区域煤块的燃烧温度,以实时观察灭火浆液的灭火效果。实验桶从下到上依次标有4 cm、20 cm、4 cm和2 cm高的母线,其中“4 cm”区域分别为上下矽石层,铺设有粒度大小均匀的矽石,模拟未燃烧的矽石表面;“20 cm”区域放置燃烧的煤块,模拟燃烧的矽石体内部;“2 cm”区域为灭火浆液注入区。

实验准备工作:实验前,先利用颚式破碎机分别将煤炭和矽石块粉碎,筛取粒径在2.6 cm~3.0 cm之间的煤块颗粒和粒径在2.6 cm~3.0 cm之间的矽石体颗粒,将矽石样均匀装入实验桶内“4 cm”区域,然后将取暖炉点燃,加入1.5 kg煤块,待煤炭部分烧红,利用铁夹子将燃着的煤块转移到实验桶“20 cm”区域并铺满,然后在其上层铺设厚度约4 cm的矽石体。同时,将三个热电偶分别插入实验桶壁上、中和下三个区域,

表1 粉煤灰的化学成分

Table 1 Chemical composition of fly ash

(单位: %)

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	FeO	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	MnO	$\text{P}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$	烧失量
49.22	27.80	1.29	6.63	3.22	0.84	1.21	0.45	0.06	0.28	0.71	7.99

表2 三种灭火浆液稳定性指标的最佳原料配比

Table 2 The best ratio of raw materials for the three stability indexes of fire extinguishing slurry

样品	水灰比	其余各基质参比	2 h析水率/%	流动度/mm	黏度/( $\text{MPa}\cdot\text{s}$ )
粉煤灰基注浆材料	0.6	粉煤灰:石灰:水泥=7:2:1,水玻璃占水泥质量分数的6%	2.47	231	1725
黄土基注浆材料	0.8	黄土:水泥=7:3	2.70	228	1680
石灰基注浆材料	1.1	石灰:水泥=7:3	1.20	225	1720



图2 室内可注性实验装置图

Fig. 2 Diagram of the experimental device for indoor injectability

记下此时温度。取3种不同基质制备的注浆材料各400 mL分别倒入三个实验桶内灭火,同时开始记录热电偶温度,每间隔10 min记数,分别记录1 h内实验桶中上、中、下三个区域煤炭内部温度,自然环境下等待实验桶内温度降低,分别记录在1 h内,三种浆液注入后,桶内温度的变化情况,实验中为了更进一步探究灭火过程,待自然降温完成后,取注浆材料与燃烧煤块交界处试样,进行SEM分析,以此判断不同浆液对燃烧煤块的包裹程度。

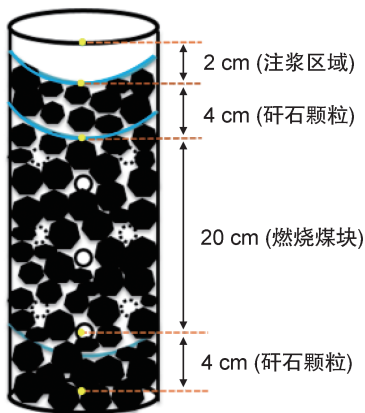


图3 灭火实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fire extinguishing experiment device

### 1.2.3 测试与表征方法

利用扫描电子显微镜(SEM)对冷态下(不点燃块的条件下进行取样)的浆液固化物、热态下(点燃块的条件下进行取样)自然冷却的浆液固化物与煤炭接触界面和矽石体接触面进行了显微观察。利用X射线衍射仪(XRD)对冷态下(不点燃块的条件下进行取样)的浆液

固化物、热态下(点燃块的条件下进行取样)自然冷却浆液固化物晶相变化进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 三种注浆材料灭火材料可注性对比

三种注浆材料灭火材料可注性对比如表3所示,不同注浆材料在8 mm~18 mm 矽石颗粒中的固结体高度。图3示出的是各组浆液与粒径8 mm~18 mm 矽石颗粒形成的固结体可注性实验结果。图4(a)为粉煤灰基注浆材料在粒径为8 mm~18 mm 矽石颗粒中的固结体照片,3天后与矽石颗粒黏结效果较好部分的长度为38 mm;与其他浆液相比,具有良好的可注性。虽在大掺量粉煤灰情况下,粉煤灰浆液的流动度进一步减小,但相对黄土基注浆材料和石灰基注浆材料其流动度较大,其装置上部浆液的剩余量较少,3天后形成的固结体黏结了较多矽石颗粒,固结体长度为38 mm。图4(b)为石灰基注浆材料,其3天后固结体高度为26 mm。由于石灰基注浆材料的流动度较低,未能均匀渗流入矽石颗粒间隙。因此,固结体黏结长度为26 mm。图4(c)是黄土基注浆材料,其3天后固结体高度为28 mm。由于黄土基注浆材料析水严重,而大部分黄土颗粒则堆积到了缝隙处发生了堵塞现象,出现浆液局部堆积现象,矽石颗粒与黄土基注浆材料未能充分接触。因此,固结体粘接部分的长度为28 mm。

表3 各组浆液的可注性实验结果

Table 3 Experimental results of the injectability of each group of slurries

浆液类型	黄土基注浆材料	石灰基注浆材料	粉煤灰基注浆材料
固结体长度/mm	28	26	38
纵向流动性/mm	267	245	323

综上所述,浆液在粒径为8 mm~18 mm 的矽石颗粒中可渗透性效果的优劣顺序为:粉煤灰基注浆材料>黄土基注浆材料>石灰基注浆材料。粉煤灰基注浆材料的流动度较高,注入深度最大,所以认为可渗透性最好。而黄土基注浆材料和石灰基注浆材料的流动性和固结体高度均较差,且黄土基注浆材料的析水现象严重,固结体下部与矽石颗粒的黏结效果较差。



图4 各组浆液与粒径8 mm~18 mm矸石颗粒形成的固结体

(a) 黄土基注浆材料; (b) 石灰基注浆材料; (c) 粉煤灰基注浆材料。

Fig. 4 Consolidation formed by each group of slurry and gangue particles with a particle size of 8 mm—18 mm

(a) loess based grouting material; (b) lime based grouting material; (c) fly ash based grouting material.

石灰基注浆材料的上部浆液残留量较大,且固结体黏结效果较差,在实际施工过程中易造成浆液的浪费。

## 2.2 三种注浆灭火材料灭火效果分析

### 2.2.1 注浆材料灭火的实验现象

采用三种注浆材料在灭火装置(如图5所示)中进行灭火试验。不同材料制备的灭火注浆材料效果差异性较大。采用黄土基注浆材料灭火时,由于黄土的吸水性和固水能力相对较差,且黄土基注浆材料成胶不完全,含有大量的游离水。将黄土基注浆材料倒入实验桶中时,由于其流动性较大,在煤炭中的下渗速度很快,浆液未能均匀地覆盖于上层矸石颗粒和中部的燃炭中,而是沿着实验桶内局部燃炭较大孔隙处,迅速渗流入下部着火区直至底层矸石颗粒,伴随有实验桶下部孔洞中黄土基注浆材料的流出。实验桶内游离水迅速气化,产生大量水蒸气,携带走大量热量,携带部分黄泥和煤颗粒飞溅出实验桶,容易灼伤实验人员。由于水分蒸发吸附走大量的热量,实验桶内下部区域温度显著下降,而未能被浆液均匀覆盖的上部和中部区域燃炭温度逐渐恢复上升,进而发生了复燃的现象。

采用石灰基注浆材料灭火时,由于其固水能力较好,且成胶完全,形成的注浆比较稳定,石灰基注浆材料的流动性较好。实验时,将石灰基注浆材料倒入实验桶内,浆液均匀地覆盖于上层矸石颗粒,然后渗流入中部和下部区域的燃炭。灭火时,只有少量水蒸气产生,没有煤颗粒飞溅,吸附了大量的热量,实验桶内各部分区域温度显著下降,未出现复燃现象。

采用粉煤灰基注浆材料灭火时,由于其固水能力较好,且成胶完全,形成的注浆比较稳定,且粉煤灰基注浆材料的流动性相对较好,下渗速度也相对较慢。实验时,将粉煤灰基注浆材料倒入实验桶内,浆液均匀地覆盖于上层矸石颗粒,很快填满上层矸石颗粒表面,隔氧降温,然后渗流到中部和下部区域的燃炭,产生的蒸汽量较少,没有煤颗粒飞溅,吸附了大量的热量,实验桶内各部分区域温度下降显著,未出现复燃的现象。

### 2.2.2 注浆材料灭火后的温度分析

在室内条件下,将400 mL黄土基注浆材料倒入实验桶,其中上、下层矸石粒度为2.6 cm~3.0 cm。图6(a)是经黄土基注浆材料灭火后实



图5 三种注浆材料的灭火装置示意图

(a) 黄土基注浆材料; (b) 石灰基注浆材料; (c) 粉煤灰基注浆材料。

Fig. 5 Schematic diagram of fire extinguishing device for three grouting materials

(a) loess based grouting material; (b) lime based grouting material; (c) fly ash based grouting material.

验桶内温度随时间的变化曲线。从图中可以看出经黄土基注浆材料处理后,实验桶内上部和中部区域温度随时间呈先降低后升高的趋势,下部区域温度随时间逐渐下降。这是由于黄土的吸水性和固水能力相对较差,且黄土基注浆材料成胶不完全,含有大量的游离水,黄土基注浆材料流动性较大,在煤炭中的下渗速度很快,浆液未能均匀地覆盖于上层矸石颗粒和中部的燃炭,而是迅速渗流到火区底层,导致上部和中部的温度短暂降低,后来出现回升的趋势,进而发生了复燃现象。因此,黄土基注浆材料灭火效果较差。

在室内条件下,将400 mL石灰基注浆材料倒入实验桶,其中上、下层矸石粒度为2.6 cm ~ 3.0 cm。图6(b)显示的是经石灰基注浆材料灭火后实验桶内温度随时间的变化曲线。从图6(b)中可以看出,经石灰基注浆材料处理后,实验桶内各区域温度随时间逐渐降低。且实验桶内上、中、下三部分的温度随时间的变化趋势大致相同,在1 h内各部分区域温度下降到40 °C左右,灭火效果明显。这是由于石灰基注浆材料的固水能力较好,且成胶完全,形成的注浆比较稳定,流动性较好,浆液从上层矸石间隙依次均匀渗流到各区域燃着的炭,降温效果显著。因此,石灰基注浆材料灭火效果较好。

同样在室内条件下,将400 mL粉煤灰基注浆材料倒入实验桶,其中上、下层矸石粒度为2.6 cm ~ 3.0 cm。图6(c)示出的是经粉煤灰基注浆材料灭火后实验桶内温度随时间的变化曲线。从图中可以看出,经粉煤灰基注浆材料处理后,实验桶内各区域温度随时间逐渐降低。且实验桶内上、中、下三部分的温度随时间的变化趋势大致相同,在1 h内各部分区域温度下降到40 °C左右,粉煤灰基注浆材料灭火效果显著。这是由于粉煤灰基注浆材料固水能力较好,且成胶完全,形成的注浆比较稳定,且粉煤灰基注浆材料的流动性相对较好,下渗速度也相对较慢。浆液均匀覆盖于上层矸石颗粒,很快填满上层矸石颗粒表面,达到隔氧降温的作用,然后从上层矸石间隙依次均匀渗流到各区域燃炭间隙,未产生大量水蒸气,实验桶内上、中、下三部分温度显著下降。因此,粉煤灰基注浆材料降温效果显著,灭火效果较好。

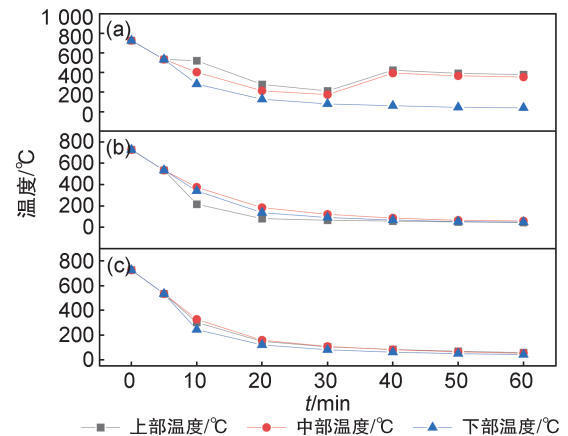


图6 不同基注浆材料灭火后温度随时间的变化曲线  
(a)黄土基;(b)石灰基;(c)粉煤灰基。

Fig 6 Variation curve of temperature with time after fire extinguishing of different base grouting materials  
(a) Loess foundation; (b) lime base; (c) fly ash base.

实验中,为了更真实地模拟自燃矸石山的实际自燃情况,通过测定实验桶内部热量较集中部分的温度,比较不同注浆材料的灭火效果,分析了1 h内实验桶内煤炭中部温度随时间的变化规律,结果如图6中的红色趋势线所示。从图中可以看出,采用不同的材料灭火,煤炭温度均会随着时间下降。经黄土基注浆材料灭火处理后,在前30 min内实验桶内煤炭中部温度随时间下降较快,在30 min以后温度急剧上升,出现复燃现象,因此灭火效果不佳。这主要是因为黄土的吸水性和固水能力相对较差<sup>[26]</sup>,且黄土基注浆材料成胶不完全,含有大量的游离水<sup>[27]</sup>,黄土基注浆材料流动性较大,在煤炭中下渗,浆液中水分遇高温迅速蒸发并带走大量热量,煤炭温度显著下降,但此后其温度上升的主要原因是浆液未能均匀覆盖于上部和中部区域的燃炭,而是沿着燃炭区域局部较大的孔隙直接渗流入下部区域至底层无法完全包覆燃炭,且燃炭继续氧化释放热量,因此出现温度上升,发生复燃现象。

经石灰基灭火注浆材料和粉煤灰基灭火注浆材料处理的实验装置,两组实验桶内中部温度均随着时间逐渐降低,且两组温度变化趋势基本相同,在60 min时两组的温度均下降到40 °C左右,其温度与室温相接近,进而下降速度逐渐减慢。这是因为两种注浆材料灭火材料的固水能力和流动性均相对较好,固水能力越

好,注浆材料受热时失水量越少,则其在注浆灭火过程中的使用寿命和现场应用价值更大;流动性越好,注浆的渗透性越好,达到煤炭内部的速度越快,温度下降越快。随着注浆材料逐渐下渗,吸热降温的同时起到了隔绝煤氧接触的效果。石灰基注浆材料和粉煤灰基注浆材料的灭火效果均明显优于黄土基注浆材料,在同样灭火效果的前提下,粉煤灰基注浆材料的成本较低,可广泛应用于工业化。因此,选择粉煤灰基注浆材料用来灭火。

### 2.3 浆液固化体微观界面形貌及组分分析

#### 2.3.1 冷态和热态条件下浆液固化体微观界面形貌分析

在冷态和热态实验条件下,通过观察界面交融处浆液固化体的表观和截面情况,对比不同灭火材料对煤炭的包覆效果,结果如图7所示。

冷态条件下的流体介质与固体物质接触都会加强接触面间的密实性。如图7(a)—(c)所示的是冷态条件下三种灭火浆液固化体与矽石块接触界面的SEM分析。可以看出在冷态条

件下,黄土基注浆材料、石灰基注浆材料和粉煤灰基注浆材料内部颗粒之间接触均较为紧密,孔隙较小,且与矽石块的界面接触处裂缝较小,仅呈现出一条浆液固化物与矽石块明显包裹覆盖所形成的交界线,均较为紧密地黏附于矽石块表面上,有效地包覆于冷态的矽石块。因此冷态条件下三种注浆材料与矽石块的黏附效果均较好,且可很好地包覆矽石块。

在热态条件下不同浆液与煤炭界面接触的效果差异很大。如图7(e)—(f)所示的是热态条件下三种灭火浆液固化体与煤炭界面接触界面的SEM分析。从图中可以看出在高温条件下,黄土基注浆材料固化体表面出现一种较为疏松的絮状物质,这些絮状物质未能形成连接紧密的稳固结构,状态较为松散,其内部颗粒之间疏松多孔,孔隙较大、较多、裂缝也较大、结构较为疏松,表面散落着较多的碎粒、团粒物质,煤炭部分被包裹在其中,黄土基注浆材料和煤炭相接触界面裂缝宽度较大,呈现出一条长长的沟壑,其对于煤炭呈现出黏结不牢

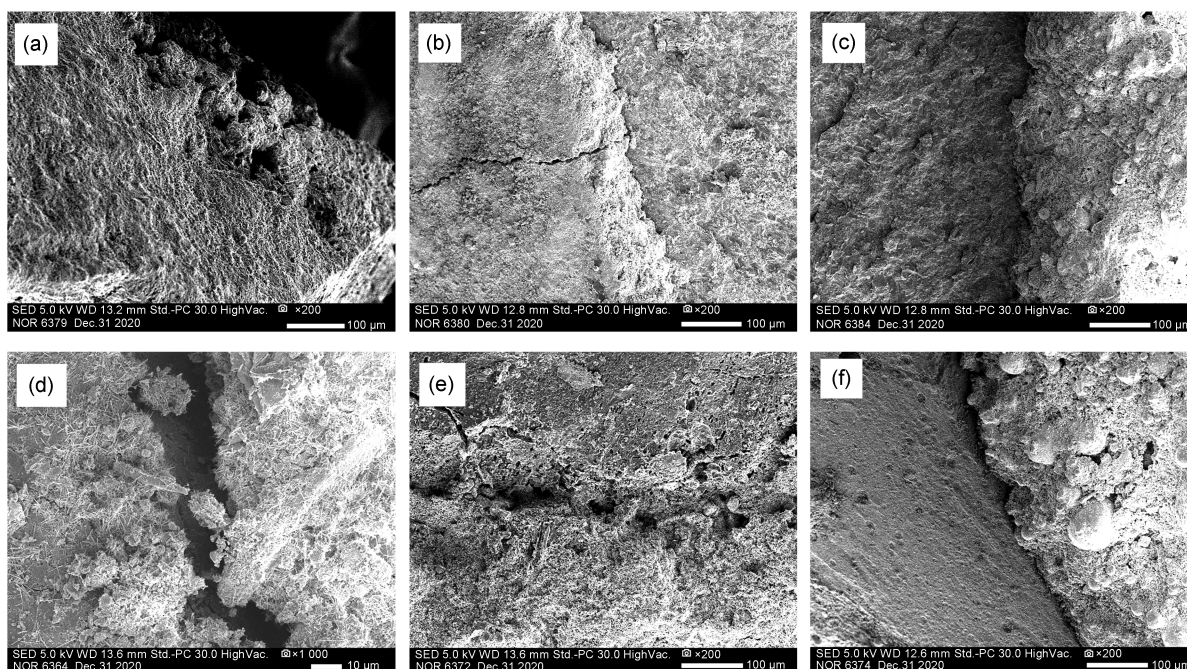


图7 冷态条件下/热态三种灭火浆液固化体与矽石块界面SEM分析

(a) 黄土浆液和矽石体界面; (b) 石灰浆液和矽石块界面; (c) 粉煤灰浆液和矽石块界面; (d) 黄土浆液和煤炭界面; (e) 石灰浆液和煤炭界面; (f) 粉煤灰浆液和煤炭界面。

**Fig. 7** SEM analysis of the interface between three kinds of fire extinguishing slurry solidified body and gangue block under cold conditions

(a) Interface between loess grout and gangue body; (b) interface between lime grout and gangue block; (c) interface between fly ash grout and gangue block; (d) loess grout and coal interface; (e) lime grout and coal interface; (f) fly ash grout and coal interface.

靠,包裹不全面的缺陷。说明黄土基注浆材料与煤炭的黏附效果不好,包裹性较差。

石灰基注浆材料固化体内部颗粒之间接触较为紧密,孔隙较小,且与煤炭的接触均较为紧密<sup>[28]</sup>,紧密地覆盖包裹在矽石体表面上,没有明显的接触空隙,有效包裹着冷态的矽石体。说明在高温状态下,石灰基注浆材料相较于黄土基注浆材料可更好地包覆于燃着的煤炭。

粉煤灰基注浆材料固化体表面呈现一个结构密实,孔隙和裂缝较少的稳固结构<sup>[29]</sup>,将煤炭紧密黏结包覆。明显观察到粉煤灰玻璃珠颗粒表面覆盖着层状、粒状的物质。说明浆液中的粉煤灰被激发,并有水化产物生成,充分包覆和粘接矽石颗粒,粉煤灰颗粒填充了部分水泥颗粒无法填充的细小孔隙,密实结构,这是能够形成结构较为密实的固化体并与煤表面紧密粘接的主要原因。

2.3.2 浆液固化体XRD分析

浆液原料的XRD分析如图8(a)所示,可以

看出水泥的XRD图谱中莫来石的衍射强度最强,硅线石次之,有较为明显的衍射峰。石灰的XRD图谱中Ca(OH)<sub>2</sub>的衍射强度较强,莫来石次之,CaCO<sub>3</sub>的特征峰不明显。黄土的XRD图谱中SiO<sub>2</sub>的衍射强度最强,部分低钠长石相应的特征峰不明显。粉煤灰的XRD图谱中主要物质为莫来石。

在冷态和热态条件下,不同基体注浆材料的XRD图谱分析如图8(b)所示。从图8(b)中可以看出,冷态和热态条件下,粉煤灰基注浆材料的水化产物主要为Ca(OH)<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub>和硅线石。其中,Ca(OH)<sub>2</sub>和CaCO<sub>3</sub>的衍射峰较强;黄土基注浆材料的水化产物主要为CaCO<sub>3</sub>和SiO<sub>2</sub>,其中SiO<sub>2</sub>的衍射峰较强;而石灰基注浆材料水化产物主要Ca(OH)<sub>2</sub>和CaCO<sub>3</sub>,其中Ca(OH)<sub>2</sub>的衍射峰较强。通过对比冷热态条件改变前后,三种基体注浆材料的主要水化产物可知,主要水化产物均无明显变化,说明三种浆液性质都较稳定。但通过对比热态条件下水化

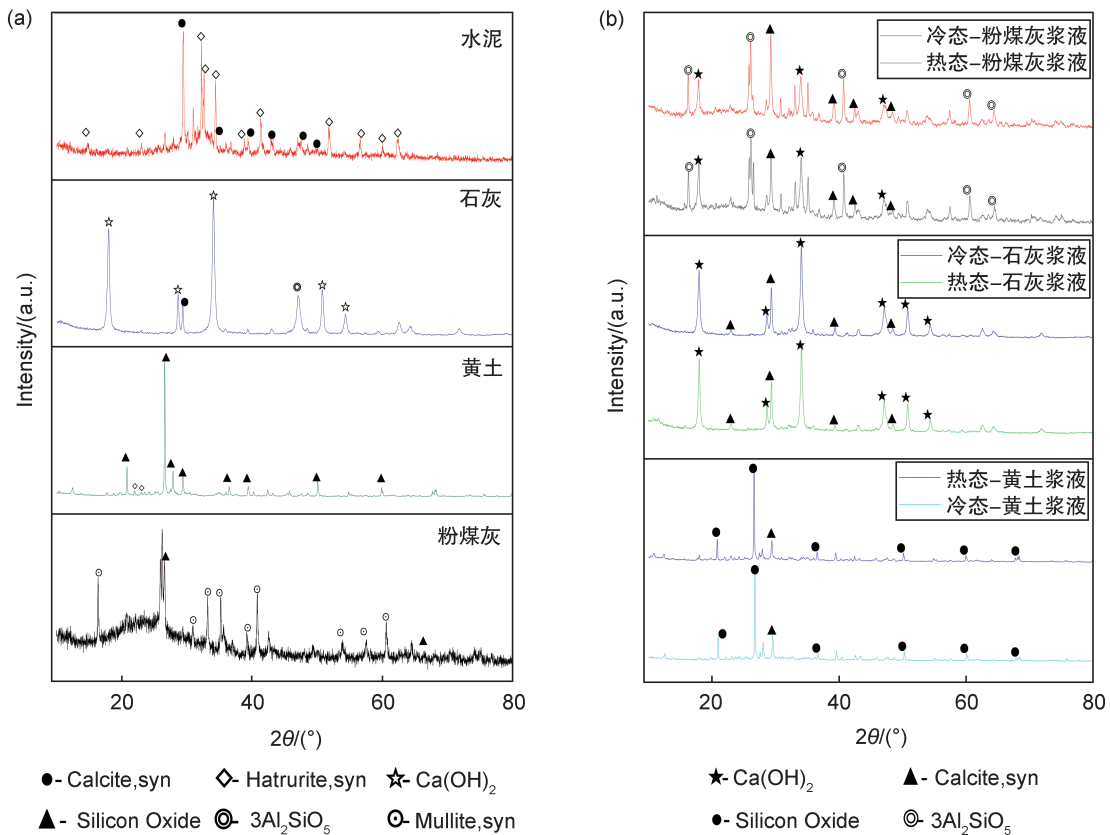


图8 XRD图谱分析

(a)浆液原料(b)冷态/热态条件下不同基体注浆材料。

Fig. 8 XRD pattern analyses

(a) slurry raw materials (b) different matrix grouting materials under cold/hot conditions.

产物可知,粉煤灰基注浆材料产物中出现的硅线石,属于耐火材料的一种,可以有效改善矸石山自燃,且主要原料粉煤灰成本低,大量使用也有利于消纳固废。

### 3 结论

1)通过对热态条件下灭火材料可渗透性研究发现,粉煤灰基注浆材料与矸石颗粒黏结紧密部分的长度为38 mm,显著优于黄土基注浆材料和石灰基注浆材料,具有良好的可注性。

2)在热态条件下对燃烧的高破碎煤炭进行灭火试验,通过监测不同灭火材料对煤炭内部温度的影响,结果表明,粉煤灰基注浆材料加注的煤炭内部温度下降明显,因此其灭火效果较好。

3)通过XRD和SEM等手段对注浆液固化体的物相和微观形貌进行了研究,发现粉煤灰基浆液固化物与煤界面交融处粘接紧密,包裹性好。因此利用粉煤灰作为注浆灭火材料,具有良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 尹建平. 平朔矿区煤矸石山生态修复模式[J]. 露天采矿技术, 2021, **36**(4): 87-88. DOI: 10.13235/j.cnki.ltcn.2021.04.023.  
YIN J P. Ecological Restoration Model of Coal Gangue Dump in Pingshuo Mining Area[J]. *Opencast Min Technol*, 2021, **36**(4): 87-88. DOI: 10.13235/j.cnki.ltcn.2021.04.023.
- [2] 黄文章, 邱贤德, 王建中, 等. 金刚煤矿矸石山煤矸石自燃机理分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2001, **24**(4): 67-70. DOI: 10.3969/j.issn.1000-582X.2001.04.019.  
HUANG W Z, QIU X D, WANG J Z, *et al.* Spontaneous Combustion Mechanism. of Gangue in Jingang Coal Mine[J]. *J Chongqing Univeristy*, 2001, **24**(4): 67-70. DOI: 10.3969/j.issn.1000-582X.2001.04.019.
- [3] ZHAI X W, WU S B, WANG K, *et al.* Environment Influences and Extinguish Technology of Spontaneous Combustion of Coal Gangue Heap of Baijigou Coal Mine in China[J]. *Energy Procedia*, 2017, **136**: 66-72. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.326.
- [4] 满朝晖, 沈军. 煤矸石山自燃治理方法研究[J]. 煤炭工程, 2014, **46**(7): 66-69. DOI: 10.11799/ce201407023.  
MAN C H, SHEN J. Study on Spontaneous Combustion Treatment of Coal Gangue Heap[J]. *Coal Eng*, 2014, **46**(7): 66-69. DOI: 10.11799/ce201407023.
- [5] WU Y G, YU X Y, HU S Y, *et al.* Experimental Study of the Effects of Stacking Modes on the Spontaneous Combustion of Coal Gangue[J]. *Process Saf Environ Prot*, 2018, **123**: 39-47. DOI: 10.1016/j.psep.2018.12.025.
- [6] 宁宝贵, 白苏敏, 刘姣, 等. 自燃矸石山动态检测与监测的实践探讨[J]. 山西建筑, 2021, **47**(18): 73-74. DOI: 10.13719/j.cnki.1009-6825.2021.18.025.  
NING B G, BAI S M, LIU J, *et al.* Discussion on the Practice of Dynamic Detection and Monitoring of Coal Gangue Piles[J]. *Shanxi Archit*, 2021, **47**(18): 73-74. DOI: 10.13719/j.cnki.1009-6825.2021.18.025.
- [7] ZHAO F Y, PENG Q H. Gangue Rocky Mountain Spontaneous Combustion Accident Analysis and Comprehensive Management Technology Application[J]. *Coal Technology*, 2007, **26**(6): 70-72. DOI: 10.1080/00102202.2021.1971661.
- [8] WANG S B, LUO K L, WANG X, *et al.* Estimate of Sulfur, Arsenic, Mercury, Fluorine Emissions Due to Spontaneous Combustion of Coal Gangue: An Important Part of Chinese Emission Inventories[J]. *Environ Pollut*, 2016, **209**(12): 107-113. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.11.026.
- [9] 杨再良. 浅谈遵义地区镍钼金属矿矸石山自燃的治理方案[J]. 新疆有色金属, 2023, **46**(5): 63-64. DOI: 10.16206/j.cnki.65-1136/tg.2023.05.027.  
YANG Z L. Discussion on the Treatment Plan of Spontaneous Combustion of Nickel-molybdenum Metal Gangue Mountain in Zunyi Area[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*. 2023, **46**(5): 63-64. DOI: 10.16206/j.cnki.65-1136/tg.2023.05.027.
- [10] 巩潇, 刘飞, 赵方莹. 煤矸石山自燃机理及灭火技术研究[J]. 洁净煤技术, 2012, **18**(5): 83-87. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8759.2008.04.006.  
GONG X, LIU F, ZHAO F Y. Spontaneous Combustion Mechanism of Gangue Dump and Fire Extinguishing Techniques[J]. *Clean Coal Technol*, 2012, **18**(5): 83-87. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8759.2008.04.006.
- [11] 何骞, 肖昉, 杨蒙, 等. 矸石山自燃防治技术及综合治理模式发展趋势[J]. 煤矿安全, 2020, **51**(8): 220-226. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2020.08.047.  
HE Q, XIAO Y, YANG M, *et al.* Development Trend of Spontaneous Combustion Prevention Technology and Comprehensive Control Mode in Gangue Hill[J]. *Saf Coal Mines*, 2020, **51**(8): 220-226. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2020.08.047.
- [12] 崔彦鹏. 煤矸石山注浆灭火的实践应用[J]. 山西冶金, 2021, **44**(5): 250-251. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2021.05.099.  
CUI Y P. Practice and Application of Grouting Fire Extinguishing in Coal Gangue Hill[J]. *Shanxi Metallurgy*. 2021, **44**(5): 250-251. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2021.05.099.
- [13] 安永兴, 梁明武, 赵平. 煤矸石山综合治理技术模式与实践[J]. 中国水土保持科学, 2012, **10**(1): 98-102.

- DOI: 10.3969/j.issn.1672-3007.2012.01.017.  
AN Y X, LIANG M W, ZHAO P. Technology Mode and Practice of Comprehensive Treatment on Piles of Coal Gangue[J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2012, **10**(1): 98-102. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3007.2012.01.017.
- [14] 张燕平, 卞正富. 煤矸石山复垦整形设计中的几个关键问题[J]. *能源环境保护*, 2005, **19**(2): 43-45. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8759.2005.02.012.  
ZHANG Y P, BIAN Z F. Several Key Problems Studying in Form Designing of Coal Waste Rock Hill Reclamation[J]. *Energy Environ Prot*, 2005, **19**(2): 43-45. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8759.2005.02.012.
- [15] 廖四海, 杜勇立, 刘振华, 等. 煤矸石堆放地周围土壤中重金属的污染特性及评价[J]. *环境工程*, 2014, **32**(8): 118-120. DOI: 10.13205/j.hjgc.201408028.  
LIAO S H, DU Y L, LIU Z H, *et al.* The Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Gangue Piling Site to Surrounding Soil[J]. *Environ Eng*, 2014, **32**(8): 118-120. DOI: 10.13205/j.hjgc.201408028.
- [16] RADWAN M K H, LEE F W, WOON Y B, *et al.* A Study of the Strength Performance of Peat Soil: A Modified Cement-based Stabilization Agent Using Fly Ash and Polypropylene Fiber[J]. *Polymers*, 2021, **13**(23): 4059. DOI: 10.3390/polym13234059.
- [17] 周洲. 脱硫石膏-粉煤灰基胶凝材料的研究现状[J]. *四川建材*, 2017, **43**(1): 13. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2017.01.006.  
ZHOU Z. Research Status of Desulfurization Gypsum-fly Ash Based Cementitious Materials[J]. *Sichuan Build Mater*, 2017, **43**(1): 13. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2017.01.006.
- [18] WU Y G, YU X Y, HU S Y, *et al.* Experimental Study of the Effects of Stacking Modes on the Spontaneous Combustion of Coal Gangue[J]. *Process Saf Environ Prot*, 2018, **123**: 39-47. DOI: 10.1016/j.psep.2018.12.025.
- [19] 刘健, 胡南琦, 徐宝军, 等. 水泥基土石坝防渗注浆材料试验[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2018, **48**(2): 39-45. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2017.066.  
LIU J, HU N Q, XU B J, *et al.* Experiment of Cement-based Seepage Grouting Materials for Earth-rock Dam [J]. *J Shandong Univ Eng Sci*, 2018, **48**(2): 39-45. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2017.066.
- [20] 周海龙. 脱硫石膏-粉煤灰复合水泥土耐久性能与固化机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.  
ZHOU H L. Study on Durability and Curing Mechanism of Desulfurized Gypsum-fly Ash Composite Cement-soil [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015.
- [21] 贾世杰, 徐洪艳, 陈辉. 粉煤灰-水泥基胶结充填体早期强度及水化机理研究[J]. *采矿技术*, 2021, **21**(3): 164-167. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2900.2021.03.047.  
JIA S J, XU H Y, CHEN H. Study on Early Strength and Hydration Mechanism of Fly Ash-cement-based Cemented Backfill[J]. *Min Technol*, 2021, **21**(3): 164-167. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2900.2021.03.047.
- [22] 兰天翔, 李绪萍, 段圆圆. 乌海地区粉煤灰充填膏体材料水化机理研究[J]. *现代矿业*, 2021, **37**(10): 261-262. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6082.2021.10.076.  
LAN T X, LI X P, DUAN Y Y. Study on Hydration Mechanism of Fly Ash Filling Paste Material in Wuhai Area[J]. *Mod Min*, 2021, **37**(10): 261-262. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6082.2021.10.076.
- [23] HUSSAIN Z, CHANG N, SUN J Q, *et al.* Modification of Coal Fly Ash and Its Use as Low-cost Adsorbent for the Removal of Directive, Acid and Reactive Dyes[J]. *J Hazard Mater*, 2022, **422**: 126778. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126778.
- [24] LIU S, LIU W, JIAO F, *et al.* Production and Resource Utilization of Flue Gas Desulfurized Gypsum in China: A Review[J]. *Environ Pollut*, 2021, **288**: 117799. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117799.
- [25] LIU S H, FANG P P, WANG H L, *et al.* Effect of Tuff Powder on the Hydration Properties of Composite Cementitious Materials[J]. *Powder Technol*, 2021, **380**: 59-66. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.11.029.
- [26] 张爱青. 大同矿区煤矸石山自燃防治及高效灭火技术[J]. *洁净煤技术*, 2010, **16**(1): 110-112. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6772.2010.01.027.  
ZHANG A Q. The Prevention and Control Technology of Spontaneous-combustion Gangue in Datong Mine[J]. *Clean Coal Technol*, 2010, **16**(1): 110-112. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6772.2010.01.027.
- [27] 王恩, 樊少武, 马超. 粉煤灰灌浆材料防治煤矸石山自燃的探讨[J]. *洁净煤技术*, 2009, **5**(5): 87-89. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6772.2009.05.024.  
WANG E, FAN S W, MA C. Study on Prevention of Autoignition of Gangue Hill by Fly Ash Grouting Material[J]. *Clean Coal Technol*, 2009, **5**(5): 87-89. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6772.2009.05.024.
- [28] 孙伟. 粉煤灰基注浆充填材料及性能试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.  
SUN W. Experimental Study on Fly Ash-based Grouting Filling Material and Its Performance[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.
- [29] 童立元, 潘石, 邱钰, 等. 大掺量粉煤灰注浆充填材料试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2002, **32**(4): 643-647. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-0505.2002.04.024.  
TONG L Y, PAN S, QIU Y, *et al.* Experimental Research on Grouting Material with Large Volume Fly Ash[J]. *J Southeast Univ Nat Sci Ed*, 2002, **32**(4): 643-647. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-0505.2002.04.024.