



移动扫码阅读

董红娟,卢悦,袁治国,等.基于温度场分布规律的矸石山注浆钻孔布置方案研究[J].能源环境保护,2022,36(3):84-89.

DONG Hongjuan, LU Yue, YUAN Zhiguo, et al. Research on the layout of fire-extinguishing grouting holes based on the temperature field distribution of gangue hills[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(3): 84-89.

基于温度场分布规律的矸石山注浆钻孔布置方案研究

董红娟¹, 卢悦², 袁治国³, 温磊³, 卢宪路³, 王晨阳¹, 熊青青¹

(1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 包钢勘察测绘研究院, 内蒙古 包头 014000; 3. 国能蒙西煤化工股份有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016062)

摘要:基于自然矸石山东北角第一台阶的实测数据,利用Fluent软件构建矸石山三维物理模型,模拟了矸石山内部温度场分布规律。高温区域位于矸石山边坡下方,着火点位于垂直于坡面向下7~10 m,顶面正下方9~11 m范围内,温度达到438.7℃。将布孔方案应用于矸石山注浆治理现场,在矸石山顶以梅花形布置4排注浆孔,排间距为3 m,孔深为10 m。结果表明:在开展注浆灭火工作前,该方案可以有效降低注浆危害,提高注浆灭火的治理效果和工程效益。

关键词:矸石山自燃;数值模拟;温度场分布;注浆灭火;钻孔布置

中图分类号:X752

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)03-0084-06

Research on the layout of fire-extinguishing grouting holes based on the temperature field distribution of gangue hills

DONG Hongjuan¹, LU Yue², YUAN Zhiguo³, WEN Lei³, LU Xianlu³,

WANG Chenyang¹, XIONG Qingqing¹

(1. The School of Mining and Coal Technology, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Baotou Iron and Steel Survey and Mapping Research Institute, Baotou 014000, China; 3. Guoneng Mengxi Coal Chemical Co., Ltd., Erdos 016062, China)

Abstract: Based on the measured data of the first step at the northeast corner of the gangue hill, a three-dimensional physical model of the gangue hill was constructed using Fluent software, and the internal temperature field distribution law of the gangue hill was simulated and studied. The high temperature area was located under the side slope of the gangue hill. The ignition points were located at 7~10 m below the slope surface perpendicular to the slope and 9~11 m below the top. The temperature at the ignition points reached 438.7℃. The hole layout scheme was applied to the grouting treatment site of the gangue hill. Four rows of grouting holes were arranged in a plum blossom shape on the top of the gangue hill, with a row spacing of 3 m and a hole depth of 10 m. The results show that before grouting and extinguishing work, this scheme can effectively reduce the grouting hazards and improve the treatment effect of grouting and extinguishing.

Key Words: Spontaneous combustion of gangue hills; Numerical simulation; Temperature field distribution; Grouting to extinguish fire; Drilling arrangement

收稿日期:2022-02-19;责任编辑:金丽丽

基金项目:粉煤灰基固废制备抑制矸石山自燃表面喷浆封闭材料耐久性机理研究(NJZY21983);中央引领地方科技发展专项资金;乌海矿区煤矸石山自燃大气污染调查及灭火技术研究与示范工程;内蒙古自治区科技重大专项;乌海及周边地区大气污染防治重大关键技术研究与示范

第一作者简介:董红娟(1983-),女,辽宁葫芦岛人,副教授,博士,研究方向矿产资源综合利用。E-mail:68362598@qq.com。Tel:15024735266

0 引 言

煤矸石是煤炭开采伴生的大量固体废弃物,占据煤炭开采总量的 15%~20%^[1-3]。矸石山长期的露天堆放,极易导致煤矸石中的硫铁矿氧化放热,导致矸石山发生氧化自燃,目前我国大约有 30%堆积的矸石山正在自燃或存在自燃倾向^[4-5]。自燃矸石山不断向空气中释放 SO₂、H₂S、CO、CO₂ 等气体,严重破坏矿区周边的大气环境,影响周边居民的身体健康^[6-7]。目前多家矿山企业采用注浆灭火法进行矸石山自燃治理,取得了一定效果。但在治理前,对矸石山内部温度分布情况和火区范围分布情况缺乏详细判定,导致施工期间注浆孔位置和钻孔深度缺乏科学指导,布置注浆孔较为盲目,导致治理后矸石山发生不同程度的复燃,使注浆灭火的效果大打折扣。

本文以内蒙古鄂尔多斯地区某矸石山东北角第一台阶的自燃区域为对象,采用 Fluent 模拟软件,对煤矸石山内部自燃区域温度场分布进行数值模拟分析,并且制定详细注浆孔布置方案,提高矸石山注浆灭火的治理效果。

1 实验区域概况

内蒙古自治区鄂尔多斯棋盘井镇某矸石山由洗煤厂排矸经平地堆积而成,空间上分台阶呈梯形状态。该矸石山的土方量约 400 万 m³,底部占地面积 16.67 万 m²,平均高差 32 m,矸石山顶部面积为 11.57 万 m²,坡面面积 16.4 万 m²,平均坡度 36°,最大坡角 38°。

该矸石山堆放过程中受到外界环境的直接作用,内部逐渐出现高温区域并且引发自燃,虽然矸石山表面进行了黄土覆盖,但表面高温区超过 100℃,植被难以成活,矸石山附近 SO₂ 浓度严重超标。进现场勘察,矸石山东北角自燃现象较为严重,现以矸石山的东北角第一台阶为对象,进行矸石山内部温度场数值模拟计算,具体位置如图 1 矸石山三维模型图所示。

2 温度场模型建立

2.1 建立几何模型

根据矸石山东北角第一台阶的实际情况,建立三维模型如图 2 所示,模型总体积为 1.14 万 m³,顶部边长 15.5 m,面积 240.25 m²,底部边长 36.14 m,面积 1 306 m²,高 20.79 m,边坡斜长 33.53 m,倾角 38°。

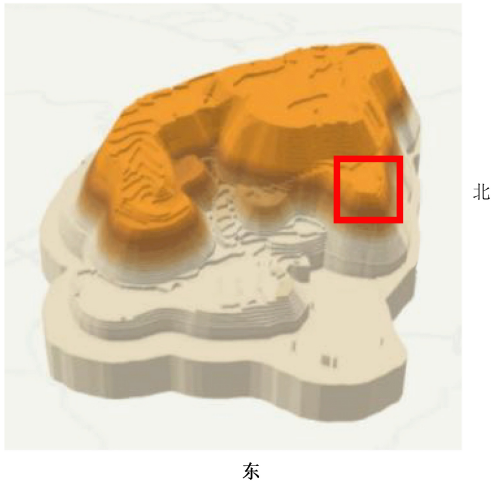


图 1 矸石山三维模型图
Fig.1 3D model of the gangue hill

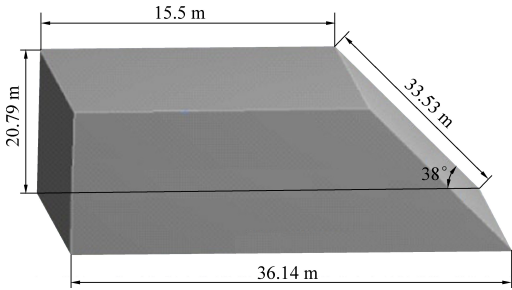


图 2 矸石山东北角第一台阶几何模型
Fig.2 Geometric model of the first step in the northeast corner of gangue hill

2.2 建立温度场数学模型

2.2.1 网格划分

为使 Fluent 模拟结果准确,需保证矸石山网格划分的质量,在模拟计算中发现,采用六面体网格会提高计算效率和准确度,网格数量为 285 000。经检验,网格质量符合模拟要求。

2.2.2 确定关键参数及边界条件

矸石山内部产生的温度场的变化处于瞬时变化状态,且矸石山内部的孔隙形成良好的空气渗流通道,因此将煤矸石山的自燃视为多孔介质的非稳态导热过程。为简化模型,提出 3 点假设:

- (1)煤矸石密度、热容等物性为定值,不随温度变化,矸石山内部气流速度很小;
- (2)忽略风流所受重力,以及风流在煤矸石山内部摩擦产热对氧化升温的影响;
- (3)矸石山对流换热系数为常数,环境温度为 26℃不变,不随时间变化而改变。

根据能量守恒方程,可将矸石山氧化放热的热量 Q_1 看作是矸石山向周围空气的散热量 Q_2 、矸

石山含水的吸热量 Q_3 和矽石山的吸热量 Q_4 的总和,其余边界视为绝热边界,无对流换热:

$$Q_1=Q_2+Q_3+Q_4$$

(1)

矽石山氧化放热量:

$$Q_1=q_s\frac{6V(1-n)}{D}$$

(2)

式(2)中: q_s ——矽石表面的放热量, W/m^2 ;

V ——为矽石山体积, m^3 ;

n ——矽石山孔隙率,%;

D ——为矽石的平均粒径, m 。

矽石山向周围空气的散热量:

$$Q_2=KA_1(t_0-t_f)$$

(3)

式(3)中: K ——矽石山的对流给热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$;

A_1 ——矽石山与空气接触面的面积, m^2 ;

t_0 ——为矽石山表面的温度, $^\circ\text{C}$;

t_f ——环境温度, $^\circ\text{C}$ 。

矽石山含水吸热量:

$$Q_3=\frac{VK_w\rho_w[C_0(100-t_w)+2\,501]}{K_0\tau}$$

(4)

式(4)中: K_w ——矽石的含水率,%;

ρ_w ——水的密度, $1\,000\,\text{kg}/\text{m}^3$;

C_0 ——煤矽石的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

K_0 ——矽石山的松散系数;

τ ——矽石山的平均温度, $^\circ\text{C}$;

t_w ——矽石山吸热过程中的温度, $^\circ\text{C}$ 。

矽石山的吸热量:

$$Q_4=\frac{(1-n)v\rho_0C_0(\bar{t}-t_w)}{\tau}$$

(5)

式(5)中: v ——单位体积矽石山上升的温度, $\text{m}^3\cdot^\circ\text{C}$;

ρ_0 ——矽石的密度, kg/m^3 ;

$\bar{t}$ ——矽石氧化吸热后的平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

由于矽石山中的水分在燃烧阶段不会有持续的补充,当温度上升至水的燃点,矽石山中原有的水分基本蒸发,空气中水分不再凝结,所以此时矽石山的含水量很低, K_w 为 0,即 Q_3 为 0,矽石中水分的吸热量忽略不计,热平衡方程最终简化为:

$$q_s\frac{6V(1-n)}{D}=KA_1(t_0-t_f)+\frac{(1-n)v\rho_0C_0(\bar{t}-t_w)}{\tau}$$

(6)

自燃煤矽石山及环境的物性参数如表 1 所示。

表 1 自燃矽石山模拟的主要物性参数

Table 1 Main physical parameters for simulating spontaneous combustion gangue hill

参数名称	计算数值
矽石山体积	1.14 万 m^3
矽石山孔隙率	0.3%
煤矽石平均粒径	0.03 m
环境温度	26 $^\circ\text{C}$
矽石山与空气接触面积	0.91 m^2
对流给热系数	10 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$
煤矽石比热容	1 400 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
煤矽石含水量	0.59%
导热系数	0.18 $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$
矽石山的松散系数	1.4

2.3 模拟结果分析

利用 Fluent 软件,根据矽石山模型和边界条件,对矽石山内部温度场进行数值模拟,得到随矽石山堆积时间增加,内部温度场变化的情况。模拟图为矽石山几何模型正视图,剖面位于矽石山几何模型顶板边长 7.75 m 处,即顶面的中心位置,如图 3 所示。

图 4 为矽石山内部不同高度处,平均温度随矽石山堆积时间的变化,曲线显示,随着矽石山的高度增加,矽石山内部温度呈现先升高后降低的趋势,且高温点出现的高度在矽石山的上半部 10.4 m 左右,更靠近矽石山的表面。

从图 3(a) 可知,在矽石山堆积 60 d 后,煤矽石处于氧化燃烧初期阶段,矽石山边坡下方出现高温区,结合图 4 曲线可知,矽石山内部的高温区域出现在矽石山的上半部,由此判定矽石山内的温度上升,使矽石山内外形成温差,产生了烟囱效应,并且在热风压的共同作用下,空气由矽石山底部进入,并不断向上部移动,最终从边坡两侧流出,故矽石山的边坡位置的氧气供应充足,是主要的风流活动区,矽石自燃的多发区域。

从图 3(b) 可知,矽石山堆积 120 d 后,高温区域的温度持续上升,此时的矽石正在缓慢氧化,矽石山内部的最高温度达到 356.3 $^\circ\text{C}$,并且图中明显显示,随着矽石山内部的燃烧升温,矽石山顶部和坡面表面出现高于环境温度的表面高温区。

从图 3(c) 可知,矽石山堆积 180 d 时,矽石山内部的温度局部可达到 438.7 $^\circ\text{C}$,矽石山表面高温区域不断扩大。煤矽石山在持续堆积 210 d 时,如图 3(d) 所示,矽石山内部高温区的矽石全面进入燃烧阶段,此时矽石山内部的着火点位于垂直

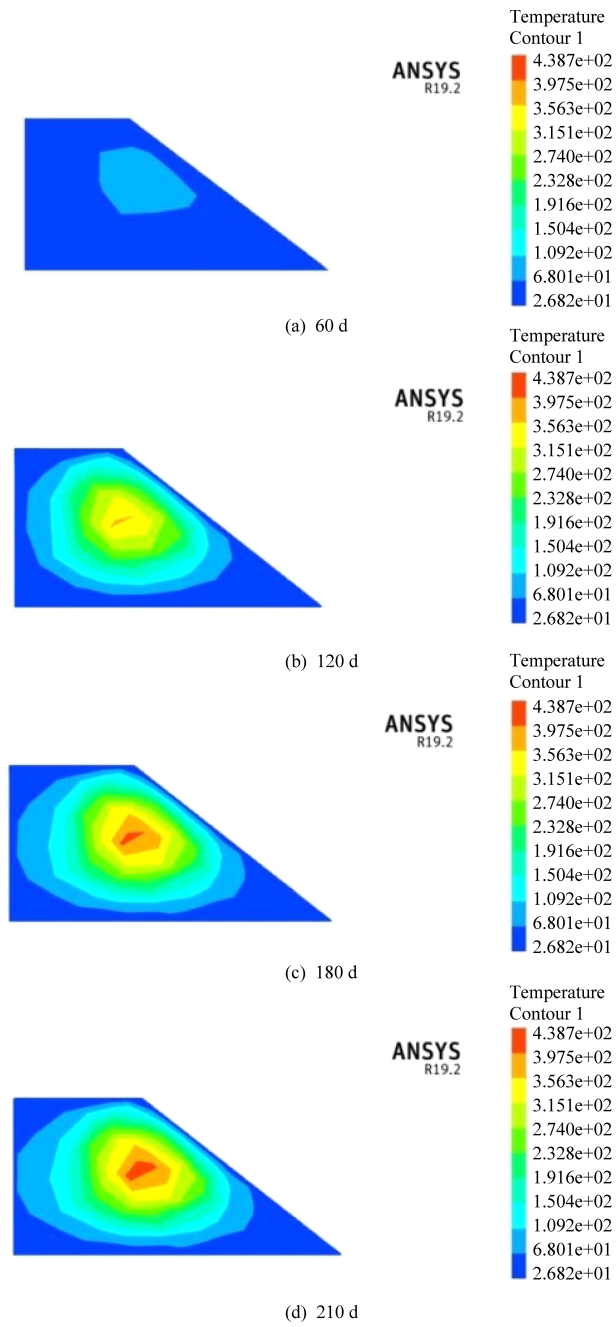


图3 矸石山堆积不同天数时温度分布图
Fig.3 Temperature distribution map of gangue hill accumulation for different days

于矸石山坡面向下 7~10 m,顶面正下方 9~11 m 的区域内,矸石山表面由坡面顶部沿坡面向下 25 m,坡面顶部沿顶面向内 15 m 的范围内均为矸石山的表面高温区,矸石山内部着火点位置与表面高温区范围如图 5 所示。

确定注浆孔的深度主要以着火点深度为依据,以达到精准扑灭着火点的目的。根据矸石山内部温度场分布的模拟结果显示,着火点位于矸石山顶部垂直向下 9~11 m 的位置,故将注浆孔

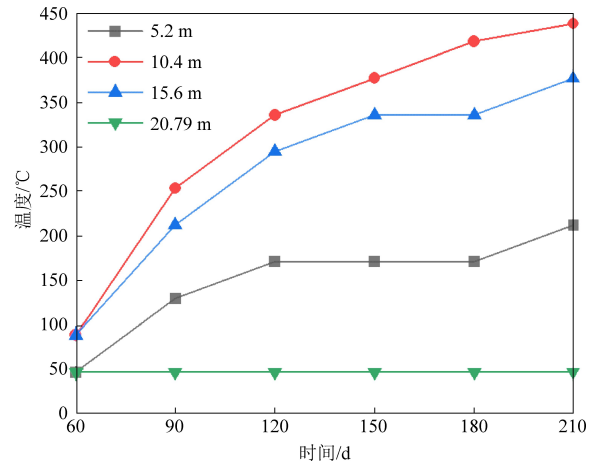


图4 矸石山内部不同高度处平均温度随堆积时间变化曲线图

Fig.4 The curve diagram of the average temperature at different heights inside the gangue hill with the accumulation time

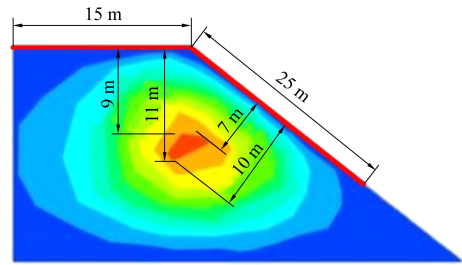


图5 矸石山内部着火点位置与表面高温区范围示意图
Fig.5 Schematic diagram of the location of the ignition point inside the gangue hill and the scope of the high temperature area on the surface

的深度设置为 10 m。

3 现场工程应用

3.1 注浆区域概况

矸石山坡面和顶部已覆土,坡面顶部土层 50 cm,坡面土层 30 cm 左右,土质为沙土和沙粒混合物,土质较差,无养分。由于坡面无被植物覆盖,造成水土流失,矸石山的部分表土已经烧成黑色,如图 6 所示,内部自燃现象严重。

为了解矸石山内部温度及分布规律,首先利用红外热像仪测得矸石山表面红外辐射的热像分布图,初步定位矸石山表面高温区域,再在圈定的高温区域的矸石山顶部钻取勘测孔进行内部的温度测量^[8]。勘测孔布置间距为 20 m,孔深 18 m,采用热电偶分别对勘测孔内部距顶面 3、6、9、12 m 的位置测温并记录,得到矸石山东南角第一台阶内部温度分布的特征,矸石山内部的着火点集中



图 6 矸石山治理前现状

Fig.6 Status of gangue hill before treatment

于边坡下方的矸石山中,距顶面 3 m 处的平均温度为 304 ℃,6 m 处平均温度 442 ℃,距顶面 9 m 的温度高达 454 ℃,距顶面 12 m 的平均温度为 412 ℃,勘测孔内部的温度超过 12 m 后开始逐渐下降。由测温结果可知,矸石山内部的高温区域较大,且最高温度位于垂直于顶面约 9 m 深的位置,矸石山的表面温度较高。矸石山现场的自燃区域温度分布特点与模拟结果基本相符,故采用对于模型模拟结果为对象制定的钻孔方案,进行矸石山现场的注浆灭火工作。

3.2 灭火浆液选取与注浆施工关键参数

注浆灭火技术的工艺,是将灭火浆液通过在矸石山上钻取的注浆孔注入矸石山内部孔隙中,形成包裹体,在降低高温区域温度的同时,阻断氧气输送通道,抑制氧化反应,达到彻底根治矸石山自燃的效果。选取当地电厂大量废弃,利用率低下的粉煤灰、水泥等外加剂制备注浆浆液,浆液具有内聚粘结力强、包裹力强、结实率高等特点。在进入矸石山内部着火点后可以有效包裹煤矸石,封堵漏风通道,迅速降低着火点温度,并且凝固后的浆液固化体性能够达到灭火要求^[9]。综合考虑浆液的化学稳定性、流动性和保水性等性能,确定注浆孔径 108 mm,每孔平均注浆量 40 m³,注浆压强 2.5 MPa,灭火浆液的扩散半径 2 m,在矸石山顶

部梅花形布置 4 排注浆孔,排间距 3 m,孔深 10 m (图 7~8),保证各钻孔之间的注浆浆液可以相互连接,达到有效充填矸石间的空隙,充分包裹自燃矸石的目的^[10]。

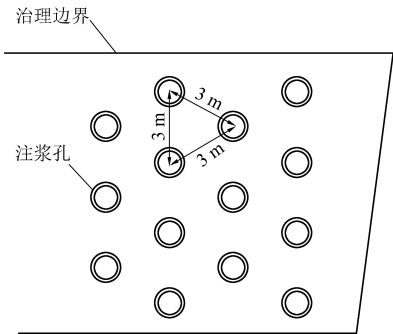


图 7 钻孔位置布置示意图

Fig.7 Drilling position layout diagram

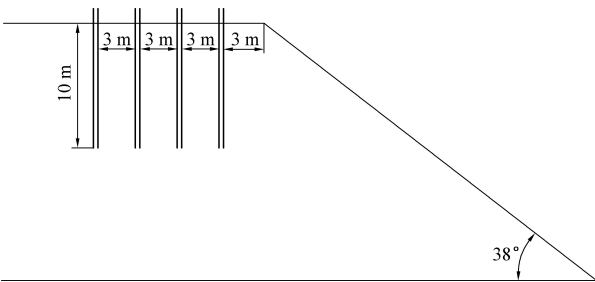


图 8 注浆孔深度布置示意图

Fig.8 Schematic diagram of grouting hole depth layout

3.3 注浆效果检验

矸石山注浆作业完成后,利用热电偶测温装置测量勘测孔内温度参数,以监测注浆治理效果^[11]。对于温度复测结果高于 80 ℃的注浆孔进行多次注浆处理和温度复测,直至测温孔内温度小于 80 ℃,视为注浆治理取得成效。

在自燃矸石山注浆治理 1 年后,检验注浆灭火方案的治理效果,通过在矸石山表面和勘测孔内温度测量进行对比,表 2 为随机抽取的注浆孔的测温结果。

表 2 矸石山注浆治理前后温度监测记录

Table 2 Temperature monitoring records before and after grouting treatment of the gangue mountain

测温位置	测温孔号	开孔温度/℃			复测温度/℃		
		3 m	6 m	9 m	3 m	6 m	9 m
矸石山东北角 第一台阶	Z30	260	280	290	35	39	43
	Z33	430	523	503	49	54	50
	Z103	110	130	210	38	42	45
	Z115	420	680	560	27	29	30
	Z128	413	440	510	21	25	26
	Z131	370	430	491	24	30	34
	Z298	240	249	262	27	30	32
	Z301	278	380	450	37	41	45
	Z303	280	360	470	41	45	47

测温结果显示,矸石山表面温度接近于正常地表温度,内部最低温为 21 ℃,最高为 54 ℃,所有测温孔内温度都小于规范要求的不高于 80 ℃ 的标准。现场的烟尘和刺激性气味大大减小,矸石山的自燃治理取得了较好的效果。

4 结 论

(1)利用 Fluent 软件对矸石山东北角第一台阶温度场分布进行模拟,结果显示高温区域位于矸石山边坡下方,着火点位于垂直于坡面以下 7~10 m 处,温度为 438.7 ℃;坡面顶部沿坡面向下 25 m,坡面顶部沿顶面向内 15 m 的范围,均为矸石山模型的表面高温区域。

(2)对自燃矸石山温度场分布模拟结果进行注浆灭火的钻孔布置,在矸石山顶部梅花形布置 4 排注浆孔,排间距 3 m,孔深 10 m。矸石山东北角第一台阶现场测温结果与 Fluent 软件模拟结果相吻合,并采取模拟钻孔方案对矸石山进行注浆钻孔治理,取得良好的治理成果。

(3)准确测定自燃矸石山内部温度场分布规律,对矸石山内部高温区域进行准确判定并制定钻孔布置方案,可以有效避免盲目注浆造成的危害,对提高钻孔注浆灭火工作的效率和治理效果具有实践指导意义。

参考文献

[1] 常允新,朱学顺,宋长斌,等. 煤矸石的危害与防治 [J].

中国地质灾害与防治学报, 2001 (2): 42-46.
[2] W J Robertson, P H-M Kinnunen, J J Plumb, et al. Moderately thermophilic iron oxidising bacteria isolated from a pyritic coal deposit showing spontaneous combustion [J]. Minerals Engineering, 2002, 15 (11): 815-822.
[3] 李艳英. 洗煤水治理矸石山自燃对地下水的影响研究 [J]. 煤矿环境保护, 2000 (4): 29-30.
[4] 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.
[5] 张震,周少玺,乔伟. 煤矿矸石山自燃防治技术研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2018 (14): 45-46.
[6] 位蓓蕾,胡振琪,王晓军,等. 煤矸石山的自燃规律与综合治理工程措施研究 [J]. 矿业安全与环保, 2016, 43 (1): 92-95.
[7] 罗彤彤,赵平. 煤矸石山注浆灭火与喷播建植兼顾的治理技术及应用 [J]. 精细与专用化学品, 2021, 29 (3): 22-25.
[8] 自卫,倪萌,王兴华. 煤矿矸石山自燃综合治理技术应用 [J]. 山东煤炭科技, 2020 (10): 118-120.
[9] 白振龙,李晓东. 粉煤灰注浆法在治理自燃煤矸石山工程中的应用 [C] // 2017 年全国选煤学术交流会论文集., 2017: 259-260.
[10] 张春林,王化耀,袁建江,等. 煤矸石场自燃治理注浆技术研究与工程实践 [J]. 中国煤炭地质, 2021, 33 (2): 73-77.
[11] 张立国,曹乃夫,郭海相. 浅埋深近距离煤层开采上覆小窑火区治理技术 [J]. 煤矿安全, 2019, 50 (5): 78-82.