



移动扫码阅读

董红娟,刘亚琳,熊青青,等.基于CO浓度监测的煤矸石山自燃的环境影响因素分析[J].能源环境保护, 2022, 36(5):71-76.
DONG Hongjuan, LIU Yalin, XIONG Qingqing, et al. Analysis of environmental factors affecting spontaneous combustion of coal gangue dump based on CO concentration monitoring[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(5):71-76.

基于CO浓度监测的煤矸石山自燃的环境影响因素分析

董红娟,刘亚琳,熊青青,王晨阳

(内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院,内蒙古 包头 014010)

摘要:为了探究煤矸石山自燃的环境影响规律,基于废弃煤矸石自燃产生的CO浓度监测数据,分析了季节、湿度及风速变化对煤矸石自燃的影响。结果表明:该煤矸石山在春、冬两季节自燃较为强烈,夏、秋两季节自燃较为平缓;随着空气湿度的增大,煤矸石自燃依次经历平缓期、较为强烈期、平缓期;当空气湿度达到32%时,煤矸石自燃最为强烈;随着风速的增大,煤矸石自燃依次经历强烈期、平缓期、强烈期;当风速小于1.88 m/s或大于2.76 m/s时,煤矸石自燃处于强烈期;当风速为1.88~2.76 m/s时,煤矸石自燃处于平缓期。

关键词:煤矸石;自燃;CO浓度;湿度;风速

中图分类号:X751

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)05-0071-06

Analysis of environmental factors affecting spontaneous combustion of coal gangue dump based on CO concentration monitoring

DONG Hongjuan, LIU Yalin, XIONG Qingqing, WANG Chenyang

(The School of Mining and Coal Technology, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: In order to study the environmental factors that affect spontaneous combustion of coal gangue dump, the influences of season, humidity and wind speed on the spontaneous combustion were analyzed based on the monitored concentration data of CO produced during the spontaneous combustion. The results show that the spontaneous combustion of the coal gangue dump is strong in spring and winter, but gentle in summer and autumn. With the increase of air humidity, the spontaneous combustion experiences a gentle period, an intense period and a gentle period in turn. When the air humidity reaches 32%, the spontaneous combustion is the intensest. With the increase of wind speed, the spontaneous combustion of coal gangue dump experiences an intense period, a gentle period and an intense period in turn. When the wind speed is less than 1.88 m/s or greater than 2.76 m/s, the spontaneous combustion of coal gangue dump is in the intense period. When the wind speed is 1.88~2.76 m/s, the spontaneous combustion is in the gentle period.

Key Words: Coal gangue; Spontaneous combustion; CO concentration; Humidity; Wind speed

0 引言

煤矸石是煤炭资源开采过程中和洗煤厂洗煤

过程中排放的固体废物,是碳质、泥质和砂质页岩的混合物,发热值低,含碳量在20%~30%之间,长时间堆放会自燃释放出污染大气的有毒气体^[1-4]。

收稿日期:2022-06-20;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:内蒙古自治区高等学校科学研究项目(粉煤灰基固废制备抑制矸石山自燃表面喷浆封堵材料耐久性能机理研究 NJZY21383);内蒙古自然科学基金项目(煤基固废协同制备矸石山注浆灭火材料研究 2022LHMS05007)

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

目前据学者研究,煤矸石自燃机理主要有黄铁矿氧化学说、细菌作用学说和煤氧复合反应学说^[5-6]。

目前,黄铁矿氧化学说被学者们广泛接受。黄铁矿氧化学说主要认为,煤矸石中所夹杂的黄铁矿(FeS_2)经过井下的煤炭开采过程及煤炭洗选过程,其完整性遭受到了一定的破坏,加大了黄铁矿(FeS_2)与氧气的接触面积,进而加快了黄铁矿(FeS_2)的氧化过程。

黄铁矿在氧化过程中会放出大量的热量,随着时间的延长,黄铁矿氧化反应放出的热量持续积累,导致煤矸石山局部温度升高,温度的升高会使煤矸石中孔隙表面的矸石与煤分子、氧分子的吸附作用增强,煤分子中的碳原子会与氧分子发生化学反应生成CO与 CO_2 ,氧分子还会与CO发生反应生成 CO_2 。自然条件下煤矸石山的自燃大部分处于缓慢氧化阶段或加速氧化阶段,不会进入快速氧化阶段释放 CO_2 ,而是以释放CO为主。

刘晓原^[7]等采用程序升温实验、热重分析实验等方法,研究了原始煤体所含水分的不同对煤自燃进程的影响。结果表明:在原始煤体中所含的水分在煤体自燃的不同阶段对煤的自燃过程影响不同,在煤体缓慢氧化阶段,原始煤体含水量的增加会对煤氧化的过程起抑制作用;在煤体加速氧化阶段,原始煤体含水量的增加会促进煤氧化过程;在煤体快速氧化阶段,原始煤体含水量的增加会更进一步促进煤氧化过程,使煤体自燃释放的CO速率达到最快。张玉涛、杨杰^[8]等采用热重分析、差示扫描量热法,研究了在相同升温速率下氧气浓度的不同对煤体自燃的影响。表明在升温速率一定的情况下,随着氧气浓度的增大,煤自燃的特征气体CO释放量达到最大值的温度会降低;相同温度作用下,氧气浓度越大,煤体氧化反应速率越快,说明随着氧气浓度的增加会促进煤体自燃进程。薛创、秦汝祥^[9]等利用自研制的常温氧化实验装置,采用实验研究、回归分析方法研究了不同粒径的煤体对煤自燃进程的影响。表明当煤体粒径在0.06~0.83 mm时,随着煤体粒径的增大,煤体自燃消耗氧气的速率越快,CO释放速率与体积浓度总体呈负相关,但有所波动,呈现出山峰状,在粒径为0.13~0.25 mm范围内CO释放速率最快^[9]。王建国^[10]等利用COMSOL数值模拟软件研究了风速对煤堆自燃的影响,得出风速

对煤堆的自燃有明显影响且存在一个临界值,当风速高于或低于临界值时,煤堆的自燃进程都会被延迟。姜德义^[11]等利用绝热氧化实验装置研究了湿度对煤自燃的影响,得出煤自燃是多因素影响的结果,主要是煤与空气中氧气的氧化反应,水在煤氧化反应过程中起重要作用。湿度会影响煤中氧化反应的活性结构,从而影响煤的自燃进程,但当湿度过大时,水蒸发损失的热量超过煤氧化所放出的热量则会降低煤自燃进程。

以上学者的研究均在不同理想实验条件下分析了温度、空气湿度、风速等对煤体自燃过程的影响,揭示了煤矸石自燃过程中CO气体释放的特征。本文通过监测煤矸石自燃产生的标志性气体CO,分析了宏观自然条件下空气湿度、风速对煤矸石自燃的影响,从而改进煤矸石的堆存条件以降低煤矸石山自燃发生的可能性。

1 矿区概况

监测地区位于鄂托克旗西北部,东与木凯淖尔镇相邻,南与阿尔巴斯苏木接壤,西与乌海市海南区公乌素镇、巴音陶亥镇毗邻,北与杭锦旗伊和乌素苏木相邻。地处鄂尔多斯高原西部,地势西高东低,呈侵蚀构造地貌。气候属于典型的大陆性气候,年平均气温9.640℃,极端最高气温40.2℃,极端最低气温-36.6℃,历年平均降水量159.8 mm,平均相对湿度42%,平均蒸发量3 289 mm,年平均风速2.9 m/s,瞬间最大风速33 m/s。常年干燥少雨,大风多沙,日照时间长,年蒸发量大于降雨量,全年主要风向为西北风和南风。

此处为典型的煤炭工业城镇,煤炭开采始于上世纪20—30年代,开采历史悠久。在近百年的煤炭生产过程中产生了大量的煤矸石,经过长期的煤矸石自燃等消耗,目前仍存放有约 1.6×10^6 t煤矸石。这些煤矸石以形态不一、大小规模不等的煤矸石堆或者煤矸石山的形式存在,如图1和图2所示。煤矸石自燃释放的CO气体对地区的大气环境造成了巨大压力。

选取煤矸石样品,利用工业分析仪对样品的水分、灰分、挥发分和固定碳等进行测定,采用EDS能谱分析对矸石样品进行元素分析。棋盘井煤矸石的工业分析与元素分析结果见表1、表2。

表 1 煤矸石样品工业分析

工业分析 $\omega_b/\%$			
水分 M_{ad}	挥发分 V_d	灰分 A_d	固定碳 FC_{ad}
0.59	14.94	77.27	7.79

表 2 煤矸石样品元素分析

元素分析 $\omega_b/\%, daf$					
C	O	H	N	Fe	S
53.47	22.42	3.27	0.76	0.66	2.30



图 1 矿区公路图

Fig.1 Road in the mine area



图 2 井工矿煤矸石山

Fig.2 Coal gangue dump in the shaft mine

2 监测方法

为了掌握监测地区 CO 浓度状况以及变化规律,分析此地空气湿度、风速与煤矸石自燃之间的

联系,根据《环境监测技术规范》的布点要求,在监测范围内不同矿产企业布置了 6 个监测点(如图 3 所示)分别位于黑龙贵矿区(106°99'29"E,39°44'68"N)、胡武煤矿(107°01'00"E,39°42'49"N)、棋盘井煤炭局门口电线杆(107°04'74"E,39°39'61"N)、广纳煤矿(107°05'59"E,39°44'21"N)、邢宇洗煤厂(107°04'56"E,39°41'24"N)、富强外排土场(107°01'07"E,39°43'86"N),每天采集一次 CO 的平均值数据。



图 3 矿区大气监测点位置图

Fig.3 Location of atmospheric monitoring sites in the mine area

监测时间为 2018 年 1 月~12 月,监测仪器为泛测(北京)环境科技有限公司生产的微型空气质量传感监测仪,型号为 Microair A108P(如图 4 所示),相关参数详见表 3。



图 4 微型空气质量传感监测仪

Fig.4 Miniature air quality sensing monitors

表 3 监测仪参数

Table 3 Parameters of the monitor					
测量类别	$PM_{10}/PM_{2.5}/(\mu g \cdot m^{-3})$	$SO_2/(mg \cdot m^{-3})$	$NO_2/(mg \cdot m^{-3})$	$CO/(mg \cdot m^{-3})$	$O_3/(mg \cdot m^{-3})$
测量范围	0~1 000	0~2.620	0~1.88	0~115	0~0.98
测量精度	5	0.131	0.009 4	0.115	0.009 8

3 矿区 CO 浓度基本特征

监测区域距最近的市区——乌海市为 43.5 km,所以采取乌海市的气象数据和空气质量数据作为分析参考依据。将各监测站的 CO 月平均浓度数据与乌海市 CO 的月平均浓度数据进行了对比分析,结果如图 5 所示,可以看出各监测站及乌海市的 CO 浓度随月份变化均具有相同特征,包括增高区、下降区和稳定区。CO 浓度在 1~3 月处于增高区,在 3 月浓度达到极值;5~6 月为 CO 浓度的下降区,在 6 月份下降到一定水平后不会继续下降;7~11 月为 CO 浓度的稳定区,在此段时间内,CO 浓度不会有大范围变化,始终在小范围内摆动。

选取 3~5 月为春季,6~8 月为夏季,9~11 月为秋季,12~2 月为冬季,可知 CO 浓度在春、冬两季节维持在较高水平,夏、秋两季节维持在低水平,即煤矸石山在春、冬两季节的自燃现象较为强烈,夏、秋两季节自燃现象较为平缓。

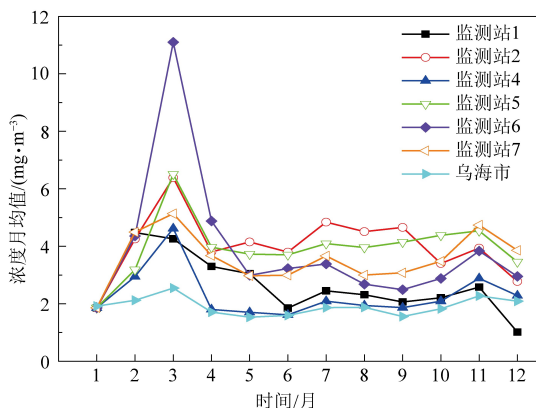


图5 CO 浓度月平均值

Fig.5 Monthly average concentrations of CO

4 CO 浓度数据结果分析

4.1 CO 浓度与湿度的关系

选取 3 月部分监测数据(3 月 1 日~7 日湿度与 CO 浓度记录)作湿度与 CO 浓度关系图,如图 6 所示。监测站 1、6、7 的 CO 浓度变化随监测点空气湿度变化情况基本一致,均在空气湿度为 30%~33%时,CO 浓度均出现异常增高,且浓度增大幅度均在 50%以上。当空气湿度继续升高时,监测站 1、6、7 的 CO 浓度出现下降,下降幅度在 20%左右。

在煤氧化前期,空气湿度越高,煤对水的吸附作用增强,有利于自由基-氧-水络合物的形成,越

有利于煤的自燃。但随着空气湿度的增加,水分蒸发速率加快,吸收的热量增加,同时产生的气压也会影响氧气与煤的接触,进而降低煤的自燃进程。

CO 浓度随空气湿度的增加有升高再降低的趋势,大致在湿度为 32%时达到最高。这是由于 CO 是煤氧复合作用的产物,空气中的水蒸气能够影响煤矸石的自燃过程,在一定的空气湿度下,空气中水蒸气使煤体疏松,形成细微裂缝,煤对水的吸附作用增强,有利于自由基-氧-水络合物的形成^[12]。同时空气中的水蒸气可以将氧气带入煤矸石山内部,促进煤氧复合反应的进行,加剧煤矸石山的燃烧,释放出 CO 气体,导致空气中 CO 的浓度增加。但当空气湿度增大到一定程度之后,水分蒸发速率加快,吸收的热量渐渐大于煤氧化产生的热量,同时产生的气压也会影响氧气与煤接触,不利于煤矸石自燃,致使空气中 CO 的浓度下降^[13]。由此可见,本地区临界的空气湿度为 32%,当空气湿度在 32%附近时,煤矸石山自燃情况较为剧烈,反之煤矸石山自燃情况较为平缓。

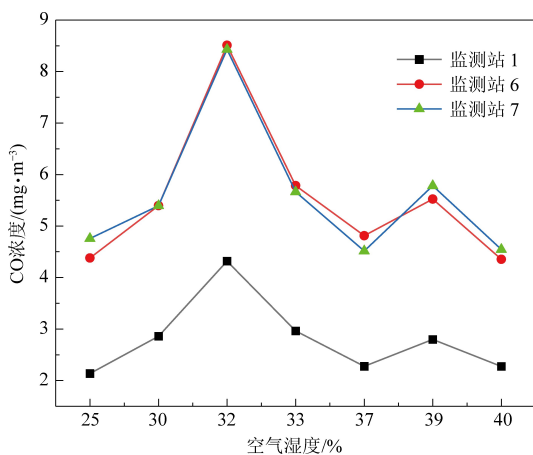


图6 空气湿度与 CO 浓度关系图

Fig.6 Relationship between air humidity and CO concentration

4.2 CO 浓度与风速的关系

选取监测站 1 的 3 月、5 月中不同风速(不同时间段每 10 min 的平均风速再取平均得到某天的平均风速)下的 CO 浓度数据,绘制风速与 CO 浓度关系图,如图 7 所示。以 CO 浓度 2 mg/m³ 为界限,区分 CO 浓度的高低。在风速小于 1.88 m/s 时,监测地区 CO 浓度高于 2 mg/m³;在风速位于 1.88~2.76 m/s 之间时,监测地区浓度低于 2 mg/m³;在风速位于 2.76~4.38 m/s 之间时,监测地区 CO 浓度高于 2 mg/m³;在风速高于

4.38 m/s 时,监测地区浓度低于 2 mg/m^3 。风速为 3.5 m/s 时,CO 浓度达到最大值,为 4.92 mg/m^3 ;风速为 2.43 m/s 时,CO 浓度达到最小值,为 0.67 mg/m^3 。

本文监测数据表明当风速小于 1.88 m/s 时,空气流动小,煤矸石山内部供氧能力不足,煤矸石不能和氧气充分结合,煤矸石燃烧不充分,释放的 CO 气体增多,CO 浓度相对较高。当风速处于 $1.88 \sim 2.76 \text{ m/s}$ 之间时,空气流动均匀,供氧比较充足,煤矸石氧化过程稳定,热量积累稳定,拥有一个相对稳定的自燃条件,但此时煤矸石仍为不完全燃烧状态,释放出的气体以 CO 为主,但 CO 的释放量有所降低,CO 浓度有所下降;当风速处于 $2.76 \sim 4.38 \text{ m/s}$ 之间时,风不仅会带走煤矸石氧化过程生成的热量,还使煤矸石与氧气的接触时间相对减少,此时加重了煤矸石的不完全燃烧,释放的 CO 气体增多,CO 浓度相对升高;风速高于 4.38 m/s 时,CO 浓度降低是由于风速过大,CO 在空气中扩散过快,导致此时监测到的 CO 浓度降低^[14]。

风速的变化会导致煤矸石表面的风压差发生改变。风速越大,煤矸石山表面的绝对压力增加,煤矸石迎风面和背风两侧的风压差也越大,压力差的增大使得两侧煤矸石山的风流渗透更为突出,煤矸石山内部氧化反应增强,自燃进程加快。但当风速过快时,煤矸石山迎风侧空气对流换热强度强于煤矸石氧化反应放出的热量,导致自燃进程减缓^[15-17]。

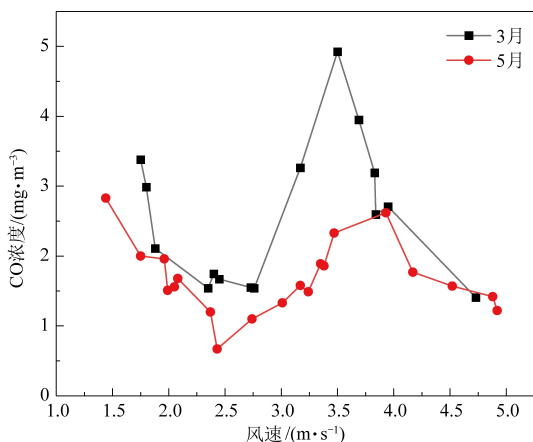


图7 监测点1 风速与 CO 浓度关系图

Fig.7 Relationship between wind speed and CO concentration at monitoring point 1

5 结 论

本文通过监测棋盘井地区煤矸石山外部 CO 浓度的变化,探寻宏观区域内空气湿度、风速和煤矸石山自燃情况的内在联系,由于非直接监测煤矸石山内部自燃情况,空气湿度、风速对煤矸石山的自燃影响存在一定的时间滞后性,通过对监测数据分析得出如下结论:

(1) 该地区煤矸石山的自燃有明显的季度性。春、冬两季煤矸石自燃释放的 CO 增多,自燃现象减弱;夏、秋两季煤矸石自燃释放的 CO 与春、冬两季相比有减少,自燃现象增强。

(2) 空气中湿度的变化对该地区煤矸石山自燃现象有较大影响。当空气中湿度 $<25\%$ 或 $>40\%$ 时,煤矸石自燃释放的 CO 减少,自燃现象减弱;当空气中湿度在 $30\% \sim 40\%$ 之间时,煤矸石自燃释放的 CO 增多,自燃现象增强。

(3) 该地区煤矸石山附近风速对矸石自燃现象也有不同程度的影响。当煤矸石山附近风速 $<1.88 \text{ m/s}$ 或 $>2.76 \text{ m/s}$ 时,煤矸石自燃释放的 CO 增多,自燃现象增强;当煤矸石山附近风速在 $1.88 \sim 2.76 \text{ m/s}$ 时,煤矸石自燃释放的 CO 减少,自燃现象减弱。

参考文献

- [1] 张炳锋. 矿产资源开发对环境的破坏及其治理研究 [J]. 能源与环境, 2012 (2): 81-82.
Zhang Bingfeng. Research on the environmental damage caused by mineral resources development and its management [J]. Energy and Environment, 2012 (2): 81-82.
- [2] 潘金禄, 李珠成. 矿产资源综合利用与环境保护探索 [J]. 环境工程, 2014, 32 (S1): 1001-1004.
Pan Jinlu, Li Zhucheng. Research on comprehensive utilization of resources in diggings and environment protection [J]. Environmental Engineering, 2014, 32 (S1): 1001-1004.
- [3] Liang Y, Liang H, Zhu S, et al. Mercury emission from spontaneously ignited coal gangue hill in Wuda coalfield, Inner Mongolia, China [J]. Fuel, 2016, 182 (15): 525-530.
- [4] 陈荣荣, 周广飞. 淮南矿区空气质量分析与污染防治对策 [J]. 煤炭科技, 2017 (2): 54-56.
Chen Rongrong, Zhou Guangfei. Air quality analysis and pollution control measures in Huainan mining area [J]. Coal Science & Technology Magazine, 2017 (2): 54-56.
- [5] 潘荣锟, 余明高, 徐俊, 等. 矸石山的危害及自燃原因关联分析 [J]. 安全与环境工程, 2006 (2): 66-69.
Pan Rongkun, Yu Minggao, Xu Jun, et al. Harm of gangue dump and cause analysis of spontaneous combustion [J]. Safety

- and Environmental Engineering, 2006 (2): 66-69.
- [6] 张振文, 宋志, 李阿红. 煤矿矸石山自燃机理及影响因素分析 [J]. 黑龙江科技学院学报, 2001, 11 (2): 12-14.
Zhang Zhenwen, Song Zhi, Li Ahong. Analysis of gangue hill spontaneous combustion and its affecting factors [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2001, 11 (2): 12-14.
- [7] 刘晓源, 张玉龙, 张晓昱, 等. 原始赋存水分对煤自燃过程的影响及作用机制研究 [J]. 太原理工大学学报, 2021, 52 (3): 350-359.
Liu Xiaoyuan, Zhang Yulong, Zhang Xiaoyu, et al. Study on the effect and mechanism of original moisture on coal spontaneous combustion [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52 (3): 350-359.
- [8] 张玉涛, 杨杰, 李亚清, 等. 氧气浓度和升温速率对煤自燃特性影响 [J/OL]. 安全与环境学报: 1-7 [2022-02-09]. DOI: 10. 13637/j. issn. 1009-6094. 2021. 1482.
Zhang Yutao, Yang Jie, Li Yaqing, et al. Effects of oxygen concentration and heating rate on the characteristics of coal spontaneous combustion [J/OL]. Journal of Safety and Environment: 1-7 [2022-02-09]. DOI: 10. 13637/j. issn. 1009-6094. 2021. 1482.
- [9] 薛创, 秦汝祥, 张树川, 等. 不同粒径易自燃煤常温氧化实验研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17 (8): 64-69.
Xue Chuang, Qin Ruxiang, Zhang Shuchuan, et al. Experimental study on oxidation of easily spontaneous combustion coal with different particle sizes at ambient temperature [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17 (8): 64-69.
- [10] 王建国, 周侗柱, 张超鹏. 风速对煤堆内部热积聚的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42 (2): 135-138.
Wang Jianguo, Zhou Tongzhu, Zhang Chaopeng. Influence of airflow velocity on heat accumulation inside coal pile [J]. Mining Research and Development, 2022, 42 (2): 135-138.
- [11] 姜德义, 李林, Beamish B Basil. 湿度对煤自燃倾向性影响 [J]. 重庆大学学报, 2008, 31 (12): 1451-1454.
Jiang Deyi, Li Lin, Beamish B Basil. The effect of moisture content on the tendency of coal to combust spontaneously [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31 (12): 1451-1454.
- [12] 肖旻, 李青蔚, 鲁军辉. 空气相对湿度对煤自燃特性的影响研究 [J]. 中国安全科学学报, 2015, 25 (3): 34-40.
Xiao Yang, Li Qingwei, Lu Junhui. Effects of air relative humidity on coal spontaneous combustion properties [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25 (3): 34-40.
- [13] 张辛亥, 李青蔚, 张长山. 空气湿度对煤自燃特性影响的试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2017, 17 (1): 147-150.
Zhang Xinhai, Li Qingwei, Zhang Changshan. Air humidity influential characteristic feature of the coal spontaneous combustion [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17 (1): 147-150.
- [14] 李瑾, 李兴华, 吴宪, 等. 风速对煤堆自燃影响的数值模拟 [J]. 世界科技研究与发展, 2016, 38 (2): 360-364.
Li Jin, Li Xinghua, Wu Xian, et al. Numerical simulation of effect of wind speed on coal pile spontaneous combustion [J]. World Sci-Tech R & D, 2016, 38 (2): 360-364.
- [15] 曲国娜, 贾廷贵, 强倩, 等. 煤堆粒径对煤堆自燃风速的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49 (9): 88-94.
Qu Guona, Jia Tinggui, Qiang Qian, et al. Effect of coal pile particle size on the spontaneous combustion velocity of coal pile [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (9): 88-94.
- [16] 宋泽阳, 郭良, 齐文宇, 等. 多场耦合下煤堆自燃过程及影响因素分析 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (8): 59-63.
Song Zeyang, Guo Liang, Qi Wenyu, et al. Analysis on coal pile spontaneous combustion process and influence factors under multi field coupling [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40 (8): 59-63.
- [17] 李树刚, 徐精彩. 地面储煤堆自燃规律的实验研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2000 (3): 229-231.
Li Shugang, Xu Jingcai. Experimental study of spontaneous combustion rule of ground coal storage pile [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2000 (3): 229-231.