

郝业, 胡鹏, 杨朋, 等. 煤矿排矸场灾害效应以及综合勘测研究[J]. 灾害学, 2023, 38(4): 45–49. [HAO Ye, HU Peng, YANG Peng, et al. Study on Disaster Effect and Comprehensive Survey of Gangue Field[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(4): 45–49. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.04.009.]

煤矿排矸场灾害效应以及综合勘测研究^{*}

郝业, 胡鹏, 杨朋, 向科俊

(陕西天地地质有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 排矸场是煤矿废弃物煤矸石的堆放场所, 排矸场堆积体中因存在含硫矿物常常会引发自燃, 产生环境污染的同时, 也存在次生地质灾害的危险。该文通过综合分析, 对排矸场自燃与边坡滑移、坡面水力侵蚀之间的链生关系及其灾害效应进行了论述。结合实际工程案例提出了三阶段排矸场异常区综合勘测确定法。排矸场自燃与边坡滑移和坡面水力侵蚀之间存在灾害互促的链生演化关系。排矸场自燃综合勘测方法是结合初步划定、浅表部验证以及深部划定来划分自燃区的三阶段勘查方法, 可对排矸场自燃区进行高效科学的划分, 从而有效的节约后续自燃区的治理成本。

关键词: 排矸场; 自燃; 灾害效应; 综合勘测

中图分类号: X43; X915.5; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2023)04–0045–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.04.009

煤矸石是煤矿中夹在煤层间的岩石, 为煤矿掘进、开采和洗选过程中产生的固体废弃物, 主要成分为残余的煤炭、煤质页岩、泥质页岩等组成的混合物^[1–2]。一般每生产1 t煤大约会产生10%~30%的煤矸石^[3], 这就造成了大量煤矸石废弃物的产生。由于煤矸石的再次利用工序复杂、成本较高且利率较低, 因而多采用就近沟谷露天堆积的方式进行处理, 从而形成体量巨大的煤矸石山以及排矸场, 在造成土地资源占用以及自然环境破坏的同时, 也潜藏着多种次生灾害, 如矸石场边坡崩塌和滑移、泥石流以及矸石场自燃等^[4–11]。据统计, 约有30%的煤矸石山属于自燃型煤矸石山^[12], 因矸石山崩塌滑坡造成的人员伤亡和财产损失也屡见不鲜^[13–15]。采用综合勘测技术确定排矸场自燃区的位置, 研究其灾害效应, 无疑具有重要的理论和现实意义。

目前针对排矸场相关次生灾害的研究, 多集中于矸石场自燃机制、矸石灭火以及综合治理措施等的研究^[16–23]。薛刚^[24]通过能量守恒理论分析, 认为矸石山自燃只有受空隙间流动气体的焓变、颗粒间热量传递以及堆积体放热强度的影响。郭宇清^[25]认为排矸场自燃取决于两个因素, 分别为可燃物和助燃条件, 并提出隔绝空气、降低矸石堆积体中硫化矿物含量以及减少水分进入堆积体内部的措施以预防矸石自燃。针对已经自燃的排矸场, 通常可采取挖出冷却法、注浆法、隔离法和覆盖压实法等。霍志国^[26]通过温度范围将排矸场高温异常区进行了划分, 并将排矸场自燃的诱因归结为含硫可燃物及通风供氧这两个条件。郑忠亚^[27]通过热红外勘测、工程钻探以及同位素

测氢气法对煤矸石山火区的分布进行了综合勘测。矸石堆积场自燃机制以及综合治理措施研究的基础则是排矸场次生灾害之间的相互影响关系以及综合勘测研究, 然而这部分研究目前仍然很薄弱。

本文通过分析排矸场次生灾害之间的相互影响作用关系, 揭示排矸场自燃的灾害效应, 同时结合实际工程案例, 提出科学划定排矸场自燃区的综合勘测手段, 可为煤矿排矸场自燃灾害的科学勘测和防治提供技术参考。

1 排矸场灾害效应分析

排矸场是人类工程活动形成的人造堆积体, 受施工质量以及矸石堆内部物质自身理化性质的影响, 时常会发生矸石自燃、滑坡、泥石流以及水力侵蚀等灾害, 且各种灾害多相互促进伴生演化。以排矸场中最为常见的排矸场自燃为例, 其自燃不仅仅是一个燃料燃烧的理化过程, 同时也是与排矸场边坡滑移、垮塌和表面流的入渗侵蚀等灾害相互作用影响的链生演化过程。排矸场自燃主要取决于两个因素, 可燃物和助燃条件。

就可燃物方面而言, 矸石中多夹杂有含硫矿物, 一般硫含量在1%以下时不会发生煤矸石自燃现象; 硫含量在2%以上时就一定会发生自燃^[25]。除此之外, 矸石堆中还会夹杂有煤炭残渣、木材以及少量的生活垃圾, 这进一步增加了矸石内部可燃物的储量。煤矸石中常见的含硫矿物硫铁矿的燃点低, 常温下在氧化环境中会慢慢发生氧化

^{*} 收稿日期: 2023–04–27 修回日期: 2023–06–02

基金项目: 陕西省煤田地质集团有限公司“特厚放顶煤开采区地质环境监测应用技术研究”(SMDZ–2023ZD–12)

第一作者简介: 郝业(1984–), 男, 汉族, 河南郑州人, 高级工程师, 主要从事地质勘查、矿山地质灾害、生态修复研究。

E-mail: 327496299@qq.com

放热,并积蓄热量,当矸石堆积体内部温度超过燃点时则会自燃,并逐渐扩散蔓延。排矸场内部可燃物燃烧后,可燃物发生碳化,并且形态从块状逐渐转化为粉末状。可燃物的堆积体积发生明显减小的同时,其物理强度大幅度劣化,这就造成排矸场内部空隙的增大以及整体强度的降低。在堆积体自重以及长期降雨入渗侵蚀作用下,空隙逐渐压缩变形。当部分区域出现不均匀变形时,即可形成拉张裂缝。拉张裂缝的出现形成了表水入渗的优势通道,从而加剧了表水入渗的强度。滑坡灾害的形成很大程度上受表水入渗造成的坡体重度增大以及滑带土物理性质劣化的控制,而排矸场中可燃物的自燃一方面加快了表水的入渗进程,另一方面,当拉裂隙相互贯通时,表水可快速入渗至滑带土深度,造成滑带土强度的降低,进而诱发滑坡灾害。排矸场多依托沟谷修建,强降雨可导致沟谷短时汇水量剧增,此时叠加排矸场滑坡提供的松散堆积物后,极易演化为泥石流灾害进而危害沟谷下游民众的生命财产安全。

就助燃条件方面而言,氧气的充分补给以及燃烧产生的次生气体如 CO 和 CO_2 的快速排放,有利于燃烧的进行。排矸场在沟谷的上下游方向存在天然临空坡面,如果堆积体没有进行分层压实或者坡体没有进行相应的加固以及削坡处理,后期在自重作用下往往会发生蠕变变形,在坡顶边缘位置形成贯通至地表的拉张裂缝。排矸场表面通常会覆盖有一层一定压实度和厚度的土体,用以隔绝表水以及空气进入矸石堆积体内部。然而在长期表水冲刷侵蚀下,表层土体会逐渐发生剥蚀,使得坡面矸石暴露。边坡变形、滑移形成的坡顶拉张裂缝以及水力侵蚀暴露的矸石坡面会构成坡面供氧、坡顶排烟的烟囱效应,从而加剧了排矸场内部的自燃进程。反过来,矸石堆内部可燃物燃烧殆尽时,会使得内部空隙和空腔增加,降低了堆积体整体强度的同时,更易于表水的入渗侵蚀,从而可诱发地面塌陷以及滑坡。除此之外,排矸场自燃形成的明火会造成林木火灾的潜在灾害,燃烧产生的有毒烟尘可造成直接的空气和环境污染。

可见排矸场灾害具有其独特的链生演化体系。排矸场自燃、边坡滑移变形以及坡体水力侵蚀灾害之间具有相互影响相互促进的链生演化关系(图1)。排矸场内部可燃物的燃烧和消耗可增大堆积体内部的孔隙度,更利于水体进入坡体内部,增大坡体重度,进而加剧坡体的变形和滑移。坡体滑移形成的拉张裂缝以及坡面侵蚀形成的烟囱效应可加剧排矸场的自燃。除此之外,水进入排矸场内部也是加速矸石自燃的一个重要条件,其促进了硫元素的氧化反应,产生硫酸盐溶液,同时放出大量的热,进而

起到助燃的作用。当煤矸石堆积体内部遇雨水产生剧烈化学反应时,可能会诱发爆炸,进而引发崩塌,危害排矸场周边居民安全。排矸场所在沟谷遇到强烈降雨形成洪流时,排矸场溃坝也可诱发泥石流灾害,危害下游公共安全。

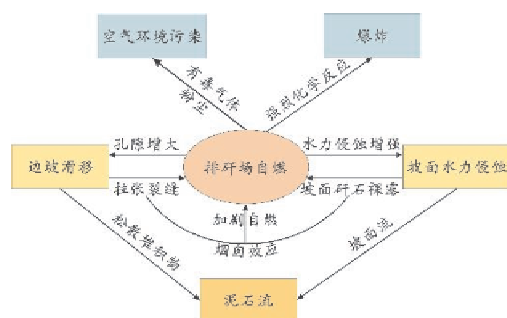


图1 排矸场灾害链生演化体系

2 综合勘测方法

鉴于排矸场自燃的次生灾害较为严重,通常需要对其进行综合治理,在此之前则需要精确划定排矸场自燃的高温异常区,为此可采用三阶段排矸场异常区综合勘测确定法对其进行科学划分。该综合勘测方法基于人类认识事物从表及里,从简单到复杂的一般规律,从初步划定到浅表部验证,再到深部划分的三个勘查阶段,对排矸场自燃区进行科学高效划分,主要步骤如下:

(1)初步划定(物探(红外热成像))。利用无人机搭载激光测距热成像镜头,对排矸场进行扫描拍照、摄像以及测绘,拍摄红外热成像照片以及红外热成像视频,建立红外正摄影像以及红外三维模型,采用热红外照片解译软件对拍摄照片解译,初步划定排矸场高温异常区(图2)。

(2)浅表部验证(浅部地质钻探(洛阳铲)+气体、温度测量)。为了验证物探(红外热成像)划定高温异常区范围以及排矸场上部覆土厚度,采用人工洛阳铲揭露排矸场表层覆土,利用非接触式红外测温仪、多功能气体检测仪、数字测温仪以及便携式泵吸气体检测仪,测量排矸场矸石表面及现场贯穿裂缝的温度和各种气体浓度,对高温异常区进行进一步勘查,细化高温异常区范围。矸石自燃生成 SO_2 气体,并且矸石自燃具有不充分燃烧的特点,因此也会生成一定浓度的 CO ,因此主要测量 CO 、 SO_2 、 O_2 的浓度。洛阳铲采用 $\Phi 80\text{ mm}$,为防止塌孔以及更好地导热,全孔下放 $\Phi 60\text{ mm}$ 的钢管。



(a) 采集信息的无人机

(b) 红外摄像头

(c) 测温和气体浓度

图2 勘测设备

(3)深部划定(工程地质钻探+气体、温度测量)。为了验证划定高温异常区范围以及勘测排矸场自燃深度,可采用钻机进行勘查成孔,利用上述测温仪和气体监测仪,测量钻孔内温度及各种气体浓度(CO 、 SO_2 、 O_2),获取温度以及气体浓度等值线图,进而划定排矸场深部自燃区的范围。

通过分析以上三个阶段热红外航测、不同深度气体浓度以及温度的测量结果,对排矸场高温异常区进行综合研判,可以使得高温异常区的划分趋近于较为精确且科学的结果,从而避免过度治理造成人力和财力的浪费。

3 方法应用

本工程实例为陕西省延安市某排矸场,其矸石内部含有一定的黄铁矿(氧化可释放大量热量)同时矸石堆积体夹杂一定量的残煤(可燃物),排矸场东侧边坡及顶部平台近东侧边坡位置均出现不同程度的自燃,严重影响当地的生态环境并对周边林地造成极大火灾隐患。排矸场自燃后,地表温度较高,上覆草本植被开始陆续死亡,地表局部裸露与周边环境不协调也造成了明显的景观破坏。

该排矸场依托地形修建于煤矿西南方向约 500 m 处的天然沟谷内,地貌上位于陕北黄土高原南部的中低山丘陵地带(图 3)。排矸场顶部平台设有“田”字形砖砌排水渠,用以将顶部汇水排至排矸场西侧坡脚管涵。南北向紧贴“V”字型沟道两侧,沟道上游及两侧坡面主要为荒坡,上伏地层第四系残破积物,下伏地层白垩系延安组砂岩,坡面植被以乔灌木混交林为主。沟谷地表水为季节性流水,连续阴雨天气或暴雨时节汇有流水,其余时间基本断流,发生泥石流灾害可能性较小。排矸场地下水含水类型主要为矸石孔隙水。大气降水为唯一补给来源,矸石体较为松散,渗水性好,储水性差。2020 年排矸场西侧坡体第一级边坡发生局部滑塌,前后缘高差 15 m,长度 33 m,宽 30 m,厚度 0.2~1 m,体积约 400 m^3 ,主滑方向 270° (图 4a、4b)。东侧为不稳定边坡,坡体长 60 m,高 30 m,平均厚度 4 m,主滑方向 95° ,东侧边坡平台上存在一系列拉张裂隙。拉张裂缝处可见明显的自燃痕迹,土体呈现焦黑状,其形成了矸石内部的排烟通道,因烟囱效应加剧了排矸场内部的自燃(图 4c、4d)。区内降雨量集中且降雨形式多为暴雨的降雨特点,并且排矸场坡面未采取排水措施,排矸场坡面受雨水冲刷作用明显。受雨水淋蚀作用,东侧坡体表面冲沟较为发育,切割密度 6 条/10 m,切割深度 1~4 m 不等,部分地区暴露出了矸石坡面,增大了内部氧气的供给(图 4e、4f)。由于排矸场内部黄铁矿以及残煤提供了自燃的可燃物,不稳定边坡活动产生的坡顶拉张裂隙以及坡面冲蚀形成的矸石裸露共同形成的烟囱效应增强了排矸场内部的氧气供给,加剧了自燃的进程。



图3 排矸场平面图(a-a'和b-b'为滑坡剖面位置)

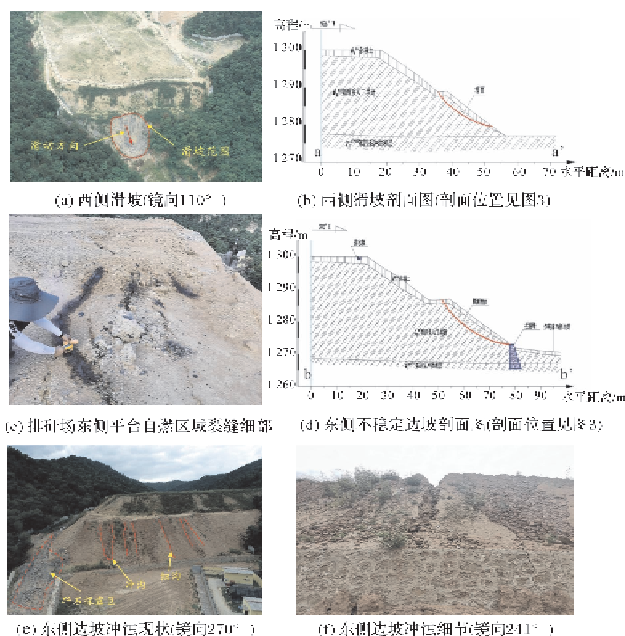


图4 排矸场典型现象及剖面图

采用三阶段综合勘测手段,对排矸场高温异常区进行了划定,勘查结果如图 4 所示。首先通过无人机搭载热红外摄像头对排矸场表面的高温异常区进行初步的识别,热成像图显示高温异常区主要位于排矸场东侧、南侧边坡及下部一平台(图 5a、5b)。西侧边坡处温度场分布较为均匀,无明显高温异常区(图 5c)。为验证物探(红外热成像)划定高温异常区范围以及排矸场上部覆土厚度,以矸石山顶面及东侧一平台为勘测区域,通过洛阳铲以及相关测温 and 测量气体浓度设备对浅表部高温异常区进行进一步的验证,利用 ArcGIS 克里金插值法对获取数据进行插值计算,获得温度等值线及各气体(CO 、 SO_2)等浓度线分布图,结合三者结果对高温异常区进行划定。等温线图以及气体浓度等值线图均显示,越靠近东侧边坡边缘位置,温度和气体浓度越高,这同时也说明坡面供氧和边坡拉张裂缝对矸石自燃具有明显的加剧作用(图 5d、5e、5f)。为了进一步验证划定自燃区范围以及排矸场自燃深度,以矸石山顶部平台为勘测区域,通过 DPP100 汽车钻和深部气体浓度测量,绘制深部气体浓度等值线以及等温线,圈定深部高温异常区范围(图 5g、5h、5i)。

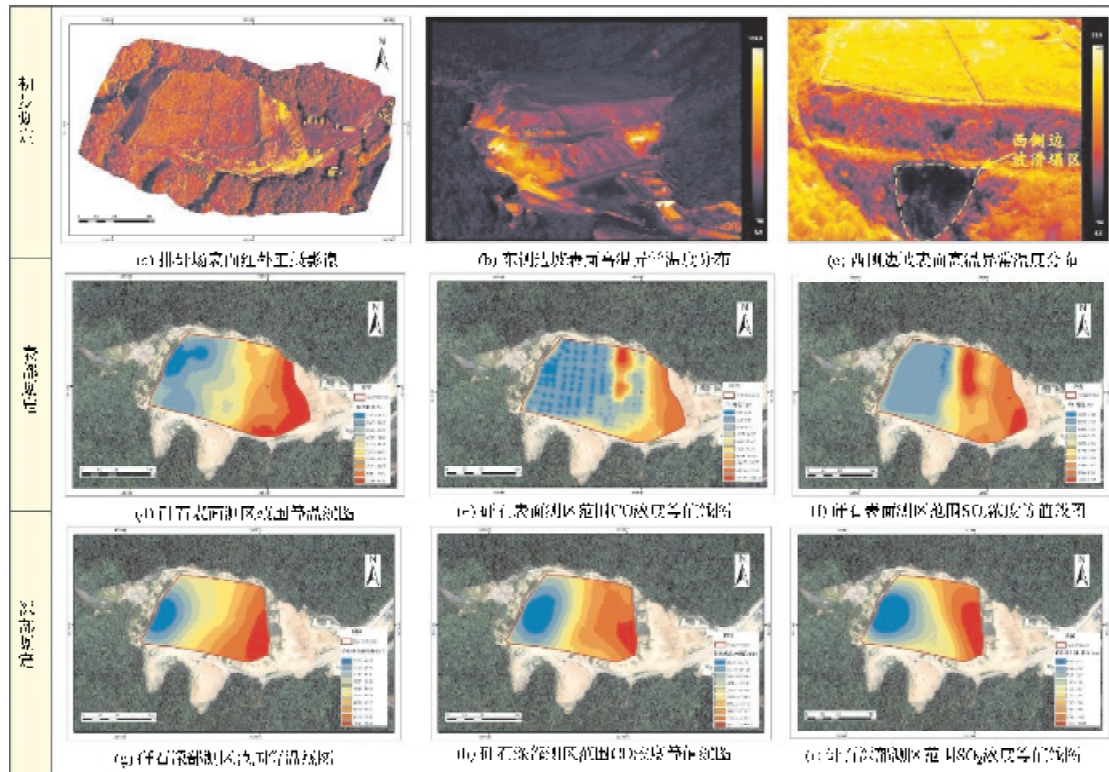


图5 排矸场高温异常勘测结果图

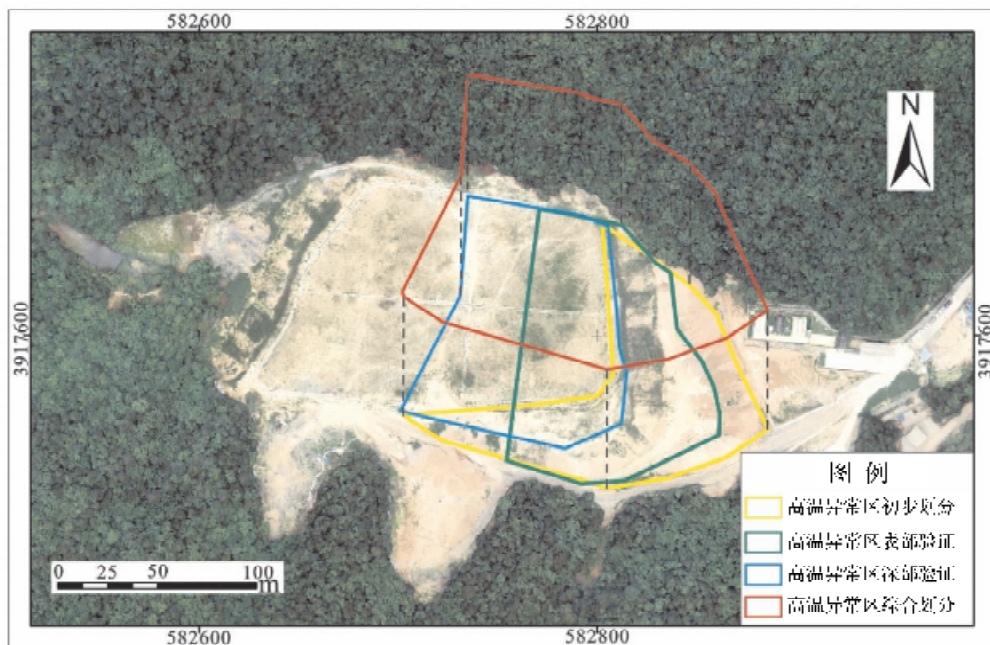


图6 排矸场高温异常区划分图

由于排矸场表部与大气直接接触, 气体浓度和温度均处于较低值, 因此在对高温异常区进行划分时, 结合相关工程经验, 温度取 39.06°C 等温线、 CO 浓度取 26.87 ppm 浓度等值线、 SO_2 浓度取 0.326 ppm 浓度等值线。在进行排矸场深部高温异常区划分时, 根据《煤矸石堆场生态恢复治理技术规范: DB14/T1755-2018》^[28], 矸石堆场内部温度 70°C 为矸石自燃的临界温度, 考虑到排矸场排矸活动中未碾压, 矸石内部较为松散且孔内 CO 气体浓度较高, 温度取 62.98°C 等温线、 CO 浓度取

391.87 ppm 浓度等值线及 SO_2 浓度取 2.52 ppm 浓度等值线。初部、表部和深部的高温异常区划分结果如图6所示, 热红外手段识别出的高温异常区主要集中于排矸场靠近东侧边坡处, 表部和深部划定范围逐步向排矸场内部延伸, 由此也可直观地看出矸石场自燃从深至浅其燃烧范围是逐步向排矸场氧气供给更充沛的临空坡面以及拉张裂缝发育区域延伸的。由此也可以看出, 不同勘测手段, 均具有其局限性, 通过多手段多维度的综合勘测手段, 则可以获取到更为科学的勘测结果。

最后实际工程应用中按照最不利和最大影响范围的原则, 将初步、表部和深部高温异常区的包络线(三者最外侧范围)综合圈定为排矸场自燃高温异常区范围, 为后续采取工程措施治理提供设计依据和基础参考。

4 结论

(1) 排矸场主要灾害类型为矸石堆积体内部可燃物的自燃, 其可导致坡体内部空隙率增大和拉张裂隙的增多, 进而加快表水入渗以及侵蚀的进程, 极易诱发滑坡、泥石流等次生地质灾害。与此同时, 边坡滑移以及坡面侵蚀可造成坡体内部拉张裂隙的增多以及坡面供氧量的增大, 从而形成烟囱效应加剧排矸场的自燃。

(2) 三阶段排矸场异常区综合勘测确定法是一种基于初步划定到浅表部验证, 再到深部划分三个勘查阶段的测温以及气体浓度结果的分析, 对排矸场自燃区进行科学高效划分的一种综合勘测手段。

(3) 三阶段排矸场异常区综合勘测确定法在实际工程应用中易于实施, 可以全面科学地揭露出排矸场浅部到深部自燃区的范围, 极大节约后续自燃区工程处理的成本。

参考文献:

- [1] 樊金拴. 中国北方煤矿矸石堆积地生态环境特征与植被建设研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [2] 张家利. 成庄矿排矸场灭火实践[J]. 科技情报开发与经济, 2004(12): 360-361.
- [3] 李琦, 孙根年, 韩亚芬, 等. 我国煤矿矸石资源化再生利用途径的分析[J]. 煤炭转化, 2007, 30(1): 78-82.
- [4] 万国祥, 贺龙, 刘东兵. 黑岱沟露天煤矿倒堆台阶边坡破坏模式及稳定性评价[J]. 露天采矿技术, 2021, 36(5): 20-23.
- [5] 万玲玲. 矿区排矸场边坡稳定性评价分析及防护治理研究[J]. 水利技术监督, 2022, 30(1): 9-12, 26.
- [6] 李永红, 姚超伟, 程晓露, 等. 神府煤矿区矿山地质环境问题及恢复治理探讨: 以赵家梁煤矿为例[J]. 资源与产业, 2014, 16(6): 112-117.
- [7] 李斌, 孟清华, 刘虎生, 等. 论我国煤矿矸石山治理现状及发展[J]. 内蒙古煤炭经济, 2014(7): 5-7.
- [8] 安永兴, 梁明武, 赵平. 煤矿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.
- [9] 刘瑞平, 徐友宁, 张江华. 煤矿山地质环境治理技术及治理模式研究[J]. 能源与环境, 2016(4): 18-19.
- [10] 黄文章. 煤矸厂山自然发火机理及防治技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [11] 徐圣集. 冯家塔矿易自燃煤层采空区火灾火源探测研究[J]. 煤矿开采, 2012, 17(3): 93-95.
- [12] 张小翌, 王德明, 杨雪花, 等. 古书院矿郭山排矸场火区快速治理技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 96-99.
- [13] 郑忠亚, 侯金玲, 梁成, 等. 资源整合矿井小煤矿采空区火灾探测技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(4): 68-70, 92.
- [14] 邓军, 徐精彩, 阮国强, 等. 国内外煤炭自然发火预测预报技术综述[J]. 西安矿业学院学报, 1999(4): 293-297, 337.
- [15] 徐精彩. 煤炭自燃过程研究[J]. 煤炭工程师, 1989(5): 17-21.
- [16] 梁永生. 东曲矿排矸场A区灭火防复燃工程实践[J]. 山西冶金, 2022, 45(4): 119-121.
- [17] 张薇. 神东矿区排矸场治理技术研究与应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(10): 150-152.
- [18] 蒋兴奎. 花山煤矿排矸场治理与生态环境恢复[J]. 四川地质学报, 2015, 35(2): 244-245.
- [19] 聂斌磊. 煤矿排矸场环境问题及综合治理技术实践[J]. 山东煤炭科技, 2019(6): 199-200, 203.
- [20] FENG K K. Spontaneous Combustion of Canadian Coals[J]. CI M Bulletin, 1985, 78(5): 71-75.
- [21] BTOOKS Kevin, SVANAS Nicolao, GLASSER David. Critical Temperatures of Some Turkish Coals due to Spontaneous Combustion[J]. Journal of Mines Metals & Fuels, 1988, 36(9): 434-436.
- [22] ONIFADE M, GENC B. A review of research on spontaneous combustion of coal[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(3): 303-311.
- [23] NORDON P. Spontaneous combustion interactive heat and mass transfer driven by a chemical reaction[C]//Third Australasian Conference on Heat & Mass Transfer. Aust: St Leonards, 1985: 363-370.
- [24] 薛刚. 大柳塔煤矿排矸场综合一体化火区治理方法[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S1): 159-167.
- [25] 郭宇清. 煤矸石综合利用对策及意义[J]. 山西煤炭管理干部学院学报, 2011, 24(1): 43-45.
- [26] 霍志国. 排矸场自燃治理及生态恢复综合技术应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019(1): 113-115.
- [27] 郑忠亚. 煤矸石山火区三维综合探测技术研究[J]. 煤矿开采, 2017, 22(4): 13-15.
- [28] 山西省市场监督管理局. 煤矸石堆场生态恢复治理技术规范: DB14/T1755-2018[S/OL]. [2023-4-11]. <https://www.waitang.com/report/211761.html>.

Study on Disaster Effect and Comprehensive Survey of Gangue Field

HAO Ye, HU Peng, YANG Peng, XIANG Kejun
(Shaanxi Tiandi Geology Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Gangue field is an accumulation of coal gangue from coal mines, which often causes spontaneous combustion within the accumulation due to its containing sulfur containing minerals, resulting in environmental pollution and the risk of secondary geological disasters. Based on theoretical analysis, we discuss the chain relationship and disaster effects between spontaneous combustion, slope sliding, and slope hydraulic erosion in gangue field. Combining with practical engineering cases, three step comprehensive survey method for the division of high temperature abnormal areas of spontaneous combustion in gangue field is proposed. The tensile cracks caused by the sliding of the waste dump slope and the exposed waste rock caused by the hydraulic erosion of the slope surface have a combustion-supporting effect on the spontaneous combustion of the gangue field. At the same time, the spontaneous combustion of the gangue field will increase the internal voids in the accumulated body, resulting in a decrease in the strength of the slope. The spontaneous combustion zone of the gangue field tends to extend from the deep to the shallow to the slope cracking zone and the exposed slope surface of the gangue field.

Keywords: gangue field; spontaneous combustion; disaster effects; comprehensive survey