

自燃矸石山爆炸规律与诱发因素

梁铁山^{1,2}, 张志杰²

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 平顶山煤业集团有限责任公司, 河南 平顶山 467092)

摘要: 在对20世纪70年代以来发生的自燃矸石山爆炸灾害调查分析的基础上, 总结出自燃矸石山爆炸的一般规律, 分析了诱发自燃矸石山爆炸的主要因素。自燃矸石山内部超限可爆混合气的形成和封闭压力的急剧增大是导致矸石山爆炸的关键因素和条件; 大气降水进入矸石山内部高温燃烧区, 与炽热矸石接触发生强烈的物理反应和化学反应, 其耦合作用是产生可爆混合气和压力迅速增大的主要途径; 不当排矸方式和取矸活动也是诱发矸石山爆炸的重要因素。

关键词: 煤矿; 自燃矸石山; 爆炸规律; 诱发因素

中图分类号: TD849.5

文献标识码: A

Blasting law and inducing factors of self-combustion waste heap

LIANG Tie-shan^{1,2}, ZHANG Zhi-jie²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Pingdingshan Coal Co. Ltd., Pingdingshan 467092, China)

Abstract: On the basis of investigation and analysis of explosion self-combustion waste heap which had happened since 1970s', the blasting law and inducing factors of the explosions were expounded. Formation of high pressure and explosive gas mixture inside the coal waste heap are the key factor and condition to induce the explosions. Strong physical and chemical reactions, which will happen as contacting of water and fiery waste during raining days, are the main way to form high pressure and explosive gas mixture inside the coal waste heap. Improper digging and piling-up of the waste are also important inducing factors of the explosion.

Key words: coal mine; self-combustion waste heap; blasting law; inducing factors

据不完全统计, 20世纪末国有重点煤矿积存煤矸石总量达到50亿t, 形成大型矸石山1500多座。其中有300多座存在自燃, 发生自燃矸石山爆炸事故50余次, 对环境和人员造成重大伤害。如: 1975年甘肃上窑矿矸石山爆炸, 带着浓烟的炽热的煤矸石喷发高百米, 200m范围内温度达500℃, 2km范围内的树木都被烧焦, 12km²范围内空气被严重污染, 烟尘数日不散, 造成20人死亡, 40余人重伤; 2005-05-15, 平顶山煤业集团有限责任公司四矿(简称平煤集团四矿)主矸石山发生2次爆炸, 近1.8万m³, 约3.3万t矸石抛到100~300m范围内, 造成8人死亡, 21人重伤, 102人轻伤, 经济损失达3000多万元^[1]。

对自燃矸石山爆炸规律及其诱发因素至今仍未有本质的和系统的研究, 甚至对爆炸事件的统计与分析也很少。现场调查表明, 多数自燃矸石山不具有发生爆炸的必要条件, 只有一些矸石山自燃发展到一定阶段, 同时存在某些环境诱因和人为不当扰动因素, 才会发生爆炸事故。本文通过对自燃矸石山爆炸现象和

诱发过程的现场调查、测量与各种试验结果的分析、研究, 可以对自燃矽石山的诱发过程、爆炸规律和主要诱发因素得到一些基本认识。

1 自燃矽石山爆炸的一般规律^[2-3]

(1) 所有爆炸事故都发生在自燃历时较长, 形成较深厚着火层的矽石山。同时, 发生爆炸的矽石山, 矽石含碳量低, 自燃现象比较温和, 在晴天甚至观察不到正在自燃的明显迹象。长期的缓和自燃造成生产和管理人员的思想麻痹, 很多发生爆炸的矽石山, 都是在内部缓慢自燃的情况下, 仍然不断堆加新鲜矽石。至今还没有统计到自燃煤堆或高含碳矽石山发生爆炸的实例。

(2) 统计到的爆炸事故都发生在较大降雨之后或者降雨过程中, 而且爆炸发生形态和水的渗入方式及自燃层分布结构有关。有的爆炸性气体集中分布, 爆炸形成很深的大坑; 有的爆炸性气体分散, 爆炸的范围比较大但比较浅, 爆炸时掀掉整个坡面的表层。这正好对应了雨水集中下渗和雨水沿坡面分散下渗的2种情况。因此, 矽石山爆炸诱发机制和水的渗入有关。

(3) 爆炸引起的自燃矽石移动采取3种方式: 喷射、垮塌和滑坡。喷射的矽石颗粒飞行高度和距离最大可以达到200~300 m; 造成坍塌的原因是爆炸和降雨破坏了保持矽石山边坡稳定的矽石颗粒间黏结力, 坍塌物质量主要取决于边坡尺寸和结构, 也和爆炸范围和释放能量有关; 滑坡则是降雨改变了堆积矽石安息角, 爆炸只是帮助含水矽石物料运动。

(4) 爆炸抛射出来的矽石温度较高并处于松散(非黏结)状态, 含有大量矽石燃烧解体形成的灰烬。无论是自然降水或者人工注水(浆)引起的爆炸都没有改变爆轰矽石主体基本干燥的状态, 对树木和人员的灼伤绝大多数是这些炽热矽石(粉)的作用, 而不是爆炸产生灼热气体的作用。

(5) 刚爆炸的矽石山有可能发生第2次爆炸, 但发生几率很小。在统计到的50余次矽石山爆炸中, 仅有平煤四矿的1次发生了第2次爆炸。第2次爆炸发生的地点是在已经被爆炸揭开的矽石山自燃区, 距离第1次爆炸仅数小时。

2 自燃矽石山爆炸诱发因素分析

2.1 可爆混合气

由上述的自燃矽石山爆炸规律可以发现, 自燃矽石山爆炸具有2个特征: ①爆炸物抛射速度快、范围大, 释放能量多; ②爆炸持续时间短, 基本上是在瞬间完成。调查表明^[4-5]: 矽石山在自燃过程中可产生大量的气体, 包括CO, CO₂, SO₂, H₂S, H₂, CH₄, NO, NO₂等, 其中H₂, CO和CH₄是可燃气体, 它们与空气(氧气)的组合就形成可爆混合气。通过以下分析, 可以得出: 正是这种可爆混合气在高压下的超限聚集, 才是矽石山爆炸的关键因素和充分条件。

(1) 只有在矽石山内部形成的高压可爆混合气爆炸才具有抛射大量矽石的能力。2005-05-15平煤四矿主矽石山爆炸抛出物料总体积为1.8万m³, 总质量为3.3万t。要把如此多矽石抛到300 m之外, 需要爆炸产生的很大压力。水进入自燃矽石山高温区产生的饱和蒸气压力不会很大, 而CH₄爆炸产生的压力约0.76 MPa, H₂爆炸约为1.7 MPa, 这样高的压力可以满足煤矽石抛射对初速度的要求。根据平煤四矿爆炸现场遗迹测量计算, 第1次集中抛射的矽石总量约为1.9万t(9 573 m³), 抛射角45°, 抛射运行轨迹基本呈抛物线, 抛射平均距离为200 m, 由运动学方程计算出的抛射初速度为62.42 m/s。据此, 可以进一步由能量方程计算出, 平煤四矿主矽石山第1次爆炸集中抛出1.9万t矽石携带的动能为3.7 GJ。

根据爆炸力学经验理论^[6], 爆炸气体转化为煤矽石动能的效率是比较高的(相当于井下炸药崩煤), 理论认为炸药爆炸产生的能量(化学能)约有1/2转化为爆炸抛射物的动能。如果爆炸气体只有H₂, 根据氢气爆炸的热力学数据, 可以计算出产生2倍的3.7 GJ的能量需要纯氢气量950.4 g, 折算成爆炸发生前煤矽石内部H₂浓度99.3 mg/m³。现场实测得到的平煤自燃矽石山内部H₂浓度最高值为967 mg/m³, 而平均值与99.3 mg/m³接近。

(2) 只有可爆混合气爆炸才能形成灼热气浪和瞬间完成爆炸过程。大量水渗入高温区发生的瞬间蒸发压力升高也可能造成矸石山爆炸(物理爆炸,类似于锅炉爆炸)。但水在矸石山内部渗流速度不可能很快,在坡面不同位置 and 不同深度渗透和蒸发过程不可能同时发生,有一个延续过程,发物理爆炸也应是一个连续的过程。这和自燃煤矸石山瞬间完成爆炸的现象不符。其次,水渗透蒸发首先在浅层发生,产生的压力和矸石山坡面封闭性有关。坡面封闭性和水渗透量及渗透深度互相矛盾,或者产生水蒸气压力很高但数量不大,或者产生水蒸气量大但压力低。只有矸石山内部可燃混合气体爆炸才能形成灼热气浪和瞬间完成爆炸过程。

排除水渗入蒸发引起矸石山爆炸,并不排除这一过程在矸石山爆炸过程中所起的作用。实际上,渗水进入高温区的瞬间蒸发,是自燃矸石山内部可燃混合气体孕育并最终诱发爆炸的最重要的一个环节^[7-8]。

2.2 大气降水

2.2.1 大气降水诱发矸石山爆炸的物理和化学反应机制

大气降水的冲刷渗透作用,改善了矸石山内部孔隙的连通性,增大矸石山内部的孔隙率,同时煤矸石的吸水膨胀,使部分矸石发生风化,从而增大了煤矸石的比表面积,提高了矸石的吸氧能力;此外,水分可以使煤矸石的燃点下降 100 ℃ 左右,这样就大大加速了矸石的自燃。大气降水的冲刷渗透作用,还能使大量的水和空气(氧气)迅速进入矸石山深层的核心燃烧区。雨水遇到深层高温区炽热的矸石(通常在 800 ℃ 以上),将首先发物理反应,即雨水在高温条件下迅速蒸发形成大量的水蒸气,体积可膨胀 1 700 倍,从而使矸石山内部单位体积的压力迅速增大;同时发生水煤气化学反应,产生大量的 H_2 (约占 60%) 和 CO (约占 40%),加速矸石的自燃,特别是高温下 H_2 的聚集和猛烈燃烧,将使矸石山内部的压力突然急剧增加;并且, H_2 , CO 和 O_2 (与雨水同时进入)一起,形成可爆混合气。在超乎寻常的高压条件下,如果可爆混合气的浓度,特别是其中 H_2 的浓度进入爆炸限的范围,在高温燃烧区现成的明火条件下,就会发生激烈的爆炸(化学爆炸)。超乎寻常的内部高压和爆炸释放的巨大能量将瞬间冲破矸石山表层的束缚,将大量燃烧的矸石抛射到数百米之外。

因此,自燃矸石山爆炸是在物理反应和化学反应的耦合作用下形成的,大气降水进入矸石山内部高温燃烧区是引起一系列物理和化学反应的重要条件。

2.2.2 自燃矸石山内部气体测试

平煤集团存在 7 座自燃严重的矸石山,对其内部不同温度点(深度)的气体进行了抽取和测试,表明各深度均存在 CO, CH_4 , H_2 , 以及其它煤炭低温干馏气体,在同一地点雨季和非雨季存在很大差别(见表 1)。

平煤集团的监测结果显示了和其它矸石山自燃区测试结果相同的规律:随着深度增加,自燃矸石区

表 1 平煤集团雨季和非雨季自燃矸石山内部气体组成
Table 1 Composition of internal gas for spontaneons combustion waste dump in Pingdingshan Coal Co. Ltd. during rainy season and dry season

气候	采样点 温度/℃	$\varphi(O_2)$	$\varphi(N_2)$	$\varphi(CO)$	$\varphi(CH_4)$	$\varphi(CO_2)$	$\varphi(H_2)$
雨季	65.8	16.1	78.5	0	0.03	3.70	0.033
	79.8	13.3	79.4	0	0.12	5.64	0.034
	98.9	4.3	76.6	0.223	0.58	12.70	4.800
	99.0	1.4	77.7	0.257	0.24	16.95	2.630
	641.0	1.8	77.7	0.570	0.17	14.95	1.172
非雨季	63.0	18.05	78.60	0	0.023	1.76	0.038
	79.8	3.55	83.95	0.021	0.330	11.45	0.090
	87.8	3.45	80.15	0.249	0.605	13.50	1.465
	393.0	2.40	81.70	0.428	0.345	14.45	0.650
	515.0	0.25	82.25	0.488	0.180	13.45	0.900

温度也增加,反应产物浓度先增加,随后基本保持一定水平; O_2 浓度降低,且在一定深度后迅速降低至 2% 以下;非雨季(包括不产生下渗水的小雨天气)自燃矸石山内部可燃气体浓度都低于爆炸下限;降雨并产生雨水下渗条件下,测试到的各类可燃气体浓度都有显著增加,其中表 1 中雨季平煤集团测到 H_2 浓度超过了爆炸下限(表 2^[9])。这就解释了为什么大多数自燃矸石山爆炸发生在下雨天或雨后的原因。

表2 可燃气体爆炸浓度的上、下限
Table 2 Up and down limit of fiery gas
content for blasting %

项 目	φ (CO)	φ (CH ₄)	φ (H ₂)
爆炸下限	12.5	5.0	4.0
爆炸上限	74.0	15.0	75.6

2.3 不当排矸方式和取矸活动

2.3.1 排矸

目前普遍采用翻矸架加推土机辅助排矸方式，翻矸过程中翻矸架的振动和推土机在平台上碾压，都容易在平台和斜坡交界处以及翻矸架下，诱发产生裂缝并深入到矸石山内部，成为空气流通和下雨天雨水渗入的通道。此外，内部缓慢自燃的矸石山，在不被人们觉察的情况下，如果在其上面

继续排（堆）矸，就出现了边自燃边加新鲜矸石的现象，其结果不仅形成深厚自燃火层，而且使自燃火层不断得到干馏可燃气体原料的补充。同时，在没有排、取矸扰动的条件下，自燃矸石山会发生自凝结作用，但在自燃矸石山上继续排矸，形成的自燃火区内部矸石是松散的。处于松散状态自燃矸石的爆炸将引起喷射，危害性大大增加。

2.3.2 取矸

由于自燃严重的矸石山堆存时间都比较长，且受内部产热影响，坡面矸石风化严重，形成一层相对致密的呈凝结壳状的风化层。不当取矸活动造成矸石山坡面凝结壳状物的破坏，比雨水冲刷造成的破坏还要严重。从而使空气通过剥开的新鲜面大量进入自燃区，促进矸石的自燃；并且也为下雨天大量雨水渗入矸石山内部并制造大量的可燃气体创造了条件。同时，矸石山表层的局部破坏使其再也束缚不住矸石山内部强大的压力，为矸石山爆炸时巨大能量的释放和大量矸石的抛射打开了方便之门。

3 结 论

（1）自燃矸石山爆炸条件形成是一个非常复杂的动态过程，其发生和发展在相对较短时间内完成，具有偶然性和突发性。通过对自燃矸石山爆炸现象、过程和现场测量与试验的结果的研究，对自燃矸石山爆炸的一般规律和诱发自燃矸石山爆炸的主要因素得到一些基本认识。

（2）自燃矸石山内部高温燃烧区超限可爆混合气体的形成（主要由 H₂、CO 和 O₂ 组成）和封闭压力的急剧增大，是导致矸石山在瞬间剧烈爆炸、释放巨大能量并引发大量炽热矸石远距离喷射的关键因素和条件。

（3）自燃矸石山爆炸事故通常发生在较大降雨之后或者降雨过程中；大气降水进入矸石山内部高温燃烧区，与炽热矸石接触发生一系列强烈的物理和化学反应，其耦合作用是产生可爆混合气并引起矸石山内部封闭压力急剧增大的主要途径。

（4）传统的排矸方式和不当的取矸活动，导致矸石山表层的开裂和破坏，为空气和雨水进入矸石山内部打开了通道，并使矸石山表层的强度和束缚矸石山内部压力的能力大大降低，是诱发矸石山爆炸的另一重要因素。

（5）为了防止自燃矸石山爆炸事故的发生，必须针对其诱发因素采取综合控制和治理措施。及时发现和有效控制自燃现象，阻止其蔓延和向深部发展^[10]；加强对矸石山坡面的管理，改变传统排矸方式，禁止不当取矸活动，避免其对矸石山凝结状表层的破坏，并采取植被覆盖等措施，减少降雨对坡面表层的冲刷作用；建立完整的监测系统，对矸石山自燃及其内部水分、气体、压力等与爆炸相关的参数进行实时监测。

参考文献：

- [1] 张志杰. 煤矿矸石山自燃爆炸机理初步分析与研究 [J]. 能源环境保护, 2007, 21 (4): 12-15.
Zhang Zhijie. Primary study and analysis on blasting mechanism of fiery waste rock bump [J]. Energy Resources and Environment Protection, 2007, 21 (4): 12-15.
- [2] 张振文. 煤矿矸石山喷爆的形成机制与影响因素 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2002, 21 (1):

- 11 – 15.
- Zhang Zhenwen. Forming mechanism and influencing factors of blasting of fiery waste rock bump in coal mines [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2002, 21 (1): 11 – 15.
- [3] 赵 宇, 崔 鹏, 王成华, 等. 重庆万盛煤矸石山自燃爆炸型滑坡碎屑流成因探讨 [J]. 山地学报, 2005, 23 (2): 169 – 173.
- Zhao Yu, Cui Peng, Wang Chenghua, et al. Study on cause forming elastic flow during blasting of fiery waste rock dump [J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23 (2): 169 – 173.
- [4] 于水军, 余明高, 段玉龙, 等. 自燃煤矸石山爆炸的热力学模拟 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (9): 945 – 949.
- Yu Shuijun, Yu Minggao, Duan Yulong, et al. Thermodynamic simulation of explosion of self-combustion gangue heap [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32 (9): 945 – 949.
- [5] 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.
- Huang Wenzhang, Qiu Xiande, Wang Jianzhong, et al. Spontaneous combustion mechanism of gangue in Jingang coal mine [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2001, 24 (2): 67 – 70.
- [6] 恽寿榕, 赵衡阳. 爆炸力学——《近代兵器力学丛书》[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- Yun Shourong, Zhao Hengyang. Blasting mechanics in “Modern Weaponry Mechanics Collection” [M]. Beijing: Publishing House of National Defence Industry, 2005.
- [7] 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 Institute of Science and Technology, 2001, 11 (2): 12 – 14.
- [8] 余明高, 段玉龙, 于水军, 等. 降雨量对自燃矸石山爆炸的影响分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36 (4): 453 – 457.
- Yu Minggao, Duan Yulong, Yu Shuijun, et al. Effect of rainfall on the explosion of coal gangue heap [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36 (4): 453 – 457.
- [9] 编委会. 煤矿瓦斯综合治理技术手册 [M]. 长春: 吉林音像出版社, 2003.
- Editing Committee. Handbook of comprehensive techniques for harnessing gas in coal mines [M]. Changchun: Jilin Audio – Video Publishing House, 2003.
- [10] 李侃社. 矸石堆自燃火灾综合防治技术 [J]. 煤炭科学技术, 1996, 24 (5): 30 – 31.
- Li Kanshe. Comprehensive techniques to prevent spontaneous fire of waste dump [J]. Coal Science and Technology, 1996, 24 (5): 30 – 31.
- +++++

我国煤炭生产有望推广井下避难舱

在中国煤炭工业劳动保护科学技术学会 (简称“中国煤炭劳保学会”) 的促进下, 北京中税天网科技有限公司与美国 Strata 公司签署了矿井应急避难所技术及设备引进协议。

从国家安监局内部获悉, 中国煤炭劳保学会已经向安监局提交了引入该技术的建议, 提出产品投产后进行试点、推广, 获得安监局的首肯和推广。如果进展顺利, 不久后我国煤炭生产中将推广该设备。井下避难舱是指设置在矿井下危险工作区域的一个密闭空间, 有很好气密性, 能抵御一定外力冲击, 内备氧气供给系统、一氧化碳和二氧化碳净化系统、供电系统和通讯系统等。