

# 煤矸石山自燃机理及灭火技术研究

巩 潇<sup>1</sup>, 刘 飞<sup>1</sup>, 赵方莹<sup>1 2 3</sup>

(1. 北京林丰源生态园林绿化工程有限公司, 北京 100083;

2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

3. 北京丰林源生态园林设计研究院有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 日益增加的煤矸石在堆置过程中极易发生自燃,对周围环境和居民造成危害。为了预防和控制煤矸石山的自燃,对煤矸石山的自燃机理、自燃因子进行了分析论述,并对几种常用的灭火技术进行比较,同时对今后预防和控制煤矸石山自燃的研究和应用工作重点提出了见解。认为在今后的工作中,除应继续对煤矸石山的自燃机理和自燃因子展开深入研究外,还应开发在技术、经济、可行性方面更为实用的新技术,尝试通过植被混合种植以改变煤矸石山表面的小气候,防止煤矸石山复燃,进而达到煤矸石山治理的目的。

**关键词:** 煤矸石; 自燃机理; 自燃因子; 灭火技术

中图分类号: X43; TD849

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2012)05-0083-05

## Spontaneous combustion mechanism of gangue dump and fire extinguishing techniques

GONG Xiao<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>, ZHAO Fang-ying<sup>1 2 3</sup>

(1. Beijing Linfengyuan Eco-landscaping Green Engineering Co., Ltd. Beijing 100083, China;

2. School of Soil and Water Conservation Beijing Forestry University Beijing 100083, China;

3. Beijing Fenglinyuan Eco-landscaping Design Institute Co., Ltd. Beijing 100083, China)

**Abstract:** To prevent and control the spontaneous combustion of gangue dump, analyse its mechanism and spontaneous combustion factors. Compared some fire extinguishing techniques which are frequently used. Through analysis find that, despite the above techniques, some more practical advanced techniques should be investigated from the aspects of economy and feasibility. The climate of gangue dump could improve by mixedly planting vegetation. All these measures serve to prevent spontaneous combustion of gangue dump.

**Key words:** gangue; spontaneous combustion mechanism; spontaneous combustion factors; fire extinguishing technology

煤矸石山在堆置过程中可能发生自燃,常年自燃的煤矸石山,每平方米燃烧面积每天将向大气排放出 10.8 g CO、6.5 g SO<sub>2</sub>、2 g H<sub>2</sub>S 和 NO<sub>2</sub><sup>[1]</sup>,同时伴有大量的烟尘,对周围环境造成严重污染,并影

响周围居民的身体健康。另外,自燃的煤矸石山如遇到淋溶水的渗入,可能会由于水气受热后急剧膨胀导致气体压力急剧增加而发生爆炸。因此,煤矸石山自燃不容忽视。近年来,国内外学者对煤矸石

收稿日期: 2012-06-16 责任编辑: 孙淑君

作者简介: 巩 潇(1982—),女,吉林省吉林市人,工程师,硕士,主要从事固体废弃物资源化处理及应用和生态环境恢复方面的研究。通讯作者: 赵方莹。

引用格式: 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.

山的自燃机理、自燃因子以及灭火技术等做了大量的研究工作,并取得了一定成果,但对煤矸石山自燃和灭火技术的研究仍将是一项任重道远的工作。

## 1 自燃机理及自燃因子研究

鉴于煤矸石山的危害,近年来国家加大了监管力度,煤矸石山已成为影响煤矿企业发展的重要制约因素,因此,探索分析煤矸石山的自燃机理和自燃因子对煤矸石山自燃预防和治理具有重要意义。

### 1.1 自燃机理

研究人员从19世纪末期开始了对煤矸石山自燃的研究,截至21世纪初,对煤矸石山自燃机理的研究已取得卓有成效的成果。研究人员基本认同:煤矸石山的自燃是一个极其复杂的物理、化学反应过程,是内在因素和外在因素共同作用的结果。但是对煤矸石山的自燃机理仍持不同观点,主要观点包括:硫铁矿氧化理论、细菌作用理论、酚基作用理论和煤氧复合理论等。其中,具有代表性的是硫铁矿氧化理论和煤氧复合理论。

(1) 硫铁矿氧化理论认为煤矸石中的硫铁矿具有较强的还原性,其与空气中的 $O_2$ 接触后作用,引发一系列氧化还原反应,反应释放出的热量在矸石山内部积累并使矸石山内部温度不断升高,当温度达到煤矸石中碳的燃点后,整个煤矸石山便发生自燃。由于煤矸石露天堆放,雨淋作用又为硫铁矿的氧化反应提供了必要的水分条件<sup>[2-3]</sup>。

(2) 煤氧复合理论认为煤矸石山自燃是多孔的煤炭表面与氧分子在物理吸附和化学吸附共同作用下产生的结果。氧分子首先进入具有自燃倾向的煤体孔隙,然后与表面的煤分子在范德华力作用下发生物理吸附,并伴随着放热,由于煤是热的不良导体,在散热条件不良的情况下,吸附热越积越多,当温度超过 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,物理吸附逐渐减弱,化学吸附得到加强并释放热量;当温度超过化学吸附的临界温度( $140\sim 160\text{ }^\circ\text{C}$ )时,开始出现煤的干馏,伴随产生多种可燃性气体,如芳香族的碳氢化合物、 $H_2$ 、 $CO$ 等,随之煤进入自热期。自热期产生的热量不断累积并使温度升高,当温度超过燃点后,煤矸石自燃,生成大量烟雾,甚至出现明火<sup>[4]</sup>。

### 1.2 自燃因子

煤矸石山的自燃过程是非常复杂的物理化学反应过程,煤矸石从自然状态到燃烧状态不仅受到自身可燃物含量、渗透率的制约,还与通风条件、水

分条件等外界环境因素密切相关,各项自燃因子相互作用,共同影响煤矸石山的自燃。

#### (1) 可燃物含量

煤矸石中的可燃物主要为硫铁矿、碳质沉积物、油页岩和残存煤。硫铁矿极易燃烧,是煤矸石自燃的主导因素<sup>[5]</sup>。有研究表明:当含硫量为 $2\%$ 时,煤矸石山极易发生自燃;武钢等<sup>[6]</sup>对阳泉煤矸石的含硫量进行了分析,煤矸石中的硫铁矿含量较多,其选矸中含量普遍超过了 $6\%$ ,是阳泉矸石山自燃的主要因素之一;陈海峰等<sup>[7]</sup>利用燃烧程度不同的煤矸石进行氧化升温实验,发现煤矸石的氧化升温速率与其硫铁矿含量有关。残存煤分为低、中、高3种程度的变质煤。低变质煤与中、高变质煤相比具有挥发分产率高、内在水分高、密度小的特点,是煤矸石山早期发火的原因之一。碳质沉积物和油页岩中的C、H含量直接影响煤矸石的燃烧强度<sup>[5]</sup>。

#### (2) 渗透率

煤矸石山的渗透率直接影响进入煤矸石山内部的空气量,渗透率大有利于空气向内部扩散,反之,进入煤矸石山内部的空气就越少,煤矸石山自燃的可能性就越小。煤矸石的粒径和煤矸石山的压实程度是影响渗透率的主要因素。

小颗粒煤矸石由于比表面积相对较大,反应活性较高,发热量较大,而且在堆放时孔隙率较小,使得反应过程中释放的热量富集,当富集的热量使温度达到临界温度,煤矸石山发生自燃。研究表明煤矸石的颗粒平均有效直径为 $6\sim 13\text{ mm}$ 时,煤矸石山的氧化升温 and 蓄热条件达到最好,产生自燃的可能性也最大<sup>[8]</sup>。邓军<sup>[9]</sup>对兖州东滩煤矿的煤样进行了不同粒度范围与低温自燃性关系的研究,研究结果也认为煤的耗氧速度与粒度分布存在一定的关系,煤的粒度越小,比表面积越大,耗氧速度就越大,氧化自燃性也随之增强。

煤矸石山的压实程度是影响渗透率的另一因素,不同的煤矸石山压实程度使煤矸石山的孔隙率不同,也会对渗透率造成影响。煤矸石山渗透率碾压测试:

压实程度	渗透率 $k/(10^{-9}\text{ m}^2)$
自然堆积	1.40
碾压1遍	0.81
碾压3遍	0.26
碾压7遍	0.15
覆盖20 cm黄土后碾压	0.05

由上述可见,碾压后的煤矸石山渗透率较自然堆积时明显减小,且随着碾压次数的增加,渗透率不断降低,但渗透率的降低幅度逐渐减小。覆盖 20 cm 黄土碾压后的煤矸石山渗透率仅为  $0.05 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ , 为碾压 7 遍之后煤矸石山渗透率的 1/3 和自然堆积煤矸石山渗透率的 1/28。还有研究表明,黄土覆盖碾压后,煤矸石山的气流速度将小于临界气流速度,这也从另一个角度防止煤矸石山发生自燃。因此,在实际工程中可以通过改变煤矸石的堆积形式来达到阻止其自燃的目的<sup>[8]</sup>。

### (3) 通风条件

空气是煤矸石山发生自燃的必要条件之一,主要通过扩散作用从煤矸石颗粒间的孔隙进入煤矸石山内部,因此,进入内部的空气量受制于风压(热风压、自然风压)和气流速度。

煤矸石山未发生自燃时,空气主要在自然风压作用下进入煤矸石山内部,自然风在吹到边坡时部分转化为静压,并向煤矸石山内部流动,研究表明煤矸石的静压随堆积高度的增大而减小,随堆积角度的增大而增大,静压越大越有利于空气进入煤矸石山。随着进入的空气量的增大,煤矸石山从自热发展到自燃。煤矸石山自燃升温后,内部空气密度减小,使得内外部压力差逐渐变大,在热风压的作用下,外界空气源源不断进入煤矸石山内部,为自燃提供  $\text{O}_2$  维持自燃。

气流速度也与煤矸石山自燃有着密切关系。国内外许多学者对临界气流速度进行了研究,前苏联学者曾提出临界气流速度值为  $2 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ,国内学者对煤矸石山自燃的临界气流速度研究表明,煤矸石山中的空气流速低于  $4.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  时不会引起煤矸石山的自燃,当温度约为 900 K 时,煤矸石山内部的空气流速达到峰值<sup>[10]</sup>。煤矸石的堆积形式是影响气流速度的重要原因,堆积形式不同气流速度也随之不同。不同堆积方式下孔隙率、气流速度参数见表 1。

表 1 不同堆积方式下孔隙率、气流速度参数

堆积方式	孔隙率	气流速度/ $(10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$
自然倾倒	0.3~0.4	0.100~0.010
轻度压实	0.2	0.02~0.001
分层压实	0.1	<0.001

由表 1 可见,不同的堆积方式对煤矸石山内部的气流速度有很大影响。自然倾倒时,煤矸石山粒

径分布自下而上分别为巨砾、粗粒和细粒,空气具有良好的通道进入煤矸石山,且气流速度较快,加速了自燃<sup>[5]</sup>。压实后堆积减小了煤矸石山的孔隙率,同时减小了煤矸石山的渗透率,使得气流速度减小,进而减少了空气的供应量,为防止煤矸石山自燃提供了有利条件<sup>[2,8,11]</sup>。

### (4) 水分条件

研究表明,水分会提高煤矸石的温度,当煤矸石吸附水分后会产生吸附热,使煤矸石的温度升高  $5 \sim 7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,而且水的湿润也能使煤矸石的温度升高  $15 \sim 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ;水分还会加快硫铁矿的低温氧化速率和煤的燃烧速度,硫铁矿的低温氧化放热速率在一定范围内随着含水量的增加而增加<sup>[8]</sup>;水分对原煤的着火温度和燃烧速度也产生影响,原煤的着火温度在一定范围内随含水量的增加而下降,当含水量达到 20% 时,着火温度比干燥时降低了  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  以上。水分会加快原煤的初期燃烧速度,在对含有 45% CO 的混合气体进行燃烧试验中,当添加溶剂比例为 5% 的水分后,煤的燃烧速度为添加 0.7% 水分速度的 2.1 倍<sup>[12]</sup>,当水分含量为 4%~6% 时,煤的吸氧量最大,其氧化燃烧反应的速率也最大。

水分还会与温度共同作用使煤矸石山不断风化,在风化的作用下,煤矸石的粒径变小,比表面积增加,孔隙率和透气性都有所增加,为空气入渗提供了有利条件,增加了煤矸石山自燃的可能性。因此,当水分含量较高时,不利于预防和控制煤矸石山自燃。

## 2 灭火技术

在温度差异引起的热对流的作用下,煤矸石山发生自燃后,空气不断向煤矸石山内部扩散,充足的  $\text{O}_2$  使其保持了长期燃烧的状态。长期燃烧的煤矸石山会对周围环境和居民造成一系列影响,因此,在煤矸石山治理过程中需采用人为的方法进行灭火。经过多年的研究和工程实践,目前国内外常见的煤矸石山灭火方法主要是覆盖法、挖除法、注浆法、注浆密闭和泡沫灭火法、控制燃烧法和低温惰性气体法等。大多数灭火方法是通过隔绝空气的渗入达到熄灭煤矸石山燃烧的目的。

### 2.1 覆盖法

覆盖法通过在煤矸石山表面覆盖惰性物质来避免煤矸石与空气接触,以此达到防止自燃发生或熄灭燃烧的目的,黄土是比较常用的惰性物质。简

单的覆盖并不能使惰性物质与煤矸石山的渗透率及孔隙率充分减小。因此,采用覆盖法时,必须将覆盖物压实,使空气难以进入煤矸石山内部,最终使煤矸石山无法自燃。

为防止煤矸石山发生自燃,国外大量采用覆盖法。英国等欧洲国家主要采用煤矸石分层堆放、分层压实法,即在相邻两层煤矸石之间夹隔压实的不可燃物质,最后在煤矸石表面再覆盖黄土压实<sup>[12-13]</sup>。阳煤集团三矿曾采用黄土覆盖碾压法治理自燃的煤矸石山,火势得到了有效控制,但几年后,局部出现火势反复,究其原因,是由于压实的黄土经过一段时间变得干松,孔隙率增大,使密闭功能失效<sup>[6]</sup>。

## 2.2 挖除法

挖除法是最原始却最有效的灭火方法。在实施过程中首先凭经验或通过实测温度找到火源,然后挖出着火和发热的煤矸石,用水冷却或自然冷却,之后回填到原处,这种方法实施起来比较简单,成功率也较高。但此法只适用于刚发生自燃的煤矸石山,且环境条件允许设备和人员能够接近燃烧区域。燃烧范围广或燃烧强度大的煤矸石山不适用,因此,这种方法适用范围较小,一般仅作为其他灭火方法的一种辅助措施。

## 2.3 注浆法

注浆法是目前国内外广泛采用的一种灭火技术,在国内很多煤矿矸石山的灭火中都取得了良好效果。工艺流程为:先将灭火材料制成一定浓度和比例的灭火浆液(浆液的配方根据煤矸石山以及矿山的实际情况进行调整,国内外广泛采用石灰作为灭火材料),然后在火区钻设一系列钻孔,用注浆泵将灭火浆液注入煤矸石山内部。灭火浆液与高温煤矸石接触后,在高温的作用下,浆液中的水分急剧蒸发,带走大量热量,煤矸石的温度得以降低。浆液中剩余的其他固体物质或覆盖于煤矸石表面,或充填在煤矸石间的缝隙中,起到阻隔空气的作用。灭火浆液中若包含碱性物质,还可以吸收一定量煤矸石燃烧释放出的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 等气体,减轻自燃煤矸石山对大气的污染。注浆法在平煤集团自燃煤矸石山灭火工程以及晋城古书院矿区矸石山灭火工程实践中都取得了良好的阶段效果<sup>[14-15]</sup>。但此法的缺点是在火区钻孔比较困难。

## 2.4 注浆密闭和泡沫灭火法

此方法将注浆法和泡沫灭火技术结合起来,利

用注浆隔离火区,然后再使用泡沫灭火剂消灭明火。2种方法结合使用能够迅速吸收热量,降低温度,缩短灭火时间。用泡沫替代水,主要是因为泡沫在煤矸石山中的流动比较容易控制,又不会破坏注浆形成的密封带,而且泡沫在着火煤矸石表面形成的膜可以保持较长时间,隔离煤矸石的效果优于水。小规模试验表明,利用这种方法可以使煤矸石山温度每分钟下降 $0.75\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[16-17]</sup>。

## 2.5 控制燃烧法

此方法的思路是让煤矸石在可控制的条件下保持燃烧,对燃烧过程中产生的热量回收利用,燃烧产生的烟气经处理后排放。此法主要目的是回收资源,同时能够控制并熄灭煤矸石山的自燃火<sup>[18]</sup>,但是,燃烧产生的烟气温度高,腐蚀性大,管道、设备的防腐处理成本高,难度大。美国西弗吉尼亚州曾在一座矸石山上进行了控制燃烧法的工业性试验,但在工程应用中比较少见。

## 2.6 低温惰性气体法

低温惰性气体注入煤矸石山火区后,发生相变,体积膨胀,能够从注入点迅速扩散至其他区域,并将热烟气排挤上升,使其升至煤矸石山表面,达到隔绝空气,灭火降温的双重作用。低温惰性气体能够使煤矸石山内部在一段较长时间内保持低温,最终温度降至临界温度以下。相对于灌水法,此法优势明显。水在重力的作用下,很难准确流到火区,但气体输送的作用力为压力和浮力,比较容易扩散至全火区。工程应用表明,单独使用液氮或固体 $\text{CO}_2$ 的效果相较二者混合使用的效果略差,而且混合物输送相对纯物质运输容易,成本也相对较低。现场试验表明,这种方法可以将火区温度降低至 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ,并保持约1个月,其灭火成本与传统方法相当<sup>[16]</sup>。

## 3 展 望

对煤矸石山自燃机理及自燃因子进行研究的最终目的是预防和控制煤矸石山自燃,并对自燃的煤矸石山进行治理,这是一项长期的工作,在今后的研究与应用中,应着重在以下三方面开展工作:

(1) 目前对于煤矸石山自燃机理仍存在许多争议,在日后的研究中,应继续开展更深入的研究,在完善现有理论的基础上,寻求新的发现,为煤矸石山的灭火技术提供理论依据。

(2) 对自燃因子展开深入研究,通过对自燃因

子的控制防止煤矸石山发生自燃,减小对自燃煤矸石山进行治理的工程量,同时避免自燃煤矸石山对环境造成污染。

(3) 改进现有的煤矸石山灭火技术,避免治理后的煤矸石山复燃,尝试通过种植一些耐高温的植物或不同植被的混合种植,最大限度地改变煤矸石山表面的小气候,进而控制矸石山的复燃。另外,还应当开发在技术、经济、可行性方面更为实用的新技术。

参考文献:

- [1] 李鹏波 胡振琪 吴军 等. 煤矸石山的危害及绿化技术的研究与探讨[J]. 矿业研究与开发 2006 26(4): 93-96.
- [2] 陈辉 宁曙光. 煤矸石中硫的存在形态及自然条件下的转化途径[J]. 山东煤炭科技 2001(3): 18-19.
- [3] 惠润堂. 煤矸石的环境影响及发生条件[J]. 煤矿环境保护, 2001 15(1): 56-58.
- [4] 林海燕 彭根明. 煤炭自燃过程的物理化学机理探讨[J]. 山西煤炭 1998 18(3): 31-34.
- [5] 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 6(2): 12-14.
- [6] 武钢 姚宇平. 阳泉煤矸石自燃原因及治理方法的研究[A]. 中国科协 2004 年学术年会第 16 分会场论文集[C]. 海南: 中国煤炭学会 2004: 449-452.
- [7] 陈海峰 夏太国 田国明 等. 矸石山自燃起因的试验研究[J]. 煤矿环境保护 1995 9(6): 23-24.
- [8] 贾宝山. 煤矸石山自然发火数学模型及防治技术研究[D]. 鞍山: 辽宁工程技术大学 2001.
- [9] 邓军. 煤的粒度与低温自燃性关系的研究[J]. 煤, 1999 8(5): 13-15.
- [10] 吴京杨. 煤矿矸石山的自燃及其控制[J]. 能源环境保护, 2008 22(4): 20-24.
- [11] 宋志 曹坤 王国道 等. 矸石堆自燃火灾的影响因素与防治途径分析[J]. 东北煤炭技术 1999(6): 30-32.
- [12] 邓寅生 邢学玲 徐奉章 等. 煤炭固体废物利用与处置[M]. 北京: 中国环境科学出版社 2008.
- [13] 陈永峰 吴丽亚. 矸石堆自燃的危害及防治[J]. 中州煤炭, 2000(1): 37-38.
- [14] 董现锋 谷明川. 平煤集团自燃矸石山灭火工程实践[J]. 煤炭科学技术 2009 37(1): 21 83-85.
- [15] 韩小林 张子虎 张弘弛. 晋城古书院矿区自燃煤矸石山灭火治理及植被实践[J]. 能源环境保护 2005 19(5): 39-40.
- [16] 顾强. 国内外矸石山灭火技术发展现状和展望[J]. 煤矿环境保护 1998 12(1): 12-17.
- [17] Jones J R Kim A G Kociban A M. The use of containment barriers and fire fighting foams for the extinguishment of coal waste bank fires: a laboratory study [A]. The international land reclamation and mine drainage conference [C]. Pittsburgh PA, USA 1994 4: 121-128.
- [18] Anna G King Robert F Carle Smith et al. Coal gangue combustion control and utilization [A]. Treatment and utilization of coal gangue compound Tian International Conference Proceedings [C]. Britain: 1984: 54-58.

(上接第 82 页)

## 2.2 解决方法

调节一体化到合适进水量,适当调节运行参数,使一体化设备出水水质稳定,对电渗析设备进行强化酸洗,使其恢复处理能力,重新启动电渗析设备,系统稳定运行后,低温循环水系统水质也得到较好改善。

## 3 结 语

在循环水处理应用中,采用“三法净水”+JR-EDR 脱盐组合设备,对进水水质指标要求宽泛、运行成本低(小于 0.9 元/t 水)、水回收率高(75%~85%)、出水水质稳定等特点,可以有效抗冲击性污染(装置泄露对循环水系统造成的污染),处理出水

明显降低了循环水系统的含盐量、硬度、浊度、Cl<sup>-</sup> 等指标,有效改善了循环水系统的水质。

参考文献:

- [1] 张葆宗. 反渗透水处理应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社 2004.
- [2] 李本高. 现代工业水处理技术与应用[M]. 北京: 中国石化出版社 2004.
- [3] 陶映初. 环境电化学[M]. 北京: 化学工业出版社 2003.
- [4] 张自杰. 排水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社 2004.
- [5] 周柏青. 全膜水处理技术[M]. 北京: 中国电力出版社 2006.