煤堆阻燃覆盖剂的工程试验研究

陈 刚¹,张 辉²,张 晶²,孙国建²,刘志东³,薛 智³,吴星文³ (1.广东电网公司电力科学研究院,广东广州 510080;2.东南大学能源与环境学院,江苏南京 210096; 3.广东珠海金湾发电有限公司,广东 珠海 519050)

摘 要:为防止煤堆自燃,以印尼煤为原料制备了煤堆阻燃覆盖剂,测定了阻燃覆盖剂孔隙率、渗透 率、抗压强度和屈服强度等指标,分析了阻燃覆盖剂的阻燃机理。采用参比方法在珠海某电厂露天煤 场进行煤堆阻燃覆盖剂的阻燃效果评估,研究阻燃覆盖剂覆盖层对现场条件的耐受性。结果表明:煤 堆整体温度自上而下升高,阻燃覆盖剂覆盖煤堆和未覆盖煤堆的实时温度最大差值超过 30 ℃,但覆 盖煤堆自上而下的温度变化率远低于未覆盖煤堆的温度变化率;均方差变化趋势不同,均方差变化的 异常是煤堆内部存在低温氧化自热效应的标志;覆盖煤堆和未覆盖煤堆的温度历史值分别为 39~49 ℃和53~75 ℃。煤堆在覆盖阻燃覆盖剂 150 d 后,未覆盖层发生自燃,覆盖层保持完好。说明研发 的阻燃覆盖剂能有效抑制煤堆低温氧化自加热进程,与实际煤堆阻燃效果一致;此外阻燃覆盖剂还有 防雨损和风损作用。

文章编号:1006-6772(2015)02-0101-05

Study on flame retardant covering agent in coal pile against spontaneous combustion

CHEN Gang¹, ZHANG Hui², ZHANG Jing², SUN Guojian², LIU Zhidong³, XUE Zhi³, WU Xingwen³

(1. Electric Power Study Institution of Guangdong Power Grid Corp., Guangzhou 510080, China; 2. Southeast University,

School of Energy and Environment, Nanjing 210096, China; 3. Guangdong Zhuhai Jinwan Electric Power Co., Ltd., Zhuhai 519050, China) **Abstract**: In order to prevent coal pile spontaneous combustion, a flame retardant covering agent (FRCA) was prepared with Indonesia coal as raw material. The porosity, permeability, compressive strength and bending strength of FRCA were analyzed. The flame retardant mechanism was researched. The evaluation experiments were conducted at an open coal yard of Zhuhai coal-fired power plant. The reference method was used to analyze the evaluation. The results showed that the temperature of coal pile increased from top to bottom, the maximum difference of real-time temperature of covered and uncovered coal pile was over 30 °C, the change rate of covered coal pile was far below the rate of uncovered coal pile. The unusual mean square error change indicated that there was low temperature spontaneous combustion. The temperature history value range of covered and uncovered coal pile was 39 °C to 49 °C, 53 °C to 75 °C respectively. After 150 days, the coal pile which wasn't covered FRCA began to burn, while the coal pile covered agent was still in good state. In addition, the FR-CA can also played a role of preventing rain and wind damage losses.

Key words: coal pile; spontaneous combustion; flame retardant covering agent; flame retardant mechanism

0 引 言

煤堆易发生的自燃现象是一个动态和自动加速 的复杂物理化学过程,主要是煤在一定条件下吸附 环境中的 O₂,发生缓慢氧化并放热,导致温度上升, 最终燃烧^[1]。因此,煤堆自燃过程不仅与煤自身特 性,如挥发分、粒径等有关,还与环境通风情况密切 相关^[2]。考虑生产需要和经济性,燃煤电厂的煤种

收稿日期:2015-01-05;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.02.023

基金项目:南方电网有限责任公司科研项目(K-GD2012-390)

作者简介: 陈 刚(1966—), 男, 湖北黄冈人, 高级工程师, 从事燃料节能优化及安全评估工作。 E-mail: chengang027@126. com

引用格式:陈 刚,张 辉,张 晶,等.煤堆阻燃覆盖剂的工程试验研究[J].洁净煤技术,2015,21(2):101-105.

CHEN Gang, ZHANG Hui, ZHANG Jing, et al. Study on flame retardant covering agent in coal pile against spontaneous combustion [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2):101-105.

复杂多变且堆放周期长,导致储煤场普遍存在自燃 现象,造成了一定经济损失和环境污染,并存在重大 安全隐患^[3-7]。

为掌握煤低温氧化和自燃规律并预测煤发火 期,国内外学者进行了大量研究,主要采用热分析 法^[8]、参比氧化法^[9]、绝热氧化法^[10-11]、红外分析 法^[12]等方法与手段研究煤固有属性对低温氧化和 自燃的影响。文虎^[13]通过自燃平台研究了煤堆放 热和环境热传递的动态过程。马恒等^[14]研究了燃 煤电厂储煤场自燃过程的温度分布,并设计了煤堆 温度远程监控系统用于防止煤场自燃。张建华 等^[15]分析了2种典型烟煤的煤质特性、外部环境、 堆放时间和温度空间分布等因素对煤堆自燃发火性 的影响,发现垂直于煤堆表面1m深度内,易出现煤 堆自燃敏感温度70~90℃;评价了煤堆深层注水法 及喷洒粉煤灰浆法2种自燃防治措施的有效性。以 上文献均是对煤的低温氧化和自燃过程的研究,但 应用阻燃覆盖剂防止煤堆自燃的研究却鲜见报道。 鉴于此,笔者针对广东省燃煤电厂的高挥发分煤种, 开发了一种低成本和环境友好的多功能复合型煤堆 阻燃覆盖剂,测定阻燃覆盖剂孔隙率、渗透率、抗压 强度和屈服强度等性能指标,并对阻燃覆盖剂的阻 燃效果进行现场评估,以期为未来煤堆自燃预警技 术的开发提供参考。

1 试验条件

1.1 煤样性质

试验煤样采自印尼苏门答腊煤矿,将煤样制备 为0.2 mm 以下颗粒,使其达到空气干燥基状态。 煤样基本性质见表1。

表1 煤样基本特性											
工业分析/%				元素分析/%				$Q_{ m net,ad}$	堆积密度 ρ/		
$A_{\rm ad}$	$M_{\rm ad}$	V_{ad}	$V_{\rm daf}$	$w(C_{ad})$	$w(H_{ad}) = w(O_{ad})$	$w(N_{ad})$	$w(S_{ad})$	$(MJ \cdot kg^{-1})$	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$		
7.55	11.34	39.96	49.27	61.81	3. 63 13. 59	1.25	0.83	23.85	730		

1.2 试验仪器

德国 IKA 的 C4000 量热仪, Hitachi(日立) 的 S-3700N 扫描电子显微镜(SEM), 英国 IN-STRON1341 电液伺服材料试验机等。

1.3 阻燃覆盖剂的制备

将印尼煤用破碎机破碎至2 mm,在常温下与改 性高黏度原油以一定比例混合,在固定容器里铺成 厚 6~10 mm 涂层,凉干后备用。

1.4 煤粉和阻燃覆盖剂的形貌表征

煤粉和阻燃覆盖剂的 SEM 分析如图 1 所示。





a) 煤粉

b) 阻燃覆盖剂

图1 煤粉和阻燃覆盖剂的 SEM 分析

由图 1a 可知,煤粉表面粗糙,具有明显的多孔 结构,这种结构便于热量传递和 O₂ 渗透。由图 1b 可知,当煤粉表面被阻燃覆盖剂均匀覆盖后,粗糙的 表面变得光滑,多孔结构消失。因此,煤粉在喷撒阻 燃覆盖剂前后的主要区别在于喷撒阻燃覆盖剂后, 煤粉表面形成致密的密封覆盖层,防止O₂进入煤堆 内部,具有防止自燃的作用。

1.5 阻燃覆盖剂基本性质

 1)热物理特性。阻燃覆盖剂的一个重要热物 理特性是其渗透流体介质的能力,包括孔隙率和渗 透率。根据阻燃覆盖剂的孔隙率和渗透率可定量判 断其配方特性。典型阻燃覆盖剂和煤粉的孔隙率和 渗透率见表2。

由表2可知,研制的煤基阻燃覆盖剂具有极低 孔隙率和渗透率,可大幅降低煤堆表层的孔隙率和 渗透率,降低 O₂ 向煤堆内部的渗透速率,起到抑制 煤堆自燃的作用。

2)抗压强度和屈服强度。将阻燃覆盖剂制成标准样品(40 mm×40 mm×160 mm)后,利用 IN-STRON1341 电液伺服材料试验机进行抗压强度和 屈服强度测试,结果见表3。

2 阻燃覆盖剂的阻燃效果评估

2.1 现场评估方法

选择印尼煤为试验煤样,采用参比方法在珠海

		表 2	典型 覆盖剂和)	保粉的孔隙率和			
试样	流量/(m ³ · s ⁻¹)	压差/Pa	试样厚 度/m	渗透 率/cm ²	孔隙 率/%	导热系数/ (W・m ⁻¹ ・K ⁻¹)	容积热容/ (kJ・m ⁻³ ・K ⁻¹)
阻燃覆盖剂(干燥)	5. 42×10 ⁻⁴	176.40	0.02	1.201×10 ⁻⁶	35.70	0. 186	1440. 50
煤粉	5. 38×10 ⁻⁴	235. 20	0.03	1.343×10 ⁻⁶	37.80	0. 215	984.70

注:煤粉截面积为0.0095033 m²,30 ℃时空气动力黏度 µ 为1.86×10⁻⁶ Pa・s。

阻燃覆盖剂的抗压强度和屈服强度 表3

抗压强度					屈服强度					
模量/MPa	加载 力/N	应力/ MPa	加载峰 值/N	应力峰 值/MPa	模量/ MPa	加载 力/N	屈服应 力/MPa	断裂加 载力/N	断裂应 力/MPa	
2.46	56.71	0. 04	67. 59	0. 04	0.75	11.07	0. 03	10. 69	0. 03	

某电厂露天煤场进行现场评估。煤堆体积为 40 m× 20 m×3 m,质量约 2000 t,一半煤堆喷撒厚度 6~ 10 mm 的阻燃覆盖剂,另一半不喷洒。采用埋设在 煤堆中的多点温度传感器和孔隙含氧量传感器,连 续监测露天堆积的煤堆中温度和 O, 浓度的变化规 律,获得2个煤堆内部的低温氧化过程数据,对煤堆 覆盖的效果进行评估。

2.2 测控系统及装置

煤堆自燃趋势实时监测系统以工控机上的专用 数据采集及分析软件为核心,通过串行口访问 RS485 总线上的 A/D 转换模块。每个温度传感器 阵列上的温度信号采用 I-7015 热电阻温度转换模 块实现:0,浓度传感器变送出来的电压信号采用 I-7017 通用 A/D 转换器:环境温度和湿度采用基 于 SHT-75 高精度温度湿度芯片的数字式传感器, 安装在煤堆附近采集站窗外的通风防雨壳体内。为 了控制引线电阻造成的误差,所有传感器信号均就 地转换后通过数据总线上传到采集站内的工控机。 测控系统构成示意如图2所示。



图2 测控系统构成示意

测控系统软件是根据设计要求采用工业组态软 件制成,包括实时数据采集和历史数据记录2部分。 在系统画面上能够实时观测到煤堆上测点的温度和 O2 浓度,也可通过历史数据查询功能调阅一段时间 内的数据。

2.3 结果与分析

试验获得了煤堆中的48个点的温度数据和4 个点的0,浓度数据,同时得到了当地温度和湿度的 历史数据,分析采用覆盖措施后,煤堆内部的自燃进 程差异。

在安装传感器后,2个煤堆的 O₂ 浓度 1 d 内迅 速下降至近乎零值,正式投运后未获得0,浓度变化 的趋势。0,浓度的快速下降反映了煤堆内部的氧 化反应速率很快,远超过通过边界的 O,渗透速率, 表明煤堆具有很强烈的低温氧化倾向。

2.3.1 煤堆内部各探测点实时温度分布

煤堆内部各探测点实时温度分布如图 3 所示。 图中标识数值是自煤堆表面向下,每隔 300 mm 处 的温度,单位为℃。SE 表示方位,南东;SW 表示南 西:其他以此类推。



由图 3 可以看出,从右侧覆盖的煤堆向左侧未 覆盖煤堆的方向,对应深度上的温度基本呈上升 趋势。2 组对应边缘点自上而下的温度相差很大, 最大差值超过 30 ℃;2 组中间对应点的温度差别 也比较明显,未覆盖部分的温度明显超过覆盖部 分;煤堆整体温度自上而下升高,这可能是煤堆内 部氧化产生的自热效应所致,但覆盖煤堆自上而 下的 温度变化率远低于未覆盖煤堆的温度 变化率。

2.3.2 煤堆深度方向的方差对比

为避免实时数据对比的片面性,将覆盖和未覆 盖部分对应点的温度在一段时间内的方差进行对 比,结果如图4所示。基于方差分析的原理是:如果 煤堆内部没有自热产生,则煤堆内部的温度应受环 境温度变化控制,从表面向下,其温度变化的方差应 该逐渐递减;如果煤堆有自热产生,必然会使方差偏 离递减的趋势。

由图 4 可知,覆盖部分的温度在一段时间内的 均方差沿深度方向递减,表明环境温度变化的影响 沿煤堆深度方向衰减。图 4a 中未覆盖部分的均方 差亦沿煤堆深度方向递减,说明该处的自热效应较 弱,不足以引起温度持续增高。图 4b—图 4d 中均 方差沿深度方向出现峰值,表明温度在朝某个确定 方向变化,由于煤堆没有冷源,所以反映出温度逐渐 升高,这种反常的均方差是煤堆中氧化反应的自热 效应造成的;覆盖部分的均方差几乎没有反常,说明 其中的氧化反应已经被抑制,煤堆表面覆盖剂的阻 燃作用非常明显。



图4 煤堆对应点的温度均方差随深度变化

2.3.3 煤堆对应点的温度变化趋势

图 3 中覆盖和未覆盖部分下侧 2 个角点的温度 变化如图 5 所示。

由图 5 可知,煤堆表面 1NW0 和 2NE0 的温度 变化受环境影响明显,内部温度几乎不受环境影响。 由图 5a 可知,内部点温度为 39~49 ℃,由于内部产 生的热量比向上传递出来的热量少,传热导致下部 温度下降,上部温度上升。同时,各点温度曲线有向 中间汇聚的迹象。由图 5b 可知,煤堆内部温度为 53~75 ℃,达到了自燃敏感温度^[10],且没有下降趋 势,表明氧化反应放热量能维持较高的温度,部分点的温度有上升的倾向。

3 阻燃剂覆盖剂覆盖层对现场的耐受性

通过照片记录在风、雨和日照条件下2个煤堆 表面和形状的变化,检验阻燃覆盖剂覆盖层对现场 条件的耐受性。

煤堆在覆盖阻燃覆盖剂后,用消防水龙头向煤 堆喷水,覆盖层完好无损(图6)。在试验期间经过 台风"天兔"袭击,覆盖煤堆阻燃覆盖层保持完好。 经过150 d 试验后,煤堆右侧未覆盖层发生自燃,左侧覆盖层保持完好(图7)。



图5 覆盖和未覆盖部分下侧边缘的温度变化



图7 煤堆现场阻燃效果

4 结 论

1)在煤堆表面喷洒阻燃覆盖剂后,煤堆粗糙的表面变得光滑,多孔结构消失,形成致密的密封 覆盖层,阻止 O₂ 进入煤堆内部,起到防止自燃的 作用。

2)煤堆阻燃覆盖剂孔隙率和渗透率均较低,使 阻燃覆盖剂在煤堆表面形成致密保护层,降低 O₂向 煤堆内部的渗透速率,达到阻燃效果。煤堆阻燃覆 盖剂具有一定的抗压强度和屈服强度,在现场应用 中能有效保护煤堆,防止风损和雨损。

3)现场试验表明,煤堆阻燃覆盖剂覆盖和未覆 盖煤堆的实时温度最大差值超过30℃,方差变化趋 势不同,温度历史值分别为39~49℃和53~75℃。 表明开发的阻燃覆盖剂能够有效抑制煤堆低温氧化 自加热进程,与煤堆实际阻燃效果一致。通过分析 煤堆深度方向温度方差的变化规律发现,方差变化 的异常是煤堆内部存在低温氧化自热效应的标志, 为未来煤堆自燃预警技术开发提供参考。

参考文献:

- [1] 邓 军,徐精彩,陈晓坤.煤炭自燃机理及预测理论研究进展
 [J].辽宁工程技术大学学报,2003,22(4):455-459.
- [2] 文 虎.煤自燃过程的实验及数值模拟研究[D].西安:西安 科技大学,2003.
- [3] 王省身,张国枢. 矿井火灾防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版 社,1990.

] 斯阔成斯基.矿内火灾[M].北京矿业学院编译室,译.北京: 煤炭工业出版社,1958.

- [5] Nordon P. Model for the self-heating reaction of coal and char[1]. Fuel, 1979, 58(6): 456-464.
- [6] Schmal D. A model for the spontaneous heating of stored coal [D]. Delft: University of Delft, 1987.
- [7] Srinivasan Krishnaswamy, Pradeep K Agarwal, Robert D Gunn. Lowtemperature oxidation of coal 3 modeling spontaneous combustion in coal stockpiles [J]. Fuel, 1996, 75(3):353-362.
- [8] Zhang Yulong, Wu Jianming, Chang Liping, et al. Kinetic and thermodynamic studies on the mechanism of low-temperature oxidation of coal; a case study of Shendong coal[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 120(1):41-49.
- [9] 陆 伟,童德明,戴广龙,等.参比氧化法研究煤低温氧化特性[J].辽宁工程技术大学学报,2007,26(1):21-24.
- [10] Basil Beamish B, BarakatModher A, GeorgeJohn D St. Spontaneous-combustion propensity of New Zealand coals under adiabatic conditions[J]. International Journal of Coal Geology, 2001, 45 (2/3):217-224.
- [11] Ren T X, Edwards J S, Clarkeb D. Adiabatic oxidation study on the propensity of pulverised coals to spontaneous combustion[J]. Fuel, 1999, 78(14):1611-1620.
- [12] 褚廷湘,杨胜强,孙 燕,等.煤的低温氧化实验研究及红外 光谱分析[J].中国安全科学学报,2008,18(1):171-176.
- [13] 文 虎.煤自燃全过程实验模拟及高温区域动态变化规律的 研究[J].煤炭学报,2004,29(6):689-693.
- [14] 马 恒,尚大俊,周 腾.煤堆温度远程监控系统的设计与实 现[J].辽宁工程技术大学学报,2009,28(6):888-890.
- [15] 张建华,沈家铨,郑智扬,等. 燃煤电厂储煤场煤堆自燃及防 治措施的试验研究[J].发电与空调,2013,34(5):15-20.