

煤仓自然发火过程高温点运移规律试验研究

金永飞^{1,2,3} 闫旭斌^{1,2} 蒋志刚³ 郭 军^{1,2} 刘文永^{1,2}

(1. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 安全科学与工程学院 陕西 西安 710054;
3. 四川省煤炭产业集团有限责任公司 四川 成都 610091)

摘 要: 为得到煤仓自燃过程中高温点运移规律,预防煤仓自然发火事故的发生,运用漏风场和结构相似的大型煤低温自然发火试验台测试了松散煤体升温过程中高温点移动规律,并提出了“定期清理、降温减氧、监测监控”的综合防治措施。结果表明:高温点首先出现在煤仓高度3/5处,然后逐步在中心轴向着煤仓下部进风侧移动,同时沿着垂直中心轴朝东南向转变,最终停留在距进风侧较近的煤仓下部并向着煤仓边缘空隙率更大的位置发展。在低温阶段(100℃以内)、风量小于0.6 m³/h时,高温点在中心轴方向下降幅度更大;在高温阶段,高温点未随着风量的增大发生移动。

关键词: 煤仓; 煤自然发火; 高温点; 升温过程

中图分类号: TD75

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)10-0034-05

Experiment study on high temperature point migration law in coal bunker during coal spontaneous combustion process

Jin Yongfei^{1,2,3}, Yan Xubin^{1,2}, Jiang Zhigang³, Guo Jun^{1,2}, Liu Wenyong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Western Mine Exploration and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
3. Sichuan Provincial Coal Industry Group Corporation Limited, Chengdu 610091, China)

Abstract: In order to get the migration law of the high temperature point during the coal spontaneous combustion in the coal bunker and to prevent the coal spontaneous combustion accident occurred in the coal bunker, the large coal low temperature spontaneous combustion test rig with similar air leakage field and structure was applied to test the location migration law of the high temperature point during the temperature rising process of the bulk coal. A comprehensive prevention and control measures with "a periodic cleaning, temperature reduction and oxygen reduction, monitoring and control" were provided. The results showed that the high temperature point was at 3/5 of coal bunker height, then high temperature point would steadily move to the air income side at the coal bunker bottom along the central shaft of bunker. Meanwhile, the high temperature point would change to the south east direction along the vertical central shaft, finally it would be stayed at bottom of coal bunker near the air income side and would then develop to the location with higher edge space rate in the coal bunker. At the low temperature (within 100℃) stage, when the air volume was less than 0.6 m³/h, the high temperature point would be highly reduced along the central shaft. At the high temperature stage, the high temperature point would not migrate with the air volume increased.

Key words: coal bunker; coal spontaneous combustion; high temperature point; temperature rising process

0 引 言

煤仓作为煤矿以及电厂的一种储煤装置,可以

临时或长时间储存大量的煤炭,保证煤炭供给的持续性。然而,煤是一种可燃物质,在煤仓中贮存时间长且在适宜的漏风蓄热条件下能够缓慢氧化升温,

收稿日期: 2016-05-11; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.10.007

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404195); 中国博士后基金资助项目(2014M552466, 2016M592820)

作者简介: 金永飞(1975—),男,新疆米泉人,教授,博士。Tel: 13700287277, E-mail: 13700287277@163.com

引用格式: 金永飞, 闫旭斌, 蒋志刚, 等. 煤仓自然发火过程高温点运移规律试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(10): 34-38.

Jin Yongfei, Yan Xubin, Jiang Zhigang et al. Experiment study on high temperature point migration law in coal bunker during coal spontaneous combustion process[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 34-38.

从而发生自燃现象。许多学者从不同方面对煤仓自燃过程的温度、气体监测及防治措施进行了研究。文虎等^[1-4]设计了一种无线监测系统,通过实测煤仓的温度或者异常气体浓度判断煤体自然发火程度及高温灾变区域位置。王建国^[5]基于 PLC 开发了一套地面煤仓的综合监控系统,实现多种监控的智能融合,同时建立了联动机制,实现煤仓的智能化管理。陈添槐^[6]在已建成的直径 120 m 筒仓内布置温度传感器,实测了堆煤引起的筒仓内壁温度的变化规律。杨俊民等^[7-8]对煤仓发生事故的实例进行分析总结,结合实际阐述了煤仓自然发火产生的原因并制定了合理的防治措施。现有研究大多只是针对煤仓自燃过程中温度的监测提出了可行性的技术方案,也有针对实例分析总结煤仓自燃原因,但是并未对煤仓自然发火过程中的温度变化规律,尤其是未对高温点的变化规律进行试验研究,因此,笔者认为利用试验研究煤仓自燃过程高温点的移动规律,对制定和实施有针对性的煤仓火灾防治和预测措施具有重要意义。

笔者分析了煤仓中煤炭自燃的过程,采用 XK 系列煤低温自然发火试验台提供最佳的漏风和蓄热条件,模拟煤仓自然发火过程中高温点的运移规律,为煤仓自燃事故的预防提供依据。

1 煤仓中煤炭的自然发火过程

煤仓是一种半封闭性的圆柱形空间结构装置,最大的煤仓装煤量可达数千吨。煤仓顶部是装煤口,底部具有一个或者多个卸煤口,装卸煤作业完成后两者均处于常闭状态。由于卸煤口往往封闭不严、装卸煤作业等情形下新鲜空气会从底部进入煤仓内部。当煤与空气接触,在常温下就会发生缓慢的氧化作用,而且煤是一种导热性差的介质,煤仓的装煤量又相当大,周围形成良好的保温层,煤的氧化放热量逐渐积聚促进煤体进一步升温,此时煤仓具备了煤炭自燃的 3 个必要条件^[9],只要三者条件共存的时间大于煤的自然发火期,煤仓就会产生自燃现象。

2 试验装置及过程

2.1 试验装置

2.1.1 试验炉体主体结构

煤仓的结构以及漏风场都与煤自然发火试验台具有一定的相似性,因而采用该试验台用来研究煤

仓自燃过程中煤体内部高温点的运移变化规律,具有很好的可行性和科学性,研究结果可为煤仓自燃事故的预防提供理论支持。图 1 与图 2 分别为试验炉体结构和内部温度探头布置。试验装置主要包括炉体、温度控制和监测系统、供风系统等^[10]。其中,主炉体呈圆柱形,内径 120 cm,高度 200 cm,最大装煤量 2 t;炉盖和底部使用保温材料,上下分别预留 10~20 cm 的自由空间,保证进出气的均匀,顶盖上留有小口径排气口;炉体外壁设有保温层和控制水层,通过控制水层跟踪外壁环境温度的改变,使煤体保持良好的蓄热条件。

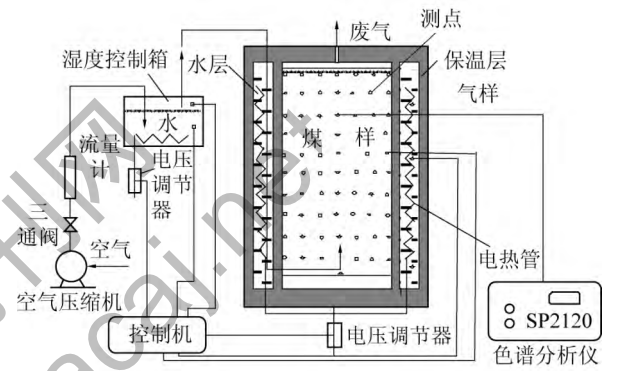


图 1 煤仓试验炉体结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of experimental coal bunker structure

炉体内部从炉底进风侧到上部出气口沿着中心轴布置 10 层测温探头,测温探头中心轴向具体的位置分布见表 1。每层按照四等分插入 K 型热电偶,如图 2 所示,探头有 10 mm 不锈钢保护管;每一层有一个探头和取气管在中心,然后以中心原点沿着径向每间隔 20 cm 布置 1 个温度测点。



图 2 煤仓内部温度探头布置
Fig. 2 Layout diagram of internal temperature probe in coal bunker

表 1 炉体中心轴温度探头的位置
Table1 The position of the temperature probe in the central axis for the bunker body

探头层序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
至进风侧距离/cm	5	25	45	65	85	105	125	145	165	185

2.1.2 温度控制系统

试验炉体中的煤温和炉壁水层温度是使用 PID 调节器(比例积分微分调节器)控制,以提高整个程序温度过程的稳定性,并进行偏差调节从而提高整个程序温度控制的精度、稳定性和可靠性。通过 PID 调节后的信号反馈给可控硅电压调节器,调整炉壁水层加热器的功率,实现水层温度跟踪炉内煤体温度的变化,达到炉体边界近似绝热层的目的。

2.1.3 温度监测系统

炉体内松散煤体温度利用计算机进行数据的自动采集和记录。使用 K 型热电偶与 ADAM4018+模拟量输入模块相接,通过数据转换器发送给工控机,使用自主设计的温度程序软件实现煤温和测点空间位置数据的实时显示和记录。其中 ADAM4018+支持 8 路差分信号且能记录数据,可独立设置各通道输入范围,同时还支持 0~20 mA 和 4~20 mA 的输

表 3 煤样试验条件

Table 3 Coal sample test condition

煤样	平均粒径/mm	试验煤高/cm	煤质量/kg	煤样体积/cm ³	块煤密度/(g·cm ⁻³)	空隙率	供风量/(m ³ ·h ⁻¹)	起始温度/℃
色连二矿	3.06	170	1 341.72	1 921.680	1.40	0.501 3	0.1~2.2	30.5

3 试验结果及分析

煤仓炉体装入破碎煤样,封闭装卸煤口,从炉体底部通入适量空气,使松散煤体与氧气充分接触氧化,待煤温升至 30.5℃ 开始试验,中途没有打开炉体进行装煤、放煤工作,煤体蓄热条件良好,至煤温升至 170℃ 共历时 17 天,因而可以推算此次试验煤仓中松散煤体连续存储最多 17 天就会发生自燃现象。

3.1 煤仓高温点空间位置运移规律

煤仓高 200 cm、内径 120 cm,沿炉体中心轴将空间分为 3 个部分,从炉体顶部出气口到底部进气口依次为:上部空间 200~135 cm,中部空间 135~55 cm,下部空间 55~0 cm;沿垂直中心轴向分为:东西南北 4 个方位,即以炉体中心轴为中心,沿着东西南北各个方位每间隔 20 cm 有 1 个温度测点且各个方位之间互相垂直。

图 3 表示煤仓内部松散煤体高温点位置的移动规律。煤仓松散煤体高温点的移动规律为:①试验起始,高温点首先出现在煤仓中部 125 cm,南向 20 cm 处;②随着温度的升高,在 41.7℃ 时高温点移动至煤仓下部 25 cm,东向 20 cm 处;温度达到 78.3℃

入范围,测量电流无需外接电阻,其采样速率为 10 个采样点/秒,即每秒内对模拟输入信号的采样次数为 10,精确度不大于±0.1%。

2.2 试验条件及过程

为了减少试验条件下由各种粒径差距较大造成的煤样间粒径的相互作用,及对松散煤体蓄热的影响,因此试验采用混合粒度煤样,具体参数见表 2 和表 3。试验开始前,检查供风、温度控制及监控系统的状况,保证整个系统性能稳定的情况下,预先通入适量预热的干空气,提供给煤样最佳的氧化蓄热条件,促使煤氧反应充分,依靠自身反应热升温,最终发生自燃现象。试验从供风开始就监测煤体温度的变化规律,直到 170℃ 结束试验。

表 2 煤样粒径分布

Table 2 Coal particle size distribution

粒度/mm	> 10	7~10	5~7	3~5	0.9~3	< 0.9
频度/%	0.013	0.079	0.121	0.245	0.204	0.338

时,高温点由东向 20 cm 转移至中心处且未在中心轴向发生移动;③高温点在 90.7℃ 时,从煤仓下部 25 cm 移动到 5 cm 处并且之后随着温度升至 170℃,高温点一直维持在距离进风侧 5 cm 的煤仓下部;然而沿垂直中心轴向高温点有向着煤仓边缘发展的趋势,由中心处转至东向 20 cm,又从东向 40 cm 发展至南向 40 cm 处。

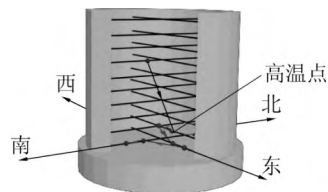


图 3 煤仓松散煤体高温点空间位置移动规律

Fig. 3 The movement law of high temperature point of loose coal in bunker

煤样高温点沿中心轴移动,其原因主要是由于试验初期,煤氧主要以物理化学吸附为主,放热量小,煤仓下部靠近进风侧漏风量大,热量容易散失,而煤仓中部的蓄热条件相对下部而言较好,因而高温点会出现在煤仓中部位置;随着煤温的升高,煤氧以化学反应为主,耗氧速率增幅较大,放

热量也增大,高温点会向煤仓下部进风侧的高氧浓度区域转移;然而高温点在垂直中心轴向煤仓边缘发展,可能是因为煤仓中松散煤体的粒度分布不均匀(粒度分布不均可能是由于煤体水分蒸发粘结、煤仓装卸煤作业导致),导致煤仓边缘局部区域的空隙率增大,此区域空隙率大的位置供氧更加充分,煤体的氧化升温速率加快,会形成新的高温点。文献[11-13]研究表明,混合煤样氧化升温过程的空隙率决定了松散煤体的漏风强度和蓄热能力的大小。

3.2 煤仓高温点位置与供风量的关系

松散煤体在试验条件下,由于煤仓的漏风强度较小,且主要沿中心轴向流动,可忽略气体的扩散作用,仅研究高温点中心轴向的位置与供风量、温度的关系,如图4所示。

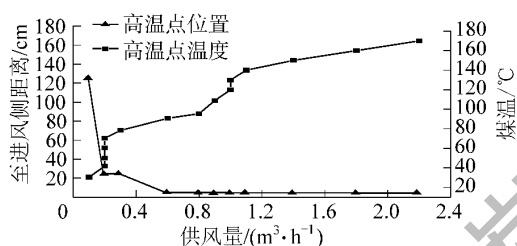


图4 高温点中心轴向位置、温度与供风量的关系

Fig. 4 Relationship between high temperature point in the center axis, temperature and air supply

由图4可知,随着供风量的增大,高温点的位置由煤仓中部向下部进风侧方向移动,即高温点从低氧浓度向高氧浓度区域转移;风量小于 $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,高温点的位置下降幅度较大,这说明低温阶段(温度小于 100°C),风量对高温点位置的影响更加显著,这可能是低温阶段煤氧复合作用产热量小,风量的增大使热量散失加快,破坏了高温点位置的蓄热环境,高温点向煤仓下部其他蓄热条件更好的位置发生转移;风量超过 $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,高温点一直保持在 5 cm 处不变,说明高温阶段风量持续增大会加速煤体氧化升温速度,对高温点的位置移动几乎无影响,可能是由于高温时期煤体氧化放热量远大于风流散失的热量,风量对煤体蓄热条件影响减弱,从而高温点会维持在进风侧的位置。

4 煤仓自然发火防治技术

煤仓是一种长久性的储煤装置,其自然发火具有隐蔽性强、高温点不确定性以及火灾监控比较困

难等特点。因而,防治技术的选取应坚持在维护煤仓正常使用功能的前提下,尽量选择高效环保经济的措施。

1) 定期清理浮煤。煤仓下部卸煤口附近区域经常出现卡塞、结拱等现象,容易形成一定厚度的浮煤。漏风和蓄热适宜的条件下,该区域会发生自燃火灾。在煤体的自然发火期内,及时清理卸煤口区域的浮煤,破坏浮煤的蓄热环境,延缓了煤体氧化的速度,可以有效预防自燃事故。

2) 注 CO_2 降温减氧。液态二氧化碳^[14]是一种密度比空气大,汽化吸热量大的窒息性气体,注入灾区后能够迅速沉降起到降温和降低氧浓度的作用,适宜瞬间发火灾的应急处理。高温区域主要出现在煤仓下部进风侧,通过在该区域预设措施钻孔,一旦煤仓有异常情况,可以利用预设钻孔注入液态 CO_2 , CO_2 汽化沉降过程能够吸热和降低煤体氧浓度,抑制煤体的氧化放热,可以高效地处理自燃火灾事故,尽快恢复正常生产。

3) 加强监测监控。建立煤仓三维立体的温度监控和气体采集智能分析处理系统,对煤仓高温异常区域可以进行实时温度巡检和煤自燃特征气体分析,及时判断不同区域的煤体自燃程度,精确定位自燃区域,采取有效的措施抑制煤炭自燃事故的发生。

5 结 论

1) 煤仓与自然发火试验台在物理结构和漏风场方面具有一定的相似性,从而采用该试验台测试松散煤体高温点的三维运移规律是可行的、合理的,试验结果对指导煤仓火灾防治具有一定的科学性。

2) 松散煤体高温点首先出现在煤仓中部位置(煤仓高度的 $6/10$ 处),然后高温点向距离进风侧较近的煤仓下部移动,最终停留在进风口位置;同时高温点在煤仓东向和南向之间转换,最终向着煤仓边缘处发展,说明煤仓自燃过程中高温点朝着煤仓下部卸煤口进风侧新鲜风流区域移动,也有向煤仓边缘空隙率更大的位置发展的趋势。

3) 煤仓高温点主要集中在进风侧附近的下部空间,该区域火源位置隐蔽、防治较困难,因此,提出了“定期清理、降温减氧、监测监控”的煤仓火灾综合防治措施,从多方面抑制煤炭氧化自燃。

参考文献(References):

- [1] 文虎,李珍宝,马砾,等.电厂煤仓自燃火灾异类信息无线

- 监测装置研究[J].煤炭技术, 2014, 33(12): 121-123.
- Wen Hu, Li Zhenbao, Ma Li *et al.* Study on heterogeneous information wireless monitoring device of spontaneous fire in power plant bunker[J]. Coal Technology, 2014, 33(12): 121-123.
- [2] 王建军, 张晋亮. 煤仓自燃特征信息无线监测及预控技术[J]. 煤矿现代化, 2016(1): 33-36.
- Wang Jianjun, Zhang Jinliang. The coal spontaneous combustion characteristic information of wireless monitoring and control technology[J]. Coal Mine Modernization, 2016(1): 33-36.
- [3] 田金云, 朱清慧. 储煤仓温度无线监控系统设计[J]. 煤炭技术, 2015, 34(11): 274-276.
- Tian Jinyun, Zhu Qinghui. Design of wireless monitoring system for coal bunker temperature[J]. Coal Technology, 2015, 34(11): 274-276.
- [4] 吴永祥. CAN 总线在火电厂煤仓安全检测系统中的应用[J]. 工矿自动化, 2006(5): 78-80.
- Wu Yongxiang. The application of CAN bus in safety monitoring system for coal bunker of thermal power station[J]. Industry and Mine Automation, 2006(5): 78-80.
- [5] 王建国, 冯艳芳. 基于 PLC 地面煤仓综合监控系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(S0): 156-158.
- Wang Jianguo, Feng Yanfang. Study on comprehensive monitoring system of ground coal silo based on PLC[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(S0): 156-158.
- [6] 陈添槐, 彭奇, 汤正俊. 大直径圆形煤仓内壁堆煤温度及侧压力现场实测与分析[J]. 武汉大学学报, 2012, 45(3): 366-369.
- Chen Tianhui, Peng Qi, Tang Zhengjun. Field measurement and analysis of coal temperature and lateral pressure for large diameter circular coal silo[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(3): 366-369.
- [7] 杨俊民, 孙冰. 煤仓自然发火因素分析及防止技术[J]. 煤矿安全, 2014, 45(3): 63-68.
- Yang Junmin, Sun Bing. Spontaneous combustion factor analysis and control techniques for coal bin[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(3): 63-68.
- [8] 线葵娟, 李应超, 丁坡岭. 炼焦煤仓自燃事故的原因和对策[J]. 冶金能源, 2011, 30(5): 63-64.
- Xian Kuijuan, Li Yingchao, Ding Poling. Cause of the accident of coking coal bin spontaneous combustion and counter measures[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2011, 30(5): 63-64.
- [9] 邢玉忠, 张俭让. 矿井灾害防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2014.
- [10] 徐精彩. 煤自燃危险区域判定理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [11] 张春, 题正义, 李宗翔. 粒径对松散煤体自燃影响的试验分析[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(5): 406-411.
- Zhang Chun, Ti Zhengyi, Li Zongxiang. Experimental study on particle size influencing loose coal spontaneous combustion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(5): 406-411.
- [12] 文虎, 徐精彩, 李莉. 等. 煤自燃的热量积聚过程及影响因素分析[J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 370-374.
- Wen Hu, Xu Jingcai, Li Li *et al.* Analysis of coal self-ignite heat accumulating process and its effect factor[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 370-374.
- [13] 马砺, 任立峰, 韩力. 等. 粒度对采空区煤自燃极限参数的影响试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 59-64.
- Ma Li, Ren Lifeng, Han Li *et al.* Experiment study on partial size affected to coal spontaneous combustion limit parameters in goaf[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 59-64.
- [14] 金永飞, 赵先科, 郭军. 等. 液态 CO₂ 灭火技术在花山矿大采区封闭火灾治理中的应用[J]. 煤矿安全, 2016, 47(2): 155-157.
- Jin Yongfei, Zhao Xianke, Guo Jun *et al.* Application of liquid CO₂ extinguishing technology in large closed mining area of Huashan mine[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(2): 155-157.