

基于大型煤堆实验台的煤自燃过程模拟研究

张 育 恒

(山西长平煤业有限责任公司, 山西 晋城 048006)

摘 要: 为研究王台铺矿 15 号煤层的自然发火规律, 利用大型煤堆实验台对其进行了试验模拟研究, 通过热电偶测得煤体的温度变化情况, 得到煤体内的升温速率、耗氧速度、临界温度及干裂温度等煤样自燃特性参数, 结合气相色谱仪对煤自燃过程中产生的指标气体进行分析。结果表明: 煤温在临界温度 80 °C 以下时, 煤的自身氧化反应过程中产生的热量小, 煤样耗氧速度较低, 煤体很难发生自燃; 在 80 ~ 110 °C 时, 耗氧速度逐渐增加, 反应逐渐加强; 当煤温超过干裂温度 110 °C 后, 氧化反应急剧加快, 放热量也随着增大, 同时 CO 和 CO₂ 产生率加快, 煤体易发生自燃。

关键词: 煤自燃; 升温速率; 耗氧速度; 临界温度; 干裂温度

中图分类号: TD752 文献标志码: A 文章编号: 0253 - 2336 (2011) 12 - 0056 - 04

Study on Simulation of Coal Spontaneous Combustion Process Based on Large Coal Pile Experiment Rig

ZHANG Yu-heng

(Shanxi Changle Coal Mining Corporation Ltd., Jincheng 048006, China)

Abstract: In order to study the spontaneous combustion law of No. 15 seam in Wangtaipu Mine, a large coal storage pile experiment rig was applied to the experiment simulation study. With the temperature variation conditions of coal measured with the thermal electric couples, the coal sample spontaneous combustion feature parameters were obtained including the temperature rising rate in the coal, the oxygen consumption speed, the critical temperature and dry fracturing temperature. In combination with the gas phase chromatographer, the index gas occurred from the coal spontaneous combustion process was analyzed. The results showed that when the coal temperature was below 80 °C of the critical temperature, the thermal value occurred from the oxidized reaction process of coal would low, the oxygen consumption speed of coal sample would low and the spontaneous combustion of the coal would be difficult to be occurred. When the critical temperature was 80 ~ 110 °C, the oxygen consumption speed would be steadily increased and the reaction would be steadily enhanced. When the coal temperature was over 110 °C of the dry fracturing temperature, the oxidized reaction would rapidly increased and the thermal emission value would be increased. Meanwhile, the CO and CO₂ production rate would be increased and the spontaneous combustion of the coal would be easily occurred.

Key words: coal spontaneous combustion; temperature rising rate; oxygen consumption rate; critical temperature; dry fracturing temperature

煤自燃现象在煤炭的生产、运输、储存过程中普遍存在。我国国有重点煤矿中有一半以上的矿井煤自燃现象很严重, 这已经成为煤矿安全生产中的重大灾害^[1-2]。煤自燃问题受到国内外很多学者的广泛关注和研究, 目前已经有多种方法判断煤的自

燃倾向性, 如色谱吸氧法^[3]、煤样温度与程序升温间的交叉点法^[4]、煤样内部不同位置点间温度的交叉点法^[5-6]、活化能法^[7-9]等, 但这些方法都存在一定局限性。近年来研究者探讨较多的为绝热氧化升温法^[10-13], 其使用的煤量较少, 多数在

收稿日期: 2011 - 07 - 21; 责任编辑: 代艳玲

作者简介: 张育恒 (1973—), 男, 山西晋城人, 工程师, 现任山西长平煤业有限责任公司总工程师, 从事煤矿安全管理和研究工作。Tel: 0356 - 3623207, E-mail: zhangyuheng8888@126.com

网络出版时间: 2011 - 12 - 19 17: 15; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20111219.1715.022.html>

引用格式: 张育恒. 基于大型煤堆实验台的煤自燃过程模拟研究 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (12): 56 - 59, 64.

1 000 g 以下, 但因试验过程为绝热氧化, 导致研究结果无法得到煤体内部的传热、向外的散热规律。为更好地模拟煤自燃的实际过程, 利用大型煤堆实验台, 用 4 800 kg 的煤量进行试验, 观测王台铺矿 15 号煤层氧化升温过程, 以得到煤层体内的升温速率、耗氧速度、临界温度及干裂温度等煤样自燃特性参数, 并结合气相色谱仪对煤自燃过程中产生的指标气体进行分析。

1 试 验

1.1 试验装置及原理

实验台主要由炉体、气路、控制检测及保温水层部分组成, 其中气路部分可以随时检测煤自燃指标气体的产生量, 控制检测系统能随时对环境温度、气体浓度和煤体温度的全自动检测控制, 大型煤堆实验台如图 1 所示。该大型煤堆实验台的炉体自身蓄热环境良好, 试验的温度可以使煤到达着火点, 与实际情况更加接近。

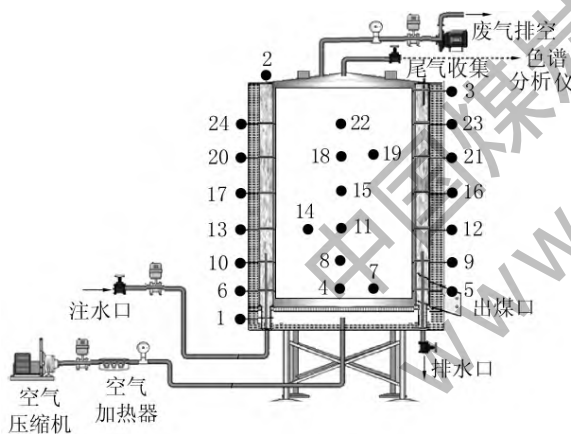


图 1 大型煤堆实验台

炉体总高度 3.15 m, 炉体外直径 2.13 m, 总装煤量约 4 800 kg, 装煤的内直径 (炉体内直径) 为 1.71 m, 其中圆柱体底部进气空间 230 mm (指

炉体外壳底部与装煤圆柱体底部间的距离), 支撑脚架高度 650 mm, 最大装煤高度 2.27 m。炉体的顶底部分别留有 100 ~ 200 mm 空间, 顶盖上方放置一个排气口从而可以保证进气和出气的均匀性。在炉体的内壁设置绝热层, 外壁设置的利用电加热线管进行控制加热可控温夹水层。炉体内部不同位置测点布置若干个热电偶。其中, 在炉体底部设置监测热风温度的 1 号热电偶, 在炉体顶部设置监测保温水层温度的 2 号热电偶和监测废气温度的 3 号热电偶; 距炉底高度 0.31 m 处, 布置 4、5、6、7 号热电偶; 距炉底高度 0.62 m 处, 布置 8、9、10 号热电偶; 距炉底高度 0.94 m 处, 布置 11、12、13、14 号热电偶; 距炉底高度 1.26 m 处, 布置 15、16、17 号热电偶; 距炉底高度 1.57 m 处, 布置 18、19、20、21 号热电偶; 距炉底高度 1.88 m 处, 布置 22、23、24 号热电偶。向内部提供的新鲜气体由空气压缩机供给, 利用流量控制阀、浮子流量计等控制空气的流量, 并且使空气在受控加热器中预热后, 从炉体底部进入试验煤层然后从顶盖出口排出, 最后采用气相色谱分析在取样点抽取气样的样品。

该试验平台以井下温度 (15 ~ 30 °C) 作为试验起始温度, 以煤的氧化放热为出发点, 模拟煤在现场的浮煤厚度、散热情况及漏风情况。同时, 研究煤的低温氧化放热特性及连续检测试验炉体内各点煤样的气体、温度变化情况, 从而预测煤的自燃倾向性及自然发火期。

1.2 煤样参数

试验采用煤样取自王台铺矿 15 号煤层, 试验煤高 1.94 m, 煤样质量 4 800 kg, 块煤密度 1 370 kg/m³, 空隙率 0.29, 供风量 0.3 ~ 0.9 m³/h, 起始温度 34 °C, 平均粒径 3.2 mm。煤样的工业与元素分析见表 1。

表 1 煤样的工业与元素分析

工业分析				元素分析				
M_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	A_{ad}	$w(C)_{ad}$	$w(H)_{ad}$	$w(O)_{ad}$	$w(N)_{ad}$	$w(S)_{ad}$
10.7	24.94	51.04	13.32	56.54	3.92	11.62	1.09	0.31

2 试验结果与分析

在井下, 由于煤与空气中的氧接触时发生化学

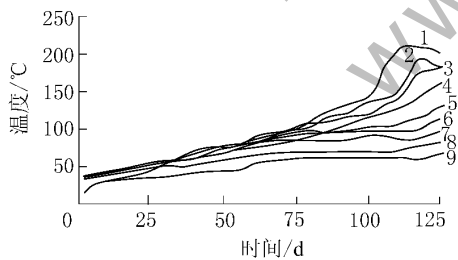
吸附和化学反应放出热量, 并且煤在氧化过程中放出的热量大于散发的热量而导致温度上升, 从而使煤自然发火, 本文所提及的煤在低温下自然发火试

验就是针对该过程的模拟。即在试验条件下,依靠煤的自身氧化放热升温,考察其煤温、CO产生量、O₂消耗量以及其他气体的变化规律。

2.1 煤自燃升温过程分析

考虑到井下煤自燃的实际情况,模拟试验过程中煤样与外界存在散热。煤温低于80℃时,气温比煤温低5~13℃,夹层水温同时保持比煤温低1~6℃;当最高煤温超过90℃时,气温比最高煤温低13~30℃,夹层水温比最高煤温低3~17℃。

试验装置内的煤温度分布情况根据中心轴线分布的热电偶由下到上测得,同时通过热电偶测得温度分布情况可以分析出空气对煤氧化过程的影响。如图2所示,煤在放热升温过程中可以分为3个阶段。第1阶段是从环境温度到80℃,这是由于试验过程中夹层水温随着煤温的改变而改变。因此,煤在氧化反应时对外散热量少,热量容易积累,所以升温速率相对较快。第2阶段从80~102℃,煤的升温速度变得非常缓慢,即使在试验过程中采取一些保温措施,但是由于对外界有大量的散热,同时由于煤发生吸热分解反应时产生的总热量减少,从而使得自身在升温过程中的速度减缓。第3阶段,当煤体温度超过110℃后,煤的整体温度速率急速加快,此时散热进一步加大,但煤自身氧化反应放出的热量远超过散热量,因此煤的温度可以极速升高。



1—距炉底高度94 cm,距炉体内壁50 cm; 2—距炉底高度31 cm,距炉体内壁82 cm; 3—距炉底高度94 cm,距炉体内壁82 cm; 4—距炉底高度62 cm,距炉体内壁82 cm; 5—距炉底高度157 cm,距炉体内壁82 cm; 6—水温; 7—距炉底高度126 cm,距炉体内壁82 cm; 8—距炉底高度188 cm,距炉体内壁82 cm; 9—进气温度

图2 15号煤层温度分布曲线

2.2 升温速率及耗氧速度分析

升温速率是反映煤低温氧化能力强弱的一个重要指标^[14]。煤温在低于110℃时,煤的自燃升温过程不仅同自身氧化性相关,还取决于向外的散热

情况;当煤温超过110℃时,煤的自然发火很难逆转。试验中煤样最高温度的升温速率曲线如图3所示。从图3可看出,煤的升温速率同样可分为3个阶段,第1阶段是从试验开始到第57天,对应的温是环境温度到80℃左右,煤的升温速率大。第2阶段是从第58天到第100天,对应的温度是80℃左右到100℃,煤的升温速率很小,主要是由于煤在氧化过程存在吸热反应以及对外的散热量增大。第3阶段是第102天以后,煤温超过100℃后温度急速升高,尽管此时散热量会进一步加大,但其自身氧化的放热速率远超过对外界的散热速率。

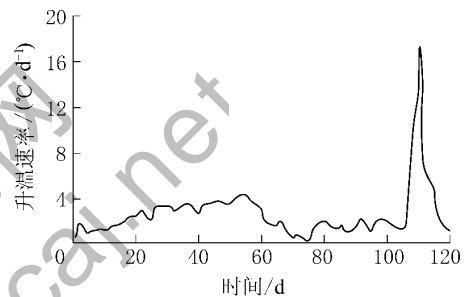


图3 15号煤层自燃升温速率曲线

试验炉体中煤样内各点氧气浓度变化主要与对流(即空气流动、紊流的扩散、分子和煤与氧的作用)等因素有关^[15]。试验中整个炉体全部密封,炉壁缝隙不漏风,空气从下部管道流入炉体内,炉体内的所有气体将全部从上部的排气管排出。根据供气流量,结合气相色谱仪所测得的尾气中氧气浓度,即可得到煤在氧化升温过程中的耗氧速率。15号煤层耗氧速度如图4所示。

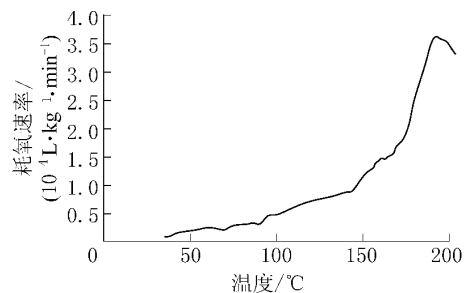


图4 15号煤层自燃过程的耗氧速率

由图4可以看出煤的耗氧速度较低,当煤温低于80℃时,煤的反应速率较弱。在80~110℃时,耗氧速度逐渐增加,即反应在逐渐加强;耗氧速度急速上升,煤温大于110℃后,意味着煤的反应速率急剧加快,即煤温也会随之快速升高。

2.3 临界温度和干裂温度分析

由图 2 和图 3 所示, 在试验初期煤样以一定的氧化速率进行升温反应, 当供风时间到第 57 天后, 煤样氧化升温的转折点是在煤温达到约 80 °C, 因此该温度点 80 °C 即为煤的临界温度。煤氧化时间在第 57 ~ 102 天时, 煤的升温速率变得小, 煤温达到约 110 °C。在此阶段, 由于煤的氧化反应吸热导致升温速率变小, 煤体内部发生热分解, 并且释放出很多挥发分, 因此可以确定该温度点 110 °C 为干裂温度。

由试验得出的数据分析最高煤温控制点的温度变化可知, 煤体中上部向下部移动即向进风侧移动是由煤体在实验台内高温点动态变化的总趋势得出的。在煤氧化初期, 煤温最高同时升温速度较快的是距供风表面一定距离的炉体中上部 (0.31 m 处)。随着煤温的最高温度点向进风侧移动, 氧化时间加长, 最终最高点温度移至供风侧煤体表面, 即形成明火燃烧。

在实际情况下, 煤自燃过程也是如此。采空区和巷道松散煤体内高温点形成的初期, 位于距离供风表面一定深度的中部。由于该处漏风强度适中并且氧气浓度适宜, 最容易满足煤自燃发生的条件从而形成自热的高温点。随着煤自燃的发展变化, 煤的高温点不间断地向进风侧发展。因此研究发现, 在煤的深部中央处形成采空区浮煤的氧化初期最高温度点, 当煤体发生自燃后, 最高温度点多发生在进风侧。

2.4 煤层自燃标志气体分析

由于气体顺着风流方向流动而煤层自燃火源点逆着风流方向发展, 所以实际条件下煤体发生自燃时, CO 等指标气体浓度最高的点不一定就在高温点。因此, 有必要进一步分析煤自燃过程中标志气体的变化规律。

在实验台中, 由于煤体容易消耗氧, 因此煤体中的氧气浓度沿着风流方向不断减少, 而 CO 和 CO₂ 浓度不断增加, 炉体内任一点处煤体氧化的 CO 和 CO₂ 产生率与耗氧速度成正比关系, 即^[16]

$$V_{\text{CO}}(T) = \frac{C}{C_0} V_{\text{CO}}^0(T) \quad (1)$$

式中: $V_{\text{CO}}(T)$ 为 CO 产生速率; $V_{\text{CO}}^0(T)$ 为标准氧浓度时的 CO 产生速率; C_0 为空气中的标准氧浓度, 取 20.93%; C 为对应温度 T 时空气中的氧

浓度。

由式 (1) 可以推出炉体内任意点的氧浓度为

$$C = C_1 e^{\frac{V_{\text{CO}}^0(T) S}{QC_0}} (Z - Z_1) \quad (2)$$

式中: C 、 Z 分别为任一点的氧浓度和该点到入口的距离; C_1 、 Z_1 分别为某一已知点的氧浓度和该点到入口的距离; Q 为供风量; S 为炉体内漏风通道的面积。

由化学动力学和化学平衡理论有:

$$V_{\text{CO}}(T) = KC \quad (3)$$

式中, K 为化学反应常数。

将式 (1)、式 (2) 代入式 (3), 即可得出 CO 的产出率, CO₂ 产出率用同样的方法计算。

应用大型煤堆实验台对 15 号煤层煤样进行氧化升温试验的同时, 结合气相色谱仪对出气管内的 CO 和 CO₂ 浓度进行测量, 所得到的 CO 和 CO₂ 浓度变化情况如图 5 所示。由此可以得出煤温在 80 °C 以下时, 煤体中的 CO 产生率与 CO₂ 产生率增加相对缓慢; 煤温超过 80 °C 后, CO 产生率与 CO₂ 产生率明显增加; 煤温超过 110 °C 后, CO 产生率与 CO₂ 产生率则急剧增加。

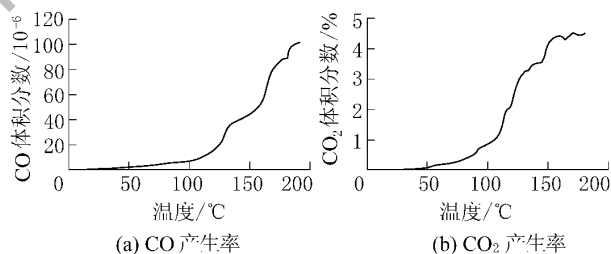


图 5 CO 产生率和 CO₂ 产生率随煤温的变化曲线

3 结 论

1) 煤温在室温到 110 °C 时, 煤自身氧化反应过程中产生的热量小, 主要取决于向外的散热情况, 当散热量很大时, 煤体很难发生自燃。煤温超过 110 °C 后, 氧化反应急剧加快, 同时放热量也随着增大, 煤体容易发生自燃。

2) 试验分析得到煤温在临界温度 80 °C 以下时, 煤样耗氧速度较低, 即此时反应较弱; 在 80 ~ 110 °C 时, 耗氧速度逐渐增加, 即反应在逐渐加强; 煤温超过干裂温度 110 °C 后, 耗氧速度急速上升, 反应急剧加快, 煤温上升幅度加大。

(下转第 64 页)

4 结 语

1) 根据单一、松软、低渗高突煤层的具体特点,研究了本煤层水力致裂机理,研制出煤矿井下水力压裂增透抽采关键技术,进一步提高了治理瓦斯和开采煤层气的水平。

2) 高压封孔技术是煤矿井下水力增透抽采技术的重要难题之一,压裂封孔质量的好坏,直接关系到压裂的成功与否;表面活性剂的使用也是水力压裂技术关键,通过研制 YL1200 活性剂,大幅提高了瓦斯抽采效果。

3) 经河南省高突矿井工业性应用试验表明:对单一、低渗、松软煤层进行压裂,通过实施水力压裂措施后,煤层透气性大幅度增加,抽采率也得到不同程度的提高,煤体应力得到了释放,降低了煤与瓦斯突出危险性,同时也改善了作业环境,提高了生产效率。

参考文献:

- [1] 杨万有. 薄差层压裂力学机理及工艺研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2006.
- [2] 国景星. 油气田开发地质学 [M]. 北京: 中国石油大学出

(上接第59页)

3) 煤体导热性很差,随煤温的升高,煤体氧化放热速率、CO 和 CO₂产生率加快。

参考文献:

- [1] 范维澄,余明高. 能源化工行业安全生产形势分析和关键技术 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002.
- [2] 贾海林,余明高,李定启. 煤矿内因火灾防治方法及其有效性分析 [J]. 河南理工大学学报, 2005, 24 (1): 9-12.
- [3] Davis J D, Byrne J F. An adiabatic Method for Studying Spontaneous Heating of coal [J]. Journal of Am Ceram Soc, 1924 (7): 809-816.
- [4] Basil Beamish B, Barakat Modher A, George John D St. Adiabatic Testing Procedures for Determining the Self-heating Propensity of Coal and Sample Ageing Effects [J]. Thermochimica Acta, 2000, 362: 79-87.
- [5] Jones J C. Low-temperature Oxidation of Coal Studied Using Wire-mesh Reactors with Both Steady-state and Transient Methods [J]. Fuel, 2000, 98: 646-650.
- [6] 仲晓星,王德明,陆伟,等. 交叉点温度法对煤氧化动力学参数的研究 [J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2007, 22 (1): 13-16.
- [7] 戴广龙,王德明,周福宝,等. 煤的绝热低温自热氧化试

验研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2005, 24 (4): 485-488.

- [3] 张士诚,牟善波,张劲,等. 煤岩对压裂裂缝长期导流能力影响的实验研究 [J]. 地质学报, 2008, 82 (10): 1444-1449.
- [4] 安志雄. 采用水力压裂强化煤层瓦斯抽放的远景 [J]. 煤矿安全, 1989, 20 (9): 51-53.
- [5] 孙炳兴,王兆丰,伍厚荣. 水力压裂增透技术在瓦斯抽采中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (11): 78-80.
- [6] 张国华. 本煤层水力压裂致裂机理及裂隙发展过程研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2004.
- [7] 杜成良,姬长生,罗天雨,等. 水力压裂多裂缝产生机理及影响因素 [J]. 特种油气藏, 2006, 13 (5): 19-21.
- [8] 代志旭. 高压水力压裂技术在瓦斯综合治理中的研究与应用 [J]. 煤炭工程, 2010 (12): 82-84.
- [9] 孙利军,李明,许灿荣. 深孔水力压裂技术在突出煤层中的应用 [J]. 中州煤炭, 2010 (10): 109-113.
- [10] 吕有厂. 水力压裂技术在高瓦斯低透气性矿井中的应用 [J]. 重庆大学学报, 2010, 33 (7): 102-107.
- [11] 杨新安,章梦涛. 岩石水力压裂机理的研究 [J]. 山西矿业学院学报, 1991, 9 (1): 26-31.
- [12] 张国华,葛新. 水力压裂钻孔始裂特点分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2005, 24 (6): 789-792.
- [13] 连志龙,张劲,王秀喜,等. 水力压裂扩展特性的数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (1): 169-174.
- [8] 陆伟,胡千庭,仲晓星,等. 燃自燃逐步自活化反应理论 [J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36 (1): 111-115.
- [9] 刘建忠,冯展管,张保生,等. 煤燃烧反应活化能的两种研究方法的比较 [J]. 动力工程, 2006, 26 (1): 21-24.
- [10] Beamish B B, Barakat M A, George J D St. Adiabatic Testing Procedures for Determining the Self-heating Propensity of Coal and Sample Ageing Effects [J]. Thermochimica Acta, 2000, 362 (1): 79-87.
- [11] 余明高,鲁来祥,潘荣锐,等. 高瓦斯矿井高冒区遗煤自燃综合防治技术 [J]. 河南理工大学学报, 2009, 28 (2): 137-141.
- [12] 李文勤,任万兴. 煤自燃的绝热氧化试验研究 [J]. 现代矿业, 2009, 10 (2): 110-111.
- [13] SHI Ting, WANG Xiao-fang, DENG Jun et al. The Mechanism at the Initial Stage of the Room-temperature Oxidation of Coal [J]. Combustion and Flame, 2005, 140 (4): 332-345.
- [14] 路长,郑艳敏,余明高,等. 吨量煤体的自燃过程试验模拟研究 [J]. 火灾科学, 2009, 18 (4): 218-223.
- [15] 郑兰芳,邓军. 不同温度阶段煤自燃的试验研究 [J]. 武警学院学报, 2010, 26 (4): 16-18.
- [16] 崔凯,张东海,杨胜强. 采空区遗煤自然带确定及风流场数值模拟 [J]. 山东科技大学学报, 2002, 21 (4): 88-92.