

基于温升速率的煤自然倾向性测定方法

张 磊 秦 岭 包 军 陈 剑 李小江
(华电电力科学研究院,杭州 310030)

摘要 为了准确判定煤炭真实条件下自然倾向性,选取具有代表性的2种褐煤、2种烟煤及2种无烟煤在煤自然测定装置上展开研究。研究结果表明,褐煤在低温缓慢氧化阶段、高温加速氧化阶段升温速率最快,烟煤次之,无烟煤最慢。利用热分析仪对煤样的着火温度进行了测定,发现褐煤着火温度最低,烟煤次之,无烟煤着火温度最高;综合评判煤自然倾向性判定指数, $I < 200$ 为强自燃倾向, $200 \leq I \leq 400$ 为中等自燃倾向, $I > 400$ 为弱自燃倾向。

关键词 自然倾向性 温升特性 着火温度 判定指数
中图法分类号 TD75; **文献标志码** B

煤炭自燃是影响煤矿安全生产、煤炭存储最重要的灾害之一,寻求一种能准确、快速判定煤自然倾向性的方法显得尤为重要。煤的自然倾向性鉴定方法很多,中国主要采用色谱吸氧鉴定法判断煤自然倾向性,然而该方法只体现出煤的物理吸附性能,并不能真实地体现煤氧混合的根本性质^[1]。陈鹏等^[2]评述了国内外煤自然倾向性测试方法的研究现状和目前存在的主要问题。靳玉萍^[3]等利用偏微分方程数值解法,对煤自燃进行了数值模拟分析,模拟结果与试验结果相符合,其他相关研究主要采用活化能^[4]、红外分析法^[5]等手段研究煤自身属性对自燃的影响,但是实验条件较煤炭真实的条件差别较大。

如何真实、准确的评判煤炭开采、存储过程中煤的自然倾向性是目前亟需解决的问题。本文克服现有技术中存在的上述不足,提供一种较为真实的模拟煤场储煤状况、测试结果准确可靠的自然倾向性的测定方法。为判定实际条件下的煤炭自燃及其动态发展变化的过程提供理论依据,指导煤炭开采及存储,防止煤炭自燃的发生。

2017年3月27日收到

国际科技合作专项
(2013DFG61490)资助

第一作者简介:张 磊(1985—),工程师。研究方向:煤炭高效清洁利用及燃料应用技术相关研究工作。E-mail:lei-zhang@chder.com。
引用格式:张 磊,秦 岭,包 军,等. 基于温升速率的煤自然倾向性测定方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(30): 186—189
Zhang Lei, Qin Ling, Bao Jun, et al. Determination method of coal spontaneous combustion tendency based on Increasing rate [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(30): 186—189

1 试验煤样及装置

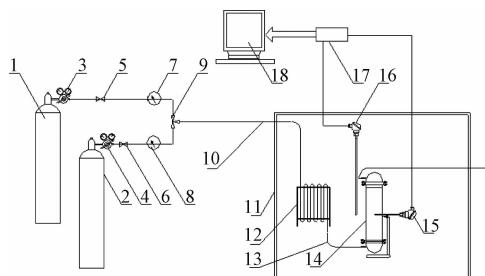
1.1 试验煤样

选取具有代表性的褐煤、烟煤、无烟煤各两种,分别表示为HM₁、HM₂、YM₁、YM₂、WYM₁、WYM₂,按照GB 475商品煤样人工采取方法^[6]的规定在煤场采取煤样。按照GB 474煤样的制备方法^[7]制备煤样,将原煤样制备成标称最大粒度为6 mm的煤样,经二分器缩分出两份2.5 kg左右的煤样,一份煤样按照正常程序制成一般分析试验煤样进行化验分析,另一份煤样以备试验,其余煤样密封后放置合适位置存放。试验煤样煤质分析如表1所示。褐煤与烟煤、无烟煤相比,水分、挥发分较高,固定碳、发热量较低,开展不同煤种的自然倾向性试验研究,以期得到全面、准确的煤炭自然倾向性测定方法。

1.2 实验装置

本实验装置能较为真实地模拟煤炭真实状态,测试系统主要由气瓶、气体预热铜管、煤样反应器、铂电阻温度计、恒温箱、数据采集器、计算机等部分组成,具体如图1所示。

将制备好的煤样装入煤样反应器中,连接好气路,检查气路气密性,首先通入氮气,将煤样中空气排空,然后设定恒温箱以2 °C/min升温速率升温,待煤样反应器中煤样温度升至70 °C时,且煤样中心温度与对应恒温箱中心温度温差小于0.1 °C时,打开空气阀,通入空气,流量为50 mL/min,同时打开数据采集装置采集数据,气体经预热铜管预热,确保送入煤样反应器中的气体温度与控温箱环境温度接近,煤样由自身氧化导致温度升高,设定恒温箱升温



1 为氮气瓶;2 为空气瓶;3、4 为减压阀;5、6 为气体开关阀;
7、8 为质量流量计;9 为三通阀;10、13 为硅胶管;11 为恒温箱;
12 为气体预热铜管;14 为煤样反应器;15、16 为铂电阻温度计;
17 为数据采集器;18 为计算机

图 1 煤炭自燃倾向性实验装置

Fig. 1 The experimental device of coal spontaneous combustion tendency

程序,跟踪煤样温度,但不高于煤样温度,确保煤样是由自身氧化导致的升温,数据采集装置按 6 次/min 的频率采集煤样中心点温度及对应恒温箱温度,连续采集 30 min。

设定恒温箱以 2 °C/min 升温速率升温,待煤样反应器中煤样温度升至 120 °C 时,且煤样中心温度与对应恒温箱中心温度温差小于 0.1 °C 时,打开空气阀,通入空气,流量为 50 mL/min,连续采集 30 min,试验结束,保存数据并处理。

2 试验结果与分析

2.1 低温缓慢氧化阶段温升曲线

采用煤样 70 °C 的温升速率 V_{70} 表征煤样低温缓慢氧化阶段的自燃特性,6 种煤样低温缓慢氧化阶段温升曲线如图 2 所示,从图 2 中可以看出,两种褐煤升温速率最快,两种烟煤次之,两种无烟煤升温速率最慢。

造成上述结果的主要原因是两种褐煤挥发分和水分含量最高,炭化程度低,结构疏松,而无烟煤挥发分和水分含量最低,炭化程度最高,结构紧密。煤样水分含量与耗氧速率有关,含水量越大,耗氧速率也越大,放出的大量热量加速了煤氧复合氧化反应速率^[8],使得褐煤绝热氧化温升速率最大;含水量

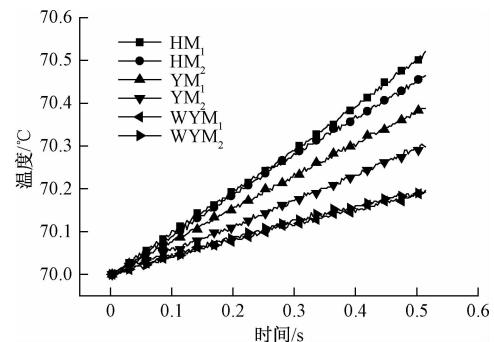


图 2 煤样 70 °C 温升曲线

Fig. 2 Coal temperature rise curve of 70 °C

越少,耗氧速率也越小,使得无烟煤绝热氧化温升速率最小。另外挥发分与煤的氧化自燃有很大关系,挥发分越低,煤的耗氧速率、放热强度越小,越不易自燃^[9]。

2.2 高温加速氧化阶段温升曲线

采用煤样 120 °C 的温升速率 V_{120} 表征煤样高温加速氧化阶段的自燃特性,6 种煤样高温加速氧化阶段温升曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,6 种煤样 120 °C 温度随时间线性升温,两种褐煤升温速率最快,两种烟煤次之,两种无烟煤升温速率最慢。与煤样 70 °C 温升速率相比,6 种煤样的温升速率明显升高,主要原因是随着温度升高,煤样中的水分蒸发析出,使得煤样内部形成空气通道,加速了煤样复合作用。

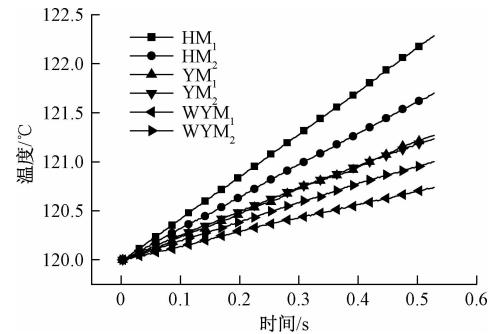


图 3 煤样 120 °C 温升曲线

Fig. 3 Coal temperature rise curve of 120 °C

表 1 实验煤样煤质数据

Table 1 Coal quality analysis data of the experimental

煤样	工业分析/%					元素分析/%				$Q_{\text{gr.ad}}/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	O_{ad}	
HM ₁	17.02	22.41	30.92	29.65	40.62	3.02	0.91	2.20	13.82	16.05
HM ₂	22.11	23.83	25.07	28.99	38.56	2.55	0.77	0.68	11.50	15.30
YM ₁	18.95	6.33	24.18	50.54	59.41	2.71	0.46	0.34	11.80	22.26
YM ₂	12.19	11.91	25.93	49.97	60.64	3.14	0.75	0.82	10.55	23.22
WYM ₁	1.18	24.35	8.60	65.87	65.18	2.65	0.88	4.70	1.06	25.44
WYM ₂	1.05	27.66	8.58	62.71	62.79	2.62	0.93	2.46	2.36	24.28

HM_1 和 HM_2 对比发现, HM_1 的挥发分和热值均高于 HM_2 , 导致 HM_1 的高温加速氧化阶段温升速率较 HM_2 快, 相同煤种不同煤样间也存在差异, 有必要开展不同煤种不同煤样的研究。

2.3 着火温度的测定

着火温度是燃料着火性能的主要指标, 着火温度越低, 表明着火性能越好。煤样的着火温度代表了煤样着火难易程度, 着火温度越高, 越难着火, 达到着火需要的能量越高。本实验采用 TG-DTG^[10]方法确定着火温度 T_i 。本试验采用 PYRIS 型 TGA 热分析仪对煤样的着火温度进行测定。仪器升温最高至 1 550 °C, 升降温速率最高 50 °C/min。TG 解析度为 0.2 μg。实验从 30 °C 以 20 °C/min 升温速率升至 900 °C, 其后降至室温。样品质量约为 5 mg, 反应气氛为空气, 流量 20 mL/min, 实验煤样经过干燥、破碎、筛分等步骤制成实验样品。

6 种煤样低温缓慢氧化阶段温升速率 V_{70} 、高温加速氧化阶段温升速率 V_{120} 及着火温度 T_i 如表 2 所示。从表 2 可以看出, 褐煤 V_{70} 和 V_{120} 在 3 种煤中最大, 烟煤次之, 无烟煤最小, 而着火温度是褐煤最低, 无烟煤最高, 表明褐煤相对于烟煤、无烟煤有较强的自燃倾向, 无烟煤有较弱的自燃倾向。

表 2 煤样温升特性参数

Table 2 Temperature increasing characteristic parameter of coal samples

序号	煤种	$V_{70}/$ (°C · h ⁻¹)	$V_{120}/$ (°C · h ⁻¹)	$T_i/$ °C
1	HM_1	0.997	4.353	383
2	HM_2	0.917	3.245	353
3	YM_1	0.760	2.432	437
4	YM_2	0.591	2.354	477
5	WYM_1	0.369	1.411	547
6	WYM_2	0.384	1.724	535

综合煤样低温缓慢氧化阶段、高温加速氧化阶段及着火温度, 采用煤自燃倾向判定指数评判煤炭自燃倾向性(表 3)。煤炭自燃倾向判定指数如式(1)所得:

$$I = \frac{T_i}{\varphi_1 V_{70} + \varphi_2 V_{120}} \quad (1)$$

式(1)中, I 为煤自燃倾向性判定指数, h ; V_{70} 为煤样 70 °C 升温速率, °C/h; V_{120} 为煤样 120 °C 升温速率, °C/h; φ_1 为低温阶段温升速率系数, $\varphi_1 = 0.5$; φ_2 为高温阶段温升速率系数, $\varphi_2 = 0.5$; T_i 为煤样着火温度, °C。

煤炭自燃倾向分类指标如表 3 所示, $I > 400$ 为弱自燃倾向, $200 \leq I \leq 400$ 为中等自燃倾向, $I < 200$ 为强自燃倾向。

表 3 煤炭自燃倾向性分类指标

Table 3 The Classification indexes of coal spontaneous combustion tendency

自燃倾向性分类	I/h
弱自燃倾向	$I > 400$
中等自燃倾向	$200 \leq I \leq 400$
强自燃倾向	$I < 200$

3 结论

煤炭开采、存储损耗及自燃等问题受到了越来越多的关注, 通过升温速率判定煤炭自燃倾向特性的研究, 将煤自燃倾向性分为强自燃倾向、中等自燃倾向和弱自燃倾向 3 类, 准确测定煤样低温缓慢氧化阶段升温速率、高温加速氧化阶段升温速率及着火温度, 计算判定指数, 快速测定煤炭自燃倾向性, 指导煤炭开采、存储, 降低煤炭在开采、存储过程中的氧化及自燃损耗。

参 考 文 献

- 胡争国, 仲晓星, 王德明, 等. 煤自燃倾向性鉴定方法不合理性分析. 煤炭科学技术, 2008; 36(8):49—52
Hu Zhengguo, Zhong Xiaoxing, Wang Deming, et al. Analysis on the irrationality of evaluation method for coal spontaneous combustion tendentiousness. Coal Science and Technology, 2008; 36(8):49—52
- 陈鹏, 张弛, 张浪, 等. 煤自燃倾向性测试方法研究进展与展望. 煤矿安全, 2016; 47(3):164—168
Chen Peng, Zhang Chi, Zhang Lang, et al. Progress and prospects of test methods of coal spontaneous combustion tendentiousness. Safety in Coal Mines, 2016; 47(3):164—168
- 靳玉萍, 张兵. 基于非稳态对流扩散方程高阶紧致差分的煤自燃数值模拟. 科学技术与工程, 2014; 14(14):27—32
Jin Yuping, Zhang Bing. Study on numerical simulation of spontaneous combustion coal around a high-order compact difference scheme for unsteady convection diffusion equation. Science Technology and Engineering, 2014; 14(14):27—32
- 程根银, 周逸飞, 程宥, 等. 蒙西侏罗纪煤差示扫描量热试验及动力学研究. 中国煤炭, 2016; 42(11):91—95
Cheng Genyin, Zhou Yifei, Cheng You, et al. Differential scanning calorimetry experiment and kinetics research for Jurassic coal in western Inner Mongolia. China Coal, 2016; 42(11):91—95
- 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. 中国安全科学学报, 2008; 18(1):171—176
Chu Tingxiang, Yang Shengqiang, Sun Yan, et al. Experimental study on low temperature oxidization of coal and its infrared spectrum analysis. China Safety Science Journal, 2008; 18(1):171—176
- 商品煤样人工采取方法: GB 475—2008. 北京: 中国标准出版社, 2009

- Method for manual sampling of commercial coal:GB 475—2008. Beijing:Standards Press of China, 2009
- 7 煤样的制备方法:GB 474—2008. 北京:中国标准出版社, 2009
- Method for preparation of coal sample:GB 474—2008. Beijing:Standards Press of China, 2009
- 8 张 磊, 陆 超, 汪后港, 等. 水分对煤炭低温氧化温升特性影响的研究. 煤炭技术, 2016; 35(12):198—199
- Zhang Lei, Lu Chao, Wang Hougang, et al. Research on influence of moisture on low-temperature oxidation heating rate characteristics of coal. Coal Technology, 2016; 35(12):198—199
- 9 刘 伟, 秦跃平, 杨小彬, 等. 挥发分对煤自燃特性影响的实验研究. 煤炭学报, 2014; 39(5):891—896
- Liu Wei, Qin Yueping, Yang Xiaobin, et al. Experimental study for impact of volatile matter on spontaneous combustion characteristics of coal. Journal of China Coal Society, 2014; 39(5):891—896
- 10 邹学权, 王新红, 吴建军, 等. 用热重-差热-红外光谱技术研究煤粉的燃烧特性. 煤炭转化, 2003; 26(1):71—73
- Zou Xuequan, Wang Xinhong, Wu Jianjun, et al. Study on combustion characteristic of coal by means of technology of TG-DSC-FT-IR. Coal Converstion, 2003; 26(1):71—73

Determination Method of Coal Spontaneous Combustion Tendency Based on Increasing Rate

ZHANG Lei, QIN Ling, BAO Jun, CHEN Jian, LI Xiao-jiang

(Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou 310030, P. R. China)

[Abstract] In order to judge the coal spontaneous combustion tendency under the real condition accurately, two kinds of lignite, two kinds of bituminous coal and two kinds of anthracite have been selected to research coal spontaneous combustion characteristics by using the measurement device of coal spontaneous combustion. The field experimental results showed that the lignite has the largest temperature oxidation heating rate in the low temperature slow oxidation phase and high temperature accelerated oxidation phase, while anthracite has the minimal. The ignition temperature of coal samples were determined using thermogravimetric analysis. The results indicated that lignite has the minimum ignition temperature, while anthracite has the highest ignition temperature. Comprehensive evaluation index of coal spontaneous combustion propensity is determined $I < 200$ for strong spontaneous combustion tendency; $200 \leq I \leq 400$ for secondary spontaneous combustion tendency, and $I > 400$ for weak spontaneous combustion tendency.

[Key words] spontaneous combustion tendency temperature increasing characteristic ignition temperature classification index