

文章编号:0253-9993(2012)08-1320-06

含瓦斯风流条件下煤自燃产物 CO 生成规律的实验研究

宋万新^{1,2}, 杨胜强^{1,2}, 蒋春林^{1,2}, 牛 杰^{1,2}

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:针对高瓦斯采空区漏风流内含有瓦斯的实际情况, 自制了含瓦斯风流条件下煤的低温氧化实验系统, 按拟定的配气方案开展了低温氧化实验, 分析了 CO 的生成规律。结果表明: 随氧气体积分数的降低或甲烷体积分数的升高, CO 生成的初始温度滞后, 相同温度时 CO 的生成量减小。因此, 用新鲜空气来预测高瓦斯采空区的煤自燃状态, 易造成错判、误判。根据气固多相反应动力学原理, 分析了化学反应速率变化的原因, 从而合理解释了实验结果。

关键词:含瓦斯风流; 氧气体积分数; 甲烷体积分数; 物理吸附; 化学吸附

中图分类号:TD712.67 **文献标志码:**A

Experimental research on the formation of CO during coal spontaneous combustion under the condition of methane-contained airflow

SONG Wan-xin^{1,2}, YANG Sheng-qiang^{1,2}, JIANG Chun-lin^{1,2}, NIU Jie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Due to the methane-contained air leakage flow existing in a high gassy goaf, an experimental system on coal sample's oxidation in low temperature under the condition of methane-contained airflow was designed. Model experiments simulating spontaneous combustion were carried out according to the gas distributing scheme. The formation of the oxidation products CO was studied. The result shows that the temperature for initial production is suppressed and the amount of products produced decreases with the decrease of oxygen volume fraction or increase of methane volume fraction. When fresh air is used to predict the state of coal spontaneous combustion in high gassy goaf, a delayed prediction is caused. Finally, based on the principle of gas-solid chemical reaction kinetics, the variation of reaction rate was analyzed, and the experimental results were reasonably explained.

Key words: methane-contained airflow; volume fractions of oxygen; volume fractions of methane; physisorption; chemisorption

煤自燃是由于煤表面各种活性结构与氧发生物理吸附、化学吸附和化学反应, 当放出的热量大于散发的热量时, 煤温上升而导致的^[1]。许多学者在煤自燃特性和氧化产物生成规律方面开展了深入研究。文献[2]采用特大型煤自然发火实验台对煤自燃过程进行模拟试验, 得出了自燃指标气体与特征温度的对应关系。文献[3-5]通过煤低温氧化实验研究了新鲜空气条件下自燃标志气体变化规律, 用于预测

预报煤炭自然发火。文献[6]采用程序升温实验系统在不同氧浓度条件下测试了煤的自燃特性。

上述研究都是在无瓦斯风流条件下考察煤自燃氧化产物的生成规律, 而对于含瓦斯风流条件下氧化产物的生成规律还鲜有系统的研究。而对于高瓦斯易自燃煤层采空区来说, 其漏风流中不仅含有氧气和氮气, 还包含一定浓度的甲烷, 在这种含瓦斯漏风流的条件下, 采空区遗煤将会发生低温氧化从而出现自

收稿日期: 2012-03-20 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50834005); 国家自然科学基金资助项目(51174198); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主课题资助项目(SKLCRSM11X01)

作者简介: 宋万新(1968—), 男, 山东济宁人, 博士研究生。E-mail: songwx2004@yahoo.com.cn

燃,甚至可能引起瓦斯燃烧、瓦斯爆炸,后果不堪设想。因此,研究含瓦斯风流条件下煤自燃氧化产物的生成规律,以便对高瓦斯采空区中煤自燃进行准确的早期预测预报,对于保障高瓦斯采煤工作面的安全生产具有重要的意义。

1 实验装置

试验采用笔者自行研制的含瓦斯风流条件下煤低温氧化实验装置,如图 1 所示。实验装置主要由程序控温箱、加压系统、供气系统、安全检测和气样采集分析等部分组成。

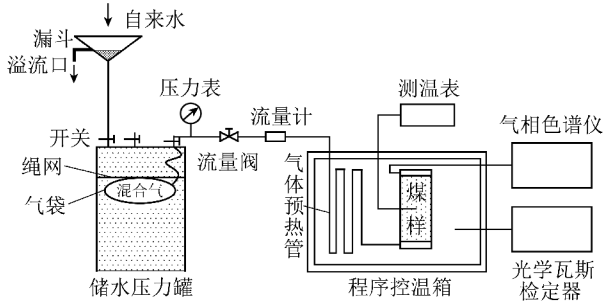


图 1 含瓦斯风流条件下煤低温氧化实验装置

Fig. 1 Experimental system on coal sample's oxidation in low temperature under the condition of methane-contained air flow

程序控温箱包括煤样罐,程序控温系统和保温层,其中圆柱形煤样罐内置铂丝温度探头于罐体的几何中心处。

加压系统。主要由带溢流口的漏斗、水管、耐压储水罐、绳网和气袋(气袋充满按要求配制好的一定体积分数的甲烷、氮气、氧气混合气)组成。由于漏斗的液面始终保持恒定,所以耐压储水罐中的气袋所承受的压力是恒定的,混合气所受到的压力也是恒定的,因此,在流量阀的调节下,气袋输出的混合气的流量是恒定不变的。由于盛有混合气的气袋完全浸没在耐压储水罐的水中,能有效地防止易燃易爆混合气的燃烧和爆炸,消除了本实验的安全隐患。

供气系统。在流量阀调整完毕后,气袋中的混合气在恒定水压的作用下,便会以恒定的流量通过压力表、流量阀、流量计、程序升温箱中的气体预热管,进入煤样罐。

安全检测部分。尽管每次实验开始前都进行煤样罐的气密性检验,但为了避免含瓦斯风流在程序升温箱内的意外泄漏而酿成瓦斯爆炸事故,笔者从程序升温箱中接出一金属铜管,通过光学瓦斯检定器随时检测其中的瓦斯体积分数,若有泄漏应及时关闭程序升温箱的电源,中断实验进行处理。

气样采集分析。混合气经过煤样罐中煤样的过

程中,和煤样发生了氧化反应,其气体成分发生了很大变化,采集其气样,通过色谱仪分析其气体成分。

2 实验过程

煤样的采集及制备是根据氧化试验的需要和采样标准,在新暴露煤壁采集新鲜煤样,并现场密封,然后运至实验室。本实验煤样采自山西天池煤矿,将整块煤破碎并筛分出粒径为 40 ~ 80 目的颗粒^[7],用电子天平称取 50 g 若干份,封口待用。

2.1 混合气体的配制

采煤工作面采空区的煤自燃一般发生在氧化自燃带,而氧化自燃带的氧气体积分数为 5% ~ 15%^[7],根据观测,在高瓦斯采煤工作面采空区的氧化自燃带,瓦斯的体积分数往往在 5% 以上。在符合现场实际的情况下,为了考察含瓦斯风流条件下煤的低温氧化规律,配制了不同甲烷体积分数的混合气体,与氧气体积分数为 21% 的新鲜空气进行煤低温氧化对比实验。笔者设计的配气方案见表 1。

表 1 配气方案

Table 1 Gas distributing scheme

气体	体积分数							
	1	2	3	4	5	6	7	8
O ₂	21	14	14	14	14	8	8	8
CH ₄	0	0	8	17	25	0	17	25

在配制混合气体时,使用体积分数皆为 99.999% 的氮气、甲烷和氧气按比例配制。储水压力罐内盛装混合气的气袋容积为 42 L,根据拟定的配气方案,分别算出 O₂, N₂, CH₄ 在混合气袋中所占的体积,利用排水法测出 3 种气体的体积,然后分别把它们输入盛装混合气的气袋,气袋中预先装入适量小直径的钢珠,通过晃动,使气袋中的 3 种气体均匀混合;采用气相色谱仪标定储气袋内 3 种气体的体积分数,对各气体进行多次微调后,达到要求的体积分数时,将混合气袋放入储水压力罐中,连接至煤样罐,作为供气源为煤样自燃提供不同混合比的含瓦斯风流。

2.2 含瓦斯风流条件下煤自燃程序升温实验

将装有 50 g 煤样的煤样罐置于程序控温箱内,连接供气管路、出气管路和热电偶(探头置于煤样罐的中心),并检查整个管路气密性。然后通过加压系统对混合气体进行加压,使气袋中混合气体的压力恒定后,方可向煤样中通入混合气体。混合气体流量为 50 mL/min,并控制氧化升温的速率为 1 °C/min。程序设定的恒温温度从 15 °C (天池煤矿工作面的温度

为 15 ℃)开始升温,最终温度设定在 225 ℃。记录热电偶温度数据,采集煤自燃氧化产物气样,利用 GC-4000A 气相色谱仪进行气体含量分析。

3 实验结果分析

3.1 氧化产物的生成规律

选择煤低温氧化产物 CO 作为研究对象,根据实验结果得出 CO 生成的初始温度的变化规律(表 2)及 CO 的生成量随温度的变化曲线(图 2),对比含瓦斯风流在不同氧气体积分数和甲烷体积分数条件下其生成的初始温度和生成量,并分析不同氧气体积分数和甲烷体积分数对其生成规律的影响。

表 2 含瓦斯风流条件下 CO 生成的初始温度

Table 2 Initial production temperature of CO under the condition of methane-contained air flow

混合气体中 O ₂ 体积分数/%	混合气体中 CH ₄ 体积分数/%	CO 生成的初 始温度/℃
21	0	20
14	0	30
14	8.70	30
14	17.04	40
14	25.00	40
8	0	50
8	17.00	50
8	24.90	60

3.1.1 氧化产物生成的初始温度

由表 2 可以看出,煤自燃氧化产物 CO 生成的初始温度受氧气体积分数和甲烷体积分数的影响较大,不同氧气体积分数时 CO 生成的初始温度不同,同样的氧气体积分数条件下甲烷体积分数不同时 CO 生成的初始温度也不相同,且受氧气体积分数和甲烷体积分数的影响总体呈现“滞后效应”,即:氧气体积分数越低,甲烷体积分数越高,CO 生成的初始温度越高,生成的时间越晚;氧气体积分数越高,甲烷体积分数越低,CO 生成的初始温度越低,生成的时间越早。由此可知,低氧气体积分数和高甲烷体积分数抑制了煤自燃的进程和 CO 的生成。

由表 2 可知,在氧气体积分数为 21% (甲烷体积分率为 0) 时,CO 生成的初始温度为 20 ℃,而在氧气体积分数为 8% (甲烷体积分率为 0) 时,CO 生成的初始温度为 50 ℃,可见,随着氧气体积分数的降低,CO 生成的初始温度升高,“滞后效应”较为明显;在氧气体积分数为 14%、甲烷体积分率为 0 时,CO 生成的初始温度为 30 ℃,在氧气体积分数为 14%,甲

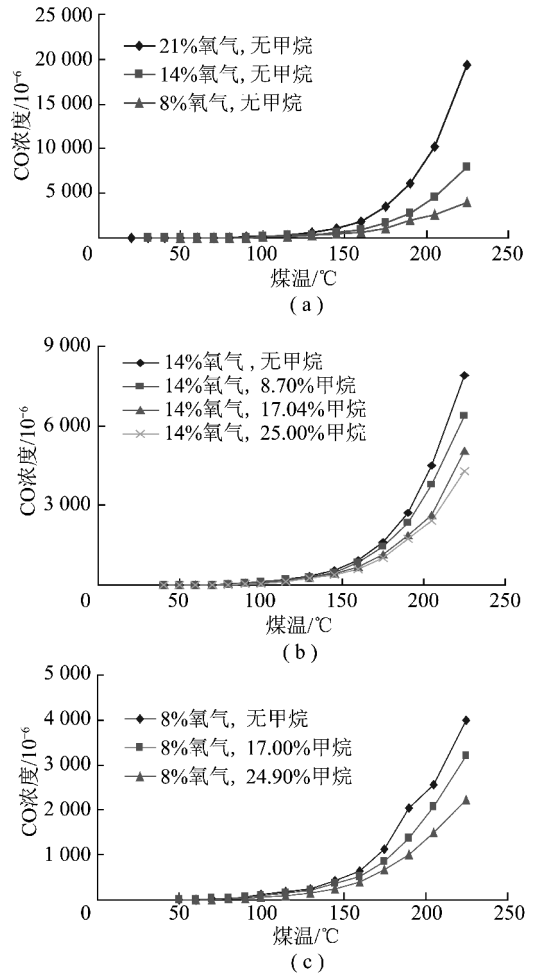


图 2 氧气和甲烷体积分数变化的条件下 CO 的生成量

Fig. 2 Production amount of CO at different volume fractions of oxygen and methane

烷体积分率为 17.04% 时,CO 生成的初始温度为 40 ℃,可见,随着甲烷体积分数的升高,CO 生成的初始温度升高,也明显地存在着“滞后效应”。

3.1.2 氧化产物的生成量

由图 2 可知,不同的氧气体积分数条件下氧化产物 CO 的生成量不同,而在相同的氧气体积分数条件下,随着甲烷体积分数的变化,CO 的生成量也有很大不同。在含瓦斯风流条件下,低氧气体积分数和高甲烷体积分率对 CO 的生成量的影响也呈现明显的“滞后效应”,具体表现为:相同温度时,随氧气体积分数的降低,CO 的生成量减小,随甲烷体积分数的升高(氧气体积分数相同),CO 生成量减小。

如图 2(a) 所示,随着氧气体积分数的降低(甲烷体积分率为 0),相同温度时 CO 生成量减小,其生成量的大小按氧气体积分数的顺序为 21%、14%、8%,因此,氧气体积分数越低,对 CO 生成量的抑制作用越明显。

如图 2(b) 所示,当氧气体积分数为 14% 时,随着甲烷体积分数的升高,相同温度时 CO 生成量减小,其生成量的大小按甲烷体积分数的顺序为 0, 8.70%, 17.04%, 25.00%。

如图 2(c) 所示,当氧气体积分数为 8% 时,随着甲烷体积分数的升高,相同温度时 CO 生成量减小,其生成量的大小按甲烷体积分数的顺序为 0, 17.00%, 24.90%, 因此,在氧气体积分数不变的条件下,甲烷体积分数越高,对 CO 生成量的抑制作用越明显。

在现场工作中,往往通过 CO 的生成量来判断采空区高温点的温度,从而预测煤自燃的危险性,根据图 2 的 CO 的生成量随温度的变化曲线可知,由于“滞后效应”的存在,相同的 CO 生成量所对应的煤温是不同的,随氧气体积分数的降低,所对应的煤温升高,随甲烷体积分数的升高(氧气体积分数相同),所对应的煤温升高。可见,在新鲜空气条件下,相同的 CO 生成量所对应的煤温是最低的,煤自燃的危险性是最小的,而在含瓦斯风流条件下,随氧气体积分数的降低和甲烷体积分数的升高,相同的 CO 生成量所对应的煤温逐渐升高,煤自燃的危险性逐渐增大。

如果把含瓦斯风流(低氧气体积分数和高甲烷体积分数)当作新鲜空气考虑,按照新鲜空气条件下煤自燃指标气体生成规律与温度的关系来预测自燃进程,就会造成延迟预报甚至误判,贻误自燃防治的最佳时机。

$$\theta(\text{O}_2) = \frac{b(\text{O}_2)p(\text{O}_2)}{1 + b(\text{O}_2)p(\text{O}_2) + b(\text{N}_2)p(\text{N}_2) + b(\text{CH}_4)p(\text{CH}_4)} = \frac{b(\text{O}_2)p(\text{O}_2)}{1 + p_z(b(\text{O}_2)C(\text{O}_2) + b(\text{N}_2)C(\text{N}_2) + b(\text{CH}_4)C(\text{CH}_4))} \quad (1)$$

式中, $b(\text{O}_2)$, $b(\text{N}_2)$, $b(\text{CH}_4)$ 分别为 O_2 , N_2 和 CH_4 在煤表面的吸附系数; p_z 为三元混合气体的总压力; $p(\text{O}_2)$, $p(\text{N}_2)$, $p(\text{CH}_4)$ 分别为 O_2 , N_2 , CH_4 在混合气体中的分压; $C(\text{O}_2)$, $C(\text{N}_2)$, $C(\text{CH}_4)$ 分别为 O_2 , N_2 和 CH_4 在混合气体中所占的体积分数,为了研究的方便,笔者假设 O_2 , N_2 , CH_4 皆为理想气体,那么, $C(\text{O}_2)$, $C(\text{N}_2)$, $C(\text{CH}_4)$ 也可理解为 O_2 , N_2 和 CH_4 在混合气体中所占的摩尔分数。

由于笔者配制的气体 $C(\text{O}_2) + C(\text{N}_2) + C(\text{CH}_4) = 100\%$, 当 $C(\text{O}_2)$ 不变, 而 $C(\text{CH}_4)$ 变大时, $C(\text{N}_2)$ 会等值地变小。又因为 $b(\text{CH}_4) > b(\text{N}_2)$, 则 $(b(\text{N}_2) \times C(\text{N}_2) + b(\text{CH}_4)C(\text{CH}_4))$ 的值变大, 从而, 氧在煤表面的覆盖度 $\theta(\text{O}_2)$ 变小。也就是说, 在含瓦斯风流中, 若氧气体积分数不变, 随着甲烷体积分数的逐渐增大, 氧在煤表面的物理吸附的覆盖度 $\theta(\text{O}_2)$ 逐渐减

3.2 CO 生成规律的理论分析

由于本实验的原始煤体中不存在 CO, 实验中测到的 CO 完全是煤与氧发生氧化反应的产物, 那么在低温氧化过程中, 氧化反应速率越快, CO 生成量越大, 反之则 CO 生成量越小^[8]。也就是说, CO 的生成量取决于氧化反应速率。现在探讨一下含瓦斯风流条件下煤的氧化反应速率的变化规律。

3.2.1 含瓦斯风流条件下煤的低温氧化过程的速率控制步骤

煤低温氧化的微观过程依次为煤对氧的物理吸附、化学吸附和化学反应, 一个氧气分子也将按照这个顺序与煤结构发生作用^[9]。但氧和煤化学反应的速率比物理吸附、化学吸附慢, 则这一步骤决定了整个过程的进行速率, 成为整个氧化反应的速率控制步骤, 而物理吸附、化学吸附均处于平衡状态。

3.2.2 含瓦斯风流条件下煤对氧的物理吸附

煤接触气体, 开始时主要是物理吸附, 发生物理吸附的吸附力主要是范德华力, 它对气体的吸附没有选择性, 可吸附任何气体。当煤样中通入含瓦斯风流(其主要成分为 O_2 , N_2 和 CH_4) 时, 煤样便对 O_2 , N_2 和 CH_4 三元混合气体同时进行物理吸附。但煤样对此 3 种气体的吸附能力是不同的, 在等温等压条件下, 煤吸附 CH_4 的能力强于 N_2 , 吸附 N_2 的能力强于吸附 O_2 ^[10]。各组分在共同吸附时会相互竞争和干扰^[11]。根据 Langmuir 吸附公式^[12], 煤对氧的物理吸附覆盖度 $\theta(\text{O}_2)$ 为

小。同样, 根据式(1), 当无甲烷情况下, 随着氧气体积分数的降低, 氧在煤表面的物理吸附的覆盖度 $\theta(\text{O}_2)$ 逐渐减小。

3.2.3 化学吸附氧的直接来源

在低温氧化阶段, 煤对氧分子发生的物理吸附和化学吸附同时并存, 只是随着温度的变化, 起主导作用的吸附类型发生变化^[13]。物理吸附的吸附和解吸速率都很快, 很短时间即可达到吸附平衡, 且不需要吸附活化能, 而化学吸附过程中有电子共享或电子转移, 有化学键的变化电子云重新分布, 相当于煤与氧之间发生了化学反应, 所以化学吸附具有很强的选择性, 而且需要一定的活化能。也就是说, 煤样在满足活化能的条件下只对含瓦斯风流中的氧进行化学吸附。

和物理吸附相比, 化学吸附发生在更靠近煤表面

处,而且二者发展顺序应该是先有物理吸附,才有化学吸附。因为化学吸附需要的活化能相当于氧气分子的解离能,如不先进行物理吸附,这么高的解离能较难满足。但是,当氧气分子发生物理吸附后,可使氧气分子沿最低能量途径靠近煤表面,化学吸附在很低的活化能作用下即可进行^[14]。

由此看来,化学吸附氧并不是直接由气相氧转化而来,而要经过物理吸附氧这一过程,即化学吸附氧直接来源于物理吸附氧,由物理吸附氧转化而来。

3.2.4 煤的化学吸附和煤氧化学反应

化学吸附相当于化学反应,具有化学反应的特征。根据表面质量作用定律,化学反应速率与反应物在表面上的浓度(或覆盖度)成正比^[15]。那么,煤对氧化学吸附速率 r_a 与煤对氧物理吸附的覆盖度 $\theta(O_2)$ 成正比,即 $r_a \propto \theta(O_2)$ 。又因为煤对氧的化学吸附速率 r_a 与化学吸附的空位率 $(1 - \theta'(O_2))$ 成正比,所以

$$r_a = k_1 \theta(O_2) (1 - \theta'(O_2))$$

煤表面的化学解吸速率

$$r_d = k_{-1} \theta'(O_2)$$

式中, k_1 为化学吸附的比例常数; $\theta'(O_2)$ 为氧在煤表面的化学吸附覆盖度; k_{-1} 为解吸的比例常数。

当化学吸附达到平衡时

$$\begin{aligned} k_1 \theta(O_2) (1 - \theta'(O_2)) &= k_{-1} \theta'(O_2) \\ \theta'(O_2) &= \frac{k_1 \theta(O_2)}{k_1 \theta(O_2) + k_{-1}} = \frac{K \theta(O_2)}{1 + K \theta(O_2)} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{K \theta(O_2)} + 1} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, K 为常数, $K = \frac{k_1}{k_{-1}}$ 。

煤氧化学反应速率为

$$V(T) = k' \theta'(O_2) = k' \frac{1}{\frac{1}{K \theta(O_2)} + 1} \quad (3)$$

式中, $V(T)$ 为化学反应速率; k' 为化学反应速率常数。

通过上面分析可知,在氧气体积分数不变的情况下,随着甲烷体积分数的升高, $\theta(O_2)$ 逐渐降低,根据式(3),则化学反应速率 $V(T)$ 逐渐降低。那么,当氧气体积分数为 14% 时,其化学反应速率 $V(T)$ 的大小按甲烷体积分数的顺序为 0, 8.70%, 17.04%, 25.00%; 当氧气体积分数为 8% 时,其化学反应速率 $V(T)$ 的大小按甲烷体积分数的顺序为 0, 17.00%, 24.90%; 当然,同样根据式(3),当无甲烷情况下,其化学反应速率 $V(T)$ 的大小按氧气体积分数的顺序

为 21%, 14%, 8%。

4 结 论

(1) 针对高瓦斯采空区自燃带氧气体积分数低于 21% 并且含有一定浓度甲烷的实际情况,设计了含瓦斯风流条件下煤低温氧化实验系统。

(2) 煤的氧化产物 CO 随氧气体积分数的降低和甲烷体积分数的升高,总体呈现“滞后效应”,表现为: CO 生成的初始温度滞后; 相同温度时 CO 的生成量减小。如按照新鲜空气条件下煤自燃指标气体生成规律与温度的关系来预测自燃进程,则会造成预报延迟、甚至误报的结果。因此,研究煤的自燃特性时,采用实际氧气体积分数和甲烷体积分数得出的结果会更符合现场情况。

(3) 根据煤对氧的吸附理论和气固多相反应动力学原理,探讨分析了 CO 呈现“滞后效应”的原因,从而合理解释了实验结果。

参考文献:

- [1] 徐精彩,张辛亥,文 虎,等. 煤氧复合过程及放热强度测算方法[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(3):253-257.
Xu Jingcai, Zhang Xinhai, Wen Hu, et al. Procedure of reaction between coal and oxygen at low temperature and calculation of its heat emitting intensity[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(3): 253-257.
- [2] 肖 阳,王振平,马 砺,等. 煤自燃指标气体与特征温度的对应关系研究[J]. 煤炭科学技术,2008,36(6):47-51.
Xiao Yang, Wang Zhenping, Ma Li, et al. Research on correspondence relationship between coal spontaneous combustion index gas and feature temperature[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(6): 47-51.
- [3] 谢振华,金龙哲,宋存义. 程序升温条件下煤炭自燃特性[J]. 北京科技大学学报,2003,25(1):12-14.
Xie Zhenhua, Jin Longzhe, Song Cunyi. Coal spontaneous combustion characteristics at programmed temperatures[J]. Journal of University of Science & Technology Beijing, 2003, 25(1): 12-14.
- [4] 邵 辉,戴广龙. 浅析煤炭自燃指标气体的优选与使用[J]. 煤炭科学技术,1996,24(9):43-46.
Shao Hui, Dai Guanglong. Optimal selection and application of indicator gas of coal spontaneous combustion[J]. Coal Science and Technology, 1996, 24(9): 43-46.
- [5] 朱令起,周心权,谢建国,等. 自然发火标志气体实验分析及优化选择[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(4):440-443,448.
Zhu Lingqi, Zhou Xinquan, Xie Jianguo, et al. Analysis of indicator gas of spontaneous combustion and its optimal selection[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4): 440-443, 448.
- [6] 周西华,王继仁,梁 栋,等. 山东兖州东滩矿 3#煤层自燃临界氧浓度指标研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2006,17(4):129-133.
Zhou Xihua, Wang Jiren, Liang Dong, et al. Critical oxygen concen-

- tration indicator of coal spontaneous combustion at the 3rd coal seam of Dongtan Mine, Yanzhou, Shandong Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(4): 129-133.
- [7] 王德明. 矿井火灾学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2008.
- [8] 邓 军, 王 楠, 文 虎, 等. 胶体防火材料阻化性能实验研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(7): 49-52.
- Deng Jun, Wang Nan, Wen Hu, et al. Experiment study on retarding performances of gel fire resistance material [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(7): 49-52.
- [9] 马汉鹏, 陆 伟, 王德明, 等. 煤自燃过程物理吸附氧的研究[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(7): 26-29.
- Ma Hanpeng, Lu Wei, Wang Deming, et al. Research on physical adsorbed oxygen in coal spontaneous combustion processing [J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(7): 26-29.
- [10] 王兰云, 蒋曙光, 吴征艳, 等. CO₂ 对低温煤物理吸附氧过程的实验研究[J]. 矿业快报, 2008(2): 29-31.
- Wang Lanyun, Jiang Shuguang, Wu Zhengyan, et al. Experimental research on effects of CO₂ on oxygen physisorption process of coal at low temperature [J]. Express Information of Mining Industry, 2008(2): 29-31.
- [11] 辜 敏, 陈昌国, 鲜学福. 混合气的吸附特征[J]. 天然气工业, 2001, 21(4): 91-95.
- Gu Min, Chen Changguo, Xian Xuefu. Adsorption characteristics of mixed gas [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(4): 91-95.
- [12] 章燕豪. 吸附作用[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989: 97.
- [13] 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: 39-40.
- [14] 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.
- Lin Haiyan, Peng Genming. Study of physical chemistry mechanism in the process of coal spontaneous combustion [J]. Shanxi Coal, 1998, 18(3): 31-34.
- [15] 李荣生, 甄开吉, 王国甲. 催化作用基础[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 82.

2012 年《煤炭学报》征订启事

《煤炭学报》是中国科协主管、中国煤炭学会主办、向国内外公开发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、矿井建设、矿山测量、煤矿开采、煤矿安全、煤矿机械与电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护、煤炭经济研究等方面的科学研究成果论著和学术论文,也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值,被 Ei、IEA Coal Abstract CD-ROM、中国科学引文数据库、科学技术文摘速报(日本)、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖,获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖,获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖,获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获首届国家期刊奖。2004, 2007, 2010, 2011 年分别入选第三、第六、第九和第十届“百种中国杰出学术期刊”。2008, 2011 年荣获“中国精品科技期刊”称号。2009 年荣获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。

《煤炭学报》深受广大作者、读者的爱护和支持,也受到各级部门的重视,在学术水平上具有较高的地位,很多单位都将在《煤炭学报》发表的论文作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊,每期 176 页,每册订价 58 元,全年共收费 696 元。欲订阅者可直接与本编辑部联系,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部

邮政编码: 100013

联系电话: (010)84262930-804 联系人: 毕永华

E-mail: mtxbbyh@126.com