

煤田露头火区标志性气体确定的试验研究及应用

王文才¹ 张培² 任春雨² 尚东² 郭振坤² 陈政²

(1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学 矿业研究院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 为了研究煤田露头火区标志性气体及其与火区温度的关系, 制作了煤田露头火区试验装置。在该试验条件上, 提出焦煤在自燃升温期的 30~130、130~190 及 190 °C 以上 3 个区间时, 分别以 CO、C₂H₄、C₂H₂ 作为标志性气体; 在阴燃稳定期, 以 CO 作为标志性气体; 在窒息降温期的 300~160 °C 及 160 °C 以下时, 分别以 C₂H₆ 和 CO 作为标志性气体; 分析了格氏火灾系数 R₂ 判别火区发展状况的可行性, 拟合出了标志性气体浓度与火区温度以及 R₂ 与火区温度的关系方程。结果表明, 煤田露头火区标志性气体的种类与采空区自燃火区的基本相同, 但其产生的最低温度不同, 即煤体吸附气体出现的最低温度较高, 而煤体氧化气体出现的最低温度较低; 依据关系方程和 R₂, 可以方便地预测煤田露头火区的温度和发展状况。

关键词: 煤田露头火区; 标志性气体; 火区温度; 格氏火灾系数

中图分类号: TD75 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)03-0055-05

Experiment study and application of indicated gas determination to fire area in outcrop of coalfield

Wang Wencai¹ Zhang Pei² Ren Chunyu² Shang Dong² Guo Zhenkun² Chen Zheng²

(1. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Mining Research Institute, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: In order to study the relationship between the indicated gas and the fire area temperature in the fire area of the outcrop of coalfield, a fire area experiment device of the outcrop of the coalfield was prepared. Based on the experiment, the paper proposed the spontaneous combustion heating period for coking with the temperature of 30~130, 130~190 and over 190 °C, and the indicated gases were CO, C₂H₄ and C₂H₂ respectively. During a moldering combustion stabilized period, CO would be the indicated gas. During the suffocation and temperature reduction period, when the temperature was 300~160 °C and below 160 °C, C₂H₆ and CO could be the indicated gas individually. The paper analyzed the feasibility of Grignard fire disaster coefficient R₂ to distinguish the development status of the fire area and a relationship equation between the indicated gas concentration and the fire temperature as well as R₂ and fire area temperature was fitted. The results showed that the type of the indicated gas in the fire area of the coalfield outcrop would be basically the same to the spontaneous combustion area in the goaf, but the lowest temperature occurred would be different, the lowest temperature of the coal absorption gas would be high and the lowest temperature coal oxidized gas would be low. Based on the relation equation and R₂, the temperature and development status of the outcrop fire area in the coalfield could be easily predicted.

Key words: fire area in outcrop of coalfield; indicated gas; temperature of fire area; Grignard fire disaster coefficient

0 引言

煤田露头火区广泛分布在我国北方的新疆、内

蒙古、宁夏等地区^[1]。煤田火区不仅可导致地表塌陷, 还造成大面积的环境破坏, 给人们的生产和生活带来了严重威胁和巨大损失^[2]。煤田露头火区的

收稿日期: 2015-10-18; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.03.011

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51364028, 51064018)

作者简介: 王文才(1964—), 男, 内蒙古伊金霍洛旗人, 教授, 博士生导师, 博士。通信作者: 张培, E-mail: 379021114@qq.com

引用格式: 王文才, 张培, 任春雨, 等. 煤田露头火区标志性气体确定的试验研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 55-59, 128.

Wang Wencai, Zhang Pei, Ren Chunyu, et al. Experiment study and application of indicated gas determination to fire area in outcrop of coalfield [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 55-59, 128.

标志性气体,是指由于露头煤层自燃而产生的或引起其体积分数发生变化的,并能在一定程度上表征露头煤层自然发火状态和发展趋势的火灾气体,又称为指标气体^[3]。根据有关研究^[4-5],煤体吸附气体的主要成分是CH₄和CO₂,有时还有CO,余下的是存量很少的烷烃组分,即C₂H₆、C₃H₈、C₄H₁₀等;煤自燃氧化气体是煤中碳和空气中氧发生氧化作用所分解出来的产物,主要有CO、CO₂、CH₄、C₂H₆、C₃H₈、C₄H₁₀、C₂H₄、C₃H₆等。煤氧化升温时,煤体吸附的烷烃组分依据其碳原子数的序列性(即沸点由低到高的序列)随着煤温度的升高而逐一解吸出来;煤自燃氧化气体一般在煤体温度达到最低生成温度时就开始出现,且煤的种类和变质程度不同,这些气体的种类几乎相同,但出现的温度和生成量不同,一般是煤的变质程度越低(如褐煤),煤越易自燃,开始出现某一种氧化气体的温度越低,并且其在同一温度下氧化气体的生成量就越大^[6-8]。

工作面采空区遗煤自燃的低温氧化试验结果表明^[2,6,9],焦煤低温氧化时,CO、C₂H₆、C₂H₄和C₂H₂出现的最低温度分别是40、40、130、280℃。一般来说,在煤的低温氧化过程中,出现CO和C₂H₄时的温度范围,一般是煤的氧化自热阶段转向快速氧化阶段的温度范围^[10-11];在出现C₂H₂时,说明煤已进入剧烈氧化阶段,此时煤已经出现了焰火燃烧或阴燃^[12]。针对煤田露头火区自燃现象,笔者对煤田火区的标志性气体展开了研究。

1 标志性气体优选

露头煤层自然发火标志性气体的优选需要满足以下条件^[13]:①在常温下煤层本身不具有该气体,仅是由煤层受热氧化生成的;②随温度变化相关性好,稳定性强;③气体的测定分析要准确、简便。

CO是煤氧化过程中出现最早的氧化气体,且贯穿于整个氧化过程中,而且检测方便,所以是煤自燃过程(尤其是自燃升温期)的理想标志性气体。为了消除有些煤层中赋存的CO的影响,采取浓度比值法来消除其影响。即

$$R_2 = \frac{\Delta\varphi(\text{CO})}{\Delta\varphi(\text{O}_2)} \quad (1)$$

式中:R₂为格氏火灾系数^[3,14];Δφ(CO)和Δφ(O₂)分别为CO浓度增量以及O₂浓度降低量。

烯烃(如C₂H₄和C₃H₆)和炔烃(如C₂H₂)是由煤氧化自燃产生的^[4,15-16],在煤的吸附气体中不存

在,故可作为煤田露头火区阴燃稳定期和窒息降温期的标志性气体。

2 试验装置及试验步骤

2.1 试验装置

煤田露头火区试验装置如图1所示,试验装置主要包括模拟露头煤层燃烧装置、温度监测系统和气体采集分析系统。模拟露头煤层燃烧装置包括钢制煤样槽(带角度调节底座)、煤层、碎岩层、滑体、变频风机、风速测定仪和可调节加热棒;温度监测系统包括热电偶、传输线、智能无纸记录仪及存储器;气体采集分析系统包括进气装置、流量传感器、压力监测器、恒温气体干燥装置、GC-85型矿用气相色谱仪、英国凯恩烟气分析仪等。

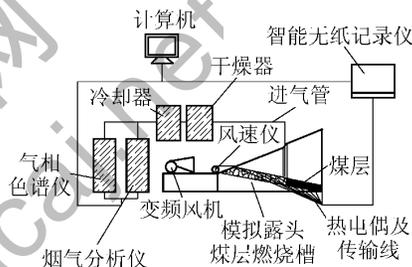


图1 煤田露头火区试验装置

Fig. 1 Coalfield outcrop fire area experiment device

2.2 试验步骤

1) 试验准备。①在某煤田采集焦煤煤样和火区气体样品;②根据矿区实际地质条件,配比孔隙率为35%的碎岩层并将其置于煤样层之上,以作为试验中的火区冒落带;③布置烧空区模拟滑体,并作相应密封处理;④安设变频风机,布设热电偶和气体采集器,连接相关仪器与仪表,并作相应调试和校对;⑤安设可调节加热棒。

2) 试验过程。调整变频风机,使煤样层露头进风口风速为0.5 m/s;启动煤样层中的可调节加热棒;将温度监测系统中的温度监测模式设为跟踪模式,以对煤层温度进行连续监测记录;开启气体采集分析系统,连续实时记录和储存其分析数据。

3 试验数据处理及分析

根据火区温度的变化情况,可将火区发展过程划分为自燃升温期、阴燃稳定期和窒息降温期3个阶段。

1) 自燃升温期。在30℃时有少量CO出现,其浓度与其增量Δφ(CO)都随着温度呈现规律性变化

(图2)。30~130℃时, O₂、CO 浓度随温度变化缓慢, 此时煤样处于低温缓慢氧化阶段; 130℃时, O₂、CO 浓度随温度变化急剧增加, 呈现指数上升。由此可知 130℃是拐点, 这时 O₂ 浓度迅速下降, CO 浓度迅速增加, 煤样的物理吸附作用已经越来越弱, 而化学吸附与化学反应开始呈现主要作用, 此时煤样进入高温加速氧化阶段。

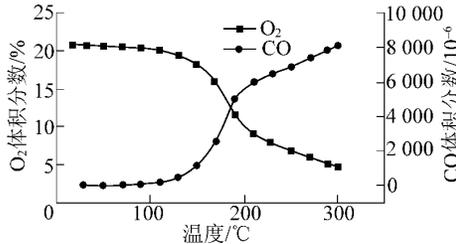


图2 升温期 O₂、CO 浓度与温度的关系

Fig. 2 Relationships between O₂ and CO concentration and temperature in heating period

C₂H₆、C₃H₈、C₂H₄ 和 C₂H₂ 分别在 50、80、110、190℃ 依次出现在模拟滑体裂隙中, 且浓度均呈规律性上升。190℃ 之前, C₂H₆、C₃H₈ 浓度呈指数增加; 190℃ 之后出现 C₂H₂, 其随温度升高而缓慢增加(图3)。

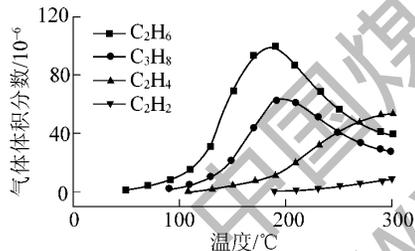


图3 升温期 C₂H₆、C₃H₈、C₂H₄ 和 C₂H₂ 浓度与温度的关系

Fig. 3 Relationships between C₂H₆、C₃H₈、C₂H₄、C₂H₂ concentration and temperature in heating period

2) 阴燃稳定期。当火区温度长时间维持不变或在较小范围内波动时, 火区即发展到了阴燃稳定期。火区温度长时间在 290~310℃ 波动, 由此可以确定火区稳定阴燃温度为(300±10)℃。O₂ 体积分数在 4.0%~5.5% 波动, CO 体积分数在 8 100×10⁻⁶~8 550×10⁻⁶ 波动, 且 CO 浓度与温度的变化特征相似, 即其相关性较好(图4)。

C₂H₆、C₃H₈、C₂H₄ 和 C₂H₂ 浓度随时间变化平缓, 分别在 38×10⁻⁶~40×10⁻⁶、28×10⁻⁶~30×10⁻⁶、53×10⁻⁶~55×10⁻⁶、7×10⁻⁶~11×10⁻⁶ 波动(图5)。

3) 窒息降温期。窒息降温期 O₂ 和 CO 浓度变化规律与预热期基本相反, 300~160℃ 时, O₂ 和 CO 浓度变化迅速, 160℃ 以下变化趋向于平缓(图6)。

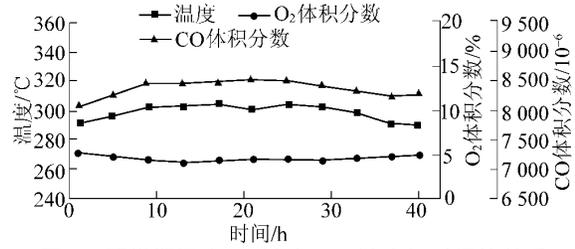


图4 阴燃期温度、O₂ 浓度、CO 浓度与时间的关系

Fig. 4 Relationships between temperature、O₂ concentration and CO concentration and time in smoldering period

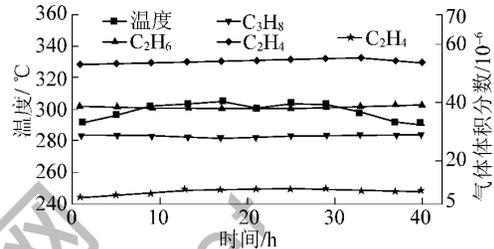


图5 阴燃期温度和 C₂H₆、C₃H₈、C₂H₄、C₂H₂ 浓度与时间的关系

Fig. 5 Relationships between temperature、C₂H₆、C₃H₈、C₂H₄、C₂H₂ concentration and time in smoldering period

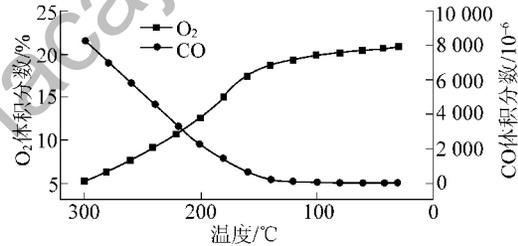


图6 窒息降温期 O₂ 浓度和 CO 浓度与温度的关系

Fig. 6 Relationships between O₂ and CO concentration and temperature in suffocating period

窒息降温期火区的 C₂H₆ 和 C₃H₈ 浓度在 300~180℃ 缓慢增加, 在 180℃ 开始迅速下降, 分别在 60℃ 和 80℃ 消失; C₂H₄ 和 C₂H₂ 浓度随温度递减一直呈单调下降趋势, 且规律性较强, 其分别在 100℃ 和 200℃ 时消失(图7)。

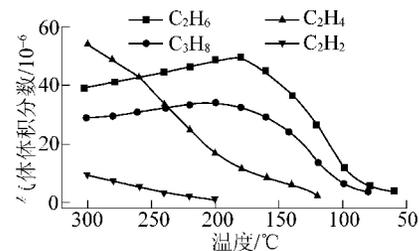


图7 窒息降温期 C₂H₆、C₃H₈、C₂H₄、C₂H₂ 浓度与温度的关系

Fig. 7 Relationships between C₂H₆、C₃H₈、C₂H₄、C₂H₂ concentration and temperature in suffocating period

4) 格氏火灾系数分析。由试验数据和式(1)计

算得到 R_2 与火区温度之间关系如图 8 所示。可见, 当 R_2 呈现上升趋势时焦煤处于自燃升温期(在自燃升温期焦煤温度为 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 时 $R_2 = 0.2$), 且 $R_2 < 0.2$ 时属于低温缓慢氧化阶段, $0.2 \leq R_2 < 0.8$ 时属于高温加速氧化阶段; 当 $R_2 = 0.8$ 时焦煤火区处于阴燃稳定期(在火区温度为 $300\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ 时 $R_2 = 0.8$); 当 R_2 呈现下降趋势时焦煤火区发展到窒息降温期。

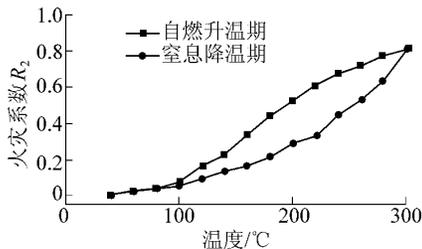


图 8 格氏火灾系数 R_2 与火区温度的关系

Fig. 8 Relationships between Graham fire coefficient R_2 and temperature

4 标志性气体与火区温度的关系及应用

1) 自燃升温期。由标志性气体早期呈现性可知, CO 出现最早, 其在 $30\sim 130\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 根据试验数据分析可知, CO 浓度随温度变化的规律性强于 C_2H_6 和 C_3H_8 , 故在 $30\sim 130\text{ }^\circ\text{C}$ 选 CO 作为标志性气体。 C_2H_4 最早出现的温度在 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 在 $130\sim 190\text{ }^\circ\text{C}$ 时, C_2H_4 浓度变化幅度较小, 灵敏度较高, 故在 $130\sim 190\text{ }^\circ\text{C}$ 选取 C_2H_4 作为标志性气体。 C_2H_2 出现的温度在 $190\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 且浓度变化较小, 准确性较高, 故在 $190\text{ }^\circ\text{C}$ 至阴燃稳定期温度 ($300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右) 选取 C_2H_2 作为标志性气体。

2) 阴燃稳定期。在煤层稳定阴燃时, CO 浓度随时间变化规律与温度变化规律相关性较其他气体好, 且 GC-85 型矿用气相色谱仪对 CO 浓度的检测范围及精度都远高于其他气体。因此, 选用 CO 作为此时期的标志性气体。

3) 窒息降温期。火区由 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 时, C_2H_6 和 C_3H_8 浓度均有较小幅度上升, 但 C_2H_6 的规律性强于 C_3H_8 , 且浓度大于 C_3H_8 。因此, 在 $300\sim 160\text{ }^\circ\text{C}$ 选 C_2H_6 作为标志性气体; 在 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 以下, CO 浓度随温度变化规律强, 可作为此阶段的标志性气体。

4) 在自燃升温期、阴燃稳定期和窒息降温期, 格氏火灾系数 R_2 与温度的相关性极强。因此, 格氏火灾系数 R_2 可以作为火区温度和发展状况的判别指标。

运用 Origin 软件对试验数据进行统计分析, 各标志性气体浓度与温度的关系方程见表 1。

表 1 标志性气体浓度与火区温度的关系方程

Table 1 Relationship equation between indicated gas concentration and fire area temperature

项目	标志性气体	温度/ $^\circ\text{C}$	关系方程	相关系数 R^2
自燃升温期	CO	$30\sim 130$	$t = 18.403 \ln \varphi + 20.727$	0.939 4
	C_2H_4	$130\sim 190$	$t = 112.67\varphi^{0.2187}$	0.997 5
	C_2H_2	$190\sim 300$	$t = 185.88\varphi^{0.2313}$	0.982 6
	R_2	$30\sim 300$	$t = 286.24R_2 + 73.491$	0.948 8
窒息降温期	CO	$300\sim 160$	$t = -6 \times 10^{-7} \varphi^2 + 0.0235\varphi + 147.82$	0.998 9
	C_2H_6	$160\sim 30$	$t = 41.222\varphi^{0.3461}$	0.967 8
	R_2	$300\sim 30$	$t = 342.31R_2^{0.4337}$	0.998 1

注: φ 为各标志性气体浓度, 10^{-6} ; t 为温度, $^\circ\text{C}$ 。

通过对某焦煤煤田新出现露头火区某处的气体测定, 其气体成分及浓度见表 2。

表 2 新出现露头火区气体成分及浓度分析

Table 2 Analysis of the outcrop fire area gas composition and concentration

样号	$\varphi(\text{O}_2)/\varphi(\text{CO})$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)/\varphi(\text{C}_3\text{H}_8)$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_2)$		
	%	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
1	5.2	8 325	37.5	26.7	48.3
2	4.7	8 459	38.1	27.3	46.9

该焦煤煤田露头火区是新出现的, 因而火区处于自燃升温期或稳定阴燃期; 其火灾气体中出现了 C_2H_2 , 因而火区温度在 $190\sim 300\text{ }^\circ\text{C}$ 。将表 2 中的平均 C_2H_2 浓度代入表 1 中 C_2H_2 对应的关系方程, 求得火区温度为 $292\text{ }^\circ\text{C}$ 。因此, 该焦煤煤田露头火区已处于稳定阴燃期。

5 煤田露头火区与采空区自燃火区差异性分析

与采空区自燃火区相比, 其标志性气体种类基本相同, 但其产生的最低温度不同, 即煤体吸附气体出现的最低温度较高, 而煤体氧化气体出现的最低温度较低。如焦煤煤田露头火区中, 煤体吸附气体 C_2H_6 出现的最低温度 $50\text{ }^\circ\text{C}$, 比采空区自燃火区中的高 $10\text{ }^\circ\text{C}$; 煤体氧化气体 CO 、 C_2H_4 和 C_2H_2 出现的最低温度 (30 、 110 、 $190\text{ }^\circ\text{C}$) 比采空区自燃火区中的分别低 10 、 20 、 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 。产生这种现象的原因为: ①二者的通风条件不同。煤田火区依靠空气-烟气温度

差引起的密度差导致的火风压为空气渗流动力,其空气是在大面积范围内的冒落带、裂隙带和滑体裂缝的空隙中渗流的,并且受地形地貌、风向风速、昼夜温差和大气压力变化的影响;而采空区通过漏风通道及其两端的风压差漏风,其漏风量很小且与通风系统有关。因而,前者的通风动力和通风通道更易于解吸煤体中的吸附气体,煤体中的吸附气体在常规条件下已经获得了较多的解吸。若煤体要再解吸出吸附的气体,则需要更高的温度才能实现。

②二者的燃烧规模不同。煤田露头火区是一个在相对开放空间进行的大面积煤层燃烧,而采空区自燃只是遗煤或煤柱的燃烧;因而前者更有利于煤的氧化燃烧,因而煤体氧化气体出现的最低温度普遍偏低。

由于煤田露头火区的标志性气体均来自于煤层的吸附或煤层的燃烧,因而其浓度与火区温度具有极强的相关性,可以准确地建立起二者的关系方程。而采空区自燃的标志性气体还可能来自矿井的风流中,且其浓度受漏风量的直接影响,所以其浓度的影响因素较多,因而很难建立起二者的关系方程。

6 结 论

1) 通过试验得出,煤田露头火区标志性气体的种类与采空区自燃火区基本相同,但其产生的最低温度不同,即煤体吸附气体出现的最低温度较高,而煤体氧化气体出现的最低温度较低。①在焦煤自燃升温期,优选出的 30~130、130~190、190~300 °C 时的标志性气体分别为 CO、C₂H₄ 和 C₂H₂; ②在焦煤火区阴燃稳定期,优选出的标志性气体是 CO; ③在焦煤火区窒息降温期,优选出的 300~160 °C 和 160 °C 以下时的标志性气体分别为 C₂H₆ 和 CO。

2) 在煤田露头火区发展过程中,格氏火灾系数 R₂ 可以作为火区温度和发展状况的判别指标。

3) 不同于采空区自燃火区,煤田露头火区标志性气体浓度与火区温度具有极强的相关性,可以准确地建立起二者的关系方程,也可以建立 R₂ 与火区温度的关系方程。所以在依据 R₂ 确定出火区的温度范围后,依据这些关系方程可由 R₂ 或 CO、C₂H₄、C₂H₂、C₂H₆ 浓度准确预测出煤田露头火区的温度和发展状况,从而有利于提出有针对性的防火措施。

参考文献(References):

[1] 王文才,张世明,周连春,等.中国煤田阴燃灾害及其防治措施

[J].煤矿安全,2010,41(10):99-101.

Wang Wencai,Zhang Shiming,Zhou Lianchun,et al.Chinese coalfield smoldering disaster and its prevention measures[J].Safety in Coal Mines,2010,41(10):99-101.

[2] 李曼,李增华,杨永良,等.运用多指标气体体系分析煤层自燃氧化性[J].煤矿安全,2012,43(1):19-22.

Li Man,Li Zenghua,Yang Yongliang,et al.Using multi-indicator gas systems to analysis the spontaneous combustion oxidizing the coal seam[J].Safety in Coal Mines,2012,43(1):19-22.

[3] 徐俊.中梁山南矿井煤自燃标志气体及指标体系研究[J].煤炭科学技术,2011,39(9):34-36,124.

Xu Jun.Study on symbolgas and index system of coal spontaneous combustion in Zhongliangshan south mine[J].Coal Science and Technology,2011,39(9):34-36,124.

[4] 蒋春林,杨胜强,宋万新,等.煤氧化过程中指标性气体的确定[J].煤矿安全,2012,43(10):185-187,191.

Jiang Chunlin,Yang Shengqiang,Song Wanxin,et al.Determination of index gas in coal oxidation process[J].Safety in Coal Mines,2012,43(10):185-187,191.

[5] 朱令起,周心权.东欢坨煤矿自然发火标志气体的优化选择[J].西安科技大学学报,2008(9):288-292.

Zhu Lingqi,Zhou Xinquan.Optimal selection of indicator gas of spontaneous combustion in Donghuanuo mine[J].Journal of Xi'an University of Science and Technology,2008(9):288-292.

[6] 刘艳红,姚建.煤样标志性气体选择的实验研究[J].煤矿开采,2009,14(4):93-95.

Liu Yanhong,Yao Jian.Experimental research on selection of significant gas for coal sample[J].Coal Mining Technology,2009,14(4):93-95.

[7] 戴广龙.煤低温氧化及自然特性的综合试验研究[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.

[8] 彭伟,何启林,葛新玉.煤炭自燃指标性气体确定的实验研究[J].中国安全生产科学技术,2010,6(6):140-144.

Peng Wei,He Qilin,Ge Xinyu.Experimental studies on the index gases spontaneous of coal[J].Journal of Safety Science and Technology,2010,6(6):140-144.

[9] 康继忠.朱家店煤矿4#煤自燃指标气体优选实验研究[J].煤矿安全,2012,43(10):21-24.

Kang Jizhong.Experiment study on spontaneous combustion index gas optimization in No.4 coal seam of Zhujiadian Coal Mine[J].Safety in Coal Mines,2012,43(10):21-24.

[10] 寇砾文,蒋曙光,王兰云,等.煤自燃指标气体产生规律及影响因素分析[J].矿业研究与开发,2012,32(2):67-70.

Kou Liwen,Jiang Shuguang,Wang Lanyun,et al.Analysis on the production law of index gas for spontaneous combustion of coal and influencing factors[J].Mining Research and Development,2012,32(2):67-70.

[11] 寇砾文,蒋曙光,王兰云,等.温庄煤自燃指标气体产生规律及影响因素分析[J].煤矿安全,2012,43(3):6-10.

Kou Liwen,Jiang Shuguang,Wang Lanyun,et al.Analysis on the

(下转第128页)

- in coal mine[J].Coal Science and Technology 2013 41(1):25-29.
- [12] 范立民,马雄德,冀瑞君.西部生态脆弱矿区保水采煤实践进展[J].煤炭学报 2015 40(8):1711-1717.
Fan Limin, Ma Xiongde, Ji Ruijun *et al.* Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment frangible area [J]. Journal of China Coal Society, 2015 40(8):1711-1717.
- [13] 鲁宝龙.鄂尔多斯盆地南部铀成矿条件及远景预测[D].西安:西北大学 2013.
Lu Baolong. Uranium metallogenic conditions and Prospect of the southern part of the basin Erdos forecast [D]. Xi'an: Northwestern University 2013.
- [14] 王德潜,刘祖植,尹立河.鄂尔多斯盆地水文地质特征及地下水系统分析[J].第四纪研究 2005 25(1):6-14.
Wang Deqian, Liu Zuzhi, Yin Lihe. Hydro-geological characteristics and groundwater systems of the Erdos Basin [J]. Quaternary Sciences 2005 25(1):6-14.
- [15] 王晓梅,王震亮.鄂尔多斯盆地中部中生界地下水动力系统[J].石油与天然气地质 2008 29(4):479-484.
Wang Xiaomei, Wang Zhenliang. Analysis on groundwater hydrodynamic systems of the Mesozoic in central Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology 2008 29(4):479-484.
- [16] 侯光才,张茂省.鄂尔多斯盆地地下水勘查研究[M].北京:地质出版社 2008.
- [17] 顾大钊.煤矿地下水理论框架和技术体系[J].煤炭学报, 2015 40(2):239-246.
Gu Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir [J]. Journal of China Coal Society, 2015 40(2):239-246.
- [18] 冀瑞君,彭苏萍,范立民,等.神府矿区采煤对地下水循环的影响:以窟野河中下游流域为例[J].煤炭学报, 2015 40(4):938-943.
Ji Ruijun, Peng Suping, Fan Limin *et al.* Effect of coal exploitation on groundwater circulation in the Shenfu mine area: An example from middle and lower reaches of the Kuye River Basin [J]. Journal of China Coal Society 2015 40(4):938-943.
- [19] 张义楷,周立发,党 犇,等.鄂尔多斯盆地中东部三叠系-侏罗系露头区裂缝体系展布特征[J].大地构造与成矿学 2006, 30(2):168-173.
Zhang Yikai, Zhou Lifa, Dang Ben *et al.* Characteristics of distribution of the field outcrop fracture systems in triassic and Jurassic in central-east Erdos Basin. [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006 30(2):168-173.
- (上接第59页)
- production law of index gas for spontaneous combustion of coal and influencing factors in Wenzhuang Mine [J]. Safety in Coal Mines 2012 43(3):6-10.
- [12] 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 under the condition of temperature programmed [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2003 25(1):12-14.
- [13] 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.
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.
- [14] 仲维仁,李凤泽.应用格拉哈姆系数(G)进行自然发火点预测预报[J].煤矿安全,1987,18(10):21-25.
Zhong Weiren, Li Fengze. Prediction of spontaneous combustion with Graham coefficient [J]. Safety in Coal Mines, 1987, 18(10):21-25.
- [15] 宋万新.立体抽采条件下高瓦斯采空区煤自燃危险性预测[J].中国安全科学学报 2012 22(4):49-51.
Song Wanxin. Prediction of coal spontaneous combustion in high gassy goaf under stereo gas drainage [J]. China Safety Science Journal 2012 22(4):49-51.
- [16] 刘爱华,蔡康旭.青山矿煤自燃预报标志气体研究[J].煤炭科学技术 2006 34(7):11-16.
Liu Aihua, Cai Kangxu. Study on predicting coal spontaneous combustion and software development [J]. Coal Science and Technology 2006 34(7):11-16.