

褐煤燃烧阶段风量对指标气体的影响

周西华^{1,2},王成^{1,2},李昂^{1,2},白刚^{1,2},郭晓阳^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院,辽宁 阜新 123000;2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室,辽宁 阜新 123000)

摘要:以平庄瑞安褐煤为研究对象,通过热重试验确定褐煤燃烧阶段温度范围,利用管式炉程序升温系统进行煤样氧化自燃试验,得到风量分别为40、80、120、160和200 mL/min条件下的气体;为确定优选指标气体的关联度大小,采用灰色关联法对其进行分析。结果表明:褐煤燃烧阶段温度为247~433℃,408℃左右达到快速燃烧状态。当风量恒定时,CO₂/ΔO₂、CO/ΔO₂、C₂H₄与温度的关联度比CO、C₂H₆、C₂H₄/C₂H₆高。随风量不断增加,指标气体与温度的关联度:CO₂/ΔO₂最大,其次是CO/ΔO₂、C₂H₄和CO、C₂H₆和C₂H₄/C₂H₆最小。故可将CO₂/ΔO₂、CO/ΔO₂和C₂H₄作为主要指标,CO作为辅助指标用于预测煤矿井下封闭火区燃烧状态。

关键词:褐煤燃烧;热重;程序升温;灰色关联度

中图分类号:X936 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)05-0018-05

Influence of air amount on index gas for lignite combustion

ZHOU Xihua^{1,2}, WANG CHENG^{1,2}, LI Ang^{1,2}, BAI Gang^{1,2}, GUO Xiaoyang^{1,2}

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Fuxin 123000, China)

Abstract: Brown coal of Pingzhuang at Ruian was taken as the sample, the temperature range of the coal during combustion stage was determined by thermo gravimetric test, and the spontaneous combustion experiment was carried out by using tube furnace heating system. Gases were obtained at 40, 80, 120, 160 and 200 mL/min of air volume respectively. In order to determine the correlation degree of the optimal index gas, the gray correlation method was used to analyze the gas. The results show that the temperature of the lignite combustion stage is 247~433℃, and the rapid combustion state is achieved at about 408℃. When the air volume is constant, the correlation degree of temperature of CO₂/ΔO₂, CO/ΔO₂ and C₂H₄ is higher than that of CO, C₂H₆ and C₂H₄/C₂H₆. With the increase of air volume, the correlation between gas and temperature is: CO₂/ΔO₂ is the largest, followed by CO/ΔO₂, C₂H₄ and CO, C₂H₆ and C₂H₄/C₂H₆ are the smallest. So CO/ΔO₂, CO/ΔO₂ and C₂H₄ can be used as the main quota, CO is used to predict the coal mine closed fire zone combustion status.

Key words: lignite combustion; thermo gravimetric test; program temperature rise; gray correlation degree

0 引 言

我国煤炭自燃发火十分严重,据统计,有50%以上的矿井存在自燃发火危险,所以矿井火灾威胁着煤矿安全生产。煤自燃是一个复杂的过程,既有物理、化学变化,又有加速放热,最主要的是煤氧复合作用过程^[1]。为此,戴广龙^[2]、董宪伟等^[3]、何

敏^[4]、P Lu等^[5]等研究了不同煤样在不同温度下气体产生成分、气体生成顺序以及气体变化规律,得出气体浓度随温度的变化关系。秦红星等^[6]采用煤氧化实验和井下现场埋管检测法,得出煤在氧化阶段,煤体温度大小可用标志气体进行预测,并拟合得出标志气体与煤温之间的函数关系式。谭波等^[7]研究了不同变质程度煤在自燃阶段产生的指标气

收稿日期:2017-06-28;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.05.004

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274115,51274113);辽宁省教育厅基金资助项目(L2012122)

作者简介:周西华(1968—),男,安徽淮北人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为煤矿火灾防治、瓦斯防治、高温防治。通讯作者:王成,硕士研究生,主要研究方向为火灾与瓦斯灾害防治。E-mail:526790532@qq.com

引用格式:周西华,王成,李昂,等.褐煤燃烧阶段风量对指标气体的影响[J].洁净煤技术,2017,23(5):18-22,27.

ZHOU Xihua, WANG Cheng, LI Ang, et al. Influence of air amount on index gas for lignite combustion[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5): 18-22, 27.

体,得出指标气体的变化特征规律以及其对应的特征温度。寇砾文等^[8]借助程序升温试验,研究了煤在升温过程中供风量对气体产生量的影响,得出供风量越大气体生成量越小。王从陆等^[9]通过热解实验得出煤样热解生成的指标气体并用于预测预报煤炭自燃发火。金永飞等^[10]通过模拟煤矿井下现场真实漏风、蓄热条件,研究了煤自燃多参数预测指标气体随煤温的变化关系,确定了多参数预报指标体系。邓军等^[11]利用煤自燃程序升温试验,对煤氧化热解过程中各阶段的气体组分和浓度进行数据分析,确定了煤自燃指标气体。周西华等^[12-13]研究了褐煤燃烧阶段碳氧化物和烃的生成规律,并用相关指标预测煤矿井下封闭火区燃烧状态。以上研究主要对煤在氧化阶段气体生成量、气体生成顺序、气体生成规律随温度的变化关系,以及用指标气体预测煤温氧化过程进行了研究,但对煤燃烧阶段如何选

取指标气体以及风量对指标气体的影响研究甚少。因此,笔者以瑞安煤业平庄矿褐煤为试验煤样,通过热重试验和管式炉程序升温实验,对褐煤燃烧阶段风量对指标气体的影响进行研究,为预测煤矿井下封闭火区燃烧状态提供依据。

1 热重试验

1.1 煤样制备及工业分析

根据《煤层煤样采取方法》^[14]和《煤样的制备方法》^[15],选取瑞安煤业平庄矿自燃发火期最短的主采煤层新鲜煤作为研究对象,用多层塑料袋或保鲜膜密封包装后运回实验室,并放入密封罐内保存。在实验室将煤样用摇摆式高速万能粉碎机粉碎,筛选出粒径介于 0.177 ~ 0.297 mm 的煤样,装入 60 mL 棕色广口瓶中密封保存。煤样的工业与元素分析结果见表 1。

表 1 煤样的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal sample

工业分析				元素分析					%
M_{ad}	A_{ad}	V_{daf}	FC_d	C	H	O	N	S	
24.820	4.705	27.865	42.610	46.24	2.78	49.10	0.68	1.20	

1.2 试验过程和结果分析

称量 15 mg 煤样,通入 O_2 和 N_2 体积比 1:4 的混合气体,设置气体流量 40 mL/min,保持样品温度、环境温度和检测温度在 20 °C 恒温 10 min,然后以 5 °C/min 的升温速率从 20 °C 升温至 800 °C。采用 STA-449C 型同步热分析仪对煤样进行热重试验,得到褐煤的 TG-DSC 曲线,如图 1 所示。根据煤燃烧过程中质量变化情况,可将褐煤燃烧分为:失水失重阶段(20 ~ 117 °C)、氧化增重阶段(117 ~ 247 °C)、燃烧阶段(247 ~ 433 °C)和燃尽阶段(>433 °C),并且在 408 °C 左右达到快速燃烧状态。

2 褐煤氧化自燃试验

由图 1 可知,瑞安褐煤燃烧阶段的温度在 247 ~ 433 °C,采用管式炉程序升温试验装置对煤样进行自燃试验,当风量分别为 40、80、120、160 和 200 mL/min 时,依次采集褐煤在 200、250、300、350 和 400 °C 的气体样品,采用 GC-4085 型气相色谱仪分析气体样品。

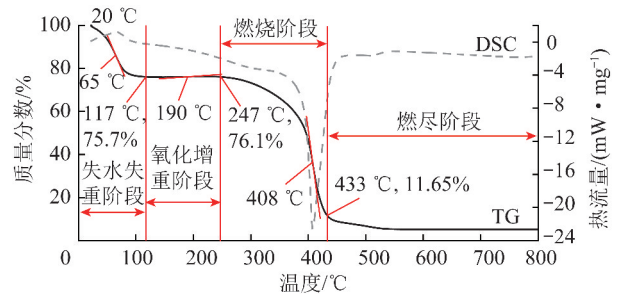


图 1 褐煤的 TG-DSC 曲线

Fig. 1 TG-DSC curves of lignite

2.1 试验系统

管式炉程序升温试验装置原理如图 2 所示。系统主要由以下部分组成:① 供气系统,包括高纯合成空气、气体钢瓶、减压阀、玻璃转子流量计和通气管路;② 升温系统,由双管电炉、瓷舟和通气管路 3 部分构成;③ 温度测试系统,包括温度显示器和 K 型热电偶;④ 气体分析系统,包括气体取样球胆和 GC-4085 型气相色谱仪。

2.2 试验结果分析

借助 GC-4085 型气相色谱仪对不同供风量不

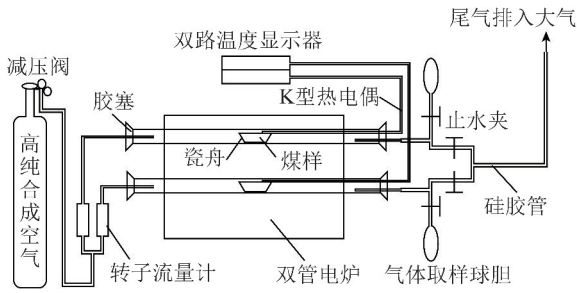


图2 管式炉程序升温实验装置原理

Fig. 2 Experiment device schematic diagram of the tube furnace heating system

同温度下气体样品进行化验分析,煤样燃烧阶段风量为 40 mL/min 的试验数据见表 2。

3 基于灰色关联分析的指标气体优选

3.1 灰色关联数学模型

1) 灰色关联分析首先确定参考序列。将比较的“母序列”作为参考序列。比较序列是指将关联分析中与参考序列作关联程度比较的“子序列”。假设用 n 次试验所得到的数列,则系统的每个参考序列和比较序列如下:

表2 煤样燃烧阶段气体生成量

Table 2 Amount of gas production in the coal combustion phase

温度/℃	O ₂ /%	CO/10 ⁻⁶	CH ₄ /10 ⁻⁶	CO ₂ /10 ⁻⁶	C ₂ H ₄ /10 ⁻⁶	C ₂ H ₆ /10 ⁻⁶	C ₂ H ₂ /10 ⁻⁶	C ₃ H ₈ /10 ⁻⁶
200	17.79	2 820.74	213.36	5 213.16	3.23	1.01	0	1.63
250	15.38	34 436.46	947.59	78 173.66	34.21	17.07	0.46	17.99
300	11.06	46 594.20	2 415.91	199 124.20	42.76	115.01	1.24	35.34
350	8.63	49 568.48	2 986.59	258 236.70	57.86	275.38	2.75	49.92
400	7.36	39 102.34	2 257.41	388 379.60	69.58	359.92	3.48	58.68

$$Y_i = [\gamma_i(1), \gamma_i(2), \dots, \gamma_i(k), \dots, \gamma_i(n)]$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (1)$$

$$X_j = [\chi_j(1), \chi_j(2), \dots, \chi_j(k), \dots, \chi_j(n)]$$

$$(j = 1, 2, 3, \dots, s) \quad (2)$$

式中, $\gamma_i(k)$ $\chi_j(k)$ 分别为系统的第 i 个参考序列和第 j 个比较序列在第 k 次试验时的数据。

2) 将原始数据序列均值化处理。均值化处理

就是将同一数列的全部数据都除以该数列的平均值,得到一个数列。

$$Y_i^1 = [\gamma_i^1(1), \gamma_i^1(2), \dots, \gamma_i^1(k), \dots, \gamma_i^1(n)] \quad (3)$$

$$X_j^1 = [\chi_j^1(1), \chi_j^1(2), \dots, \chi_j^1(k), \dots, \chi_j^1(n)] \quad (4)$$

$$\gamma_i^1 = t_i^1(k) / t_i(k) \quad (5)$$

$$\chi_j^1 = X_j^1(k) / X_j(k) \quad (6)$$

3) 求关联系数。关联系数的计算公式为

$$\xi_i(k) = \frac{\xi \min_i \min_k |t(k) - X_i(k)| + \xi \max_i \max_k |t(k) - X_i(k)|}{|t(k) - X_i(k)| + \xi \max_i \max_k |t(k) - X_i(k)|} \quad (7)$$

式中, $\xi_i(k)$ 为 X_i 对 t 在 k 时刻的灰关联系数。

4) 计算比较序列和参考序列的关联度。即

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{ij}(k) \quad (8)$$

可得到关联度矩阵为

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1s} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & \dots & r_{ms} \end{bmatrix} \quad (9)$$

当参考序列和比较序列不止一个时,这种关联分析就叫做优势分析。由母序列和子序列构成关联矩阵,通过关联矩阵,分析各因素之间的关系,找出优势因素和非优势因素。

3.2 指标气体优选

煤在氧化过程中,释放的 CO 随煤温的升高不断增加,且贯穿于煤升温氧化的全过程,此外 CO 不仅受外界条件影响较小,还具有较高的灵敏性。原始煤体中吸附大量 CH₄,煤在燃烧阶段的 CH₄ 既有低温时从煤孔隙内脱附的部分,又有煤高温裂解的部分,其含量随煤温的升高变化较大,因此,不考虑 CH₄ 作为指标气体。由于在煤层吸附气体中没有烯烃气体成分,且目前一致认为 C₂H₄ 与煤温之间的关系既明确又简单,环境对 C₂H₄ 影响也很小,因此在测定 CO 浓度的同时也测定 C₂H₄。根据文献 [16] 褐煤燃烧阶段供风量对碳氢化物的生成规律,褐煤在氧化增重阶段和燃烧阶段生成的 C₂H₄ 和

C_2H_6 的体积分数随煤温的升高均不断增加,两者存在明显的相关性,可将 C_2H_6 作为预测煤层自燃发火的指标气体。 C_2H_2 和 C_3H_8 在整个燃烧阶段含量太少,不符合指标气体的优选原则。此外,指标单一易受环境影响, C_2H_4/C_2H_6 、 $CO_2/\Delta O_2$ 和 $CO/\Delta O_2$ 不仅可以排除风流对气体体积分数的影响,还可以准确确定煤的氧化发展趋势,故采用双组分指标使预测结果更加准确。根据指标气体所具有的灵敏性、规律性、独立性和可测性等原则^[17],风量为 40 mL/min 时,优选的指标气体见表 3。

3.3 指标气体与温度的灰色关联分析

采用灰色关联分析法,对褐煤燃烧阶段温度在 [200,400] 之间的各指标气体进行灰色关联度分析,先确定关联度大小,再判断各指标气体的可信度。

$$X_i = \left\{ \begin{array}{cccccc} [2\ 820.74 & 34\ 436.46 & 46\ 594.20 & 49\ 568.48 & 39\ 102.34] \\ 3.23 & 34.21 & 42.76 & 57.86 & 69.58 \\ 1.01 & 17.07 & 115.00 & 275.38 & 359.92 \\ 3.20 & 2.00 & 0.37 & 0.21 & 0.19 \\ 1.95 & 12.81 & 19.10 & 20.08 & 27.49 \\ [0.76 & 5.64 & 4.47 & 3.86 & 2.77] \end{array} \right\}$$

2) 利用均值法进行无量纲化处理

$$t = \{0.67, 0.83, 1.00, 1.17, 1.33\}$$

$$X_i = \left\{ \begin{array}{ccccc} [0.08 & 1.00 & 1.35 & 1.44 & 1.13] \\ 0.08 & 0.82 & 1.03 & 1.40 & 1.68 \\ 0.01 & 0.11 & 0.75 & 1.80 & 2.34 \\ 2.67 & 1.67 & 0.31 & 0.18 & 0.16 \\ 0.12 & 0.80 & 1.20 & 1.26 & 1.72 \\ [0.22 & 1.61 & 1.28 & 1.10 & 0.80] \end{array} \right\}$$

3) 求绝对差值 $\Delta_i (|t(k) - X_i(k)|)$, 其计算公式为

$$\xi_i(k) = \frac{\xi \min_i \min_k |t(k) - X_i(k)| + \xi \max_i \max_k |t(k) - X_i(k)|}{|t(k) - X_i(k)| + \xi \max_i \max_k |t(k) - X_i(k)|} \quad (10)$$

取分辨率系数 $\xi=0.5$, 代入式(10)得

$$X_i = \left\{ \begin{array}{ccccc} [0.53 & 0.85 & 0.64 & 0.69 & 0.83] \\ 0.63 & 1.00 & 0.91 & 0.81 & 0.72 \\ 0.60 & 0.52 & 0.70 & 0.61 & 0.50 \\ 0.33 & 0.54 & 0.59 & 0.50 & 0.46 \\ 0.65 & 0.97 & 0.83 & 0.92 & 0.72 \\ [0.73 & 0.66 & 0.78 & 0.93 & 0.67] \end{array} \right\}$$

表 3 指标气体优选结果

温度/ °C	CO/ 10^{-6}	C_2H_4 / 10^{-6}	C_2H_6 / 10^{-6}	C_2H_4 / C_2H_6	CO_2 / ΔO_2	CO/ ΔO_2
200	2 820.74	3.23	1.01	3.20	1.95	0.76
250	34 436.46	34.21	17.07	2.00	12.81	5.64
300	46 594.20	42.76	115.00	0.37	19.10	4.47
350	49 568.48	57.86	275.38	0.21	20.08	3.86
400	39 102.34	69.58	359.92	0.19	27.49	2.77

1) 确定参考序列和比较序列

以温度为参考序列: $t = \{200, 250, 300, 350, 400\}$

各指标气体为比较序列:

$$\Delta_i = \left\{ \begin{array}{ccccc} [0.59 & 0.17 & 0.35 & 0.27 & 0.20] \\ 0.59 & 0.01 & 0.03 & 0.23 & 0.35 \\ 0.66 & 0.72 & 0.25 & 0.63 & 1.01 \\ 2.00 & 0.84 & 0.69 & 0.99 & 1.17 \\ 0.55 & 0.03 & 0.20 & 0.09 & 0.39 \\ [0.45 & 0.78 & 0.28 & 0.07 & 0.53] \end{array} \right\}$$

4) 计算两级最大差和最小差

两级最大差: $\Delta_{\max} = \max_i \max_k \Delta_i = 2.00$

两级最小差: $\Delta_{\min} = \min_i \min_k \Delta_i = 0$

5) 计算关联系数

6) 计算比较序列和参考序列的关联度

$$\gamma_i = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 \xi_i(k) \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

(11)

将数据代入式(11)得: $r = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6)^T = (0.71, 0.81, 0.58, 0.48, 0.82, 0.75)^T$

按照灰色关联度计算方法,应用 Matlab 计算机编程,可得到褐煤燃烧阶段不同风量下优选指

标气体与温度的灰色关联度,并绘制曲线,如图3所示。

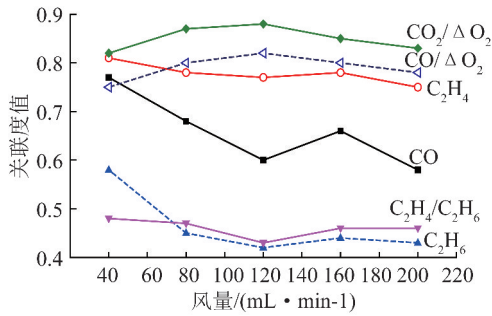


图3 不同风量时指标气体与温度的灰色关联度曲线

Fig.3 Change curves of gray correlation degree of Index gas and temperature under different air volume

由图3可得,当风量为40 mL/min时, $\gamma(\text{CO}_2/\Delta\text{O}_2) > \gamma(\text{C}_2\text{H}_4) > \gamma(\text{CO}) > \gamma(\text{CO}/\Delta\text{O}_2) > \gamma(\text{C}_2\text{H}_6) > \gamma(\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6)$ 。表明 $\text{CO}_2/\Delta\text{O}_2$ 与温度的灰色关联度最大,它与温度的联系最紧密,依次是 C_2H_4 、 CO 、 $\text{CO}/\Delta\text{O}_2$ 、 C_2H_6 、 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 与温度的联系最小。当风量分别为80、120、160和200 mL/min时, $\gamma(\text{CO}_2/\Delta\text{O}_2) > \gamma(\text{CO}/\Delta\text{O}_2) > \gamma(\text{C}_2\text{H}_4) > \gamma(\text{CO}) > \gamma(\text{C}_2\text{H}_6) > \gamma(\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6)$ 。 $\text{CO}_2/\Delta\text{O}_2$ 与温度的灰色关联度依然最大,其次是 $\text{CO}/\Delta\text{O}_2$ 、 C_2H_4 、 CO 和 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 、 C_2H_6 与温度的关联度最小。

由图3可知,各指标气体与温度的关联度随风量变化的走势, $\text{CO}_2/\Delta\text{O}_2$ 、 $\text{CO}/\Delta\text{O}_2$ 、 C_2H_4 与温度的灰色关联度比 CO 、 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 、 C_2H_6 更稳定。随着风量逐渐增加, $\text{CO}_2/\Delta\text{O}_2$ 、 $\text{CO}/\Delta\text{O}_2$ 、 C_2H_4 与温度的灰色关联度曲线平滑,而且始终在0.75~0.80变动。 CO 指标气体随风量的增加总体呈现降低趋势,变化幅度明显。 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 、 C_2H_6 与温度的灰色关联度始终是最小的。

4 结 论

1)通过热重试验得到了褐煤的TG-DSC曲线,并根据热重曲线将褐煤划分为失水失重、氧化增重和燃烧3个阶段,确定了褐煤燃烧阶段温度为247~433℃。

2)利用管式炉程序升温实验装置进行褐煤氧化自燃实验,得到褐煤在燃烧阶段不同温度下的气体组分,利用灰色关联分析法,确定了褐煤燃烧阶段不同风量下指标气体与温度的灰色关联度顺序。

3)在褐煤燃烧阶段,当风量不断增加时, $\text{CO}_2/\Delta\text{O}_2$

ΔO_2 、 $\text{CO}/\Delta\text{O}_2$ 、 C_2H_4 与煤温的关联度比 CO 、 C_2H_6 、 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 高,其中 $\text{CO}_2/\Delta\text{O}_2$ 最大,其次是 $\text{CO}/\Delta\text{O}_2$ 、 C_2H_4 和 CO ,最小的是 C_2H_6 和 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 。故可将 $\text{CO}_2/\Delta\text{O}_2$ 、 $\text{CO}/\Delta\text{O}_2$ 、 C_2H_4 作为主要指标, CO 可作为辅助指标,用于预测煤矿井下封闭火区燃烧状态。

参考文献 (References) :

- [1] 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.
- [2] 戴广龙. 煤低温氧化过程气体产物变化规律研究[J]. 煤矿安全,2007,38(1):1-4.
DAI Guanglong. Study on change law of gas product of coal oxidation in low temperature[J]. Safety in Coal Mines,2007,38(1):1-4.
- [3] 董宪伟,王福生,孟亚宁. 不同煤种升温氧化过程中气体产物特征研究[J]. 中国安全生产科学技术,2014,10(3):48-53.
DONG Xianwei, WANG Fusheng, MENG Yaning. Study on the characteristics of gas products in heating and oxidation process of different coal[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014,10(3):48-53.
- [4] 何敏. 煤矿井下封闭火区的燃烧状态与气体分析研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [5] LU P, LIAO G X, SUN J H. Experimental research on index gas of the coal spontaneous at low-temperature stage[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2004,17(3):243-247.
- [6] 秦红星,戴广龙,张树川,等. 基于煤低温氧化试验下的标志气体优选及应用[J]. 煤炭科学技术,2015,43(6):65-70.
QIN Hongxing, DAI Guanglong, ZHANG Shuchuan, et al. Optimal selection and application of mark gas based on coal low temperature oxidation test[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6):65-70.
- [7] 谭波,胡瑞丽,高鹏,等. 煤自燃灾害气体指标的阶段特征试验研究[J]. 中国安全科学学报,2013,23(2):51-57.
TAN Bo, HU Ruili, GAO Peng, et al. Temperature-programmed experimental study on stage characteristics of coal spontaneous combustion disaster gas indicators[J]. China Safety Science Journal,2013,23(2):51-57.
- [8] 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 of the laws of spontaneous combustion index gases and their influencing factors for Wenzhuang coal[J]. Safety in Coal Mines,2012, 43(3):6-10.
- [9] 王从陆,伍爱友,蔡康旭. 煤炭自燃倾向性试验研究及指标气体优选[J]. 中国安全科学学报.2006,16(10):131-134.
WANG Conglu, WU Aiyou, CAI Kangxu. Experimental study on tendency of coal spontaneous combustion based on CO concentration[J]. China Safety Science Journal,2006,16(10):131-134.

(下转第27页)

参考文献 (References):

- [1] CRONAUER D C, SHAH Y T, RUBERTO R G. Kinetics of thermal liquefaction of Belle Ayr subbituminous coal[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 2002, 17(3): 281-288.
- [2] SHAH Y T, CRONAUER D C, MCILVRIED H G, et al. Kinetics of catalytic liquefaction of Big Horn coal in a segmented bed reactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 2002, 17(3): 288-301.
- [3] CURRAN G P, STRUCK R, GORIN E. Mechanism of hydrogen-transfer process to coal and coal extract[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1967, 6(2): 166-173.
- [4] BRUNSON R J. Kinetics of donor-vehicle coal liquefaction in a flow reactor[J]. *Fuel*, 1979, 58(3): 203-207.
- [5] HAN K W, DIXIT V B, WEN C Y. Analysis and scale-up consideration of bituminous coal liquefaction rate processes[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1978, 17(1): 16-21.
- [6] 张德祥. 年轻煤在石油重油中加氢液化的研究: 煤液化动力学初探[J]. *淮南矿业学院学报*, 1990, 10(1): 113-122.
- [7] GERTENBACH D D, BALDWIN R M, BAIN R L. Modeling of bench-scale coal liquefaction systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1982, 21(3): 490-500.
- [8] XU B, KANDIYOTI R. Two-stage kinetic model of primary coal liquefaction[J]. *Energy & Fuels*, 1996, 10(5): 1115-1127.
- [9] KIDOGUCHI A, ITOH H, HIRAIDE M, et al. Simulation of initial stage reactions in the direct coal liquefaction of sub-bituminous coals[J]. *Fuel*, 2001, 80(9): 1325-1331.
- [10] ONOZAKI M, NAMIKI Y, ISHIBASHI H, et al. A process simulation of the NEDOL coal liquefaction process[J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, 64(1/2/3): 253-269.
- [11] 王勇. 煤直接液化反应动力学的高压釜试验研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2007.
- [12] FERRANCE J P, HOLDER G D. Development of a general model for coal liquefaction[J]. *Preprints Paper American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry*, 1996, 41(3): 941-945.
- [13] FERRANCE J, WARZINSKI R P. A liquefaction kinetic research needs assessment[J]. *Preprints Paper American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry*, 1996, 41(3): 928-934.
- [14] COMOLLI A G, LEE T, PROPPER G A, et al. The Shenhua coal direct liquefaction plant[J]. *Fuel Processing Technology*, 1999, 59(2): 207-215.
- [15] ITOH H, HIRAIDE M, AKIRA K, et al. Simulator for coal liquefaction based on the NEDOL process[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2001, 40(1): 210-217.
- (上接第 22 页)
- [10] 金永飞, 赵瑞元, 邓军, 等. 煤自燃多参数预报指标试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(9): 112-114, 76.
JIN Yongfei, ZHAO Ruiyuan, DENG Jun, et al. Experiment study on multi parameters prediction indexes of coal spontaneous combustion[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(9): 112-114, 76.
- [11] 邓军, 李贝, 李珍宝, 等. 预报煤自燃的气体指标优选试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(1): 55-59, 79.
DENG Jun, LI Bei, LI Zhenbao, et al. Experiment study on gas indexes optimization for coal spontaneous combustion prediction[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(1): 55-59, 79.
- [12] 周西华, 李昂, 聂荣山, 等. 不同变质程度煤燃烧阶段链烃生成规律[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(7): 1741-1746.
ZHOU Xihua, LI Ang, NIE Rongshan, et al. Chain hydrocarbons formation law of different metamorphic grade coals at combustion phrase[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7): 1741-1746.
- [13] 周西华, 宋东平, 聂荣山, 等. 褐煤燃烧阶段碳氧化物生成规律研究[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(3): 59-63.
ZHOU Xihua, SONG Dongping, NIE Rongshan, et al. Study on formation law of carbon oxides of lignite in combustion phase[J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(3): 59-63.
- [14] 中国国家标准委员会. 煤层煤样采取方法: GB/T 482—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [15] 中国国家标准委员会. 煤样的制备方法: GB/T 482—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 周西华, 白刚, 孙宝铁, 等. 褐煤燃烧阶段供风量对碳氢化物生成影响研究[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(10): 59-63.
ZHOU Xihua, BAI Gang, SUN Baotie, et al. Study on influence of air supply amount on hydrocarbon production for lignite combustion[J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(10): 59-63.
- [17] 余明高. 矿井火灾防治[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.