

文章编号:1000-582X(2011)11-122-06

## 煤田火区挥发燃烧机理分析及实验

曲志明<sup>1</sup>,周心权<sup>2</sup>,李唐山<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2. 中国矿业大学(北京)

资源与安全工程学院,北京 100083; 3. 中国中煤能源集团公司 安全监察局,北京 100120)

**摘要:**根据煤田火区挥发燃烧的特点,建立了煤田火区挥发燃烧数学模型和物理模型,用解析方法对数学模型中的控制方程进行求解,得出了在相对静止高温环境中煤层挥发燃烧速度、挥发份组分含量、燃烧火焰温度等参数的解。根据解析的结果,煤田火区挥发燃烧火焰的温度是按挥发份的低热值计算的绝热燃烧温度。在实际的火区中,由于自然对流或强迫对流的作用,真实温度要比绝热燃烧温度低。实验研究发现,在外界加热过程中,不仅发现受热面受到外界的升温影响最大,而内部受到外界影响较小,而且发现在外界温度升高达到一定的程度后,受热面温度会超过外界温度持续上升,这说明该处煤开始了氧化放热。在风量增大后,受热面的温度增长幅度由于煤氧化放热加强而略微提高,而煤体中间层温度下降幅度由于气体对流散热增强而略微提高。

**关键词:**煤田火区;挥发份;自燃

中图分类号:TD712

文献标志码:A

## Volatilization combustion mechanism analysis and experiment of coalfield fire

QU Zhi-ming<sup>1</sup>, ZHOU Xin-quan<sup>2</sup>, LI Tang-shan<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, P. R. China;

2. Faculty of Resources and Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing,

Beijing 100083, P. R. China; 3. Bureau of Coal Mine Safety and Supervision, China National Coal Group Corporation, Beijing 100120, P. R. China)

**Abstract:** According to the volatile combustion, the mathematical and physical models on the volatilization combustion of coal field fire area are established. The governing equations are analyzed by analytic method. The parameters such as volatilization combustion speed, the content of volatile component and the flame temperature are obtained at relatively high temperature environment. According to the solutions, the flame temperature of the volatilization combustion is calculated by the heat insulation temperature in the light of the low-heat value of the volatile component. Due to the free or forced convection in the actual fire area, the true temperature would be lower than the calculation. Through experiment, heating process takes the greatest impact on the heating surface but least on inner parts. The temperature is increased and the heating surface temperature will exceed the temperature and continue increasing, which indicates that the coal begins oxidation. While the airflow is increased, the temperature will be slightly increased. The temperature is descent more slightly in the coal temperature because of thermal radiation.

**Key words:** coalfield fire area; volatile component; spontaneous combustion

收稿日期:2011-06-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)(2005CB221506);国家自然科学基金重点项目(50534090)

作者简介:曲志明(1970-),男,河北工程大学教授,博士,主要从事安全工程、岩土工程方面的研究,

(E-mail)chinaqzm@163.com.

中国北方地区存在的大面积煤田火区, 造成资源巨大损失, 威胁生产安全, 严重污染环境, 破坏土壤、植被, 恶化了生存空间。中国对煤田火灾的治理非常重视, 将中国北方煤田火区的治理列入“中国 21 世纪议程”<sup>[1-3]</sup>。在对煤田火灾的治理过程中, 人们主要对煤田火区的监测方法和治理方法进行研究, 而关于其燃烧的物理分析研究很少。煤层在燃烧时, 首先是煤层中的瓦斯释放并燃烧, 其次是煤变软, 不断地释放出挥发份, 而且逸出挥发份的量和挥发份的组分是对煤加热温度的函数, 挥发份放出之后剩余的固体为碳<sup>[4-6]</sup>。瓦斯和挥发份在碳外围空间燃烧, 形成空间气相火焰, 而碳与气相氧化剂发生气-固两相燃烧<sup>[7-9]</sup>。煤在高温下除发生物理变化释放出瓦斯气体外, 同时也发生化学变化, 释放出挥发份气体, 包括  $H_2$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_3H_8$ 、 $C_2H_2$ 、 $C_3H_6$  等。煤热解产生的挥发份的质量百分数和挥发份组分强烈地依赖热解温度。煤的热解温度在 800 K 左右时, 一般挥发份百分数不大于 40%, 但是当热解温度升高之后, 热解逸出的挥发份质量百分数可以高达 70% 以上。在实际的煤田火区, 虽然煤层在地下几十米甚至上百米, 但夜晚在地面能看到燃烧的熊熊火焰, 这些火焰就是挥发份燃烧形成的, 说明以挥发份的燃烧形式燃烧在煤田火区的燃烧中占有重要比例<sup>[10-12]</sup>。

笔者从燃烧物理学的角度, 通过建立燃烧物理模型, 分析其燃烧现象的物理本质, 为治理煤田火灾提供参考。建立煤田火区挥发燃烧物理模型, 对挥发燃烧进行了数学分析。在数学分析的基础上, 进行实验研究, 对挥发燃烧的物理模型和数学分析进行验证。

## 1 煤田火区挥发燃烧物理模型及基本假设

按照燃烧物理学理论, 火区煤层的燃烧是扩散燃烧<sup>[10, 13, 14]</sup>, 基于此, 建立如图 1、2 所示的煤层燃烧物理模型, 其中图 2 是图 1 从中抽象出来的一个流管。图中:  $A$  是流管面积,  $f$  是质量相对浓度; 下角标  $ox$  是氧化剂,  $F$  是挥发份,  $f$  是燃烧面,  $0$  是界面,  $\infty$  是环境值。挥发份的组分复杂, 为了有效的研究, 把它们看成一个整体, 以整体反应的方法进行分析, 在自然对流和强迫对流很小的情况下, 近似认为挥发份是在相对静止的环境中挥发并燃烧。煤层燃烧面是一平面, 由无数的微元面组成, 微元面尺寸极

小, 小到使断面内各点速度和压力均一致, 且代表该处的真值, 煤层总的燃烧是由无数微元面所组成。与无数的微元面对应, 燃烧反应空间分成无数的流管, 煤层燃烧表面与环境的传热传质是在流管内进行的, 流管是由流线组成的曲面管, 其横断面尺寸极小, 使断面内各点速率和压力均一致, 且代表该处的真值。流管横断面具有一定尺寸, 断面上各点的运动要素相等。

基本假定: 气体沿流管到达自燃点供煤自燃, 参与燃烧后其剩余气体和气体产物依然沿该流管流动, 直到燃烧反应结束。流管内, 密度取其平均值。煤层与环境无相对速度, 只有斯蒂芬流引起的一维流动。忽略热辐射和热解离。过程是准定常的, 即不考虑煤燃烧面的移动效应。火焰面为一几何面, 挥发份由煤燃烧面向火焰面扩散, 空气则由环境向火焰面扩散。

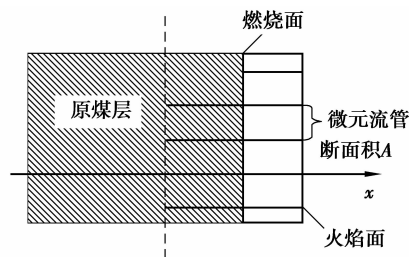


图 1 煤田火灾燃烧物理模型

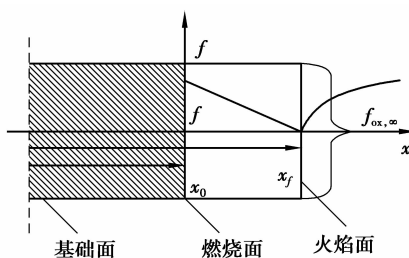


图 2 燃烧流管物理模型

## 2 煤田火区的挥发燃烧机理

根据物理模型, 在火焰面上  $f_{ox} = f_F = 0$ , 燃烧产物则由火焰面分别向煤燃烧面和环境扩散。这样, 按照燃烧的基本定律、基本方程及其边界条件, 可以写出边界上有热交换、质交换的一维定常有化学反应多成分层流流动连续、动量、扩散、能量方程等基本方程<sup>[10, 14]</sup>。

$$\begin{cases} A_0 \rho_0 u_0 = A \rho u = G = \text{const} \\ p = \text{const} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \rho u \frac{df_s}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \rho D_s \frac{df_s}{dx} \right) - w_s, \\ \rho u C_p \frac{dT}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) + w_s Q_s, \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T$  是温度,  $\rho$  是密度,  $u$  是速度,  $G$  是总物质流,  $p$  是压力,  $D$  是扩散系数,  $w$  是反应率,  $C_p$  是定压比热,  $\lambda$  是导热系数,  $Q$  是反应热; 角标  $p$  是压力,  $s$  是某种组分。边界条件  $x=x_0$  处有

$$\begin{cases} \lambda_0 \left( \frac{dT}{dx} \right)_0 = \rho_0 u_0 q_e = \frac{G}{A_0} q_e \\ -D_{s0} \rho_0 \left( \frac{df_s}{dx} \right)_0 + f_{s0} \rho_0 u_0 = \alpha \rho_0 u_0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中,  $f_{F,0} = f_{F,0}(T_0)$  (饱和条件)。  $q_e$  是挥发热,  $\alpha$  是对流换热系数。其中, 对于可燃挥发份,  $s=F$ ,  $\alpha=1$ ; 对于其余组分, 即  $s=ox; pr; iner$  时,  $\alpha=0$  (其中,  $pr$  是燃烧产物,  $iner$  是惰性物)。  $x=\infty$  处有  $T=T_\infty$ ,  $f_F=0$ ,  $f_{pr}=0$ ,  $f_{ox}=f_{ox,\infty}$ ,  $f_{iner}=f_{iner,\infty}$ 。补充条件为  $\sum f_s = f_F + f_{ox} + f_{pr} + f_{iner} = 1$ 。若将式(2)两边同乘微元流管断面面积  $A$ , 令  $\psi = A w_s Q_s$ , 则得:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} (G f_s) = \frac{d}{dx} \left( A D_s \frac{df_s}{dx} \right) - A w_s \\ \frac{d}{dx} (G C_p T) = \frac{d}{dx} \left( A \lambda \frac{dT}{dx} \right) + \psi \end{cases} \quad (4)$$

利用  $x=x_0$  处的边界条件式(3), 将式(4)从  $x=x_0$  到  $x$  积分一次, 可得

$$\begin{cases} G [C_p (T - T_0) + q_e] = A \lambda \frac{dT}{dx} + \int_{x_0}^x \psi dx \\ G (f_F - 1) = A D_{F0} \left( \frac{df_F}{dx} \right) - \int_{x_0}^x A w_F dx \\ G f_{ox} = A D_{ox0} \left( \frac{df_{ox}}{dx} \right) - \int_{x_0}^x A w_{ox} dx \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $w_{ox} = \beta w_F$ ,  $\beta$  是化学当量比。利用火焰面两侧各导数间的关系式<sup>[14]</sup>可得:

$$\begin{cases} \lambda_f \left( \frac{dT}{dx} \right)_{f_1} - \lambda_f \left( \frac{dT}{dx} \right)_{f_2} = -Q_F D_{F,f} \rho_f \left( \frac{df_F}{dx} \right)_{f_1} \\ \beta D_{F,f} \rho_f \left( \frac{df_F}{dx} \right)_{f_1} = D_{ox,f} \rho_f \left( \frac{df_{ox}}{dx} \right)_{f_2} \end{cases} \quad (6)$$

以上各方程中已知量为  $A_0$ ,  $T_\infty$ ,  $f_{ox,\infty}$ ,  $f_{ox,f} = f_{F,f}=0$ , 待求的量是挥发速率  $G$ , 火焰温度  $T_f$ , 火焰长度  $x_f$ , 煤层表面温度  $T_0$ , 表面燃料气浓度  $f_{F,0}$  及温度, 浓度。考虑到煤层燃烧面边界条件(3)及火焰面处条件<sup>[14]</sup>及式(2)分别在  $x_0 < x < x_f$  及  $x_f < x < x_\infty$  两个区域内, 由  $x_0$  到  $x$  或者由  $x_f$  到  $x_\infty$  积分可进行积分得

$$\frac{d(C_p T)}{C_p (T - T_0) + q_e - Q_F} = Le \frac{df_{ox}}{f_{ox} + \beta} \quad \text{将其由}$$

$x=x_f$  到  $x=\infty$  积分, 令  $Q_F - q_e - C_p (T_\infty - T_0) = Q'_F$  (低热), 得到  $1 - \frac{C_p (T_f - T_\infty)}{Q'_F} = \left( 1 - \frac{f_{ox,\infty}}{f_{ox,\infty} + \beta} \right)^{Le}$ 。因此, 在相对静止高温环境中,

挥发份燃烧火焰温度正好等于按挥发份的低热值计算的绝热燃烧温度。由于煤热解产生的挥发份的质量百分数和挥发份组分是温度的函数, 对于不同的火区, 需要进行实验测定具体的挥发份低热值, 才能计算具体的挥发份绝热燃烧温度<sup>[14]</sup>。

### 3 实验模型

在煤田露头自燃过程中, 破碎煤体的斜坡受到阳光照射、高温加热或者人工加热后, 斜坡及邻近斜坡的内部煤体和气体温度上升, 内部气体在外界风流压力和热力的作用下, 在煤体内部形成高温的自下至上的气体渗流<sup>[15-17]</sup>。由此会引起煤体的自热自燃发生。这是一个非常复杂的过程。众所周知, 为了研究一个复杂的问题, 经常需要经过一个由简单到复杂的过程, 这是人类研究复杂问题的基本路线和规律。遵循此规律, 在煤田露头自燃研究中, 建立如图3的实验模型。

实验装置和气样分析: 采用太原理工大学中澳国际合作中心的实验装置。该装置的下半部分装煤, 其外直径约 1.8 m, 高 2.5 m, 内芯装煤部分直径为 1 m; 上半部分装岩石, 其外直径为 1.1 m, 高为 2.68 m。此次装煤量为 1 t, 煤体破碎后最大块直径为 3 cm, 连煤块和煤面一起装入炉体, 注意块和面尽量均匀装入。该装置还装备了气样采集器、温度测量装置, 空气压缩机供风, 炉体加热装置, 炉体上方为烟流排放口, 四周为绝缘层。气样分析采用上 GC-950 型气相色谱仪。

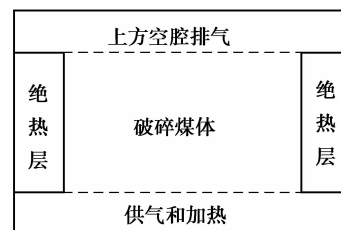


图3 煤田露头自燃实验模型

### 4 部分实验结果及讨论

本实验在加热时为了深刻了解和清楚体现温度

的变化以及煤自燃过程中气体组分的变化, 加热温度较高, 高达 700 多 °C。已经不局限于氧化自热的过程中。记加热盘 2 的温度为 TT2 (Thermal tray 2, 这里以加热盘 2 的温度作为外界的参考温度), 中心轴线上最下层直接受盘的加热, 其温度记为 CB (Center Bottom), 煤体中心温度记为 CM (Center

Middle); 1/2 处最下层直接受盘的加热, 其温度记为 HB (Half Bottom), 1/2 处煤体中间温度记为 HM (Half Middle), 外边缘受到周围环境影响较大, 此处不予考虑。1/2 处是指炉体中心轴线和外界边缘之间的中间位置。在加热初期, 煤体温度变化曲线 (风量为 2 样 L/min) 为图 4。

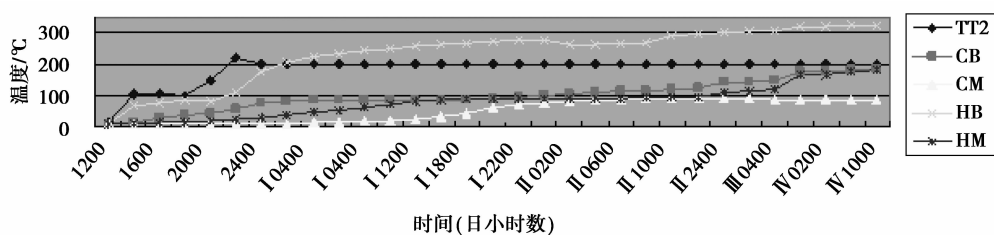


图 4 煤体中温度受外界升温的影响而升高

上图中 1200 代表中午 12 时 00 分, I 0400 代表第 2 天 (晚上 0 点后) 的 4 点 00 分, II 0200 代表第 3 天的 2 点 00 分, 其他符号类推, 此后图中类似符号意义相同。从图中可以知道, 在加热盘加热过程中, 底层受到外界的升温影响较大, 随着外界急剧升温。而内部受到外界影响温度变化缓慢。加热盘维持温度 200 度后, 煤中温度仍在上升; 1/2 处最下层直接受盘的加热, 其温度此后超过了加热盘的温度持续上升, 这是由于该层加热、供氧条件好, 煤已经发生自热或者燃烧; 中心轴线上最下层直接受盘的加热, 但是由于该处供氧条件差 (炉体周围供氧), 煤没有发生自热 (或者放热量很小), 致使该处温升幅度小于 1/2 处最下层; 其他温升幅度由高到低的是, 1/2 处煤体中间温度和煤体中心温度。

煤炭自燃氧化气体产物的实验研究很多, 但是大多数实验是小剂量小粒度煤样 (煤样剂量为 1 g, 粒度为 100 目 (100 目对应的粒度大小为 150 μm)), 小的空气供应量 (100 mL/min) 实验, 其温度范围较低 (高的温度有 220 °C), 程序升温速率低 (0.5 °C/min), 煤升温氧化过程中气体产物产生和分析装置由供气系统、氧化炉、煤样反应管、程序升温控制装置、测温系统和色谱分析仪组成。本实验利用了太原理工大学中澳国际合作中心的大型实验炉随机地对煤自燃氧化气体产物进行了分析。本实验特点是煤的剂量大 (1 t), 煤粒度分布范围宽 (大的颗粒直径有 3 cm, 小至煤面), 空气流量可调 (0~10 L/min), 温度范围高达 700 °C, 程序升温速度约 10 °C/h, 可以大致区分煤自燃气体产物的 (气流的) 上、下、中游, 分析气体产物在流动过程中的变化 (见表 1)。

不同温度和位置下气体浓度的分析。此前关于

表 1 不同温度和位置下气体浓度

		H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	合计
第 1 天上午 11 时最高温度 329 °C 的气样分析 (加热 1 d 后)	上游	20.981 5	74.167 6	0.003 7	0.250 4	0.000 2							95.403 4
	中游	19.238 0	77.898 9	0.052 0	0.588 3	0.001 0	0.000 2						97.778 4
	下游	20.609 9	77.386 3	0.005 3	0.087 9	0.000 2							98.089 6
第 4 天上午 7 时 21 分 (停止加热 28 h 后) 最高温度 383 °C 的气样分析	上游	20.154 7	77.323 8		0.037 2	0.000 2				0.000 1		0.000 1	97.516 1
	中游	19.947 3	77.135 3	0.000 2	0.037 9	0.000 4				0.000 2			97.121 3
	下游	20.334 7	77.505 9		0.037 4					0.000 1	0.000 1	0.000 1	97.878 3

由表 1 可以看出, 第一天上午最高温度为 329 °C

的气样分析结果说明: 在中游有乙烷出现, 但是下游

和上游没有。说明不同地点气样中气体种类和浓度是不同的。第 4 天上午 7 时 21 分(停止加热 28 h 后)最高温度为 383 °C 的气样分析可知:在上游和下游中没有监测到 CO,这可能是由于上游氧气充足的缘故;下游中无 CH<sub>4</sub>,原因可能是测点时间影响,正好错过收集该气体的时机;中上游没有检测到 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>,中游没有检测到 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>。这说明燃烧系统的上中下游气体的种类和浓度是不同的。上下游气体种类不同,当然也可能是该大分子气体容易转化成小分子气体,或者气体分子不稳定等多方面的原因。在实际采集过程应注意,尽可能多地点采集;尽可能尽快分析气样,以免不稳定气体分子转化为其他分子或者煤对裂解气体的吸附作用影响。在低温下(227 °C)只有小的有机碳分子 CH<sub>4</sub> 出现,而没有 C<sub>2</sub> 以上的气体出现,这是对此前所记载的煤样烷烃、烯烃随温度变化规律(在 150~280 °C 区间出现)的一个补充。

不考虑上中下游的气体产物的区别,分析整个炉体中气体浓度随温度的变化趋势如图 5 所示(数据处理上,以中游气样为准,中游气样中没有的组分取上游的,上游没有的取下流的气体浓度)。H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 和 CO 气体含量是非常低的,故采用次坐标轴。由图 5 中可以看出 CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 在 329 °C 时候就已经出现,C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 和 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 在 711 °C 时被检测到,C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 和 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 在煤体降温过程中的 383 °C 时候被检测出来。这些结果对于煤田自燃灭火过程中的气体产物分析具有一定的参考价值。同时从表 1 中第 2 天到第 6 天的氧气浓度变化可以看出氧气浓度随煤温降低而升高,而一氧化碳浓度随煤温降低而下降。这和白杨河井田灭火过程中温度和气样分析结果趋势是一致的,从而验证了前面对应项目分析所得的结果。

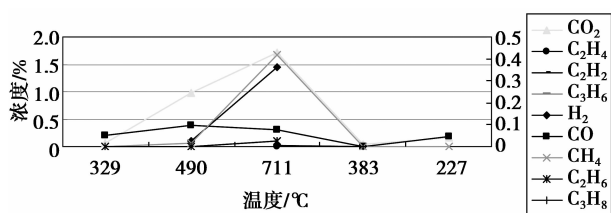


图 5 气体浓度随温度的变化趋势

## 5 结 语

通过以上对煤田火区挥发燃烧的物理分析,在

假定煤层所处环境既无自然对流,也无强迫对流的情况下,若已知煤田火区煤层的燃烧面积、环境温度、环境中的氧气含量等,以及对火区煤层的挥发份热值测定等实验,即可求得煤层挥发燃烧的速度、挥发份组分含量、挥发燃烧火焰温度等参数,从而为火区的灭火决策提供科学依据。在实际的火区中,由于自然对流或强迫对流的作用,火区供氧不足或供氧过剩,都将使温度降低,因此在假定条件下的煤田火区挥发燃烧温度是最高温度。

实验研究发现,在外界加热过程中,不仅发现受热面受到外界的升温影响最大,而内部受到外界影响较小,而且发现在外界温度升高达到一定的程度后,受热面温度会超过外界温度持续上升,这说明该处煤开始了氧化放热;在风量增大后,受热面的温度增长幅度由于煤氧化放热加强而略微提高,而煤体中间层温度下降幅度由于气体对流散热增强而略微提高。在外界降温过程中,原受热面受外界影响最大;对于本实验装置的实验条件,提出了一个适合煤自燃的风速值,解释了有关理论中的结论。详细记录了热椭球体的动态形成过程。在燃烧系统的(气流的)上中下游气体的种类及浓度是不同的,用 2 种观点进行了解释。发现了炉体中气体产物随着温度的变化特征,指出在低温下只有小的有机碳分子 CH<sub>4</sub> 出现,而没有 C<sub>2</sub> 以上的气体出现。

## 参考文献:

- [1] 钟茂华,符泰然,胡忠斌. 新疆煤田火区现状调查研究——小尺度区域热辐射信息分析[J]. 中国工程科学, 2010, 12(1): 12-17.  
ZHONG MAO-HUA, FU TAI-RAN, HU ZHONG-BIN. Small-scale area survey and analyses of Xinjiang's coal field fire in China [J]. Engineering Science, 2010, 12(1): 12-17.
- [2] HEFFERN E L, COATES D A. Geologic history of natural coal-bed fires, Powder River Basin, USA [J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 59(1/2): 25-47.
- [3] 张敦虎,王晓鹏,康高峰,等. 基于 ASTER 数据的煤田火区温度异常信息提取方法研究——以新疆轮台县阳霞火区为例[J]. 中国煤田地质, 2009, 21(9): 35-37.  
ZHANG DUN-HU, WANG XIAO-PENG, KANG GAO-FENG, et al. Study on coal fire area land surface temperature anomaly information extraction from ASTER satellite images—a case study of Yangxia coal

- fire area in Luntai County, Xinjiang[J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(9): 35-37.
- [4] STRACHER G B, TAYLOR T P. Coal fires burning out of control around the world; thermodynamic recipe for environment catastrophe[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 59(1/2): 7-17.
- [5] HEFFERN E L, COATES D A. Geologic history of natural coal-bed fires, Powder River Basin, USA [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 59(1/2): 25-47.
- [6] PONE, N DENIS J, STRACHER, et al. Environmental impacts of coal fires: spontaneous combustion in South Africa [C] // *International Conference on Coal Fire Research*, Beijing, China, November 29-December 1, 2005. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005.
- [7] 曹代勇, 时孝磊. 煤田火区环境影响综合评价指标体系与评价方法[J]. *地球科学与环境学报*, 2009, 31(1): 94-99.
- CAO DAI-YONG, SHI XIAO-LEI. Study on the index system and method for comprehensively assessing the environmental impact of coalfield fires[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 2009, 31(1): 94-99.
- [8] 曹代勇, 樊新杰, 吴查查, 等. 内蒙古乌达煤田火区相关裂隙研究[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(8): 1009-1014.
- CAO DAI-YONG, FAN XIN-JIE, WU CHA-CHA. Study on the fractures related with coalfield fire area in Wuda coal field, Inner Mongolia[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(8): 1009-1014.
- [9] 曾强, 常心坦. 新疆煤田火区火风压模式研究及其应用[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(9): 955-958.
- ZENG QIANG, CHANG XIN-TAN. Study on the model of fire-heating airflow and its application to Xinjiang coal-field fires [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(9): 955-958.
- [10] LU G D, ZHOU X Q, JIANG J. A mathematical model of the temperature in a coalfield fire area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 18(3): 358-361.
- [11] 罗淑政, 玉米提·哈力克, Joerg Schulz, 等. 新疆煤田火灾的成因、危害及综合治理[J]. *灾害学*, 2008, 23(3): 62-65.
- LUO SHU-ZHENG, UMUT H, JOERG S, et al. Causes, damages and comprehensive management of coalfield fires in Xinjiang [J]. *Journal of Catastrophology*, 2008, 23(3): 62-65.
- [12] 蔡忠勇, 吕昭双. 煤田火区的缓慢氧化及其意义——以小东沟煤矿为例[J]. *中国矿业*, 2008, 17(11): 102-104.
- CAI ZHONG-YONG, LV ZHAO-SHUANG. The laggard oxidation in coalfield fire zone and its significance—for example Xiaodonggou coal mines [J]. *China Mining Magazine*, 2008, 17(11): 102-104.
- [13] 谢兴华. 燃烧理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.
- [14] 李唐山. 煤田露头自燃气体渗流和传热传质规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2006.
- [15] FINKELMAN R B. Potential health impacts of burning coal beds and waste banks [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 59(1/2): 19-24.
- [16] NORMAN K A, PHIL D. Coal fires are a social problem [C] // *International Conference on Coal Fire Research*, Beijing, China, November 29-December 1, 2005. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005.
- [17] Saule Aidarova & Ospanova Zh. B. Musabekov K. B., Kusainova J. J., Composition Foams for Quenching Coal Fires [J]. *International Conference on Coal Fire Research*, Beijing, China, November 29-December 1, 2005. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005.

(编辑 郑洁)