

煤层自燃的热流耦合分析

李崇山¹, 鹿广利¹, 刘占宝²

(1. 山东科技大学采矿工程系; 2. 肥城矿业集团)

摘要: 本文对易燃煤层低温氧化特性、热效应以及在自热自燃过程中的热流耦合关系进行了初步理论分析, 导出了煤层自燃的临界性条件。

关键词: 煤层自燃; 低温氧化; 热效应; 热流耦合; 自燃临界性条件

中图分类号: TD75⁺2.2

文献标识码: A

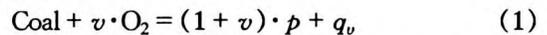
当前, 有关煤层自然发火机理、机制及热流耦合关系等方面的研究, 是各主要产煤国所共同关注的理论课题。由于人们迄今对煤层自然发火机理及其氧化特性的认识不够深入, 所以煤层自燃仍然是严重威胁和制约煤矿安全生产的重大自然灾害。

矿井火灾科学中的煤层自然发火属于高挥发份中低变质煤的自热自燃, 是采场具有自然倾向性且处于破碎状态的煤层, 与空气中的 O₂ 常温下进行物理化学作用放出热量, 热量积聚煤温升高达到其着火温度以后而形成的自燃。煤层自燃应同时具备 3 个基本条件: 一是煤层具有自然倾向性, 即矿井中的破碎煤层或遗煤在低温下应有较高的氧化活性; 二是有连续适宜的漏风供 O₂ 条件; 三是热量易于积聚、煤温持续上升。因此, 矿井中的煤层自然发火期一般比较长, 可达数月以上。

煤层自热自燃过程的实质, 是在煤、O₂ 非线性有限化学反应释热速率 q_v , 同煤层漏风环境内热散失速率 q_a 相互之间热流耦合过程中持续发展的。如果这种耦合结果能够使得煤层在聚热环境中的自热升温速率 q 得到加速, 则煤层的最终自燃着火就不可避免。本文从理论上初步分析这一热流耦合关系, 并确定了破碎煤层的自燃临界性条件。

1 煤的氧化反应及其热效应

易燃煤层常温状态下煤氧间氧化反应进行的十分缓慢, 氧化过程中产生的微量反应热也会很快散失掉。只有在煤氧化学反应热效应引起了煤层及其热环境的温度升高后, 煤氧间的化学反应才能加速。煤、O₂ 间的氧化反应属于气固非均相化学反应过程。当仅考虑煤、O₂ 间单步不可逆的氧化反应时, 煤的自热自燃过程可用如下表面反应通式表示:



如果利用单位时间单位摩尔反应物的消耗量或产物的生成量来表达上式所表示的基元化学反应速率, 根据质量作用定律, 则氧化单位摩尔煤的可燃分时其热量的产生速率为:

$$q_v = \Delta h \cdot \frac{dm_p}{dt} = \Delta h \cdot k \cdot [\text{O}_2]^n \cdot [\text{Coal}] \quad (2)$$

式中, k —反应速率常数, 由 Arrhenius 指数定律给出:

$$k = A_0 \cdot \exp(-E_c/RT_c) \quad (3)$$

取 $[\text{Coal}] = 1$, 则

$$q_v = \Delta h \cdot [\text{O}_2]^n \cdot A_0 \cdot \exp(-E_c/RT_c) \quad (4)$$

式中, n —反应级数, 这里可取 1; A_0 —氧化反应的频率因子; E_c —煤表面反应的活化能^[1], 与煤种无关, 只取决于温度: $E_c = 180\text{kJ/mol}$; T_c —细

收稿日期: 1999-10-25 基金项目: 山东省教委科学基金项目(J99L51)

作者简介: 李崇山(1962-), 男, 山东菏泽人, 讲师, 博士研究生, 从事矿山安全技术与工程方面的教学与研究工
作. 泰安 271019.

微观煤壁面上气固非均相反应的温度; Δh —单位摩尔反应物的氧化发热量, J/mol; R —煤表面 O_2 的气体常数。

式(4)即为易燃煤层发生低温非均相氧化反应时的热产生速率 q_v 计算式。该式表明, 煤层在氧化自热过程中热的产生速率 q_v 不仅与煤质因素 A_0 、 Δh 有关, 而且与煤的反应温度 T_c 及自热环境 O_2 浓度 $[O_2]$ 有关。而 $[O_2]$ 又与煤的表面漏风空气流速及温度边界层中的扩散传质规律有关。实验室测得的不同易燃煤样的氧化发热量 Δh 见表1所示。

表1 不同煤样的氧化发热量

发热量 Δh	褐煤	长焰煤	气煤	肥煤	无烟煤
氧化发热量 J/mol	56.4— 30.0	47.6— 30.8	27.9— 12.8	11.3— 3.6	5.88— 0.24
平均发热量 J/mol	40.7	40.0	19.8	8.88	2.76

由表1可以看出, 相同情况下低变质煤的低温氧化发热量远大于高变质煤的氧化发热量。因此矿井开采低变质的褐煤、长焰煤与气煤时, 最易发生煤层自然发火。

2 煤层自热自燃过程热流耦合关系的初步理论分析

2.1 自热自燃煤层裂隙内部的热流耦合描述

矿井开采有自然倾向性的煤层时, 煤层巷道及采空区内能够发生自热自燃的地点, 往往是在煤层已经损伤破坏、产生了孔裂隙并达到逾渗(贯通)的局部位置上, 因为只有破碎煤层中的逾渗裂隙才是漏风空气得以缓慢流入的有效过流通道。煤表面非均相化学反应释热是与漏风空气的对流散热之间相互耦合的; 煤表面的自热升温就是在这种热流耦合关系中缓慢发展的。由此可见, 裂隙煤层中的热流耦合是一种伴有非均相化学反应、传热传质和气相流动的、复杂的动态变化过程; 煤层的自热自燃及其高温点正是在这种动态而复杂的热流耦合过程中形成的。

在破碎煤层的裂隙之中, 通常在煤固相表面的某个局部位置上产生高温点, 煤的热解产物进入漏风空气的气相之中; 热解热及反应释热又可传递给临近的煤使之也开始热解, 同时加热流动空气后还可对相对远处的下游煤体表面产生预热作用。裂隙煤层内的热量几乎全部被裂隙通道上的煤所吸收; 而只有热解与氧化反应的气相产物(CO 、 CO_2 等)能够随漏风空气一起流向采掘生产空间, 并成为预报煤自热自燃现象最早的标志气体。

对煤层自然发火过程的研究表明, 煤层漏风裂隙中煤固相表面上自热的物理机制, 是相界面处煤的热解和氧化释热产生的动量连同分子扩散作用一起维持了裂隙界面上煤自热过程的延续和传播。煤层裂隙内煤自热自燃过程中漏风空气的流动属于超低速流动, 其特征是扩散作用起控制作用。在对煤自热自燃过程进行有条件的数值模拟时, 还应当考虑多种化学组分在相界面处的质量、动量和能量输运过程。因此未来对相界面漏风流动和热传递过程的模拟研究是整个煤层内因火灾研究中的核心问题之一, 它具有很重要的实际意义。

2.2 煤层自热过程热流耦合的物理模型

破碎煤层漏风裂隙内部煤自热过程的数学物理描述应当包括气、固两相中的数学模型以及相界面热流耦合的数学方程等。

2.2.1 气固非均相界面漏风流速的无滑移条件

对裂隙煤层自热自燃过程进行数学模拟时, 可将煤层裂隙内的煤壁视作具有有限厚度为 δ 的“薄板”固体可燃材料。假定裂隙煤壁位于 yz 平面上(x 为垂直煤壁的法线方向), 则煤层裂隙内煤壁固相表面上漏风流速的切向速度分量可按无滑移条件处理:

$$(u_y)_b = (u_z)_b = 0, \quad (5)$$

式中, 下标“ b ”—代表煤固相表面, 下同。

2.2.2 相界面连续性耦合条件

相界面 x 向的法向流速度分量可由煤壁热解及自燃产物经过相界面时的连续性条件加以确定:

$$\rho u_x = -\frac{dq_s}{dt} \cdot \delta = A_s \rho_s e^{-E_s/(RT_s)} \cdot \delta \quad (6)$$

式中, 下标“ s ”—是指煤的热解产物参数及热解特性参数; ρ —气相成分混合密度, 下同。

2.2.3 相界面传质耦合条件

界面处的反应物、热解及自燃产物的浓度、扩散物质流—即法向的总物质流满足于质量守恒方程。相界面的组分质量份数方程为:

$$\left(\rho u m_{fu} - \frac{\mu}{S_c} \frac{\partial m_{fu}}{\partial x} \right)_b = \rho \cdot (u_x)_b \quad (7)$$

$$\left(\rho u m_{ox} - \frac{\mu}{S_c} \frac{\partial m_{ox}}{\partial x} \right)_b = 0 \quad (8)$$

式中, ρ —气相成分混合密度; m_{fu} , m_{ox} —产物及氧质量流量。

2.2.4 逾渗裂隙气相方程组的耦合条件

逾渗裂隙气相方程组中各方程之间的耦合关系是由气体的密度 ρ 来耦合的, 因为气体的密度

是煤氧化反应释热及对流、辐射换热的函数。气相温度 T 是由从混合份额得到的化学组分的质量份数方程和焓方程中计算出的。漏风热空气的湍流扩散系数为有效线性系数, 即:

$$\mu_e = C_\mu \rho \kappa^2 / \epsilon + \mu_L \quad (8)$$

式中, κ, ϵ —分别为湍流强度和耗散率; μ_L —漏风热空气层流扩散系数。

2.2.5 裂隙内煤的自热自燃过程与裂隙漏风流速之间的耦合

煤层裂隙内煤的自热自燃过程与裂隙漏风空气流速之间也是相互耦合的。漏风空气流过煤层裂隙时为煤的氧化自热自燃提供氧化剂。其对流换热系数在层流条件下可比无振荡时增强 100%—300%; 在紊流条件下也能增强 20%—30%。因此, 漏风流的温度高时会带走更多的煤层热量。

在煤层逾渗裂隙通道内所形成的氧化自热区, 实际是具有一定长度和多维特性的梭形长度, 但为研究方便, 可仅以一个物理化学作用强烈的间断面 Σ 来代替, 并认为它就固定在煤层逾渗裂隙通道的中部。这种代替将不会改变讨论问题的本质。

煤自热自燃与漏风空气流速之间的耦合主要表现在改变煤的自热速度上, 对煤的不完全氧化反应速率的影响可忽略不计。

2.3 煤层漏风裂隙自热自燃过程的统一模型

煤层裂隙漏风流场内热空气的流动属于有化学反应的强非线性热流耦合流动, 是气相流动(同一般的气相流场)、气相成分变化(O_2 减少, CO 、 CO_2 等增加)及化学反应热流流动(热传导、热对流、热辐射—总称热扩散)等 3 大部分的有机耦合—即非线性非稳态的热流耦合。

按照 Spalding—Patankar 数值模拟计算的基本思想, 这种气相场三维 κ - ϵ 双方程湍流反应流的基本微分方程组可用以下统一模型形式表示—即关于欧拉坐标系中非稳态守恒方程的一般形式:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_j \varphi - \Gamma_{\text{eff}} \text{grad}\varphi) = S_\varphi, \quad (j = x, y, z) \quad (9)$$

式中, φ —流场通用因变量, 可代表速度 u_j , 压力 p , 总焓 h , 低变质煤的可燃份 m_{fu} , 紊流动能 κ , 湍流动能耗散率 ϵ , 反应物浓度脉动 g ; ρ —密度; x, y, z —直角坐标; t —时间; Γ_{eff} —有效交换系数, 即 φ 的输运系数: $\Gamma_{\text{eff}} = \frac{\mu_e}{\sigma_\varphi}$; S_φ —场源项。其

中通用变量 φ 在连续方程中代表 1; 在 x, y, z 三个方向的动量方程中分别代表速度分量 u_j ; 对组分质量份数方程分别代表 m_{fu} 、 m_{ox} ; 对总焓方程代表 \bar{h} ; 对于辐射通量方程分别代表三个方向的辐射通量组合变量 R_x, R_y, R_z ; 数值模拟中的模型常数 $C_\mu = 0.09$; $\sigma_\kappa = 1.0$; $\sigma_\epsilon = 1.22$ 或 1.3 ; $\sigma_h = 0.9$; $\sigma_g = 0.9$; $C_{g1} = 2.8$; $C_{g2} = 2.0$ 。

在用差分方式对统一模型(9)进行数值求解时, 则应先利用控制容积法将偏微分方程离散化为下列通用形式的有限差分方程:

$$A_P \varphi_P = A_N \varphi_N + A_S \varphi_S + A_W \varphi_W + A_E \varphi_E + S_U \quad (10)$$

对源项线性化可得:

$$\varphi_P = (\sum A_i \varphi_i + C) / (\sum A_i - b) \quad (12)$$

$$\text{源项: } S = S_U = S_P \varphi_P \quad (13)$$

式中, A_N, A_S, A_W, A_E 为 P 点控制容积体的北、南、西、东 4 个表面上的对流、扩散通量。这里

$$A_P = \sum A_i - S_P \cdot \Delta x \cdot \Delta y, \quad i = N, E, S, W \quad (14)$$

$$A_i = \max(|0.5 \cdot C_i|, D_i) - 0.5 \cdot C_i, \quad i = N, E, S, W \quad (15)$$

3 煤层自热自燃临界性条件

3.1 煤的自热持续发展条件

(1) 自热环境中煤的热散失率

煤层自然发火是煤与持续稳定漏风空气中的 O_2 加速氧化反应的结果。采空区或破碎煤层内持续稳定漏风会将氧化产热量部分地带走, 使煤的升温速度受到抑制。在裂隙煤层漏风散热环境中, 反应热的散失以对流散热形式为主时, 则符合 Newton 冷却定律:

$$q_a = \alpha \cdot s \cdot (T_c - T_\infty) \quad (16)$$

式中: T_c, T_∞ —分别为煤的气固非均相反应温度和风流温度, K ; α —煤与空气间的对流换热系数, $J/m^2 K$; s —煤氧化反应表面的散热面积, m^2 。

在煤自热表面上存在流速及温度边界层, (16)式所表达的对流散热量 q_a 等于通过边界层传递的热量 q_{tr} , 即

$$q_a = q_{tr} \quad (17)$$

由 Fourier 导热定律, 得:

$$q_{tr} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (18)$$

式中: λ —煤表面边界层漏风空气的导热系数, $w/m \cdot K$; y —边界层内距煤表面的垂直距离, m 。

(2) 煤自热持续发展的条件

工作面采空区或破碎煤层自热环境中煤的自热持续发展条件可归结为:

①煤的热产生速率 q_v 必须大于其热散失速率:

$$q_v > q_a \text{ 或 } q_v - q_a > 0 \quad (19)$$

②漏风空气中的 O_2 浓度必须大于 10%。

3.2 煤的自然临界性条件

根据上述分析,在采空区或破碎煤层内自热自燃环境中,当符合煤的自热持续发展条件并维持了足够长的时间以后,煤的自热就能进一步发展为煤的自燃着火。自热环境中由煤的自热持续发展为自燃着火的临界性条件为:

$$\begin{cases} q_v = q_a \\ \partial q_v / \partial T = \partial q_a / \partial T \end{cases} \quad (20)$$

上式的数值解 T_i 定义为煤自热自燃的着火温度。

将式(4)、(16)分别代入(20)中的各式,则

$$\Delta h \cdot [O_2]^n \cdot A_0 \cdot e^{\frac{E}{RT_i}} = \alpha \cdot s \cdot (T_i - T_\infty) \quad (21)$$

$$\frac{\Delta h \cdot E_c \cdot [O_2]^n \cdot A_0 \cdot \exp(-E_c/RT_i)}{R \cdot T_i} = \alpha \cdot s \quad (22)$$

式(21)除以(22)得

$$\frac{R}{E_c} T_i^2 - T_i + T_\infty = 0 \quad (23)$$

解此一元二次方程并取其最小正根为:

$$T_i = \frac{1 - \sqrt{1 - 4RT_\infty/E_c}}{2R/E_c} \quad (24)$$

对上式进行 *Talor* 级数展开,并略去 3 阶以上的高阶项后,得

$$T_i = T_\infty + \frac{R}{E_c} T_\infty^2 \quad (25)$$

式中: T_i —煤表面氧化自燃的着火温度, K; T_∞ —自热环境中漏风热空气温度, K; 其余符号意义同前。

利用式(25)我们对兖州矿区 3# 煤层气煤,在煤表面的自热温度超过(70~75)℃以后自热自燃加速期着火温度 T_i 与热环境温度 T_∞ 之间的对

应关系进行了理论计算,取 $E_c = 180\text{kJ/mol}$, $R = 8.31\text{kJ/kmol}$ 。计算结果表明,煤自燃着火时的 T_i 与 T_∞ 仅相差约 5.5~15.2℃;并且 T_∞ 越高越接近煤的实际点火温度时,其差值越大。

以上是从分析煤的表面自热热力作用所得出的结论。由此可知:

①煤表面气固非均相自热氧化反应的热产生速率 q_v 对温度 T_c 的关系是非线性的;而煤表面通过漏风空气对流散失的热量对 T_c 的关系则是近似于线性的,这就决定了采空区或破碎煤层内部自热环境中热量的得失之间存在着完全不同的规律;

②当 $q_a \geq q_v$ 时,煤的自热环境就不存在聚热条件,煤的氧化反应放出的热量将全部散失掉,煤就不能升温,时间长了,煤风化而永远不会发生自热自燃;

③煤自热表面的温度 T_c 对 q_v 的影响极大,即对煤的自热过程发展影响深刻,并且煤温越接近着火温度 T_i ,这种影响就越大。当煤氧化进入自热加速期以后,漏风空气对流散失的热量 q_a 实际上就不可以忽略;

④采空区或破碎煤层自热环境之中始终存在热流的动态平衡关系,煤的自热自燃过程发展实际上就是在自热环境内部热流耦合的能量动态平衡矛盾中持续稳定进行的。

参考文献:

- [1] Fu W B, Zhang B L. A Generalized Relationship between the Kinetic Parameters of Char Combustion and Coal Properties [J]. J. of Combustion Science and Technology, 1997; Vol. 3(1)
- [2] 冯长根著. 热爆炸理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1988, 1~20.
- [3] 王云主编. 矿井火灾预防与处理 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992, 112~115.

Analysis of Heat-Fluid Coupling During the Spontaneous Combustion of Coal Seam

LI Chong-shan¹, LU Guang-li¹, LIU Zhan-bao²

(1. Dept. of Mining Engineering, SUST; 2. Fei Cheng Mining Group Company)

Abstract: This paper presents the preliminary theoretical analysis of low-temperature coal oxide natures, heat effect of coal seam liable to combustion and heat-fluid coupling relationships during the process of self-heating and spontaneous combustion of coal seam. In the paper, the critical condition of spontaneous ignition of coal seam is also derived.

Key words: Spontaneous ignition of coal seam; Low temperature coal oxidation; Heat effect; Heat-fluid coupling; The critical condition of spontaneous of coal seam