

开区注氮采空区自燃温度场的数值模拟研究

李宗翔 纪奕君

(辽宁工程技术大学职业技术学院, 辽宁阜新 123000)

摘要 为了研究开区注氮采空区遗煤自燃和被抑制的力学过程, 用非均质多孔介质中的渗流连续性方程、气体弥散方程和综合传热方程的联立, 建立了采空区注氮非定常数值模型. 结合实例, 用迎风格式有限元方法求解. 给出了采空区的漏风流态、氮气流态, 描绘了采空区自燃过程中氧、CO 浓度和温度分布的变化过程. 计算考虑了瓦斯涌出和工作面推进的影响. 得到注氮条件下采空区高温区形状变窄; 随着注氮量的提高, 使自然发火期逐渐变长, 直至不自燃. 理论计算与实际情况吻合.

关键词 采空区注氮, 气体浓度分布, 温度场, 自然发火期, 自燃与瓦斯耦合, 有限元

开区注氮是防治采空区遗煤自燃最有效的技术手段之一, 其理论和试验研究一直是学者们关注的焦点^[1,2]; 用计算流体力学方法(场流理论)描述注氮过程, 求解较为复杂, 涉及非均多孔介质流场多相气体渗流扩散、传质传热的动态联立求解问题, 所以至今还没有直观可靠的分布解计算成果. 李宗翔曾用数值模拟方法讨论了注氮过程中氧浓度分布变化过程和注氮参数确定问题^[2]. 这里进一步研究开区注氮条件下采空区自燃的温度场变化过程, 笔者开发的采空区漏风流态、气体(O₂, CH₄, CO)浓度和温度分布及其变化的有限元计算程序(以下简称 G3)^[3,4], 能够为此提供有效的分析平台, 并以图形显示计算结果, 使问题研究更加深入.

1 注氮采空区流态和遗煤自燃定解模型

将注氮管口简化为小流量边界, 图 1 为简化的二维非均质采空区开区注氮流场^[2], 图中 Q 为工作面风量, q_L, q'_L 分别为漏入、漏出风量, q 为注氮流量.

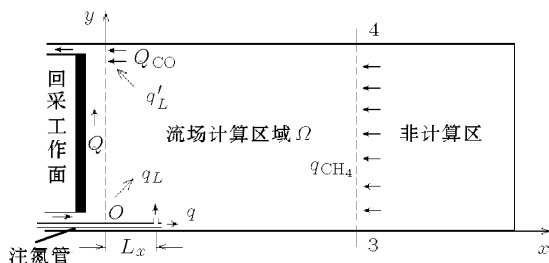


图 1 开区注氮采空区计算区域划分

L_x 为注氮口的位置; q_{CH_4} 为深部瓦斯涌出; Q_{CO} 为自然采空区 CO 的绝对涌出量

假设采空区充分冒落, 老顶板块作为不透透气边界, 注氮流场为不可压缩气体稳定渗流, 那么, 综合考虑一场一态多相气体、温度动态联立求解的方程组为

$$\nabla \cdot (k \nabla p) = \frac{W_g}{H}, \quad k = b \frac{(K_P - 1)^3}{K_P}, \quad H = \frac{K_P M}{K_P^{(0)} - 1} \quad (1)$$

$$\frac{dc(\theta)}{d\tau} + \mathbf{v} \cdot \nabla c(\theta) = \nabla [D \nabla c(\theta)] + \frac{c - c(\theta)}{c \cdot n} W(\theta) \quad (2)$$

$$C_e \frac{\partial t}{\partial \tau} + C_g \mathbf{V} \cdot \nabla t = \lambda_e \nabla^2 t + \frac{Q_S}{H} + h(t - T_f) \quad (3)$$

$$W(O_2) = - \left[\frac{(1-n)H_1 \cdot \gamma_0 e^{b_0 \cdot t}}{n \cdot c(O_2)_0 \cdot H} + \frac{W(CH_4)}{c - c(O_2)} \right] \cdot c(O_2) \quad (4)$$

$$W(CO) = 2\beta \cdot W(O_2) - \frac{1}{H} W_1 \quad (5)$$

$$Q_S = (b_2 + b_1 \beta) W(O_2) - (T_W - T_0) \sqrt{\frac{\lambda_s C_s}{\pi \cdot \tau}} \quad (6)$$

式中 Ω 代表计算区域; p 为风压; k 为渗透性系数, b 为 k 的待定识别数; M 为采高; K_P 为冒落碎胀系数分布函数^[3], $K_P^{(0)}$ 为初冒碎胀系数, n 为空隙度; τ 为时间变量; H 为冒落流场高度. $\mathbf{v}$ 为真速度, $\mathbf{v} = \mathbf{V}/n$ (其中 $\mathbf{V}$ 是渗流速度). θ 代表 Ω 中各相气体组分, 分别取 $\theta = CH_4, O_2, CO$; $c(\theta)$ 为 θ 相气体摩尔浓度, c 为空气全相饱和浓度, 取 44.643 mol/m^3 ; $W(\theta)$ 代表 θ 相气体的源汇项; W_g 是瓦斯涌出强度, $W_g = 0.0224 W(CH_4) \cdot H$; W_1 是吸附 CO 强度. D 是气体弥散系数张量^[3]. H_1 为遗煤厚度. γ_0 是冒落煤耗氧速度常数; b_0 为实验

常数^[3]; t 为采空区温度; λ_e, C_e 分别为冒落介质有效传热系数和热容; β 为产生 CO 的耗氧量占煤耗氧总量的比例^[4]; b_1, b_2 为煤对应的化学反应、化学吸附氧化热. h 为对流换热系数. T_W 是贴底处煤矸温度; T_0 是初始温度; T_f 为风流温度, 在新风侧 $T_f = T_0$.

模型定解的边界条件

$$p = \alpha_1 r_1 Q^2 (L - y) \quad (\text{工作面边界上})$$

$$kH \cdot \nabla p = -q, c(\theta)|_{\Gamma_1} = 0 \quad (\text{在注氮口边界})$$

$$c(\theta)|_{\Gamma_1} = c(\theta)_{,0}, t|_{\Gamma_1} = T_0 \quad (\text{在入新风边界上})$$

$$c(\theta)|_{\tau=0} = c(\theta)_{,b}, t|_{\tau=0} = T_0 \quad (\text{在 } \Omega \text{ 上})$$

式中 Γ_1, Γ_2 分别代表第 1, 第 2 类边界. L 为工作面长度; r_1 为单位长度工作面风阻. y 为工作面上距入风口位置, α_1 为界壁局部阻力系数. $c(\theta)_{,0}$ 为新风气体浓度, $c(\text{O}_2)_{,0} = 9.375 \text{ mol/m}^3$, $c(\text{CO})_{,0} = c(\text{CH}_4)_{,0} = 0$.

2 算例注氮采空区的自燃过程

算例为阜新五龙煤矿 3231 综放工作面, $L = 175 \text{ m}$, $M = 9.5 \text{ m}$. $r_1 = 1.13 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^9$, $Q = 33.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 日进度为 1.8 m ; 采空区计算尺度如图 2, $L_x = 20 \text{ m}$, $q_{\text{CH}_4} = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$. $a = 0.0268$, $b = 0.67$, $k = 2.1 \sim 59.2 \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$. $\gamma_0 = 2.31 \times 10^{-5} \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, $W_g = 3.3 \times 10^{-5} \sim 4.5 \times 10^{-3} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. 取传热系数为 2.13 (岩石)、 0.0265 (空气) $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 热容为 5.1×10^5 (岩石)、 1207 (空气) $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$. $b_1 = 221.1 \text{ kJ/mol}$, $b_2 = 393.1 \text{ kJ/mol}$, $b_0 = 0.0235 ^\circ\text{C}^{-1}$. 模型方程是非自伴性的, 用迎风格式的有限元法求解^[3]. 图 2 区域三角形单元剖分,

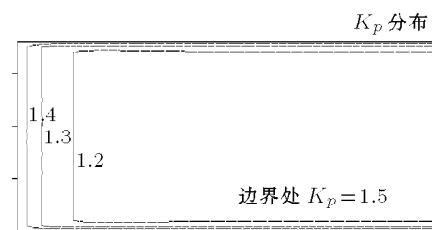
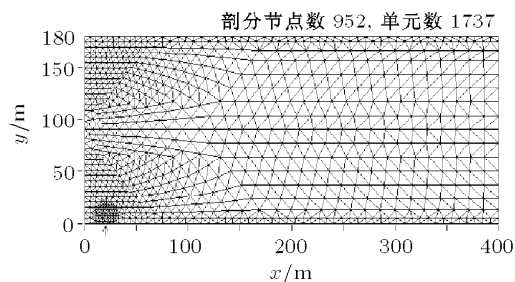


图 2 采空区剖分网格、冒落膨胀系数 (K_p) 分布及流态变化

注氮口附近二次加密.

求解过程及工作面推进动态处理参见文献 [4]. 自燃标志温度为 80°C . 工作面附近各相气体分布为冒落渗流层中的浓度, 未考虑冒空带回流新风混溶效应. 图 3 中风压等值线差距 5 Pa , 流线的流量差距为 $4 \text{ m}^3/\text{min}$. 输出图形结果见图 4, 图 5.

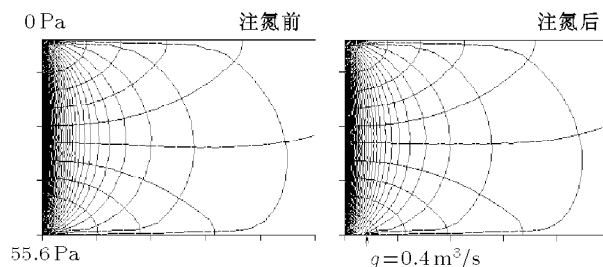


图 3 注氮前后采空区漏风流态变化

注氮前 $q_L = q'_L = 2.4 \text{ m}^3/\text{s}$; 注氮后 $q_L = 1.96 \text{ m}^3/\text{s}$, $q'_L = 2.4 \text{ m}^3/\text{s}$

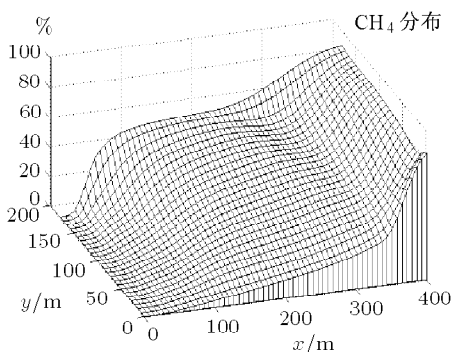
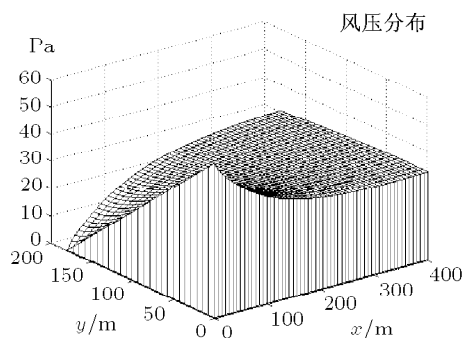


图 4 无注氮采空区自燃时气体浓度和温度分布结果

最高温度 78.4°C , 达 80°C 时的自然发火期 17.2 天; $Q_{\text{CO}} = 0.69 \text{ m}^3/\text{min}$

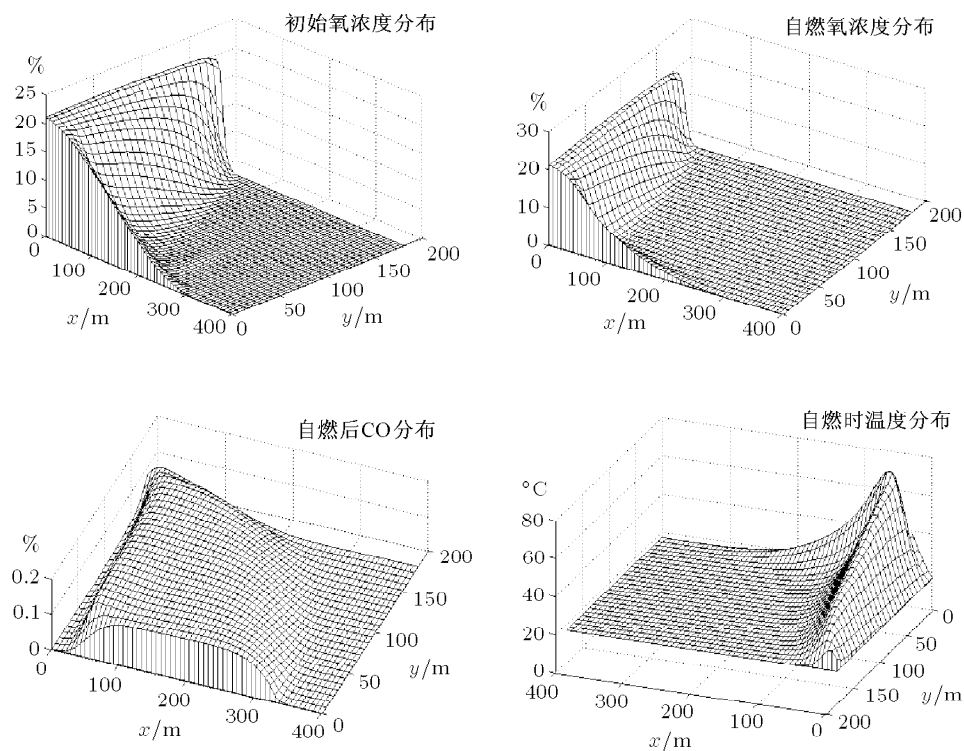


图 4 无注氮采空区自燃时气体浓度和温度分布结果 (续)

最高温度 78.4°C , 达 80°C 时的自然发火期 17.2 天; $Q_{\text{CO}} = 0.69\text{m}^3/\text{min}$

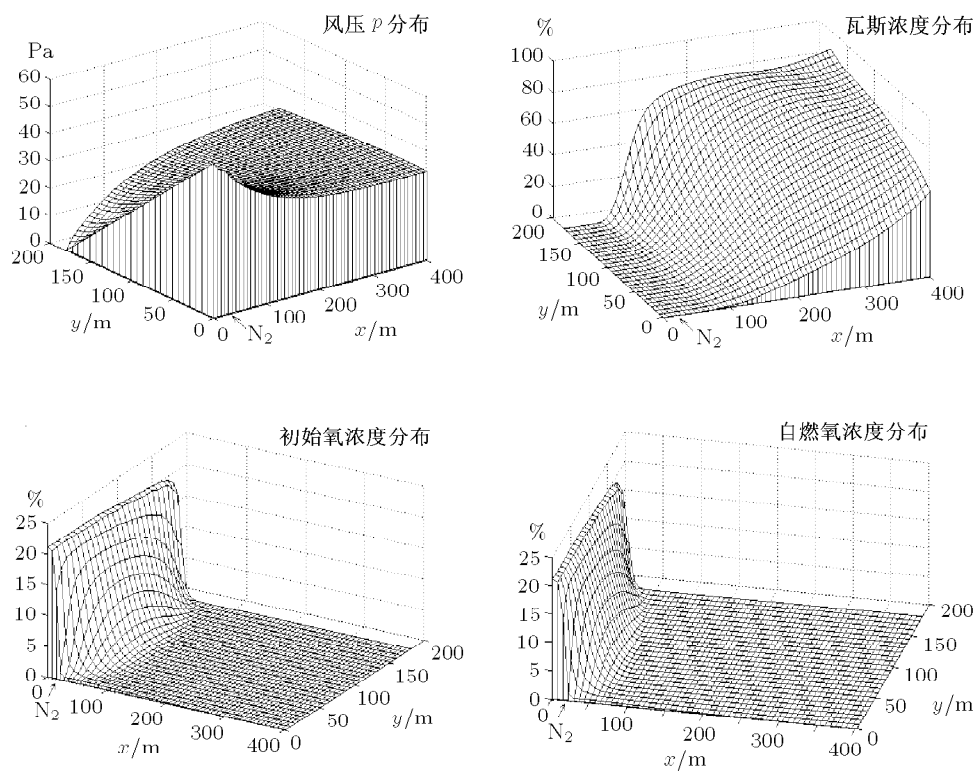


图 5 注氮采空区气体浓度及温度分布结果

最高温度 51°C , 不自燃; $Q_{\text{CO}} = 0.13\text{m}^3/\text{min}$

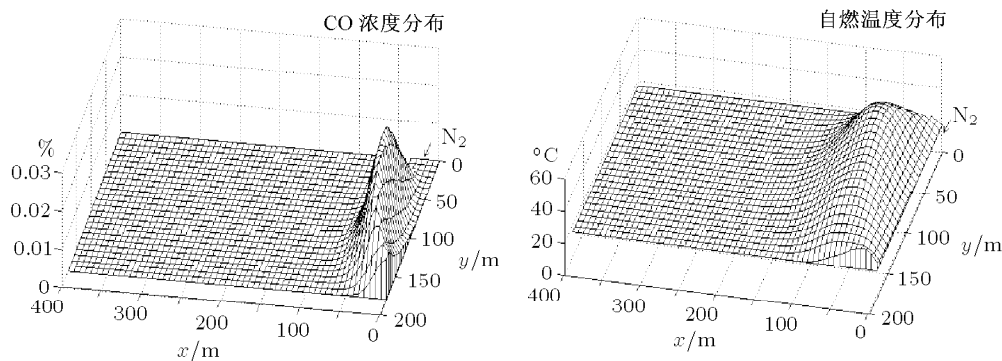


图 5 注氮采空区气体浓度及温度分布结果 (续)

最高温度 51°C, 不自燃; $Q_{CO} = 0.13 \text{ m}^3/\text{min}$

对比图 4 与图 5, 在注氮后入风侧的自然高温区范围由宽变窄. 当使用两台注氮机同时工作, 注氮量为 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 、推进度为 $2.4 \text{ m}/\text{d}$ 时, 温度增长趋于平缓, 基本控制了遗煤的自然. 这是实际的五龙矿注氮情况. 图 6 为不同条件下注氮采空区自燃升温过程.

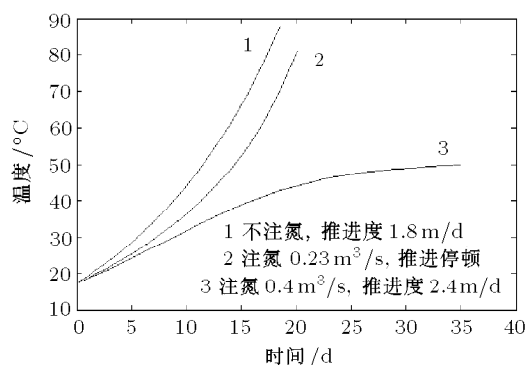


图 6 采空区内自燃的升温过程

3 结 论

(1) 注氮氮气主要是沿冒落非压实边界带流向采空区的深部, 并以等量驱替工作面向采空区的部分漏风, 对深部已受长时间氧化蓄热行将燃烧的遗煤正起着熄灭的作用.

(2) 注氮采空区自燃高温区形状由原来的三角形变为更窄的扁槌形, 并随注氮量的增加, 高温区逐渐消失. 受注氮设备和井下条件的限制, 注氮流量是有限的, 因此, 在氮流带和冷却带之间形成自燃

氧化带. 对自然发火严重的工作面, 注氮仅能起到延缓自然发火的发生时间.

(3) G3 模拟的理论结果得出的采空区自燃与注氮互动规律与实际有良好的一致性, 适用于研究注氮熄燃作用及确定注氮参数.

参 考 文 献

- 1 丁广骧. 三维采空区瓦斯、氮气的扩散运动及有限元解法. 煤炭学报, 1996, 21(4): 411~414 (Ding Guangxiang. Diffusion of methane and nitrogen in 3D goaf and the finite element solution. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(4): 411~414 (in Chinese))
- 2 李宗翔. 综放采空区防灭火注氮数值模拟与参数确定. 中国安全科学学报, 2003, 13(5): 53~57 (Li Zongxiang. Numerical simulation of nitrogen injection process for fire prevention and extinguishment in fully mechanized longwall top-coal goaf. *China Safety Science Journal*, 2003, 13(5): 53~57 (in Chinese))
- 3 李宗翔, 韦涌清, 孙世军. 非均质采空区气-固耦合温度场迎风有限元求解. 昆明理工大学学报, 2004, 29(2): 5~9 (Li Zongxiang, Wei Yongqing, Sun Shijun. Gas-solid coupling temperature field in heterogeneous goaf solved by upwind finite element. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology)*, 2004, 29 (2): 5~9 (in Chinese))
- 4 李宗翔, 吴志君, 王振祥. 采空区遗煤自燃升温过程的数值模型及其应用. 安全与环境学报, 2004, 4(6): 58~62 (Li Zongxiang, Wu Zhijun, Wang Zhenxiang. Numerical simulation model and application of temperature rise process caused by naturally burn of losted coal in goaf. *Journal of Safety and Environment*, 2004, 4(6): 58~62 (in Chinese))

NUMERICAL SIMULATION OF TEMPERATURE FIELD WITH SPONTANEOUS COMBUSTION IN OPEN REGION NITROGEN INJECTION GOAF

LI Zongxiang JI Yijun

(Vocational College, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract To study the complicated mechanical process of spontaneous combustion of remnant coal in goafs under the conditions of open region nitrogen injection, based on seepage continuous equation, gas dispersion equation and integrated heat transfer equation, a non-steady numerical model of spontaneous combustion of coal in nitrogen injection goaf is established, and these equations are solved by windward finite element method. The spontaneous combustion process in goaf with different flux of nitrogen is computed, and the flow pattern of air leakage and the flow pattern of nitrogen are expressed by graphs, together with the variation of oxygen and carbon monoxide concentration and temperature distribution in goaf. Some influencing factors, such as gas effusion and the advance of working front are taken into account during computation. It is concluded that a high temperature zone usually appears at the inlet air side in goaf spontaneous combustion under open region nitrogen injection, but the shape turns to narrow. The spontaneous combustion period will become long with the increase of nitrogen injection quantity until spontaneous combustion stops. Theoretical simulation result and practical nitrogen injection conditions are in general agreement.

Key words nitrogen injection in goaf, concentration distribution of gas, temperature field, spontaneous combustion period, the coupling of spontaneous combustion and gas, finite element