

采空区注氮软件模拟及开发研究

王月红^{1,2}, 吴 怡^{1,2}, 张九零^{1,2}, 关雅洁^{1,2}

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063009; 2. 河北省矿山开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山 063009)

[摘 要] 为了防止采空区遗煤自燃, 基于有限体积法, 建立采空区注氮氧浓度场、温度场数学模型, 利用 VB 语言编制采空区注氮解算系统, 开发软件。模拟研究采空区注氮前后温度场、氧浓度场的变化规律。结果表明: 在氧浓度场中, 采空区注氮后, 氧化带宽度变窄并向工作面方向推进, 并出现氧浓度急剧下降的凹点。在温度场中, 注氮前后的采空区深部温度差较大, 由 70℃ 降低到 40℃, 且采空区温度与深度呈正比例关系。注氮后, 采空区深部温度明显降低, 且最高温度集中于回风巷深部附近。最后通过现场工程应用验证了研究结果, 为以后煤层自燃治理提供技术支持。

[关键词] 注氮; 温度场; 氧浓度场; 数值模拟

[中图分类号] TD752 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2018) 06-0006-06

Study of Simulation and Development of Goaf Nitrogen Injecting Software

WANG Yue-hong^{1,2}, WU Yi^{1,2}, ZHANG Jiu-ling^{1,2}, GUAN Ya-jie^{1,2}

(1. Mine Engineering School, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China;

2. Hebei Province Key Laboratory of Mine Development and Safety Technology, Tangshan 063009, China)

Abstract: In order to prevent coal spontaneous combustion in goaf, based on finite volume method, and mathematics model of goaf Nitrogen and oxygen injecting concentration field, temperature field were built, and also calculating system of goaf nitrogen injecting system was finished by VB language, and software was developed, and the oxidizing zone width was narrow down and advanced to working face direction, and dent mark of oxygen concentration decreased sharply appeared. In temperature field, after nitrogen injected, deep temperature difference of goaf was larger, and decreased from 70℃ to 40℃, the relationship between goaf temperature and depth appeared as direct proportion. After nitrogen injected, and temperature in depth of goaf decreased obviously, and the largest temperature appeared in depth of air return roadway. And studying results was verified by practical, and provided technology support for future coal seam consumption control.

Key words: nitrogen injecting; temperature field; oxygen concentration field; number simulation

由于采空区中存在的大量遗煤和适宜漏风环境为煤氧化创造了条件, 增大了自燃的危险性^[1]。而注氮作为防治遗煤自燃的有效措施之一, 它具有稀释采空区氧浓度、冷却遗煤、增大采空区压力、减少漏风量、延长自然发火期等优点, 近年来被广泛应用^[2-5]。

由于数值模拟成本低廉, 只需在计算机上进行模拟和数据处理, 有时可达到理想化克服现场的困难。国内外学者关于模拟采空区注氮技术的成果很多。在模拟漏风流场和温度场中, 李宗祥^[6-7]针对 Y 形通风的工作面, 综合各种传热方程, 并对模型参数及边界设计后进行注氮问题的数值模拟, 得到了各种气体 (瓦斯、CO、氧气等)、温度和漏风流的分布情况及变化规律, 并且计算出了注氮与工作面推进速度的配比关系。美国学者 Yuan 等^[8]根据

CFD 模型研究采空区漏风流场变化规律, 并通过研究结果完善现场通风技术, 控制灾害的发生。罗新荣^[9]采用 Fluent 软件建立物理模型和数学模型, 设置相应的参数, 并根据采空区渗透率和遗煤氧化范围编制自定义函数, 模拟不同抽采量和注氮形式对采空区温度场的影响规律。在关于注氮前后氧浓度的变化规律上, 刘玉良^[10-11]将理论和数值模拟结合对浅埋深煤层注氮技术进行研究, 比较了注氮前后“氧化带”的范围。澳大利亚学者 Ren^[12]利用软件模拟详细研究了瓦斯的运移规律和氧浓度分布情况, 并结合理论知识控制自然发火问题。唐冠楚^[13-15]在 CFD 模型下, 模拟不同的抽采方式与注氮技术相结合自燃危险区域的分布情况, 在瓦斯抽采率提高的同时防止采空区遗煤自燃的发生。

[收稿日期] 2018-05-29

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2018.06.002

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (51504077、51404086); 河北省自然科学基金资助项目 (E2016209056); 华北理工大学杰出青年基金 (jp201509, JQ201710)

[作者简介] 王月红 (1980-), 女, 河北唐县人, 博士, 副教授, 主要从事于煤化学、煤岩学以及矿山安全等方面工作。

[引用格式] 王月红, 吴 怡, 张九零, 等. 采空区注氮软件模拟及开发研究 [J]. 煤矿开采, 2018, 23 (6): 6-11, 64.

但是, 国内外均用流体动力学软件进行模拟, 不能更针对性地研究采空区注氮防火技术。笔者基于有限体积法, 利用 VB 语言编制注氮防火模拟系统, 通过 Tecplot 软件作为图显, 进行温度场和氧浓度场的模拟。利用编制的软件模拟采空区注氮, 减少了现场的大量实验, 应用于各种类型下的采空区注氮问题。

1 理论基础

在采煤工作持续进行中, 工作面向前推进, 相对区域也持续扩大, 因此选取一部分采空区作为研究对象, 引入动态坐标。在注入氮气后, 采空区气体压力、氧气浓度、温度均会产生影响。基于有限体积法建立数学模型, 利用数学语言对实际问题进行量化, 使指标体系可计算。

1.1 有限体积法

有限体积法 (FVM) 是将计算区域划分为一系列不重复的控制体积, 使每个网格点周围有一个控制体积; 将待解的微分方程对每一个控制体积积分, 然后对积分式进行离散化处理, 再导出离散化方程。

有限体积法在流体流动和传热数值计算领域被广泛应用, 与其他有限元和边界方法比较, 其基本思想简洁, 能够在物理意义上表示控制体的通量平衡, 建立的模型方程意义明确。因此, 将有限体积法应用到采空区注氮防火的模型构建上, 为解决矿井火灾易复燃、难扑灭等问题提供了有效支撑。

1.2 采空区注氮氧浓度场数学模型

根据质量守恒定律: 在单位时间内, 漏风风流通过任意封闭区域内氧气质量的变化量 (W_C) 主要由以下几个方面引出: 由于渗透风流中的氧气流出与流入任意封闭曲面之差 (W_1); 氧气消耗量 (W_2); 浓度差异引起的弥散进出任意封闭曲面的氧气之差 (W_3), 如公式 (1), (2), (3) 所示。

$$W_C = W_1 + W_2 + W_3 \quad (1)$$

$$W_1 = \iint_F \rho_{O_2} \vec{v} dS = \oint_{\Gamma} (\rho_{O_2} v_x dy - \rho_{O_2} v_y dx) \quad (2)$$

$$W_2 = \iint_F u(t) dS \quad (3)$$

因为在采空区存在气体的动力弥散现象, 所以氧气的扩散系数与风流速度大小成正比, 故 W_3 :

$$W_3 = -k_{O_2} \oint_{\Gamma} n v \left(\frac{\partial \rho_{O_2}^x}{\partial x} dy - \frac{\partial \rho_{O_2}^y}{\partial y} dx \right) \quad (4)$$

$$W_C = \iint_F \frac{\partial (n \rho_{O_2})}{\partial t} dS = \iint_F \left(\rho_{O_2} \frac{\partial n}{\partial t} dS + n \frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial t} dS \right) \quad (5)$$

即将式 (2), (3), (4) 以及 (5) 代入 (1) 得:

$$\oint_{\Gamma} (\rho_{O_2} v_x dy - \rho_{O_2} v_y dx) - k_{O_2} \oint_{\Gamma} n v \left(\frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial x} dy - \frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial y} dx \right) + \iint_F u(t) dS = \iint_F \left(\rho_{O_2} \frac{\partial n}{\partial t} dS + n \frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial t} dS \right) \quad (6)$$

在实际情况下, 氧气流动速率要大于采空区工作面的回采速度, 即单位时间内选取的微元 ΔS 内的孔隙率和氧气密度变化可以忽略不计, 即式 (6) 可变成:

$$\oint_{\Gamma} (\rho_{O_2} v_x dy - \rho_{O_2} v_y dx) - k_{O_2} \oint_{\Gamma} n v \left(\frac{\partial C_{O_2}}{\partial x} dy - \frac{\partial C_{O_2}}{\partial y} dx \right) + \iint_F u(t) dS = 0 \quad (7)$$

为了和 Fick 定律保持一致, 将 (7) 式中质量浓度改为摩尔浓度。

$$\oint_{\Gamma} (C_{O_2} v_x dy - C_{O_2} v_y dx) - k_{O_2} \oint_{\Gamma} n v \left(\frac{\partial C_{O_2}}{\partial x} dy - \frac{\partial C_{O_2}}{\partial y} dx \right) + \iint_F u(t) dS = 0 \quad (8)$$

式中, n 为有效孔隙度; ρ_{O_2} 为氧气的密度, kg/m^3 ; C_{O_2} 为氧气的浓度, mol/m^3 ; k_{O_2} 为氧气的扩散系数常数; v_x 为 x 方向气体渗流速度, m/s ; v_y 为 y 方向气体渗流速度, m/s ; v 为气体的渗流速度, m/s ; $u(t)$ 为松散煤体内的氧气消耗速度, $\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ 。

确定边界条件 $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ 后, 得到氧浓度场的数学模型, 如 (9) 所示。

$$\begin{cases} \oint_{\Gamma} (C_{O_2} v_x dy - C_{O_2} v_y dx) - n k_{O_2} \oint_{\Gamma} v \left(\frac{\partial C_{O_2}}{\partial x} dy - \frac{\partial C_{O_2}}{\partial y} dx \right) + \iint_F u(t) dS = 0 \\ C_{O_2}|_{\Gamma_1 \overline{\Gamma}} = C_{O_2}(x, y) |_{(x, y) \in \Gamma_1 \overline{\Gamma}} \\ \left. \frac{dC_{O_2}}{dy} \right|_{\Gamma_2, \Gamma_3} = 0 \\ \left. \frac{dC_{O_2}}{dx} \right|_{\Gamma_1 \perp, \Gamma_4} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $C_{O_2}(x, y)$ 为回采工作面连接的边界上的氧气浓度函数, mol/m^3 。

根据模型可以分析出氧浓度在注氮整个过程中的变化, 从而研究出注氮对采空区火灾的影响作用。

1.3 采空区注氮温度场数学模型

在采空区中, 除了岩石间导热的过程外, 还有气体与气体间互相导热, 它们导热的方式是有区别的, 除此之外, 固体间的导热还会受到气体的影响, 因此在采空区注氮模型中的温度场分为固体温度场和气体温度场。

1.3.1 固体温度场

在一定的时间内, 导入和导出冒落岩石的热量差 Q_{sc} 、冒落岩石氧化放热的热量差 Q_r 之和, 也就是进入控制体的热量, 应该与导出控制体的热量相

等,也就是冒落岩石及孔隙中气体的对流换热量 Q_d 和冒落岩石移动带出控制体的热量差 Q_v 之和。即为公式 (10) 所示。

$$Q_{sc} + Q_f = Q_d + Q_v \quad (10)$$

由傅里叶定律得知,由边界 Γ 流入曲面 F 全部热量 Q_{sc} :

$$Q_{sc} = \oint_F k \frac{\partial T}{\partial n} d\Gamma \quad (11)$$

式中, k 为渗透率, m^2 。

单位时间内控制体的氧化放热量为:

$$Q_f = \int_F q(t) dS \quad (12)$$

在松散煤体内同时存在对流换热和导热两种过程,这两种热量传递方式也相互影响,同时还受气体运动规律的影响,因此这是一个十分复杂的过程,利用牛顿冷却公式进行计算,如公式 (13) 所示。

$$Q_d = \int_F K_e S_n (t_s - t_g) dS = \int_F K_e a (t_s - t_g) dS \quad (13)$$

$$Q_v = \oint_{\Gamma} (1 - n) c_s \rho_s v_0 t_s dy \quad (14)$$

将式 (11), (12), (13), (14) 代入式 (10) 得:

$$\oint_{\Gamma} (q_x dy - q_y dx) + \int_F q(t) dS = \int_F K_e a (t_s - t_g) dS + \oint_{\Gamma} (1 - n) c_s \rho_s v_0 t_s dy \quad (15)$$

根据傅里叶定律可知:

$$\begin{cases} q_x = \lambda_y (1 - n) \frac{\partial t_s}{\partial x} \\ q_y = \lambda_y (1 - n) \frac{\partial t_s}{\partial y} \end{cases} \quad (16)$$

将式 (16) 代入 (15) 得:

$$\oint_{\Gamma} \lambda_y (1 - n) \left(\frac{\partial t_s}{\partial x} dy - \frac{\partial t_s}{\partial y} dx \right) + \int_F q(t) dS - \int_F K_e a (t_s - t_g) dS - \oint_{\Gamma} (1 - n) c_s \rho_s v_0 t_s dy = 0 \quad (17)$$

式中, λ_y 为采空区冒落岩石的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; t_s 为冒落岩石温度, K ; q_x 为沿 x 轴方向的热流量; q_y 为沿 y 轴方向的热流量; K_e 为对流换热系数, $J/(m^2 \cdot s \cdot K)$; S_n 为单元体内冒落岩石与气体对流换热的表面积, m^2 ; t_g 为气体温度, K ; t_s 为冒落岩石温度, K ; $q(t)$ 为单位时间单位体积内冒落岩石的放热量, $kJ/(m^3 \cdot s)$; ρ_s 为固体的密度, kg/m^3 ; c_s 为固体的比热容 $kJ/(kg \cdot K)$; a 为单元体的比表面积, $a = S_n / \Delta x \Delta y \Delta z$, L/m ; v_0 为工作面推进速度, m/s 。

即式 (17) 是移动坐标下采空区内冒落岩石

能量方程。

1.3.2 气体温度场

设有温度场 $Q_g(Q, t) = Q_g(x, y, t)$, 由能量守恒定律可知,单位时间内,汇入封闭曲线范围的气体热量 Q_{gc} ,同控制体体内固体对流散热量 Q_d 之和,应等于单元体内孔隙中气体内能的增加值 Q_h , 即:

$$Q_{gc} + Q_d = Q_h \quad (18)$$

由傅里叶定律得知,单位时间内曲面边界 Γ 流入曲面 F 全部热量是 Q_{gc} :

$$Q_{gc} = \oint_F k \frac{\partial T}{\partial n} d\Gamma \quad (19)$$

热量 Q_h 可表示为:

$$Q_h = \oint_{\Gamma} (c_g \rho_g v_x t_g dy - c_g \rho_g v_y t_g dx) = c_g \oint_{\Gamma} (\rho_g v_x t_g dy - \rho_g v_y t_g dx) \quad (20)$$

对流换热量 Q_d 可表示为:

$$Q_d = \int_F K_e a (t_s - t_g) dS \quad (21)$$

将式 (19), (20), (21) 代入 (18) 得:

$$\oint_{\Gamma} (q_x dy - q_y dx) - c_g \oint_{\Gamma} \rho_g t_g (v_x dy - v_y dx) + \int_F K_e a (t_s - t_g) dS = 0 \quad (22)$$

根据傅里叶定律可知:

$$\begin{cases} q_x = \lambda_y (1 - n) \frac{\partial t_g}{\partial x} \\ q_y = \lambda_y (1 - n) \frac{\partial t_g}{\partial y} \end{cases} \quad (23)$$

将 (23) 代入式 (22) 得:

$$\oint_{\Gamma} \lambda_y n \left(\frac{\partial t_g}{\partial x} dy - \frac{\partial t_g}{\partial y} dx \right) - c_g \oint_{\Gamma} \rho_g t_g (v_x dy - v_y dx) + \int_F K_e a (t_s - t_g) dS = 0 \quad (24)$$

式中, λ_g 为采空区气体导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; K_e 为对流换热系数, $J/(m^2 \cdot s \cdot ^\circ C)$; S_n 为单元体内冒落岩石与气体对流换热的表面积, m^2 ; t_g 为气体温度, $^\circ C$; t_s 为固体温度, $^\circ C$; a 为单元体的比表面积, $a = S_n / \Delta x \Delta y \Delta z$, L/m ; v_x, v_y 为气流沿 x 轴、 y 轴方向的分量, m/s ; ρ_g 为气体的密度, kg/m^3 ; c_g 为气体的比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

式 (24) 是移动坐标下采空区内气体温度场能量方程。

2 软件开发

2.1 软件界面

图形显示模块的任务是把整个模拟过程处理存储的数据用图形显示出来,具有一个功能齐全的图形显示界面是有限体积软件中最基本的一个要求。对于大多数的用户而言,图形显示功能是至关重要的,因为图形显示能够有效地减小大量数据结构的

堆积，进而减小了结构计算的错误。本设计软件图形显示模块分为 3 部分：登陆系统；参数输入界面；结果汇总显示。

显示界面是 Tecplot10.0 作为绘图以及数据分析情况下通用软件，该软件作为图形显示的优点是易学易用，界面友好，能够马上读入 *.cas、*.dat 文件等。因此基于 Tecplot 软件的这些优点，使其作为该软件的图形显示模块效果是非常可观的，而且该软件较成熟，解决了不能准确地处理数据的弊端。

2.2 软件功能

该软件的开发，不仅对采空区自然发火防治的研究起到了极大的作用，更是对注氮防火这一灭火技术有了更深入的研究。该软件的开发可应用到实际的生产中，通过各煤矿的实际情况，解算出注氮的最佳位置、最佳流量、最佳个数等实质性问题；还可计算采空区注氮条件下“三场”（氧浓度场、流场、温度场）的分布情况；避免了实际操作困难，取而代之的是一次次的计算机上的操作，相对比人工操作精确而且可循环，试验性强，计算精度高，速度快，对煤矿解决火灾这个难题起到了极大的帮助。

3 数值模拟

3.1 网格划分

首先通过计算一个控制体，达到计算出构成采空区工作面所有单元的相关参数。为了清楚地表示出网格划分的方法，用图 1 所示 MNPQ 代表中心体积法中的矩形网格，四边形 abcd 表示选取的控制体。沿 ab 方向为采空区深度，沿 ad 方向为工作面方向，根据采空区自然发火物理模型 ab 方向为采空区的进风巷，dc 为回风巷，在采空区中“两道两线”处为自燃易发部位，因此在对控制体 abcd 进行网格剖分时在自燃易发部位处的网格加密。采空区其余工作面部位采取疏密不一的网格线进行剖分，为了使得绘制的网格标准化和规范化，网格之间的距离引入数学理论中的等比数列且系数大于 1，如图 2 所示。

然后在采空区中注入氮气，选取一个注氮点，假设在该点注入氮气，氮气进入采空区后会在该点向四周扩散，划分了如图 3 所示的第二层网格。如图所示坐标为 (e, f) 的点的氮气含量系数为 $(e^2 + f^2)^{1/2}$ ，用 DI 表示注入的氮气流，则该点 G 的氮气含量为 $DI_G = DI \times (e^2 + f^2)^{1/2}$ 。同理，其余点的氮气流也可据此求出，这样就得出采空区内所有点

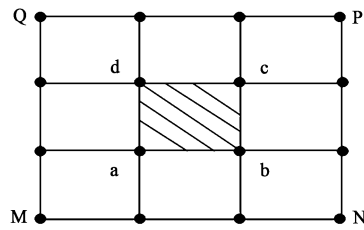


图 1 有限体积法矩形网格

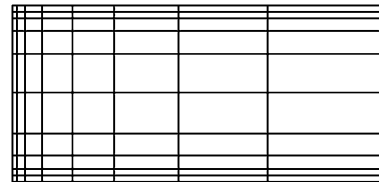


图 2 控制体网格划分

的氮气流。

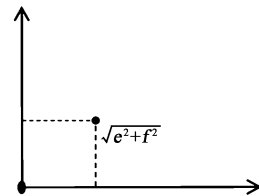


图 3 注氮含量计算示意

通过将两个网格叠加之后，从而进行模型的数值计算。由 Tecplot 作为图显得到图 4 的网格划分形式。

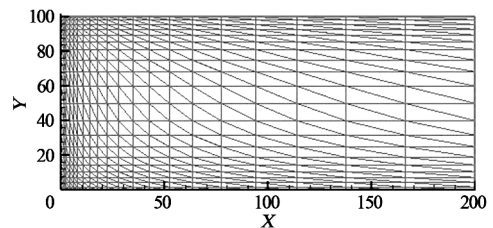


图 4 网格划分

3.2 参数设置

在林南仓煤矿井下采集具有代表性的煤样进行工业分析、元素分析等基础实验，从而确定采空区注氮软件开发基础参数的设定，如表 1 所示。

表 1 模型基础参数

参数	数值
煤的密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1400
煤的比热 / $(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	1200
顶板密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1410
顶板比热 / $(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	1200
上隅角绝对气压 / Pa	101430
工作面通风阻力 / Pa	15

由采空区自然发火原理中的煤氧复合理论得出，空气中的氧气与煤的表面结合后会发生大量的化学反应，并释放大量的热量，同时该过程更会加

快煤与氧气的反应进程,使得火灾或爆炸迅速发生。因此,针对这一理论知识,通过升温氧化实验,确定煤氧化放热参数,如表 2 所示。

表 2 煤氧化放热参数

参数	数值
临界温度前耗氧速度系数	0.277
临界温度后耗氧速度系数	1.920
临界温度前放热强度系数	18.6108
临界温度后放热强度系数	142.3156
进风流温度/℃	25
回风流温度/℃	28
氮气注入量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	20

3.3 模拟结果

3.3.1 氧浓度场

对比未注氮(如图 5(a))和注氮(如图 6(a))的氧浓度图可知,注氮使氧化带变窄,窒息带变宽,且氧化带向工作面方向推进。因为随着漏风气流流入采空区中,氧气持续向深部扩散,但氮气的注入不断稀释氧浓度,使氧浓度下降。且温度在注氮后逐渐降低,减轻了热量积聚放热量降低,使得耗氧速率减小,氧化带宽度则变窄。

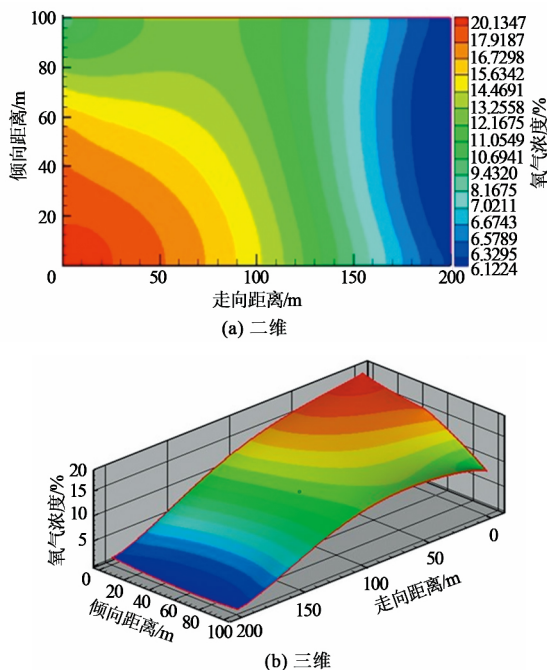


图 5 未注氮氧浓度模拟

对比未注氮和注氮后的氧浓度场三维图,发现两者的氧浓度均是逐渐降低的,但氧浓度变化趋势则由注氮前的凸形变为注氮后的凹形。观察图 5(b)和图 6(b)可知,三维图中反曲线的凸率逐渐减小,说明随着距回风巷距离的增大,氧浓度改变的速率逐渐减小。证明了未注氮时在进风巷周围由于漏风流将氧气带入采空区深部,而到达回风巷

时,由于逆风的作用,使得氧气浓度的变化不再明显;而注氮后,靠近进风巷的位置处氧浓度随深度的改变呈凹形变化,且随着与进风巷距离的加大,凹率逐渐减小。

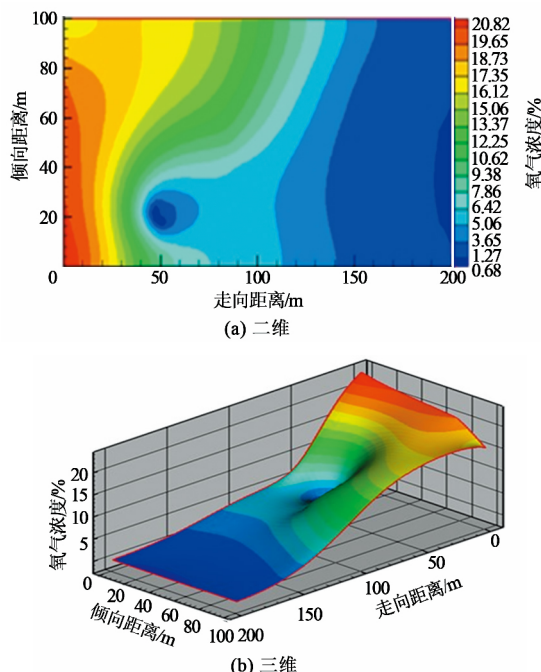


图 6 注氮后氧浓度场模拟

3.3.2 温度场

对比未注氮(如图 7(a))和注氮(如图 8(a))二维图的温度场可知,工作面附近的温度较低,且注氮前后的温度差只有 2°C ,说明注氮前后进风巷中与漏风流的温度相接近。但随着风流向采空区深部,低温气体与采空区深部的冒落岩石及煤体进行热量交换,温度急剧降低,因此采空区深部的温度差较大。注氮前的最高温度为 70°C ,注氮后的最高温度仅为 40°C ,温差达到了 30°C 左右。且注氮前后采空区温度与深度呈正比例关系,采空区越深部温度越高。注氮后进风巷附近的温度有明显的降低,而回风巷周围的温度较总体有明显的降低,但与注氮前相比较,高温区域由注氮前的采空区深部位置变为回风巷部位。由于注入氮气后,氮气被风流带入采空区深部,发生热传导降低原有遗煤温度,热量则积聚到回风巷;又因回风巷处的风量较小,热量不易被带出采空区,导致回风巷深部位置温度最高。

图 7(b)(注氮前)与 8(b)(注氮后)三维图对比发现,不仅注氮与未注氮最高点温度不同,且在进风侧附近,注氮后的温度随着采空区的深度的增加缓慢上升,而在回风侧附近,上升速率

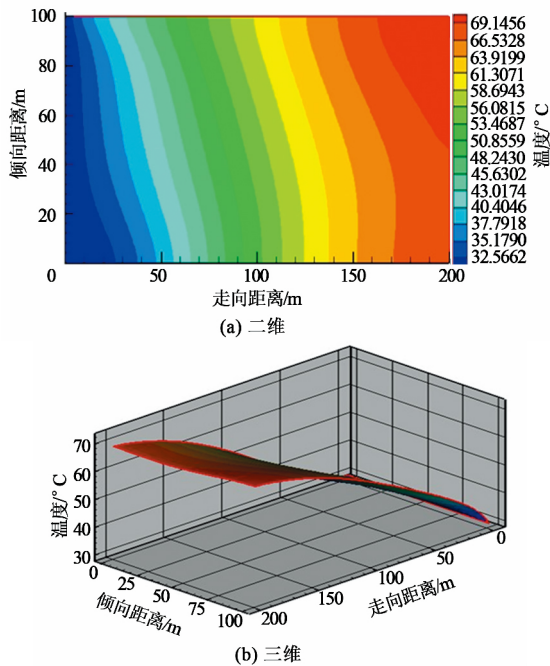


图7 采空区未注氮温度场模拟

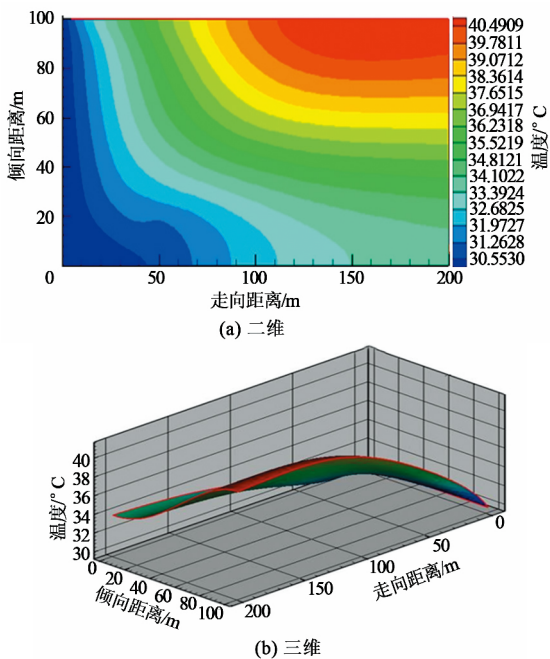


图8 采空区注氮后温度场模拟

较大。因为氮气进入采空区后，由于氮气的低温降低了采空区内遗煤温度上升的速率，而在回风巷附近，由于逆风的作用，氮气的温度较低，所以大量的热量积聚在上隅角的位置处，使得该处的温度很高。

3.4 工程应用

根据林南仓煤矿的技术条件及生产能力确定相应的注氮参数，矿井下通常运用埋管方式进行防火，沿回采工作面进风巷巷帮铺设管路，伴随着工作面推进，管段注氮口会逐渐伸入深部，注氮口位

置开始进入氧化自燃带时进行注氮，每隔一段步距重新铺设一条管路，在注氮的过程中采用封闭式注氮，即利用密闭墙上的注氮管向采空区中注入氮气。进行现场注氮后发现温度和氧气浓度明显降低，林南仓煤矿在正常生产的条件下是不易发生自燃的，因此注氮达到了相应的效果，由此说明，该软件的模拟结果切实可行，为日后采空区注氮技术研究起到了很大支撑作用。

4 结 论

(1) 基于有限体积法，建立采空区注氮“氧浓度场”和“温度场”数学模型。并利用VB语言编制注氮防火模拟系统，通过Tecplot软件作为图显，开发了采空区注氮防火软件。可运用到煤矿实际生产中，并有效解决煤矿火灾问题。

(2) 根据模拟得到的氧浓度场，发现注氮前后氧化带宽度变窄，并且向工作面方向推进，窒息带变宽。氧浓度变化曲线由凸形变为凹形。随着回风巷距离的增大，氧浓度变化速率越来越小。

(3) 在温度场中，注氮前后工作面附近的温度差仅 2°C ，而采空区深部的温度差为 30°C ，且采空区温度与深度呈正比例关系。注氮后，进风巷附近温度明显降低，而回风巷周围温度较总体明显下降，但与注氮前比较高温区域由深部位置变为回风巷位置。

[参考文献]

- [1] 徐会军, 刘江, 徐金梅. 浅埋薄基岩厚煤层综放工作面采空区漏风数值模拟[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 435-441.
- [2] 肖蕾, 郭玉东, 张平银. 注氮防火技术在煤矿中的应用[J]. 宁夏工程技术, 2009, 8(1): 19-23.
- [3] 温伟. 大黄山矿采空区自燃“三带”数值模拟及注氮防治研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [4] 高海明. 注氮防火技术在综采工作面回采期间的应用[J]. 能源与节能, 2016, 3(5): 138-141.
- [5] 王月红, 关雅洁, 张九零, 等. 多参数遗煤耗氧速度耦合模型研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(1): 98-102.
- [6] 李宗翔, 李海洋, 贾进章. Y形通风采空区注氮防火的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2005, 30(5): 51-55.
- [7] 朱红青, 刘鹏飞, 刘星魁, 等. 采空区注氮过程中自燃带范围与温度变化的数值模拟[J]. 湖南科技大学学报, 2012, 27(1): 1-6.
- [8] YUAN L, SMITH A C, BRUNE J F. Computational fluid dynamics study on the ventilation flow paths in longwallgobs[J]. American Mine Ventilation, 2006, 12(1): 32-36.

(下转 64 页)

衡拱的巷道有效跨度^[12-13]为:

$$\begin{cases} a_1 = a + \frac{h}{2} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \\ a_2 = a + h \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \end{cases} \quad (30)$$

式中, a 为巷道半宽, m; a_1 为隐形平衡拱半跨度, m; a_2 为扩展隐形平衡拱半跨度, m; h 为巷道高度, m。

得到巷道有效跨度的基础上, 基于上述分析过程可得在垂直地层荷载和水平构造应力联合作用下层状顶板的隐形平衡拱和扩展隐形平衡拱形态及矢高, 通过公式 (28) 进而可得支护设计时锚索的长度。限于篇幅, 在此不再赘述。

4 结 论

通过分析普氏平衡拱理论对于层状顶板变形研究存在的不足, 考虑巷道两帮稳定状态与平衡拱形态及矢高的关系, 对上覆地层压力和水平构造应力共同作用下露井联采中井工矿巷道层状顶板变形破坏后的平衡拱形态及矢高进行深入研究, 考虑到理论计算与实际有一定区别, 下一步将结合实际开展相关研究, 该论文成果只是理论分析。

主要结论有:

(1) 露井联采中井工矿巷道层状顶板岩体在垂直地层荷载和水平构造应力的综合作用下发生挠曲变形后将不断冒落而形成初始平衡拱。若不及时支护, 层状顶板的初始平衡拱不断脱落, 直至冒落成高形态极限自然平衡拱。

(2) 露井联采中井工矿巷道层状顶板的平衡拱矢高与水平侧压力和巷道跨度密切相关。当 $\lambda < 1$ 时, 地应力起主要作用, 层状顶板上部一定范围内岩层在垂直地层荷载下出现较大塑性破坏范围, 形成竖直方向的椭圆状平衡拱; 相反, 当 $\lambda > 1$ 时, 水平构造应力起主要作用, 层状顶板上部一定范围

内的岩层在垂直地层荷载下出现较小塑性破坏范围, 形成水平方向的椭圆状平衡拱。

(3) 当巷道帮部为较软弱的岩体时, 帮部易发生失稳, 层状顶板自然平衡拱将进一步演变为隐形平衡拱和扩展隐形平衡拱。在得到巷道有效跨度的基础上, 可分析在垂直地层荷载和水平构造应力联合作用下层状顶板的隐形平衡拱和扩展隐形平衡拱的形态及矢高, 进而可得支护设计时锚索的长度。

【参考文献】

- [1] 徐志远. 平朔矿区露井联采技术综述 [J]. 煤炭工程, 2015, 47 (7): 11-14.
- [2] 邓奇根, 王 燕, 刘明举, 等. 2001~2013 年全国煤矿事故统计分析及其启示 [J]. 煤炭技术, 2014, 33 (9): 73-75.
- [3] 康红普. 巷道围岩的承载圈分析 [J]. 岩土力学, 1996, 17 (4): 84-88.
- [4] 康红普. 巷道围岩的关键圈理论 [J]. 力学与实践, 1997, 19 (1): 34-36.
- [5] 何满朝, 钱七虎. 深部岩体力学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 苏学贵. 特厚复合顶板巷道支护结构与围岩稳定的耦合控制研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [7] 孙训方. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [8] 于远祥. 矩形巷道围岩变形破坏机理及在王村矿的应用研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [9] Mehdi Amini, Abbas Majidi, Mohammad Amin Veshadi. Stability Analysis of Rock Slopes Against Block-Flexure Toppling Failure [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, 45 (4): 519-532.
- [10] 赵彭年. 考虑水平方向原始应力时巷道顶板上自然平衡拱的形态 [J]. 中国矿业学院学报, 1978: 56-63.
- [11] 谷拴成, 史向东, 王恩波. 层状岩体中矩形巷道顶板破坏高度 [J]. 煤矿安全, 2014, 45 (12): 61-63, 67.
- [12] Yan H, Hu B, Xu T. Study on the Supporting and Repairing Technologies for Difficult Roadways with Large Deformation in Coal Mines [J]. Energy Procedia, 2012 (14): 1653-1658.
- [13] 惠兴田. 矿山建设工程 [M]. 西安: 西安地图出版社, 2010. [责任编辑: 施红霞]
- (3): 241-254.
- [13] 罗新荣, 唐冠楚, 李亚伟, 等. CFD 模型下采空区瓦斯抽采与注氮防火设计 [J]. 中国安全科学学报, 2016, 26 (6): 69-74.
- [14] 张东坡. 易自燃特厚煤层综放面采空区注氮防火技术研究与应用 [D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [15] 王月红. 移动坐标下采空区自然发火的有限体积法模拟研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2009.
- [16] 杨小玉, 李 阳, 赵世龙, 等. FLUENT 软件在传热分析中的应用 [J]. 工业加热, 2018, 47 (1): 1-4. [责任编辑: 施红霞]

(上接 11 页)

- [9] 罗新荣, 李亚伟, 丁 振. 地面钻井抽采下的高瓦斯采空区注氮防火研究 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2016, 26 (3): 244-250.
- [10] 刘玉良, 彭宝山, 蒙文军, 等. 浅埋深煤层采空区注氮防火技术 [J]. 煤矿安全, 2017, 48 (5): 73-76.
- [11] 史 磊. 注氮条件下采空区氧气浓度分布的数值模拟研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- [12] REN TIING, WANG ZHONGWEI, GAREME COOPER. CFD modeling of ventilation and dust flow behavior above an underground bin and the design of an innovative dust mitigation system [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 41