

综采面邻空煤柱漏风微循环现象研究

朱帅虎¹,王金宝²

(1.冀中能源集团峰峰集团梧桐庄矿,河北邯郸056500;2.冀中能源集团峰峰集团通防部,河北邯郸056500)

摘要:针对综采面“采场-邻空煤柱-采空区”间的漏风微循环现象,利用MATLAB中的PDE工具进行二维非线性渗流的数值模拟,同时分析研究漏风微循环现象形成的原因,以及漏风微循环对煤炭自燃的影响。研究表明,“采场-邻空煤柱-采空区”间的漏风微循环可以导致采空区内相对压力和气体成分的周期性变化,即“采空区喘息”现象。

关键词:邻空煤柱;漏风微循环;采空区喘息;防灭火

中图分类号:TD713

文献标识码:A

Research on air leakage micro-circulation in coal pillar near goaf for comprehensive mechanical mining face

ZHU Shuai-hu¹, WANG Jin-bao²

(1. Wutongzhuang Coal Mine, Jizhong Energy Fengfeng Group Co. Ltd, Hebei Handan, 056500, China;

2. The Department of Ventilation and Fire Prevention, Jizhong Energy Fengfeng Group Co. Ltd., Hebei Handan, 056500, China)

Abstract: As a two dimensional nonlinear transfusion model, the “stope-neighboring pillars-goaf” micro-circulation phenomenon was numerically simulated with PDE tools in MATLAB. The formation of the phenomenon and its influence on coal spontaneous combustion was also studied. The results show that the “stope-neighboring pillars-goaf” micro-circulation causes the periodic variation of relative pressure and gas composition in mining face goaf, which is called “goaf gasp”. The research gives a theoretical significance for large-area fire prevention and extinguishing.

Key words: neighboring pillar, air leakage micro-circulation, goaf gasp, fire prevention and extinguishing

采空区是煤炭自燃的重要易发地点。综采面与相邻采空区间的煤柱受采动应力的作用而被压酥破碎时,在采场漏风风压的作用下,一部分风流就会由综采面后部采空区经破碎煤柱漏入相邻已采空区内,这种发生在“采场-邻空煤柱-采空区”间的漏风现象通常被称为漏风微循环。李宗翔等^[1]研究得出了煤柱内漏风流态和氧浓度分布的动态变化过程。郭兴明等^[2]通过研究得出巷道松散煤体内的漏风流态为层流,其漏风动力主要由风流沿巷道的压力降、巷道煤柱两侧的压力差、热力风压、巷道起伏引起的动压差和巷道风流的位压差构成。朱红青等^[3]分析了巷道煤柱自燃的特点,并采用数值模拟研究了巷道煤柱自然火灾

火源点及区域温度场分布。上述研究成果虽然得出了煤柱内漏风流态及其对煤体自燃的影响,但并未将采场、邻空煤柱及采空区作为一个整体进行漏风微循环的研究。本文结合梧桐庄矿综采面的生产实际,利用MATLAB中的PDE工具对发生“采场-邻空煤柱-采空区”之间的漏风微循环现象进行了二维非线性渗流的数值模拟,同时研究分析了漏风微循环现象形成的原因以及漏风微循环对煤炭自燃的影响。

1 梧桐庄矿182401综采面概况

梧桐庄矿于2003年10月投产,矿井原设计生产能力1.2Mt/a,经过2005年扩建后,矿井生

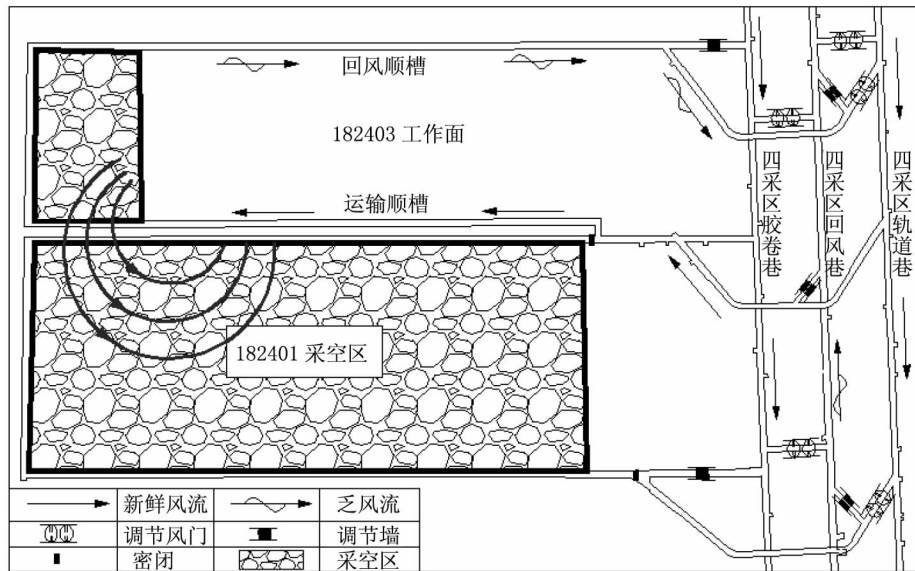


图 1 漏风微循环示意图

Fig.1 Air leakage micro-circulation in coal pillar

产能力为 2.1 Mt/a。其中可采煤层为 2#层煤,平均厚度 3.18 m。矿井在井下四采区布置有 182401 采面。该采面回采结束后,梧桐庄矿又在 182401 已采空区附近布置了 182403 邻空综采面。两区域以 6.2 m 宽的顺槽煤柱相间隔。

182403 工作面回采期间,一部分漏风风流会由综采面运输顺槽、综采面后部采空区,经压酥的邻空煤柱进入 182401 已采空区,形成“采场-邻空煤柱-采空区”间的漏风微循环,如图 1 所示。

2 漏风微循环数值模型的建立

漏风流在破碎煤柱内的流动可以视为气体在多空隙介质中的稳定渗流流动,可以用多空隙介质流体力学的理论来进行邻空煤柱漏风微循环风流结构的研究。对于流速较低的漏风流来说,“采场-邻空煤柱-采空区”间碎煤多空介质的漏风流可认为服从达西定律;而综采面顺槽内部风流速度较大,应为紊流流动,考虑到漏风压力与遗煤氧化升温引起的热风压作用,“采场-邻空煤柱-采空区”间的漏风场可以用 Bachmat^[1]提出的非线性渗流方程来描述:

$$E \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{v}{g} \left(1 + \frac{v\beta d}{nv}\right) V \quad (1)$$

若令 $a = \frac{v}{eg}$, $b = \frac{\beta d}{egn}$, 则方程(1)变为:

$$-\frac{\partial p}{\partial n} = (a + bV) V \quad (2)$$

式中, p 为风流压力; E 为多孔介质渗透率张量, m^2 ; n 为方向向量; g 为重力加速度, 9.81 m/s^2 ; V 为风流渗流速度, m/s ; β 为孔隙率; d 为平均调和粒径; v 为运动粘性系数, 对采空区风流, 取 $14.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; β 为介质颗粒形状系数; e 为多孔介质标量渗透率, m^2 。

当水平方向的风速与层面漏风相对很小, 把层面漏风简化为有限个源(或汇)后, 将“采场-邻空煤柱-采空区”风流运动视为二维平面渗流^[2-4]。则公式(2)可改写为:

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial x} i + \frac{\partial p}{\partial y} j\right) = (a + bV) (V_x i + V_x i + V_y j) \quad (3)$$

或者:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x} = (a + bV) V_x \\ -\frac{\partial p}{\partial y} = (a + bV) V_y \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)中, 第一个方程两边对 y 求偏导数, 第二个方程两边对 x 求偏导数后再相减, 得:

$$\frac{\partial}{\partial x} [(a + bV) V_y] - \frac{\partial}{\partial y} [(a + bV) V_x] = 0 \quad (5)$$

对于二维平面不可压缩渗流, 其流量应该守恒, 因此满足方程:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

引入流函数 ψ , 有:

$$V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, V_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(5),得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(a + b \sqrt{(\frac{\partial \Psi}{\partial X})^2 + (\frac{\partial \Psi}{\partial y})^2}) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(a + b \sqrt{(\frac{\partial \Psi}{\partial X})^2 + (\frac{\partial \Psi}{\partial y})^2}) \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right] = 0 \quad (8)$$

令 $c(\psi) = - \left[(a + b \sqrt{(\frac{\partial \Psi}{\partial X})^2 + (\frac{\partial \Psi}{\partial y})^2}) \right]$, 上式化为:

$$-\nabla(c(\psi) \cdot \nabla \psi) = 0 \quad (9)$$

公式(9)即为二维平面非线性渗流流函数微分方程。

对于实际问题,上述方程应给出定解条件:一类边界条件,已知边界流函数: $\psi|_r = \psi(x, y)$;二类边界条件,已知边界上流函数导数: $\frac{\partial \Psi}{\partial n}|_r = \psi(x, y)$;第三类边界条件: $(\frac{\partial}{\partial n} + k\psi)|_r = \psi(x, y)$ 。

采用有限元解法求解上述方程即可得到各点处的流函数 ψ 值,把 ψ 值相同的点用光滑的曲线连接起来,就得到漏风风流的流线。

3 漏风微循环数值模拟分析

MATLAB 中的偏微分方程工具箱(PDE Toolbox)为研究和求解空间二维偏微分方程问题提供了一个强大而灵活的环境^[5]。此处即采用 PDE 求解该二维平面非线性渗流问题。

分析可知,公式(9)为非线性椭圆型方程:

$$-\nabla(c(\psi) \cdot \nabla \psi) + a(\psi)\psi = f(\psi) \quad (10)$$

其中, $a(\psi) f(\psi) = 0$ 。求解时选择非线性求解器求解。

两类边界条件设置: Dirichlet 条件, $h_\psi = r$; Neumann 条件, $n \cdot (c(\psi) \nabla \psi) + 9\psi = g$ 。

3.1 计算区域创建及网格划分

根据实际漏风情况,将计算区域划分为 182403 综采面后部采空区,煤柱和已采空区三部分。在 PDE 中以角点方式或中心方式绘制三个矩形区域,如图 2 所示。

其中,R1 为 182403 综采面后部采空区,R2 为间隔煤柱,R3 为 182401 已采空区。

对计算区域进行三角形剖分,如图 3 所示。

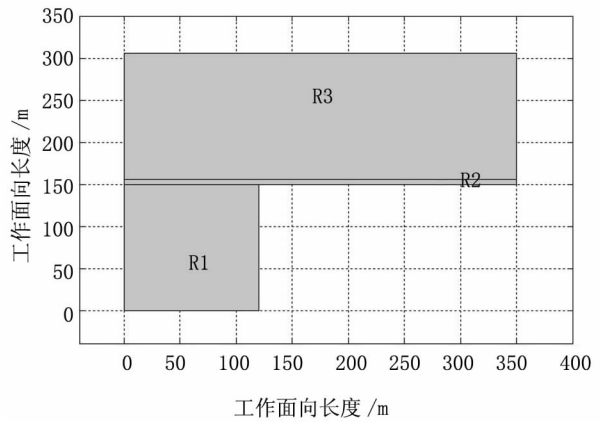


图2 计算区域划分图

Fig.2 Numerical simulation area

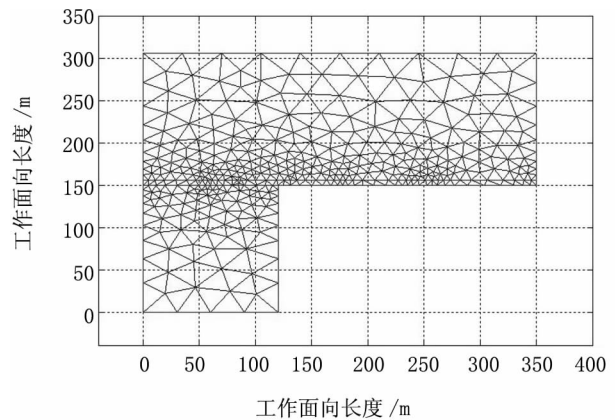


图3 计算区域三角形剖分图

Fig.3 The triangle subdivision of simulation area

3.2 数值模拟结果

选择非线性求解器求解,绘制流函数等值线。模拟结果如图 4 所示。

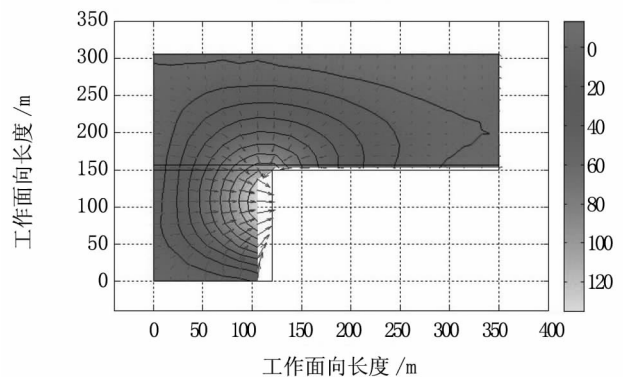


图4 漏风流场模拟结果图

Fig.4 The simulation result of air leakage micro-circulation

图中黑色曲线即为流函数等值线,也就是流线。流线清晰得显示了漏风微循环的漏风流场中风流的分布情况。

4 漏风微循环产生的原因及其对煤炭自燃的影响

4.1 漏风微循环形成的原因

邻空综采面与已采空区间的煤柱在邻空面回采过程中,受采动应力影响遭到破坏,部分地段已被压酥,在综采面运输顺槽与已采空区之间形成了漏风通道,通过该通道产生持续的漏风作用,形成了漏风微循环现象。

生产综采面通风系统压力分布的波动作用:矿井提升设备占据部分井筒空间,由于粘性以及气流对井巷壁面和提升设备表面的摩擦作用,使得被排开的空气不能像在空旷的地方那样及时顺畅地沿提升设备周围流动,矿井提升设备的频繁升降运动使井筒内产生较大的活塞风流和瞬态变化的井巷压力,引发相应的空气动力学效应,从而导致通风系统风压和风流的频繁变化,造成风流的脉动。

季节性大气压力波动对矿井通风系统绝对静压的影响:冬季气压要比夏季气压高,大气压力降低时,采空区内气体压力相对增高,体积膨胀,采空区内气体就会通过邻空煤柱裂隙漏入综采面;反之,风流则通过漏风通道进入采空区。

4.2 漏风微循环对煤炭自燃的影响

(1) 采空区漏风

邻空煤柱遭到破坏后,生产面后部采空区、邻空顺槽煤柱及邻近已采空区三者之间形成了连通漏风通路,呈现出极为复杂的漏风网络。综采面运输顺槽内的新鲜风流进入采空区为遗煤氧化供氧,促进氧化过程的发展,当漏风条件适宜、蓄热达到自燃的程度时就可能引发遗煤自燃发火。在综采面的生产过程中,采场风流经过后部采空区、邻空压酥煤柱向邻近已采空区内部的漏风相当严重,当该区域与综采面后部采空区“三带”连通时,会给采空区漏风管理和控制造成很大困难。

(2) 采空区喘息现象

“采场后部采空区-邻空煤柱-已采空区”内

部受地表大气压、主扇不稳定运行、遗煤氧化热压及漏风微循环的影响,内部漏风总量、相对压力和气体成分则会出现一种近似于周期性变化的喘息现象,称为“采空区喘息现象”。

梧桐庄矿在生产过程中通过现场监测,获得了182401工作面采空区发生“采空区喘息现象”时的监测数据,如表1和图5所示。

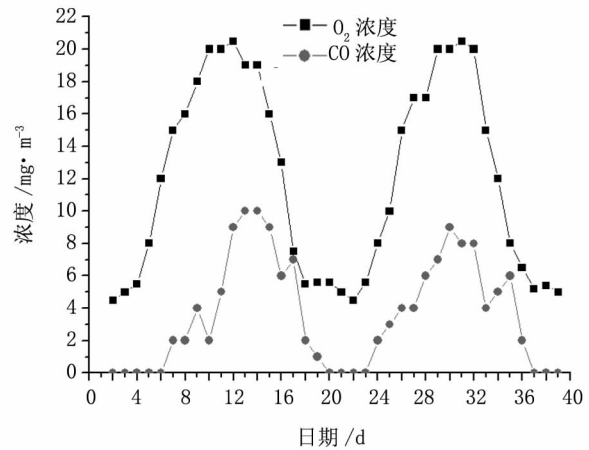


图5 182401采空区2~3月份气体成分变化情况
Fig.5 The variation trend of gas composition in 182401 mining face goaf from February to March

采空区出现这种“喘息现象”的原因主要有:采空区有自燃倾向性的遗煤与漏风流中的O₂发生氧化反应后温度升高,致使空气密度减小、体积膨胀,促使采空区气压向压力增大的正压方向发展^[6],当采空区空气压力大于巷道内通风压力时,采空区气体便向井巷中外漏,即“呼气”;另一方面,随着采空区丢煤氧化过程的继续,O₂浓度迅速减少,当采空区漏风量不能满足采空区丢煤氧化所需的O₂含量时,氧化过程停止,温度下降,压力下降,采空区气压向负压状态变化,最终低于井巷通风压力,巷道内空气通过漏风风道向采空区缓慢漏入,即“吸气”,从而使采空区O₂浓度升高,丢煤又开始新的氧化过程,即出现新的丢煤氧化周期。如此周期性的变化,就像人在呼吸一样,故称为“采空区喘息现象”;另外,当地表大气压力发生周期性变化,以及主扇不稳定运行的时候,也会

表1 182401采空区2~3月份相对压力变化情况(-表示采空区出气,+表示进气)

Tab.1 The relative pressure variation of 182401 mining face goaf from February to March

日期	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
压力	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
日期	21	22	23	24	26	27	28	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
压力	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-

(下转第103)

算得出各参数权重系数:孔隙结构类型为 0.55,孔隙大小类型为 0.31,相对压力为 0.10,气体吸附量为 0.67,吸附回线类型为 0.42。依据评价模型公式:

$$S = ay_1 + by_2 + cy_3 + dy_4 + ey_5$$

式中: S 为最终评价结果; a 为孔隙结构类型权重系数; b 为孔隙大小类型权重系数; c 为相对压力权重系数; d 为气体吸附量的权重系数; e 为吸附回线类型的权重系数。

根据公式计算可得最终评价结果:样品 4 > 样品 2。综上所述,四个样品的孔隙发育从优到差依次为:样品 3 > 样品 4 > 样品 2 > 样品 1。将评价结果与实际测量的孔隙结构参数对比发现,此标准的定性评价效果较好。

5 结论

1) 低温氮吸附过程中氮气分子在孔隙中依次发生单分子层吸附、多分子层吸附、毛细管凝聚现象,且依次发生在较大孔隙、次较大孔隙中;脱附过程与之相反。

2) 孔隙结构类型和气体吸附量是评价页岩储层孔隙结构的重要指标,孔隙大小、相对压力和吸附回线类型等次之。

参考文献:

- [1] 田华,张水昌,柳少波,等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J]. 石油学报,2012,33(3): 419-427.
- [2] 郭旭升,李宇平,刘若冰,等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业,2014,34(6):9-16.
- [3] 谢启红,邵先杰,霍梦颖,等. 生物礁成礁条件、成礁模

式及与油气关系[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2015,32(4):94-97.

- [4] 张创,孙卫,高辉,等. 基于铸体薄片资料的砂岩储层孔隙度演化定量计算方法—以鄂尔多斯盆地环江地区长 8 储层为例[J]. 沉积学报,2014,32(2):365-375.
- [5] 杨峰,宁正福,孔德涛,等. 高压压汞法和氮气吸附法分析页岩孔隙结构[J]. 天然气地球科学,2013,24(3):450-455.
- [6] 张陈珺,郭平,熊健. 川南龙马溪组页岩孔隙分形特征[J]. 复杂油气藏,2014,7(4):15-18.
- [7] 薛华庆,胥蕊娜,姜培学,等. 岩石微观结构 CT 扫描表征技术研究[J]. 力学学报,2015,47(6):1073-1078.
- [8] 张腾,张烈辉,唐洪明,等. 页岩孔隙整合化表征方法—以四川盆地志留统龙马溪组为例[J]. 天然气工业,2015,35(12):19-26.
- [9] GREGG S J, SING K S W. Adsorption surface area and porosity[M]. 2nd ed. London: Academic Press, 1982.
- [10] 陈萍,唐修义. 低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究[J]. 煤炭学报,2001,26(5):552-556.
- [11] 汪政德,张茂林,梅海燕,等. 毛细凝聚和吸附—脱附回路的物理化学解释[J]. 新疆石油地质,2002,23(3):233-235.
- [12] 杨峰,宁正福,张世栋,等. 基于氮气吸附实验的页岩孔隙结构表征[J]. 天然气工业,2013,33(4):135-140.
- [13] 邵龙义,刘磊,文怀军,等. 柴北缘盆地 YQ-1 井中侏罗统石门沟组泥页岩纳米孔隙特征及影响因素[J]. 地学前缘,2016,23(1):164-173.
- [14] 谢启红,邵先杰,战南,等. 注 CO₂ 驱替煤层气过程的影响因素分析[J]. 辽宁石油化工大学学报,2015,35(6):38-41.

(责任编辑 王利君)

(上接第 88 页)造成“采空区喘息现象”的发生。

为防止发生“采空区喘息现象”,必须做好堵漏风与采场均压调控方面的技术工作,从根本上防止因“采空区喘息”而引发的遗煤自燃发火现象。

5 结论

邻空煤柱受采动应力影响遭到破坏,在综采面和采空区之间形成了漏风通道。部分风流由综采面经破碎煤柱进入采空区,形成了“采场—邻空煤柱—采空区”间的漏风微循环。漏风微循环会引起“采空区喘息”现象并加剧遗煤自燃,给采空区漏风管理和防灭火工作带来很大困难。

参考文献:

- [1] JACOB BEAR. Dynamics of fluids in porous media[M]. American: Elsevier Publishing Company, 1972.
- [2] 丁广骧,邸志乾. 二维采空区非线性渗流函数方程及有限元解法[J]. 煤炭学报,1993,18(2):19-25.
- [3] 李宗翔. 采空区遗煤自燃过程及其规律的数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报,2005,15(6):15-19.
- [4] 刘星魁,杜学胜,赵新涛. 沿空侧煤柱耗氧—升温的三维数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报,2014,33(9):1206-1211.
- [5] 陆君安,尚涛,谢进,等. 偏微分方程的 MATLAB 解法[M]. 武汉:武汉大学出版社,2001.
- [6] 张国枢. 通风安全学[M]. 北京:中国矿业大学出版社,2011.

(责任编辑 王利君)