

掘进巷道油型气扩散规律数值模拟^{*}

张俭让^{1,2} 张 荃^{1,2} 董丁稳^{1,2} 陈 伟^{1,2}

(1. 西安科技大学 能源学院 陕西 西安 710054; 2. 教育部 西部矿井开采及灾害防治重点实验室 陕西 西安 710054)

摘 要: 根据掘进巷道风流流场特点,应用计算流体力学(CFD)软件 ANSYS 的 Realizable $k-\varepsilon$ 双方程模型模拟了掘进工作面的油型气与风流质量混合过程。探讨了掘进工作面风流流场和油型气的主要成分 CH_4 浓度分布规律,对比了油型气在掘进巷道底板不同位置涌出的扩散规律。研究表明,涌出点在涡流内部区域时,油型气与巷道风流混合得更充分;涌出点距掘进头一定距离之后,油型气涌出后随风流方向运动,且巷道顶部浓度较高;涌出源为垂直于掘进方向的裂隙时,油型气扩散后 CH_4 浓度在高度上的浓度差较小,裂隙平行于掘进方向时,高度上的浓度差较大。

关键词: 掘进巷道; 数值模拟; 风流流场; CH_4 浓度

中图分类号: TD 712 **文献标志码:** A

Numerical simulation of oil-type gas diffusion regularities in roadway excavation

ZHANG Jian-rang^{1,2} ZHANG Quan^{1,2} DONG Ding-wen^{1,2} CHEN Wei^{1,2}

(1. College of Energy Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mine Exploration and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to the characteristics of flow field in roadway excavation, a simulation was carried out on mixing procession of airflow and CH_4 in heading face with CFD fluent, using Realizable $k-\varepsilon$ double equation model. The heading face airflow field and CH_4 concentration distribution was discussed. And emission law of oil-type gas at different floor position was compared. The study found that when the point in eddy current region, oil-type gas and airflow mixed more fully. After a certain distance from point to face, oil-type gas moves with the airflow and the concentration decreases from top to bottom. Emission point for the cracks perpendicular to the driving direction, CH_4 concentration in the height of the gas diffusion after oil type difference is tiny discrepancy; cracks parallel to the driving direction, the concentration of the height is large differences.

Key words: heading face; numerical simulation; airflow; CH_4 concentration

0 引 言

煤油气共生矿井易发生围岩瓦斯涌出现象,并具有突发性、隐蔽性和涌出量大等特点,底板涌出则更为严重,成为影响矿井安全高效开采新的

致灾因素。经检测,异常涌出气体的成因类型为油型气。

天然气中的有机成因气根据其母质类型划分为煤成气和油型气^[1]。煤成气是指煤系地层或亚煤系地层中的煤与分散腐殖型有机质在成煤作用

* 收稿日期: 2015-04-10

责任编辑: 高 佳

通讯作者: 张俭让(1963-),男,陕西岐山人,教授, E-mail: zhaangjr@sohu.com

中形成的天然气,包括煤层气(瓦斯)^[2];油型气是指分散的腐泥型有机质和以腐泥型为主的混合型有机质,在其热演化进入成熟阶段后,在热力作用下成油的高成熟至过成熟阶段,液态烃和有机质裂解所形成的天然气^[3]。油型气的主要成分 CH_4 含量高达 90%,此外还含有 C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , C_6H_{14} , H_2 , CO 等多种可燃性气体^[4]。

黄陵矿区、焦坪矿区、鄂尔多斯矿区^[5]、甘肃窑街矿区^[6]等地均存在煤层瓦斯与围岩油气共生现象。目前尚未开展矿井监测监控油型气及油型气、煤层瓦斯混合气体爆炸临界值的影响等方面的研究,更未能形成有效地煤油气共存矿井瓦斯综合防治理论及技术体系。文中针对煤油气共生矿井,通过油型气涌出扩散过程的数值模拟,分析掘进工作面油型气在底板涌出时的扩散规律及油型气主要成分 CH_4 分布规律,为煤油气共生矿井瓦斯治理提供了依据。

1 物理模型及网格划分

依照掘进巷道实际尺寸,利用 ANSYS 软件建立三维模型。模型为矩形掘进巷道,巷道横断面宽 5.4 m,高 3.6 m。局部通风采用压入式通风方式,风筒直径为 1 m,风筒轴线距巷道侧壁 1.5 m,风筒出口距掘进头 6 m。在模拟中将掘进机简化为长方体来模拟其对风流流场的影响,其尺寸为长 9.44 m,宽 2.9 m,高 1.65 m。结合掘进工作面瓦斯赋存及涌出规律^[7-10],模拟中将掘进头瓦斯涌出设置为源项。

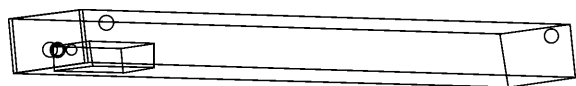


图1 模型几何

Fig. 1 Geometric model

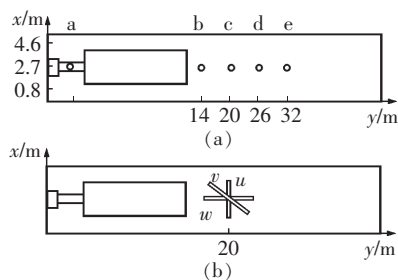


图2 涌出源设定图

Fig. 2 Location of CH_4 emission

(a) 圆形涌出源 (b) 矩形涌出源

根据模型的物理特征,选择 CutCell 网格划分方式。 $k-\varepsilon$ 模型只针对充分发展的湍流有效,而近壁面区域流体粘性的影响较大,雷诺数较低,湍流发展不充分,应采用壁面函数法。本文采用 Realizable $k-\varepsilon$ 双方程模型和壁面函数法相结合对掘进工作面压入式通风过程进行数值模拟研究,应该保证近壁面第一层节点位于对数律层中,以保证模拟的精确度^[11-12]。网格接近壁面需要满足

$$y_p \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} \leq 1. \quad (1)$$

式中 y_p 为近壁面第一层单元中心到壁面的距离; u_∞ 为自由流速度; ν 为流体的动力学粘性系数; x 为从边界层起始点开始至壁面的距离。

2 数学模型

2.1 数学模型

掘进工作面的风流流动状态为湍流流动,包括射流区和回流区^[13]。巷道内空气湍流流动与浓度扩散控制方程包括连续性方程、动量守恒方程和组分质量守恒方程^[14]。

2.1.1 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m. \quad (2)$$

左侧第一项是质量对时间的变化率; u_i 是轴向速度分量; 源项 S_m 是稀疏相增加到连续相中的质量或者质量源项。

2.1.2 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_i. \quad (3)$$

式中 p 为静压; F_i 为重力体积力和其它体积力,体积源项。

2.1.3 组分输运方程

$$\frac{\partial (\rho c_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho u c_s) = \text{div}(D_s \text{grad}(\rho c_s)) + S_s. \quad (4)$$

式中 c_s 为组分的体积浓度; ρc_s 为该组分的质量浓度; D_s 为该组分的扩散系数; S_s 为系统内部单位体积的化学反应在单位时间内产生的该组分的质量,也称生产率。

2.1.4 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k$$

$+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k,$ (5)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+$$
$$\rho C_1 S\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b+S_\varepsilon.$$
 (6)

式中 G_k 为 $k-\varepsilon$ 计算模型中湍流动能的平均速度梯度; G_b 在 $k-\varepsilon$ 计算模型中描述浮升力对湍流的影响; Y_M 为在可压缩湍流脉动扩张到整体的耗散率,描述可压缩性对湍流的影响。 C_2 和 $C_{1\varepsilon}$ 是常数; σ_k 和 σ_ε 分别是 k 和 ε 的湍流普朗特数。

结合主控方程,模型中风流视为不可压缩气体流动,考虑重力及密度差产生的浮升力影响,求解计算选择隐式分离三维稳定流求解器,速度采用绝对速度;用 SIMPLEC 算法求解流速和压力耦合;压力场采用标准离散方式。

2.2 边界条件

掘进头瓦斯涌出源区域类型为流体、源项、多孔介质,孔隙率为 0.2。风筒出口速度通过工作面有效风量计算得到。通过模拟,瓦斯涌出质量流量设定为 $0.005\ 65\ \text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ 时,巷道 CH_4 浓度为 0.6%,与现场数据相符,且符合规程要求。边界条件设定见表 1、表 2。

表 1 主要边界条件设定

Tab.1 Main boundary conditions

边界条件		设定
入口边界类型		速度入口
入口速度 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		9.77
湍流强度 / %		3
水力直径 / m		1
出口边界类型		自由出口
壁面	壁面函数	标准壁面函数
	剪力条件	无滑移
	粗糙度	0.05
	粗糙值	0.5

3 数值模拟结果及分析

以下所有分析皆以巷道中轴切面 $x=2.7$ 平面风流流场矢量图及 CH_4 浓度分布云图为依据。 CH_4 浓度皆为 CH_4 的质量分数。无油型气涌出及涌出点 a 、 b 、 c 、 d 、 e 的风流流场矢量图及 CH_4 浓度分布云图,如图 4、图 5 所示。涌出源 u 、 v 、 w 的 CH_4 浓度分布云图,如图 7 所示。为探究油型气扩散稳定后在巷道的浓度分布情况,建立了如图 3 的

观测线,图 6 和图 8 为观测线上的 CH_4 浓度曲线图。

表 2 油型气涌出源边界条件设定

Tab.2 Oil type gas emission source boundary conditions

边界条件		设定
入口边界类型		速度入口
圆形涌出源	入口速度 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.8
	湍流强度 / %	4.35
	水力直径 / m	0.3
入口边界类型		速度入口
矩形涌出源	入口速度 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.8
	湍流强度 / %	5.526
	水力直径 / m	0.054

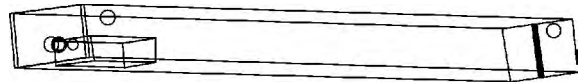


图 3 巷道的 CH_4 浓度分布情况观测线

Fig.3 Observation line of CH_4 concentration distribution in coal roadway

3.1 无油型气涌出时掘进工作面情况

无油型气涌出时,巷道中 CH_4 来源为掘进头瓦斯涌出,在远离风筒一侧,除掘进头上方有涡流外,风流比较稳定;在巷道中部,掘进头位置涡流较多,掘进机后方有小涡流;近风筒一侧,风流在巷道上部流动复杂,涡流众多,而巷道下部流动稳定。对应无油型气涌出时的 CH_4 浓度分布云图,在掘进头瓦斯涌出源中,风筒出口正对的部位 CH_4 浓度最低,远离风筒一侧下部角落 CH_4 浓度最高,约为 1%; CH_4 进入巷道之后,随风流流动向整个巷道扩散,并从图 5 中可以明显看出 CH_4 向巷道上部扩散。扩散稳定后,巷道平均 CH_4 浓度约为 0.6%,与实测数据相符,满足规程要求。

3.2 有油型气涌出时掘进工作面情况

3.2.1 油型气在底板不同位置涌出的扩散规律

油型气涌出时,巷道中 CH_4 来源为掘进头瓦斯涌出以及涌出点涌出的油型气中的 CH_4 。

涌出点 a 处于掘进机前端,油型气涌出之后在风流的带动及涡流的影响下,很快扩散并充满整个巷道,因此,油型气与风流混合的相对比较均匀,巷道下部浓度比较高。图 6 中曲线 a 比较平缓,说明涌出点油型气涌出平稳后高度上的浓度差比较小。

涌出点 b 处于掘进机后的涡流处,油型气涌出

后受横向的力较小,几乎是垂直涌向顶板,沿顶板贴附流动,一部分与涡流风流混合,因此巷道下部的 CH_4 浓度也并不小。

涌出点 c 距掘进头 20 m,此处巷道风流已接近稳定,从图 5 可以看出,巷道断面 CH_4 呈明显分层,巷道上部 2.6 m 以上浓度较高,往下递减,浓度范围在 0.5% ~ 2% 之间。油型气涌出后,一部分被巷道上部的涡流带往工作面,一部分顺巷道风流流动,在涌出气体到达巷道顶部之后,流动方向

发生改变,这也解释了 CH_4 浓度分布呈波浪形的原因。从完整的截面图可以看出,在涌出点后约 20 m,浓度分布达到平稳。

涌出点 d 处于基本稳定的风流流场,其风流流场矢量图与 CH_4 浓度分布云图都极为相似,巷道上部 CH_4 浓度较高,涌出点 e 巷道上部 CH_4 浓度要更高。分析其原因,一是油型气涌出有初始向上的动能,且油型气的主要成分 CH_4 的密度较空气小;二是此时巷道风流流向趋于稳定。

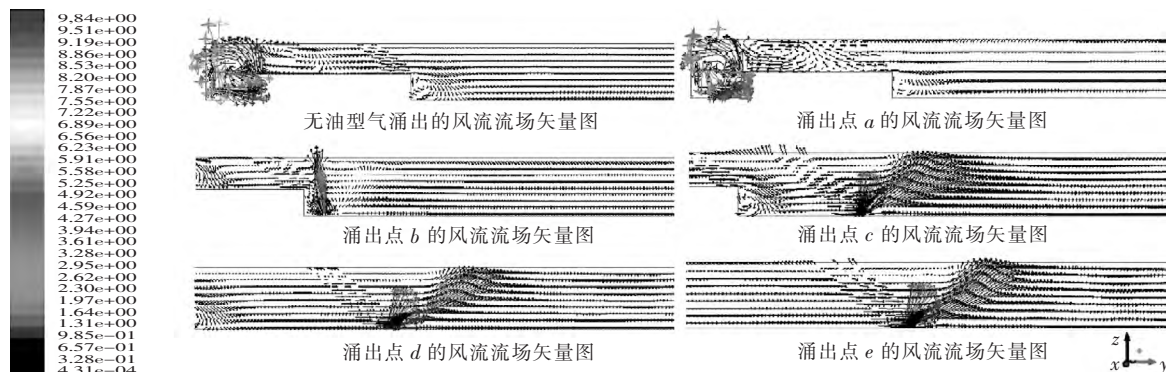


图 4 风流流场矢量图模拟结果总汇

Fig. 4 Flow field vector diagram

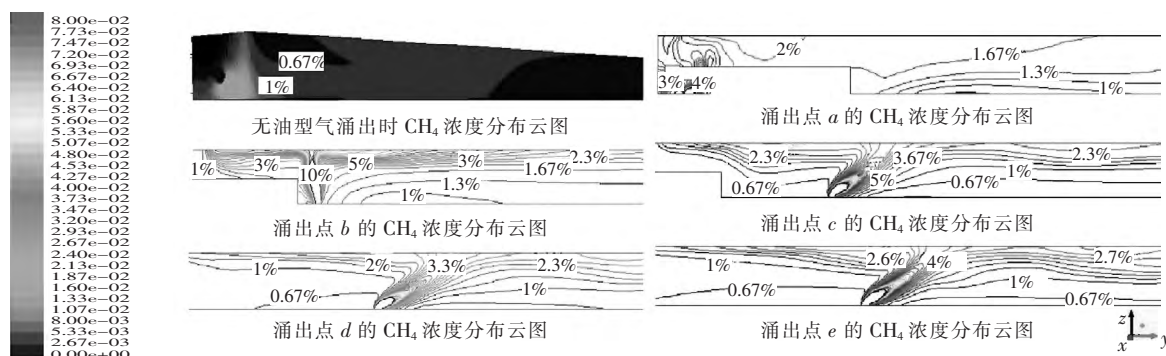


图 5 CH_4 浓度分布模拟结果总汇

Fig. 5 CH_4 concentration distribution

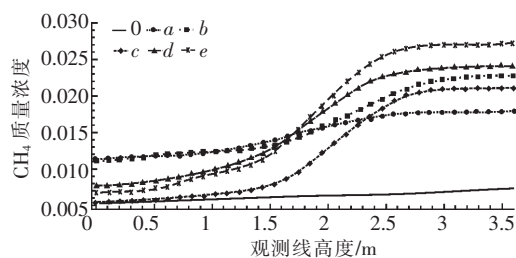


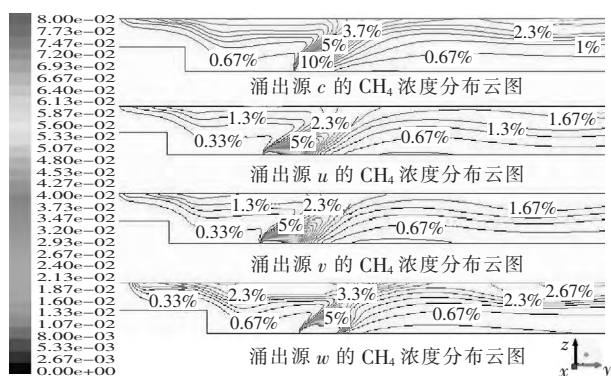
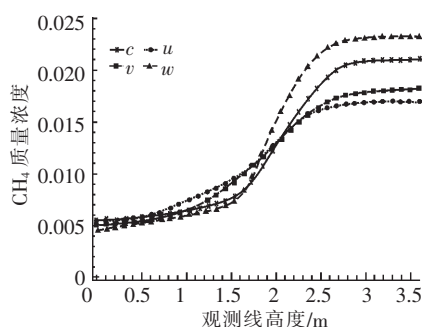
图 6 不同涌出点在观测线上的 CH_4 浓度曲线图

Fig. 6 CH_4 concentration on the observation line

3.2.2 油型气以不同形状涌出的扩散规律

涌出源 c μ p w 的 $x=2.7$ 截面 CH_4 浓度分布图及油型气扩散稳定后 CH_4 在巷道高度上的浓度

分布曲线图,如图 7,图 8 所示。结合两图可以看出,涌出源 c 的 CH_4 浓度在高度上的变化最明显。涌出源 u 的浓度变化差异最小,浓度范围为 0.55% ~ 1.7% p 与 u 极为相似;涌出源 w 的上下分层情况较为明显,涌出源 w 在巷道高度约 1.6 m 时,浓度开始急剧增加,直到 2.6 m 上方 CH_4 浓度达 2.3%,1.5 m 下方为 0.5%。从图 7 可以看出, c 曲线几乎是在 u p 曲线与 w 曲线之间。由此可知,根据涌出量和涌出位置,油型气以不同涌出形状涌出扩散稳定后截面的 CH_4 浓度分布范围是可以推断的,这对研究爆炸范围的确定有重要意义。

图7 不同形状涌出源 CH_4 浓度分布云图Fig. 7 CH_4 concentration in different shapes图8 不同形状涌出源在观测线上 CH_4 浓度曲线图Fig. 8 CH_4 concentration on the observation line

4 结 论

1) 无油型气涌出时,风筒出口直对区域 CH_4 浓度较小,远离风筒的区域 CH_4 浓度较大; CH_4 进入巷道后随风流扩散,且巷道上部 CH_4 浓度略高于巷道下部;

2) 油型气在底板不同位置涌出的扩散规律不同。在本文的数据背景中,涌出点在掘进机前方时,能与巷道风流混合均匀;涌出点在掘进机后方涡流区时,涌出点上方漏斗形区域 CH_4 浓度在爆炸极限内;涌出点在距掘进头约 20 m 后的范围时,油型气顺着风流延轴向方向运动且不与巷道内的风流均匀混合,巷道上部 CH_4 浓度较高,往下递减;

3) 文中设置了矩形涌出源模拟油型气从裂隙中涌出后的扩散,模拟发现,裂隙平行于掘进方向时,油型气扩散后 CH_4 浓度在巷道中出现上下分层;裂隙垂直于掘进方向时,油型气扩散后 CH_4 浓度在高度上的浓度差比较小;圆形涌出及裂隙与掘进方向成 45° 涌出时, CH_4 浓度在高度上的浓度曲线在二者之间。这说明,涌出量、涌出位置及其他条件不变时,涌出源的形状变化对应的 CH_4 浓度

变化规律是有迹可循的。

参考文献 References

- [1] 戴金星,裴锡古,戚厚发. 中国天然气地质学 [M]. 北京:石油工业出版社,1992.
DAI Jin-xing, PEI Xi-gu, QI Hou-fa. Geology of natural gas in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [2] 张新民,庄军,张遂安,等. 中国煤层气地质与资源评价 [M]. 北京:科学出版社,2003.
ZHANG Xin-min, ZHUANG Jun, ZHANG Sui-an, et al. Coalbed methane resource assessment in China [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [3] 黄弟藩,秦匡宗,王铁冠,等. 煤成油的形成与成烃原理 [M]. 北京:石油工业出版社,1995.
HUANG Di-fan, QING Kuang-zong, WANG Tie-guan, et al. Formation of oil from coal and mechanism of hydrocarbon generation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [4] 封华,徐永亮,任万兴. 焦坪矿区油气伴生特性及其对瓦斯爆炸极限的影响 [J]. 矿业快报,2007,26(7):53-55.
FENG Hua, XU Yong-liang, REN Wan-xing. The characteristic of Jiaoping mining district oil field-associated gas and the influence on the explosion limit of gas [J]. Express Information of Mining Industry, 2007, 26(7): 53-55.
- [5] 杜艳,于波,徐敏. 伊陕斜坡东南部延长组页岩气地球化学特性分析 [J]. 西安科技大学学报,2015,35(1):63-71.
DU Yan, YU Bo, XU Min. Geochemical characteristics of shale gas from Yanchang Formation in southeastern Yishan slope [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(1): 63-71.
- [6] 张庚申,杜丽平. 窑街矿区煤成气及其储蓄条件 [J]. 煤田地质与勘探,1992,20(2):30-35.
ZHANG Geng-shen, DU Li-ping. Gas and coal saving condition of Yaojie mining area [J]. Coal Geology and Exploration, 1992, 20(2): 30-35.
- [7] 候三中,刘德民,李金岭. 掘进工作面煤层渗透率变化对瓦斯涌出量的影响分析 [J]. 矿业安全与环保,2010,37(5):7-10,95.
HOU San-zhong, LIU De-min, LI Jin-ling. Analysis of the effect of heading face coal seam permeability change on gas emission [J]. Mining Safety Environmental Protection, 2010, 37(5): 7-10, 95.
- [8] 梁冰,刘蓟南,孙维吉,等. 掘进工作面瓦斯流动规

- 律数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011 22(4): 46-51.
- LIANG Bing, LIU Ji-nan, SUN Wei-ji, et al. Numerical simulation of flowing gas on heading face during coal mining[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2011 22(4): 46-51.
- [9] 刘学服, 方前程, 黄渊跃. 独头煤巷掘进过程中瓦斯分布规律研究[J]. 煤炭科学技术 2012 40(3): 62-64 69.
- LIU Xue-fu, FANG Qian-cheng, HUANG Yuan-yue. Study on gas distribution law of driving process in blind seam gateway[J]. Coal Science and Technology 2012, 40(3): 62-64 69.
- [10] 孙树林, 周西华, 徐 军. 煤矿掘进工作面瓦斯涌出规律研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(1): 101-103.
- SUN Shu-lin, ZHOU Xi-hua, XU Jun. Study on the gas effuse law in dig working face of coal mine[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2005, 16(1): 101-103.
- [11] 高建良, 侯三中. 掘进工作面动态瓦斯压力分布及涌出规律[J]. 煤炭学报 2007 32(11): 1 127-1 131.
- GAO Jian-liang, HOU San-zhong. Dynamic distribution of gas pressure and emission around a diving roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1 127-1 131.
- [12] 刘金金. 局部通风倾斜巷道掘进工作面瓦斯分布规律[D]. 焦作: 河南理工大学 2011.
- LIU Jin-jin. Regularity of gas distribution in sloping heading face with auxiliary ventilation[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University 2011.
- [13] 汤民波. 掘进工作面压入式通风风流流场数值模拟研究[D]. 赣州: 江西理工大学 2013.
- TANG Min-bo. Numerical simulation of forced ventilation flow field in driving face[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology 2013.
- [14] 高建良, 徐昆伦, 吴 妍. 掘进巷道瓦斯分布数值实验研究[J]. 中国安全科学学报 2009, 19(1): 18-24.
- GAO Jian-liang, XU Kun-lun, Wu Yan. Numerical experiment of methane distribution in developing roadway[J]. China Safety Science Journal 2009, 19(1): 18-24.

(上接第 306 页)

- [5] 王佰顺, 戴广龙, 童云飞, 等. 深孔松动爆破提高瓦斯抽放率的应用研究[J]. 煤矿安全 2002 33(11): 5-7.
- WANG Bai-shun, DAI Guang-long, TONG Yun-fei, et al. Applied study on deep shot to improve methane drainage efficiency[J]. Safety in Coal Mines 2002 33(11): 5-7.
- [6] 周廷扬. 高压水力割缝提高瓦斯抽采率的技术研究[J]. 矿业安全与环保 2010 81(37): 7-12.
- ZHOU Ting-yang. Research on high-pressure hydraulic cutting seam to improve the gas extraction rate[J]. Journal of Mining Safety and Environmental Protection, 2010 81(37): 7-12.
- [7] 郭红玉. 基于水力压裂的煤矿井下瓦斯抽采理论与技术[D]. 焦作: 河南理工大学 2011.
- GUO Hong-yu. Gas drainage theory and technology in underground coal mine based on hydraulic fracturing[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University 2011.
- [8] 刘明举, 孔留安, 郝富昌, 等. 水力冲孔技术在严重突出煤层中的应用[J]. 煤炭学报 2005 30(4): 451-454.
- LIU Ming-ju, KONG Liu-an, HAO Fu-chang. Application of hydraulic flushing technology in severe outburst coal[J]. Journal of China Coal Society 2005 30(4): 451-454.
- [9] 范迎春, 王兆丰. 水力冲孔强化增透松软低透突出煤层效果分析[J]. 煤矿安全 2012 43(6): 137-140.
- FAN Ying-chun, WANG Zhao-feng. Effect analysis of strengthening permeability in soft and low permeability outburst coal seam by hydraulic flushing[J]. Safety in Coal Mines 2012 43(6): 137-140.
- [10] 浑宝炬, 周红星. 水力诱导穿层钻孔喷孔煤层增透技术及工程应用[J]. 煤炭科学技术 2011 39(9): 46-49.
- HUN Bao-ju, ZHOU Hong-xing. Seam permeability improvement technology and application with hydraulic guided drilling through strata borehole blowing[J]. Coal Science and Technology 2011 39(9): 46-49.