



移动扫码阅读

DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2020.03.001

试验·研究

孙卓越,杨东,裴越,等.基于时间分源法的CO₂相变致裂抽采有效半径测定[J].煤矿安全,2020,51(3):1-5,11.

SUN Zhuoyue, YANG Dong, PEI Yue, et al. Determination of Drainage Effective Radius of CO₂ Phase Transition Fracturing Based on Time-source Method[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(3): 1-5, 11.

基于时间分源法的CO₂相变致裂抽采有效半径测定

孙卓越^{1,2},杨东^{3,4},裴越^{3,4},孙刘伟^{1,2},马小敏^{3,4}

(1.煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013;2.天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013;
3.煤科集团沈阳研究院有限公司,辽宁 沈阳 110016;4.煤矿安全技术国家重点实验室,辽宁 抚顺 113122)

摘要:针对CO₂相变致裂抽采有效半径测定尚无统一标准的现状,对相对瓦斯压力法局限性进行归纳,进一步明确抽采半径的概念。基于SF₆示踪法,采用抽采数据处理与分析方式,建立时间分源法,并进行现场试验。研究表明:抽采影响半径和抽采有效半径之间存在时间效应,抽采时间是区分二者的关键因素;时间分源法将抽采时间分为影响时间和承接时间2部分,通过SF₆示踪法及现场抽采数据分析得到一定抽采时间下抽采有效半径,更能够真实反映钻孔抽采情况;在大平煤矿3号煤层运输大巷实测得到,抽采时间为120 d时,CO₂相变致裂抽采有效半径为12 m;抽采时间为148 d时,抽采有效半径达到16 m。

关键词:CO₂相变致裂;时间分源法;抽采有效半径;抽采影响半径;SF₆

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:1003-496X(2020)03-0001-05

Determination of Drainage Effective Radius of CO₂ Phase Transition Fracturing Based on Time-source Method

SUN Zhuoyue^{1,2}, YANG Dong^{3,4}, PEI Yue^{3,4}, SUN Liuwei^{1,2}, MA Xiaomin^{3,4}

(1. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Design Department of Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. China Coal Technology and Engineering Group Shenyang Research Institute, Shenyang 110016, China; 4. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: There is no uniform standard for determining the drainage effective radius of CO₂ phase transition fracturing in view of the fact, we analyze the traditional measurement for drainage effective radius, clarify definition of drainage radius. The time-source method is established based on SF₆ tracer method and test data, and it was tested in coal mine. The research shows there is time effect between drainage influence radius and drainage effective radius, and the drainage time is the key factor to distinguish them; the time-source method divides the drainage time into drainage effective time and drainage compensation time. The drainage effective radius under a certain time is obtained through SF₆ tracer method and analysis of the field data. It can reflect the drainage situation of boreholes more accurately; the test-in-place experimented at main haulage roadway in No.3 coal seam of Daping Coal Mine. The result shows that the drainage effective radius after CO₂ phase transition fracturing is 12 m when the drainage time is 120 d and drainage effective radius is 16 m when the drainage time is 148 d.

Key words: CO₂ phase transition fracturing; time-source method; drainage effective radius; drainage influence radius; SF₆

瓦斯是影响采矿安全的重要因素^[1]。随着采煤

工作面埋深的增加,矿井瓦斯条件随之恶化^[2]。瓦斯抽采既是应对瓦斯问题的重要举措,又是综合利用瓦斯的根本保证^[3]。高瓦斯矿井中最普遍的解决方

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804205);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51304119)

法就是通过施工钻孔进行抽采^[4],而抽采有效半径则是影响布孔间距及预抽时间的关键因素^[5]。梁冰等^[6]采用分组布置压力测试孔和瓦斯抽采孔方式,将瓦斯压力作为评价指标确定抽采有效半径;郝富昌等^[7]基于煤的物理特性建立渗流-应力耦合模型,以钻孔抽采渗透率为导向,找到影响抽采半径的因素;季准君等^[8]基于瓦斯流场建立瓦斯压力分布模型,采用 VB.NET 解算抽采半径,探究钻孔周边瓦斯压力分布情况;王兆丰等^[9]利用 COMSOL 分析了抽采负压和抽采半径的关系;Wu Bing 等^[10]利用 FLAC^{3D} 模拟煤体力学性质在抽采过程中的变化情况来确定抽采有效半径。总结发现, SF₆ 示踪法检测方便,灵敏准确,但只能测出抽采影响半径,需要结合其它方法才能得到钻孔抽采有效半径。当前很多学者采用数值模拟与 SF₆ 示踪法相结合的方式确定抽采有效半径。由于数值模拟需要假设煤体为理想模型,而现场复杂地质条件使得模拟结果与实际效果差别较大^[11],因此提出时间分源法,采用 SF₆ 示踪法与现场抽采数据分析相结合,达到测定 CO₂ 相变致裂抽采有效半径的目的。

1 时间分源法的原理

1.1 抽采半径时间效应

根据作用程度的不同,抽采半径存在抽采影响半径及抽采有效半径 2 个概念。钻孔抽采时,一定范围内瓦斯在压强差作用下进入钻孔内被抽出,此范围的半径即为抽采影响半径^[12]。抽采影响半径随抽采时间增加而增大,直至抽采负压作用不足以克服煤体中瓦斯渗透到钻孔的阻力为止。抽采有效半径是指经过一段时间的抽采,煤层瓦斯指标下降到允许值以下的最远点到抽采钻孔中心的距离。

由此可知,不能笼统认为抽采影响半径一定大于抽采有效半径,二者存在着时间效应。只要煤层中一点处在抽采影响半径范围内,就表明此点的抽采负压可以克服该处瓦斯渗透至抽采钻孔的阻力,再经过一定的时间,就能够使瓦斯指标降到允许值以下,即达到抽采有效半径。因此,抽采时间是影响二者的关键因素,离开抽采时间去分析抽采影响半径和抽采有效半径是没有意义的。

1.2 时间分源法基本原理

基于抽采半径时间效应,时间分源法将 CO₂ 相变致裂后的抽采时间分为 2 部分,一部分为影响时间,可基于 SF₆ 示踪法测定,同时得到的还有抽采影响半径;另一部分为承接时间,可通过现场抽采数

据分析得到。CO₂ 相变致裂后的承接时间需要对未致裂钻孔进行分析,研究表明:在一定的瓦斯地质情况下,通过差分方程计算可得出抽采有效半径与抽采时间存在幂函数关系^[13]。根据现场经验,未致裂钻孔的影响时间一般很短,可认为抽采有效半径与承接时间仍满足幂函数关系。即:

$$r = \alpha t_{2w}^\beta \quad (1)$$

式中: r 为抽采有效半径, m ; t_{2w} 为未致裂钻孔的承接时间, d ; α, β 均为系数。

由式(1)可以推算出抽采有效半径对应的承接时间 t_{2w} 。但 t_{2w} 为煤层未受致裂影响的数据。CO₂ 相变致裂会增大一定范围内的煤体裂隙,从而改善该区域煤体透气性,在进行抽采时,相同参数钻孔抽出的瓦斯量会大于未致裂钻孔,从而使 CO₂ 相变致裂后的承接时间小于上述推测时间。故利用 CO₂ 相变致裂前后的钻孔瓦斯抽采纯量进行对比,通过修正因数校正未致裂时的承接时间 t_{2w} ,得到 CO₂ 相变致裂后的承接时间 t_2 。相较于未致裂条件,CO₂ 相变致裂后瓦斯抽采纯量会从 1 个较高值逐渐降低到稳定值,致裂后抽采纯量变化曲线如图 1。经过分析,提高段抽采纯量随时间变化为 1 条近似三次多项式函数的曲线 $f(t)$,累计抽采纯量 W_1 的提高段采用定积分计算曲线下面积,加上稳定段抽采时间及其近似平均抽采纯量乘积。未致裂条件下抽采纯量较为稳定,可直接采用抽采时间与近似平均抽采纯量相乘计算累计抽采纯量 W_2 。

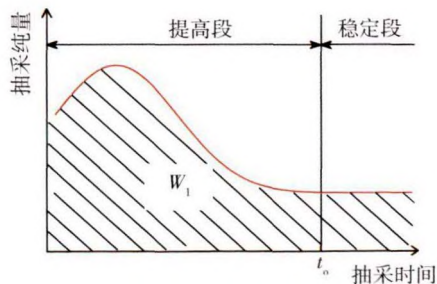


图 1 致裂后抽采纯量变化曲线

Fig.1 The curve of drainage pure quantity after fracturing

综上,CO₂ 相变致裂后达到相应抽采有效半径的抽采时间 t 为:

$$t = t_1 + t_2 = t_1 + t_{2w} \frac{1}{n} \quad (2)$$

式中: t_1 为影响时间, d ; t_2 为承接时间, d ; n 为修正因数。

当抽采时间 $t \leq t_0$ 时,修正因数 n 为:

$$n = \frac{W_1}{W_2} = \frac{\int_0^t f(t) dt}{S_2 t} \quad (3)$$

当抽采时间 $t > t_0$ 时,修正因数 n 的表达式为:

$$n = \frac{W_1}{W_2} = \frac{\int_0^{t_0} f(t) dt + S_1(t - t_0)}{S_2 t} \quad (4)$$

式中: W_1 为 CO_2 相变致裂后一定抽采时间的累计抽采纯量, m^3 ; W_2 为未增透情况下一定抽采时间的累计抽采纯量, m^3 ; t_0 为抽采提高段过渡到抽采稳定段时间, d ; S_1 为 CO_2 相变致裂后稳定段的抽采纯量近似平均值, m^3/d ; S_2 为未致裂情况下抽采纯量近似平均值, m^3/d 。

由式(3)、式(4)可知,修正因数 n 并非一定值,其会随抽采时间 t 的不同而变化。令 $\int_0^{t_0} f(t) dt = C$,应用极限思维:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} n = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C + S_1(t - t_0)}{S_2 t} = \frac{S_1}{S_2} \quad (5)$$

由此可知,修正因数 n 会随抽采时间 t 的延长从较高值逐渐降低并无限趋近于某一定值。在现场测定工作中,可根据矿井工作面抽采设计或实际生产需要的抽采时间来确定修正因数 n 。

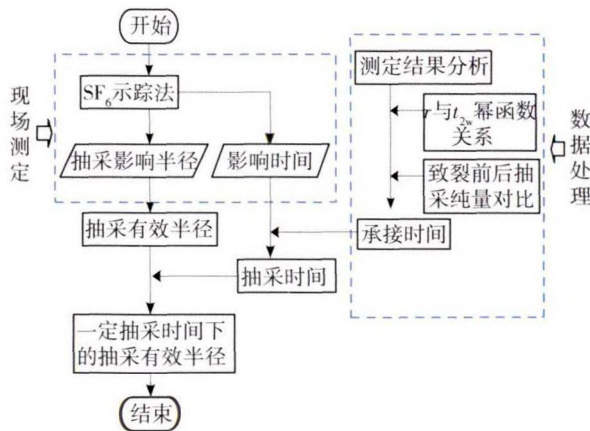


图 2 CO_2 相变致裂抽采有效半径测定流程

Fig.2 The determination process of drainage effective radius after CO_2 phase transition fracturing

通过上述分析, CO_2 相变致裂抽采有效半径测定流程如图 2。

2 时间分源法的工程实例

2.1 工程概况

山西大平煤矿位于沁水煤田东部, 矿井核定产

能为 1.51 Mt/a, 当前主采 3 号煤层, 属高瓦斯矿井, 矿井最大瓦斯含量为 $9.91 m^3/t$, 煤层的透气性系数为 $0.50 m^2/(MPa^2 \cdot d)$, 煤层倾角为 $0^\circ \sim 10^\circ$, 煤层平均厚度为 6.26 m。

2.2 现场试验方案

在运输大巷 2 200 m 处施工 5 个钻孔, 其中包括 4 个观测孔(抽采孔, $\phi 113 mm$), 1 个 CO_2 相变致裂孔(SF_6 注气孔, $\phi 94 mm$), 观测孔至 CO_2 相变致裂孔的距离分别为 12、16、20、24 m。 CO_2 相变致裂孔和观测孔孔深均为 50 m。试验钻孔布置如图 3。

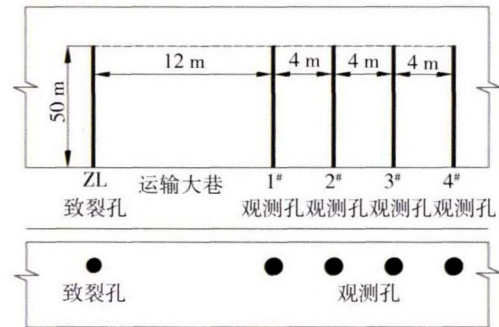


图 3 试验钻孔布置

Fig.3 Test drilling arrangement

依次施工 CO_2 相变致裂孔和观测孔, 将 4 个观测孔封孔后并入汇流管, 接入矿井已有抽采管路。将 SF_6 气体间歇式注入致裂孔中, 打开观测孔阀门, 将其与瓦斯抽采系统接通, 每天从观测孔中抽取气样, 检测是否含有 SF_6 气体, 定期对 CO_2 相变致裂后汇流管的抽采数据进行观测。

2.3 数据处理与分析

SF_6 示踪法检测结果见表 1。

表 1 SF_6 示踪法检测结果

Table 1 Test results of SF_6 tracer method

观测孔	至致裂孔 距离/m	是否检测到 SF_6 示踪气体		
		致裂注气 后 6 d	致裂注气 后 15 d	致裂注气 后 25 d
1#	12	是	是	是
2#	16	否	是	是
3#	20	否	否	否
4#	24	否	否	否

由表 1 可知, 致裂注气 6 d 后距致裂孔 12 m 的 1# 观测孔检测到 SF_6 示踪气体, 15 d 后, 距致裂孔 16 m 的 2# 观测孔检测到 SF_6 示踪气体。此后其他观测孔一直未检测到 SF_6 示踪气体, 在第 25 d 结束观

测。故影响时间为 6 d 时,抽采影响半径为 12 m;影响时间为 15 d 时,抽采影响半径为 16 m。

对未致裂条件下抽采有效半径和承接时间 t_{2w} 进行线性拟合,未致裂时抽采有效半径变化曲线如图 4。

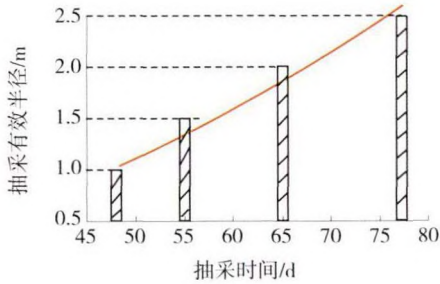


图 4 未致裂时抽采有效半径变化曲线

Fig.4 The curve of drainage effective radius before fracturing

得到 r 与 t_{2w} 的关系式为:

$$r=0.000\ 69\ t_{2w}^{1.888\ 5} \quad (6)$$

CO₂ 相变致裂后抽采有效半径与承接时间 t_{2w} 关系见表 2。对 CO₂ 相变致裂后汇流组瓦斯抽采量进行处理,抽采纯量和抽采时间关系如图 5。

表 2 致裂后抽采有效半径与承接时间关系

Table 2 Relationship between drainage effective radius and drainage compensation time after fracturing

抽采孔径 d/mm	承接时间 t_{2w}/d	抽采有效半径 r/m
113	172	12
	200	16

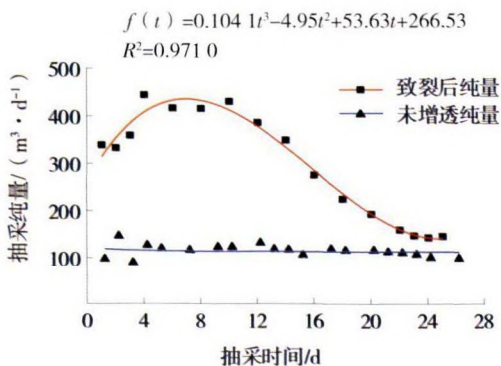


图 5 抽采纯量和抽采时间关系

Fig.5 Relationship between drainage pure quantity and drainage time

稳定段抽采纯量近似平均值为 0.1 m³/min。运输大巷九联巷处未采取增透措施的相同数量钻孔汇流组抽采纯量近似平均值为 0.077 m³/min, 两地工

作面相距不远,属于同一地质单元,煤层赋存情况相差不大,可进行对比。

第 25 d 时瓦斯抽采纯量已稳定,故取第 25 d 为提高段末端对应的抽采时间,由式(3)、式(4)得:

当抽采时间 $t \leq 25$ d 时:

$$n = \frac{\int_0^t (0.104\ 1t^3 - 4.95t^2 + 53.63t + 266.53) dt}{110.88t} = \frac{0.026t^4 - 1.65t^3 + 26.815t^2 + 266.53t}{110.88t} \quad (7)$$

当抽采时间 $t > 25$ d 时:

$$n = \frac{\int_0^{25} f(t) dt + 144 \times (t - 25)}{110.88t} = \frac{4\ 027 + 144t}{110.88t} \quad (8)$$

根据式(7)、式(8),对不同抽采时间下的修正因数进行分析,修正因数与抽采时间关系如图 6。

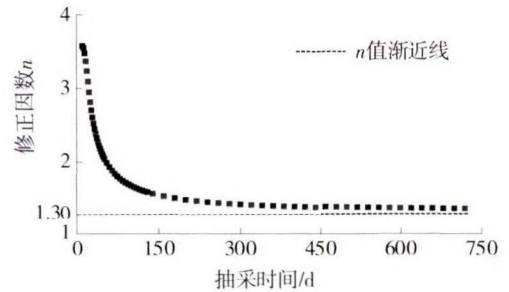


图 6 修正因数与抽采时间关系

Fig.6 Relationship between correction factor and drainage time

从图 6 可以看出,修正因数 n 随抽采时间延长逐渐降低并趋于 1.30。根据大平煤矿抽采设计,工作面本煤层预抽时间不少于 6 个月,取抽采时间 $t = 180$ d,代入式(8),得到 $n = 1.51$,将 $n = 1.51$ 和表 2 的结果代入式(2),即算出达到一定抽采有效半径所需的抽采时间,致裂后抽采有效半径和抽采时间关系如图 7。因此,大平煤矿在实施 CO₂ 相变致裂的情况下,抽采时间为 120 d 时,抽采有效半径为 12 m;抽采时间为 148 d 时,抽采有效半径为 16 m。

3 合理性验证

观测孔达到式(2)计算的抽采时间后,可在各观测孔附近施工校验钻孔,将残余瓦斯含量作为验证有效指标对此法进行校验。不同抽采目的对应着不同的抽采达标界定指标,可将其换算为残余瓦斯含量 Q 进行理论验证。当以防突为抽采目的时,依据《防治煤与瓦斯突出规定》^[14]第五十三条,要求残余瓦斯压力小于 0.74 MPa,残余瓦斯含量小于 8 m³/t,

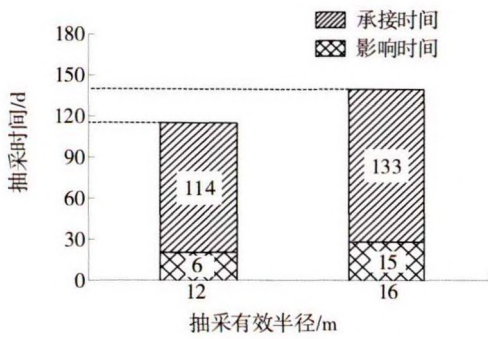


图 7 致裂后抽采有效半径和抽采时间关系

Fig.7 Relationship between drainage effective radius and drainage time

此时残余瓦斯含量验证指标 $Q_1 \leq 8 \text{ m}^3/\text{t}$ 。当以煤层抽采达标为抽采目的时,依据《煤矿瓦斯抽采达标暂行规定》^[15]第二十七条、第二十八条,开采层为瓦斯涌出主要来源时,可解吸瓦斯量应符合有关规定,经过换算,此时残余瓦斯含量验证指标 $Q_2 \leq Q_j + Q_{cc}$,其中 Q_j 为不同工作面日产量对应的可解吸瓦斯量, m^3/t ; Q_{cc} 为评价范围内残存瓦斯含量, m^3/t 。邻近层或围岩为瓦斯涌出主要来源时,工作面抽采率应符合相关要求,经过换算,此时残余瓦斯含量验证指标 $Q_3 \leq Q_0 \times (1 - \eta)$,其中 Q_0 为抽采前瓦斯含量, m^3/t ; η 为不同工作面绝对瓦斯涌出量对应的工作面抽采率。

试验地点的抽采目的为实现煤层瓦斯抽采达标,根据大平煤矿瓦斯涌出量预测报告,其涌出量主要来自开采层,故使用式 $Q_2 \leq Q_j + Q_{cc}$ 对抽采有效半径的测定结果进行验证。大平煤矿工作面日产量为 5 471 t,根据《煤矿瓦斯抽采达标暂行规定》,可解吸瓦斯量 $Q_j \leq 5.5 \text{ m}^3/\text{t}$ 。根据大平煤矿实验室数据,此处残存瓦斯含量 $Q_{cc} = 3.26 \text{ m}^3/\text{t}$ 。可得临界值 $Q_2 = 8.76 \text{ m}^3/\text{t}$ 。通过现场测定,抽采 120 d 后,在 1# 孔附近新打 1 个钻孔测定瓦斯含量,测定结果为 $q_1 = 6.84 \text{ m}^3/\text{t}$;抽采 148 d 后,在 2# 孔附近新打 1 个钻孔测定瓦斯含量,测定结果为 $q_2 = 7.47 \text{ m}^3/\text{t}$;抽采 181 d 后,在 3# 孔附近新打 1 个钻孔测定瓦斯含量,测定结果为 $q_3 = 9.24 \text{ m}^3/\text{t}$ 。由此可知,在达到相应的抽采时间后,抽采有效半径范围内的瓦斯指标均降到临界值 Q_2 以下,因此验证基于时间分源法的测定结果具有良好的可靠性。

4 结 论

1) 抽采半径分为抽采影响半径和抽采有效半

径,前者仅指抽采效果影响至该点,后者则是指经过抽采,瓦斯指标降到允许值以下。在煤矿生产工作中,起指导作用的是抽采有效半径。抽采时间是影响二者的关键因素,提出抽采半径存在时间效应,离开时间因素去分析抽采影响半径和抽采有效半径没有意义。

2) 在分析当前测定 CO_2 相变致裂抽采有效半径方法的基础上,提出时间分源法。该方法无测压工序,避开了当前测压成功率低的现状,且无需通过建立理想模型进行数值模拟,测定过程简单实用,测定结果可靠。

3) 在大平煤矿进行 CO_2 相变致裂试验,抽采时间为 120 d 时,测得钻孔抽采有效半径为 12 m;抽采时间为 148 d 时,钻孔抽采有效半径达到 16 m。通过实施 CO_2 相变致裂,增大了布孔间距,减少了钻孔数量,施工时间和抽采周期显著缩短。

参考文献:

- [1] 张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 3-5.
- [2] 樊保龙, 白春华, 李建平. 基于 LMD-SVM 的采煤工作面瓦斯涌出量预测[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 946-952.
- [3] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 低渗煤层液态 CO_2 相变定向射孔致裂增透技术及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1938-1950.
- [4] 朱南南, 张浪, 范喜生, 等. 基于瓦斯径向渗流方程的有效抽采半径求解方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 105-110.
- [5] 鲁义, 申宏敏, 秦波涛, 等. 顺层钻孔瓦斯抽采半径及布孔间距研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 156-162.
- [6] 梁冰, 袁欣鹏, 孙维吉, 等. 分组测压确定瓦斯有效抽采半径试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 132-135.
- [7] 郝富昌, 刘明举, 孙丽娟. 基于多物理场耦合的瓦斯抽放半径确定方法[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 106.
- [8] 季淮君, 李增华, 杨永良, 等. 基于瓦斯流场的抽采半径确定方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 917-921.
- [9] 王兆丰, 李炎涛, 夏会辉, 等. 基于 COMOSOL 的顺层钻孔有效抽采半径的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2012, 43(10): 4-6.
- [10] Bing W, Mingguo H, Xiaoyan F, et al. Study on Methods of Determining Gas Extraction Radius with

(下转第 11 页)

2)在定容常压下,甲烷最大爆炸压力随着初始温度的升高呈连续下降趋势,降幅一致为36%~37%之间。且发现拟合的压力公式基本不受混合可燃气体和甲烷体积分数的影响。

3)在定容常压下,含 C_2H_4 和 C_2H_6 较多的配比对甲烷最大爆炸温度和压力的影响相对较大。正氧平衡下,配比1至配比3使甲烷最大爆炸温度要大于配比4至配比6,负氧平衡下则相反。上述规律在初始温度升高的情况下也一直成立。而最大爆炸压力则与初始温度二者时刻呈现负相关的关系。另外,随初始温度的增加,最大爆炸温度和最大爆炸压力随多元混合气体体积分数增加而上升或下降的幅度减小。

4)定容常压下,对比不同温度下爆炸传播的动态过程发现:体积分数为9.5%的甲烷比11%的甲烷爆炸反应速率更快。温度为140℃时比25℃时提前消耗完燃料,即初始温度加快了甲烷的爆炸反应。

参考文献:

[1] 钟元华,孙继宏.煤矿瓦斯爆炸原因分析与防治[J].企业技术开发,2014(11):172-173.
[2] Hashimoto A, Matsuo A. Numerical analysis of gas explosion inside two rooms connected by ducts [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, 20(4): 455-461.
[3] Skřínsky J, Vere J, Peer V, et al. Explosion characteristics of methane for CFD modeling and simulation of turbulent

gas flow behavior during explosion [C]// American Institute of Physics Conference Series. AIP Publishing LLC, 2016:37-43.

[4] Vlasin N I, Colda C I, Pasculescu V M, et al. Turbulence modelling in computational simulation of methane explosions [C]//16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference Sgem. Bulgaria: Albena, 2016.
[5] Sarli V D, Benedetto A D, Russo G. Large Eddy Simulation of transient premixed flame vortex interactions in gas explosions[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 71(13):539-551.
[6] 罗振敏,张群,王华,等.基于FLACS的受限空间瓦斯爆炸数值模拟[J].煤炭学报,2013,38(8):1381.
[7] 王涛.管道内甲烷爆炸特性及 CO_2 抑爆的实验与数值模拟研究[D].西安:西安科技大学,2014.
[8] 邓军,马晓峰,商铁林,等.多元可燃气体爆炸压力峰值的数值模拟[J].煤矿安全,2014,45(4):13-16.
[9] 张群.高瓦斯矿井封闭火区瓦斯爆炸实验及数值模拟研究[D].西安:西安科技大学,2013.
[10] 马秋菊.约束空间内多元气体爆炸及其转燃烧规律[D].北京:北京理工大学,2015.

作者简介:罗振敏(1976—),女,山东兖州人,教授,西安科技大学安全科学与工程学院副院长,主要从事可燃性气体爆炸防控理论及技术研究。

(收稿日期:2019-03-29;责任编辑:王福厚)

(上接第5页)

Numerical Simulation[J]. Procedia Engineering, 2012, 45(2): 345-351.
[11] 郝富昌,刘明举,孙丽娟.瓦斯抽采半径确定方法的比较及存在问题研究[J].煤炭科学技术,2012,40(12):55-58.
[12] 俞启香.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992:103-104.
[13] 徐三民.确定瓦斯有效抽放半径的方法探讨[J].煤炭工程师,1996(3):43-44.
[14] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.

防治煤与瓦斯突出规定[M].北京:煤炭工业出版社,2009:20-21.

[15] 国家安全生产监督管理总局,国家发展和改革委员会,国家能源局,等.煤矿瓦斯抽采达标暂行规定[M].北京:煤炭工业出版社,2016:5-6.

作者简介:孙卓越(1992—),男,河北保定人,研究实习员,煤炭科学研究总院在读硕士研究生,主要从事矿山灾害及其防治方面的研究。

(收稿日期:2019-04-11;责任编辑:王福厚)

