

文章编号: 1673-3363-(2012)04-0596-05

基于钻孔瓦斯流量和压力测定有效抽采半径

余陶¹, 卢平², 孙金华¹, 邓中²

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026;
2. 安徽建筑工业学院安全工程系, 安徽 合肥 230022)

摘要 为了准确的测定有效抽采半径, 提出基于钻孔瓦斯流量和压力的测定方法。以抽采钻孔影响范围内残余瓦斯压力小于 0.74 MPa 且预抽率大于 30% 为指标, 基于钻孔瓦斯流量的负指数衰减规律, 推导出有效抽采半径计算公式, 并结合瓦斯压力变化共同确定有效抽采半径。该方法应用于区域预抽消突钻孔布置中, 分析了不同预抽时间下的钻孔有效抽采半径和极限抽采时间, 并依据预抽 90 d 有效抽采半径为 2.5 m, 布置消突钻孔。残余瓦斯压力和预抽率的检验以及煤巷掘进期间的区域验证, 均证明按该方法布置的预抽钻孔, 消突效果有效。

关键词 有效抽采半径; 瓦斯流量; 瓦斯压力; 消突; 区域预抽

中图分类号 TD 713 **文献标识码** A

Measurement of Effective Drainage Radius Based on Gas Flow and Pressure of Boreholes

YU Tao¹, LU Ping², SUN Jin-hua¹, DENG Zhong²

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;
2. Department of Safety Engineering, Anhui Institute of Architecture and Industry, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract In order to measure effective drainage radius exactly, we propose the method based on gas flow and pressure of boreholes. Under the index of remnant gas pressure less than 0.74 MPa and pre-drainage rate more than 30%, the computing formula is deduced based on the negative exponent attenuation law of gas flow, and the effective drainage radius is determined in combination with the variation of gas pressure. The method is applied in the arrangement of zonal pre-drainage boreholes. The effective drainage radius of different pre-drainage time and the utmost pre-drainage time are analyzed. Based on the premise that effective drainage radius reaches to 2.5 m in 90 pre-drainage days, the boreholes are designed to eliminate coal and gas outburst. The measurement method is demonstrated valid in outburst elimination by the examination of remnant gas pressure, pre-drainage rate and the zonal verification during the coal roadway driving.

Key words effective drainage radius; gas flow; gas pressure; outburst elimination; zonal pre-drainage

穿层钻孔预抽煤层瓦斯是重要的区域性消突措施^[1], 有效抽采半径是钻孔布置的依据, 而钻孔布置直接影响煤层的消突效果, 因此准确测定有效

抽采半径十分必要。目前, 有效抽采半径测定方法主要分为理论计算和现场测定 2 类。理论计算方面, 孙培德、徐三民依据达西定律和质量守恒定律建立

收稿日期: 2011-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172147, 50974002); 安徽省科技计划项目 (11010401015)

作者简介: 余陶 (1983-), 男, 安徽省安庆市人, 博士, 从事煤矿瓦斯治理方面的研究。

Email: ytyt1983@163.com

Tel: 13721029177

了预抽钻孔周围瓦斯流动方程，并给出有效抽采半径计算的解析解^[2-3]；卢平、王兆丰利用数值计算方法分析钻孔周围瓦斯流动，确定有效抽采半径^[4-5]；马耕基于不同瓦斯流态（线性渗流、低速非线性渗流、扩散）的雷诺数计算抽采半径^[6]。理论计算方法可以方便、快速地确定有效抽采半径，但计算参数的选取具有经验性，相关计算模型适用条件较为理想，并不能完全表征钻孔周围煤体与瓦斯的流固耦合作用过程^[7]。因此，有效抽采半径多采用现场测定的方法确定。煤矿现场最为常用的是压力降低法^[8]，该方法需施工较多的测压钻孔，而瓦斯压力的测定受诸多现场因素影响，有时瓦斯压力难以测得，有时钻孔有水测得瓦斯压力过大，有时测压钻孔漏气压力值衰减较快。因此，寻求一种有效可靠的方法测定钻孔有效抽采半径十分必要。本文提出一种基于钻孔瓦斯流量和压力测定有效抽采半径的方法，并应用于淮南矿业集团新庄孜煤矿区域预抽消突钻孔中，指导穿层钻孔布置，为煤层消突，确保安全生产奠定了基础。

1 有效抽采半径确定依据

钻孔抽采瓦斯时，煤体中的某点瓦斯压力与抽采负压的压差超过渗流启动压力时，瓦斯开始向钻孔流动，吸附瓦斯解吸为游离瓦斯补充流走的瓦斯，同时更远处的瓦斯也缓慢的向该点扩散^[9]。从钻孔边缘至煤体瓦斯压力梯度为0处，就是钻孔抽采瓦斯的影响范围，可近似认为是个圆形区域。影响范围的大小主要由煤体透气性决定，随抽采时间的延长向外延伸，并存在一个极限影响范围。影响范围内达到消除煤与瓦斯突出危险性的区域认为有效，由此可确定有效抽采半径。但相关规定对消突指标的确定存在分歧，防治煤与瓦斯突出规定认为残余瓦斯压力小于0.74 MPa或残余瓦斯含量小于8 m³/t为无突出危险区，煤矿安全规程以预抽率大于30%为指标。预抽率与残余瓦斯压力和残余瓦斯含量的关系可按式计算^[9]：

$$\eta = 1 - \frac{W_c}{W} = 1 - \frac{\alpha \sqrt{P_c}}{\alpha \sqrt{P}} = 1 - \frac{\sqrt{P_c}}{\sqrt{P}} \quad (1)$$

式中： η 为瓦斯预抽率，%； P_c 为残余瓦斯压力，MPa； P 为原始瓦斯压力，MPa； W_c 为残余瓦斯含量，m³/t； W 为原始瓦斯含量，m³/t； α 为煤层瓦斯含量系数，m³/(t MPa^{1/2})。

取 $P_c=0.74$ MPa， $P=0.74\sim 5$ MPa时，计算 η ，并作原始瓦斯压力与预抽率的对应关系图，如图1

所示。

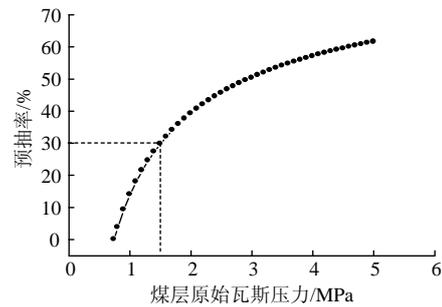


图1 煤层原始瓦斯压力与预抽率对应关系

Fig.1 Correspondence of original gas pressure and drainage rate

由图可知，原始瓦斯压力小于1.5 MPa时，以残余瓦斯压力小于0.74 MPa为指标时预抽率不足30%；原始瓦斯压力大于1.5 MPa时，随原始瓦斯压力增大，为满足残余瓦斯压力指标，预抽率须不断提高。由于煤层瓦斯含量测定操作复杂，测定结果易受影响且不能快速、直接获取^[10]，所以现场测定时，取残余瓦斯压力小于0.74 MPa和预抽率大于30%共同作为消突指标，即消突指标为 $\{P_c < 0.74 \text{ MPa} \cap \eta > 30\%$ ，以此确定钻孔的有效抽采半径。

2 有效抽采半径测定方法

基于钻孔瓦斯流量和压力测定有效抽采半径，即测定抽采钻孔的瓦斯流量并观测周围测压孔瓦斯压力变化，2者共同确定有效抽采半径。瓦斯流量数据真实的反映了实际抽采情况，对预抽钻孔的抽采效果有所预计，结合瓦斯压力考察，可以相互补充、相互验证。

长时间抽采，钻孔瓦斯流量由下式决定^[9]：

$$Q = 3.14m\lambda^{0.9} p_0^{1.85} R^{0.2} \alpha^{0.1} t^{-0.1} \quad (2)$$

由(2)式可知，钻孔抽采瓦斯流量 Q 与见煤长度 m ，煤层原始瓦斯压力 p_0 的1.85次方、透气系数 λ 的0.9次方、钻孔半径 R 的0.2次方、煤层瓦斯含量系数 α 的0.1次方成正比；与抽采时间 t 的0.1次方成反比。式中 λ ， p_0 ， α 是煤层瓦斯基础参数， m ， R ，为钻孔施工参数，均为定值，主要变量为时间 t 。抽采负压对钻孔瓦斯流量影响在于^[9]：短时间内会呈现随着负压的增高而抽出量增加的趋势，但随着时间的延长，其作用逐渐减弱或消失。因此，对于长时间抽采，抽采负压的影响可以忽略，只需满足不小于13 KPa，瓦斯抽采量随时间以负指数关系衰减。

煤矿现场大量实践也证明钻孔抽采瓦斯流量衰减规律符合负指数关系^[11]。对单孔抽采瓦斯量进行实测，为避免不同钻孔的见煤长度和半径影响，将计量结果统一换算为百米钻孔抽采量，并进行回归分析。回归分析采用如下公式：

$$q_t = q_0 e^{-\beta t} \quad (3)$$

式中： q_t 为百米钻孔抽采时间 t 时钻孔瓦斯抽采量， $m^3/(hm \min)$ ； q_0 为百米钻孔瓦斯初始抽采量， $m^3/(hm \min)$ ； β 为抽采钻孔瓦斯涌出衰减系数。与煤层透气性系数、瓦斯含量以及孔径大小有关，由现场实际考察测得； t 为钻孔抽采瓦斯时间， d 。

对 (3) 式在抽采时间 t 内积分可得百米钻孔抽采瓦斯总量如下：

$$Q_c = \int_0^t 1440 \times q_0 e^{-\beta t} \quad (4)$$

然后依据瓦斯抽采率计算公式：

$$\eta = \frac{Q_c}{Q} = \frac{\int_0^t 1440 \times q_0 e^{-\beta t}}{100 \times \rho W \pi r^2} \quad (5)$$

式中： Q 为钻孔有效半径范围内煤体瓦斯储量， m^3 。

结合 (1) 式即可确定有效抽采半径

$$r < \sqrt{\frac{1440 \times q_0 (1 - e^{-\beta t})}{100 \times \eta \rho W \pi \beta}} \quad (6)$$

($\eta = 1 - \frac{\sqrt{0.74}}{\sqrt{P}}$ ，且 $\eta > 30\%$)

式中： r 为有效抽采半径， m ； ρ 为煤的密度， t/m^3 。

钻孔抽采瓦斯的影响范围是随着时间的延续而不断扩大的，但存在一个极限影响范围，达到该范围的时间为极限抽采时间，此后延长抽采时间无现实意义，所以钻孔抽采时间不应大于极限抽采时间。可按下式计算：

$$t_{max} = \frac{3}{\beta} \quad (7)$$

本方法可以计算不同预抽时间下的钻孔有效抽采半径和极限抽采时间，为煤矿钻孔布置和工期安排提供依据。

3 工程试验

3.1 试验地点概况

新庄孜煤矿 62110 工作面位于六水平二采区，上限标高为 -612 m，下限标高为 -662 m。工作面设计走向长为 710 m，倾斜长为 180 m，采高 1.5 m。 B_{10} 煤层为突出煤层，煤厚 1.0~1.7 m，倾角 $20^\circ \sim 28^\circ$ ；

最大瓦斯压力为 1.8 MPa，瓦斯含量 $7 \sim 9 m^3/t$ 。煤层所对应的上覆 B_{11b} 煤及下伏的 B_8 煤均为突出煤层，首采 B_{10} 煤层作为保护层。轨顺掘进属沿空掘巷无突出危险区，切眼与运顺处于突出危险区，采用底板巷穿层钻孔条带式预抽煤层瓦斯掩护掘进，底板巷距 B_{10} 煤层法距约 12 m，长 1 100 m。

3.2 试验方法

运顺底板巷选一无构造煤层赋存稳定区域施工 2 个测压孔 1[#]和 2[#]，两测压孔终孔间距 5 m。测压孔施工时，取煤样测定该处煤体瓦斯含量 W 和密度 ρ 。待 1[#]和 2[#]孔所测压力稳定后在两孔之间，终孔间距 1[#]测压孔 2 m 处施工一抽采孔，记录见煤长度，封孔后合茬抽采。试验钻孔布置如图 2 所示，施工采用保直钻进，确保钻孔按设计参数施工到位。由测定的抽采孔流量计算有效抽采半径，并观测压力表数值随抽采变化规律，进行对比验证。

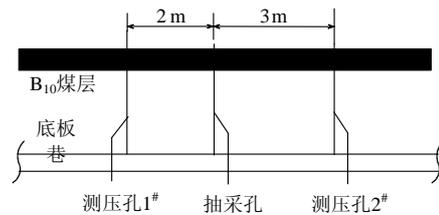


图 2 试验钻孔布置

Fig.2 Arrangement of test boreholes

3.3 试验结果

由于单孔瓦斯抽采流量衰减缓慢且波动较大，每隔 3~5 d 测定一次单孔瓦斯流量，取当天 3 班所测瓦斯流量的平均值。测定结果按负指数关系拟合曲线如图 3 所示。

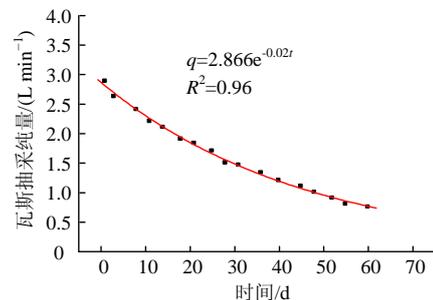


图 3 单孔瓦斯抽采流量衰减规律

Fig.3 Reduction discipline of gas drainage flow for single borehole

钻孔见煤长度为 1.8 m，按(2)式换算为百米钻孔抽采量为：

$$q_t = 0.159e^{-0.02t}$$

最大原始瓦斯压力 $P=1.8 MPa$ 按(1)式计算，预

抽率 $\eta=35.88\%$ 。按式(6)计算, 极限抽采时间为 150 d。测得试验地点煤体瓦斯含量 $W=8.7 \text{ m}^3/\text{t}$, 密度 $\rho=1.45 \text{ t}/\text{m}^3$, 按式(5)分析预抽 30, 60, 90, 120, 150 d 的有效抽采半径如表 1 所示:

表 1 不同预抽时间的有效抽采半径
Table 1 Effective drainage radius in different times

抽采时间/d	30	60	90	120	150
有效抽采半径/m	1.91	2.37	2.59	2.71	2.77

所以设计预抽 90 d, 钻孔合理布置间距应不大于 5.18 m, 可取间距 5 m 布置钻孔。

钻孔抽采期间 1[#]和 2[#]测压孔瓦斯压力随抽采变化规律如图 4 所示。

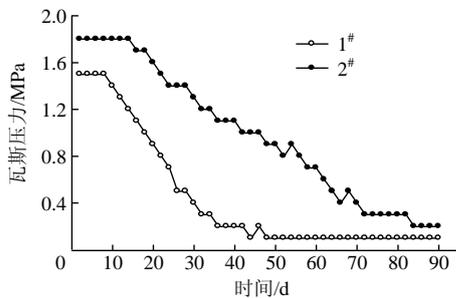


图 4 瓦斯压力随抽采变化规律

Fig.4 Variation discipline of gas pressure according to drainage

如图所示, 预抽 24 d, 与抽采孔间距 2 m 的 1[#]测压孔瓦斯压力降至 0.7 MPa, 预抽 46 d 降至 0.1 MPa。与抽采孔间距 3 m 的 2[#]测压孔, 预抽 58 d,

瓦斯压力降至 0.7 MPa, 预抽 90 d 降至 0.2 MPa。与基于钻孔瓦斯流量的计算结果较为一致, 验证了有效抽采半径测定的准确性。

4 消突效果检验与验证

底板巷区域预抽钻孔依据测定的有效抽采半径布置, 钻孔终孔间距为 5 m。预抽消突效果可由残余瓦斯压力和预抽率检验。1[#]和 2[#]测压孔预抽 90 d 后的残余瓦斯压力分别为 0.1 MPa 和 0.2 MPa; 考察底板巷一钻场内的 49 个钻孔 90 d 的抽采流量如图 5 所示, 计算该钻场影响范围内煤体瓦斯的预抽率。计算相关参数和结果如表 2 所示。该钻场 90 d 的预抽率为 40.77%。残余瓦斯压力和预抽率的检验结果证明了按有效抽采半径 2.5 m 布置钻孔, 消突效果有效。

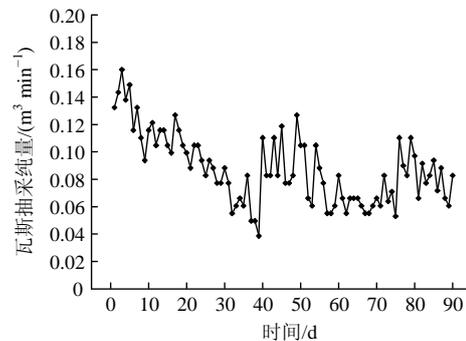


图 5 钻场中所有钻孔的瓦斯抽采量随时间变化

Fig.5 Gas flow of all boreholes according to drainage time

表 2 预抽率计算参数与结果

Table 2 Calculation parameters and value of drainage rate

走向影响范围/m	倾向影响范围/m	平均煤厚/m	原始瓦斯含量/($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$)	煤体密度/(t m^{-3})	影响范围内瓦斯储量/ m^3	预抽瓦斯总量/ m^3	预抽率/%
35	35	1.8	8.7	1.45	27 816.08	11 340.09	40.77

煤巷掘进期间对钻孔预抽消突效果进行区域验证, 突出危险性指标分析如图 6 所示。依据《防治煤与瓦斯突出规定》瓦斯解吸指标 K_1 临界值 $0.5 \text{ mL}/(\text{g min}^{1/2})$, 钻屑量 S_{max} 的临界值 $6 \text{ kg}/\text{m}$ 。在已掘进的 360 m 巷道, 瓦斯解吸指标 K_1 最大值为 $0.22 \text{ mL}/(\text{g min}^{1/2})$, 钻屑量 S_{max} 为 $3.2 \text{ kg}/\text{m}$, 均小于防突规定的参考临界值, 且未出现过夹钻、喷孔等突出预兆, 证明了按有效抽采半径 2.5 m 布置钻孔, 消突效果有效。

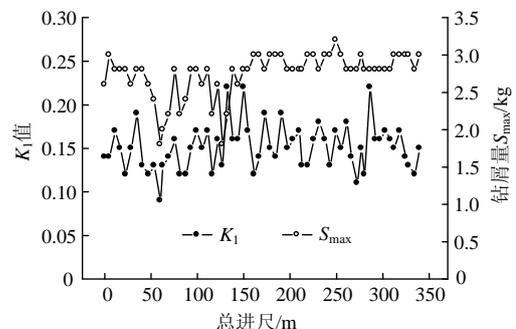


图 6 运顺掘进期间的突出危险性指标

Fig.6 Indexes of coal and gas outburst during tunnelling

5 结 论

1) 分析相关规定在消突指标认定上的分歧, 确定有效半径的依据指标为: 钻孔瓦斯抽采影响范围内残余瓦斯压力小于 0.74 MPa 且预抽率大于 30%, 即 $\{p_c < 0.74 \text{ MPa} \cap \eta > 30\%$ }。

2) 提出基于钻孔瓦斯流量和压力测定有效抽采半径的方法, 即测定抽采钻孔的瓦斯流量并观测周围测压孔瓦斯压力变化, 2 者共同确定有效抽采半径。瓦斯流量数据真实的反映了实际抽采情况, 对钻孔的抽采效果有所预计, 结合瓦斯压力考察, 可以相互补充、相互验证。

3) 试验了基于钻孔瓦斯流量和压力测定有效抽采半径的方法, 并在新庄孜煤矿 62110 工作面底板巷区域预抽消突钻孔中应用。测定预抽 90 d 有效抽采半径为 2.5 m, 并依此布置消突钻孔。残余瓦斯压力和预抽率的检验以及煤巷掘进期间的区域验证, 均证明按该方法布置的预抽钻孔, 消突效果有效。

4) 基于钻孔瓦斯流量和压力测定有效抽采半径的方法可以计算不同预抽时间下的钻孔有效抽采半径和极限抽采时间, 为煤矿钻孔布置和工期安排提供依据, 为煤层消突, 确保安全生产奠定了基础。

参考文献:

[1] 国家安全生产监督管理总局. 防治煤与瓦斯突出规定[S]. 2009.

[2] 孙培德. 煤层抽放瓦斯钻孔合理布置探讨[J]. 阜新矿业学院学报, 1989, 8(3): 44-50.
SUN Pei-de. A probe into the rational arrangement bores of drainage gas in coal seams[J]. Journal of Liaoning Technical University, 1989, 8(3): 44-50.

[3] 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): 43-45.
XU San-min. Discussion on method for determining effective methane drainage radius[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 1996, (3): 43-45.

[4] 卢平, 李平, 周德永, 等. 石门揭煤防突抽放瓦斯钻孔合理布置参数的研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3):

242-248.
LU Ping, LI Ping, ZHOU De-yong, et al. Study on proper layout parameters of the gas drainage drills of outburst prevention in rock cross-cut coal uncovering[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3): 242-248.

[5] 王兆丰, 周少华, 李志强. 瓦斯抽采钻孔有效抽采半径的数值计算方法[J]. 煤炭工程, 2011, (6): 82-84.
WANG Zhao-feng, ZHOU Shao-hua, LI Zhi-qiang. Numerical calculation method of effective drainage radius for gas drainage borehole[J]. Coal Engineering, 2011, (6): 82-84.

[6] 马耕, 苏现波, 魏庆喜. 基于瓦斯流态的抽放半径确定方法[J]. 煤炭学报, 2009, 34(4): 501-504.
MA Geng, SU Xian-bo, WEI Qing-xi, et al. The determination method of coal gas drainage radius based on methane flow state[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 501-504.

[7] 汪有刚, 刘建军, 杨景贺, 等. 煤层瓦斯流固耦合渗流的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 285-289.
WANG You-gang, LIU Jian-jun, YANG Jing-he, et al. Simulation of fluid-solid coupling flow of coal-bed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 285-289.

[8] 刘三钧, 马耕, 卢杰, 等. 基于瓦斯含量的相对压力测定有效半径技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1715-1719.
LIU San-jun, MA Geng, LU Jie, et al. Relative pressure determination technology for effective radius found on gas content[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1715-1719.

[9] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.

[10] 齐黎明, 陈学习, 程五一, 等. 新型煤层瓦斯含量准确测定方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 111-115.
QI Li-min, CHNE Xue-xi, CHENG Wu-yi, et al. Newly developed method for exact measurement of gas content [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 111-115.

[11] 于不凡. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.