

钻孔参数对瓦斯压力测定时间的影响分析

王超杰^{1,2} 蒋承林^{1,2} 杨丁丁^{1,2} 杨凯^{1,2}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为了能缩短现场瓦斯压力测定时间,探讨了被动式测压方法,从理论上分析了测压钻孔半径与入煤深度对瓦斯压力测定所需时间的影响,并建立计算模型,推导出了瓦斯压力测定稳定时间的计算公式。结果表明:煤层瓦斯压力测定稳定时间与测压钻孔半径的 $4/3$ 次方成正比,与测压钻孔入煤深度的 $2/3$ 次方成正比。现场试验表明:在相同的钻孔暴露时间下,钻孔半径与入煤深度越小,瓦斯压力测定时间越少,且瓦斯压力测定结果越大。同时也表明了理论公式的可行性,这为煤层瓦斯压力的快速测定提供了重要的参考依据。

关键词: 瓦斯压力; 钻孔参数; 测定时间; 球向流场; 被动式测压; 入煤深度

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)07-0170-05

Analysis on borehole parameters affected to gas pressure measuring time

Wang Chaojie^{1,2}, Jiang Chenglin^{1,2}, Yang Dingding^{1,2}, Yang Kai^{1,2}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

2. MOE Key Lab of Mine Gas and Fire Prevention and Control, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to reduce the time required to measure the gas pressure at the site, the paper discussed the passive mode pressure measuring method. Theoretically analyzed the radius of the pressure measured borehole and the depth in coal affected to the time required to measure the gas pressure. A calculation model was established and a formula was derived to calculate the measuring stable time of the gas pressure. The results showed that the measuring stable time of the seam gas pressure would be directly proportional to $4/3$ power of the pressure measuring borehole radius and would be directly proportional to $2/3$ power of the depth in the coal of the pressure measured borehole. The site test results showed that under the same borehole exposed time, the smaller of the borehole radius and the depth in coal, the less measuring time of the gas pressure would be and the higher of the gas pressure measured results would be. Meanwhile, the feasibility of the theoretical formula was expressed and thus could provide the important reference basis to the rapid measurement of the seam gas pressure.

Key words: gas pressure; borehole parameters; measuring time; spherical flow field; passive mode pressure measuring; depth in coal

0 引 言

矿井瓦斯是时时刻刻严重威胁煤矿井下安全生产的自然因素之一,预防瓦斯灾害对矿井建设和煤炭生产具有重要意义^[1]。准确快速测定煤层瓦斯压力对预测煤与瓦斯突出危险性 & 合理制定瓦斯防治措施等都具有非常重要的意义,是煤矿安全生产的重要保障^[2]。而目前,获取煤层瓦斯压力参数的

主要途径是通过直接法测定,为了快速准确地测出煤层的瓦斯压力,众多国内外学者对现场测定工作做了深入研究。文献[3]系统分析了测压地点、封孔深度等影响煤层瓦斯压力测定结果的因素。文献[4]提出了基于“高压注浆、耐压试验、二次成孔、快速密封”模式的用于复杂地质条件下的瓦斯压力快速测定技术。文献[5]等对封孔材料、封孔方式的选择进行了研究。文献[6-7]对含承压水煤岩瓦斯

收稿日期: 2016-03-17; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.07.029

基金项目: 江苏省自然科学基金基础研究计划资助项目(BK20150180); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX15_1431)

作者简介: 王超杰(1992—),男,河南商丘人,硕士研究生。Tel: 15996933998 E-mail: wangchaojie1017@foxmail.com

引用格式: 王超杰,蒋承林,杨丁丁,等. 钻孔参数对瓦斯压力测定时间的影响分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 170-174.

Wang Chaojie, Jiang Chenglin, Yang Dingding et al. Analysis on borehole parameters affected to gas pressure measuring time [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 170-174.

测定做了现场研究,并设计了测压水剔除仪,提出了双套管带压注浆封孔方法。文献[8-9]得出了封堵钻孔围岩裂隙注浆压力的范围。文献[10]通过理论分析和现场试验得出了满足快速测压的钻孔入煤大致深度。文献[11]推导出了瓦斯压力测定时间的计算公式。

上述研究都是基于钻孔穿透煤层形成的径向流场测压,并对影响瓦斯压力测定的外界因素进行了研究。而同等的放空时间下,未穿透煤层形成的球向钻孔卸压半径远小于径向钻孔,瓦斯损失量小,平衡时间较短且测定的压力值准确度较高^[12]。故笔者在理论分析的基础上结合现场试验,来考察测压钻孔入煤深度和半径对测压时间的影响。

1 瓦斯压力测定时间影响因素

瓦斯压力测定时间是自在24 h内完成钻孔的封孔工作,到压力变化在3 d内小于0.015 MPa测压工作结束所经历的时间^[13]。影响瓦斯压力测定的因素有很多,如邻近煤层的岩层有高承压水,煤层顶底板岩石较破碎,围岩裂隙大,封孔的严密性与封孔时间的长短,打钻速度等。如果在同一地质单元内,同一测点的测压钻孔,采用合理的封孔方式与测定方法,影响瓦斯压力测定时间的因素只有钻孔本身,即钻孔半径与钻孔入煤深度。《煤矿井下煤层瓦斯压力的直接测定方法》给出了钻孔直径宜为65~95 mm,穿层测压钻孔除特厚煤层外应穿透煤层。而我国大多数地下矿井煤层厚度均低于8 m,文献[12]研究发现未穿透煤层比穿透煤层瓦斯压力测定结果更有优势。

当测压钻孔入煤深度一定时,钻孔半径越大,钻孔与煤体的接触面积越大,钻孔自由放空时释放的瓦斯越多,而封孔后煤层内瓦斯向外渗透的也越多。很难判断钻孔半径的大小对瓦斯压力测定时间的影响。瓦斯在多孔的煤体中运移时符合达西定律,可以认为是渗透层流运动^[14]。故瓦斯的运移主要靠压力梯度,很显然钻孔放空时瓦斯运移时的平均压力梯度大于封孔后。同时钻孔周围煤体的透气性系数与时间成反比,与钻孔半径成正比,单位面积瓦斯流量与半径成反比,与时间成正比^[15]。因此钻孔半径越大,瓦斯压力测定时间很大程度上会越长。

当测压钻孔半径一定时,钻孔入煤深度不同,其钻孔周围煤体形成的瓦斯流场不同,一般穿透煤层时形成的是径向流场,而入煤但未穿煤层时形成的

则是球向流场如图1所示。

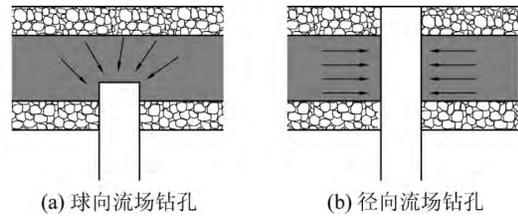


图1 施工钻孔示意

Fig. 1 Construction diagram of borehole

由于2种流场所对应的卸压半径不同,则同等时间下放散的瓦斯量不同,通过下述2个公式进行比较^[16]。

1) 球向流场钻孔卸压半径。

$$R_1 = R_0 \left[\frac{3(\omega_0 + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{(3 + \sin \varphi)(0.1 + C \cot \varphi)} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{4 \sin \varphi}} \quad (1)$$

2) 径向流场钻孔卸压半径。

$$R_2 = R_0 \left[\frac{(\omega_0 + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{(0.1 + C \cot \varphi)} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (2)$$

式中: R_0 为钻孔半径, m; ω_0 为无限远处单位煤体面受到的应力, MPa; C 为煤体黏聚力, MPa; φ 为煤体内摩擦角, $^\circ$ 。

式(1)转化为

$$R_1 = R_0 \left[\frac{(\omega_0 + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{\left(1 + \frac{1}{3} \sin \varphi\right)(0.1 + C \cot \varphi)} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{4 \sin \varphi}} \quad (3)$$

式(3)和式(2)相比,两式分子相同,式(3)分母明显较大些,根据Mohr应力圆可知 $0^\circ < \varphi < 90^\circ$,故 $0 < \sin \varphi < 1$,则式(3)的指数较小。可知 $R_1 < R_2$,两卸压半径的求得视卸压时间相等或时间无限长,说明在同等时间下球向流场卸压半径的平均增加速率小于径向卸压半径的平均增加速率。由于卸压半径越大,在同等的钻孔放空时间下,瓦斯放散得越多,所以径向流场钻孔在同等条件下会逸散更多的瓦斯,致使瓦斯压力平衡时间较长。

2 钻孔参数与测定时间的关系

2.1 物理模型的建立

测压钻孔在进入而没有穿透煤层的情况下(图1),一般认为钻孔周围形成的瓦斯运移流场是球向流场,但根据瓦斯流动理论,实际钻开的煤层流场为类球向流动流场,在钻孔低端是向心的球向流场,在钻孔壁为径向流场。所以对整个钻孔而言其流场是复合的流场,这势必会给模型的建立及计算带来复

杂性。通过对这种瓦斯流动进行模拟,结果表明^[17]:除了在靠近钻孔附近煤体中瓦斯压力线受圆柱空腔形状影响外,较远一点的瓦斯压力线都接近于球形。基于此,可以把短圆柱形钻孔转化为球形钻孔进行计算,如图2所示。

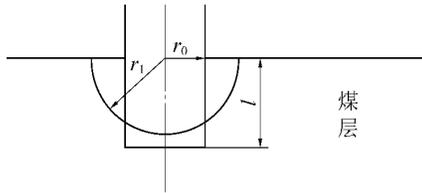


图2 转化的球形钻孔

Fig. 2 Spherical drilling hole transformed

由于转化前后钻孔体积不变,转化后的球形钻孔半径为:

$$r_1 = \left(\frac{3}{2} r_0^2 l \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中: r_0 为实际钻孔半径 m ; l 为钻孔入煤深度 m 。

对于建立的计算模型做如下假设: ①钻孔卸压范围内的煤体透气性系数及含量系数为常数; ②所研究煤层是连续的、均质的、各向同性的多孔介质; ③瓦斯在煤体内的运移符合达西定律; ④煤层顶底板岩层不含瓦斯且不漏气; ⑤瓦斯在流动过程中煤层温度恒定且不发生其他的物理化学作用; ⑥测压钻孔垂直钻入煤层。

2.2 理论公式的推导

符合达西定律的煤层瓦斯渗流速度 v ^[18] 为:

$$v = \lambda \frac{dP}{dr} \quad (5)$$

式中: λ 为煤层透气性系数 $m^2 / (MPa \cdot d)$; P 为瓦斯压力的平方 MPa^2 ; r 为瓦斯流动半径, 即至钻孔中心点的距离 m 。

故煤层瓦斯流量 q 的表达式为:

$$q = vs \quad (6)$$

$$\text{即: } q = 2\pi r_1^2 \lambda \frac{dP}{dr} \quad (7)$$

式中: s 为瓦斯流过的截面积 m^2 。

据文献[11]可知采用主动法测压,其补偿气体的压力大小对压力测定稳定时间有较大影响。根据现场经验,在煤层压力很大时如 2 MPa,采用主动法测压,在注入补偿气体时,由于孔内会很快形成一定的瓦斯压力,对补偿气体有一定的逆反排斥,致使同一测点的 2 个孔补偿气体压力最终大小不一。故对于单个因素的研究,为保证试验能真正准确地反应

出该因素对所研究问题的影响,须尽量控制其他影响因素不变。基于此,笔者主要研究在被动法测压下,钻孔入煤深度及半径对压力测定稳定时间的影响。

通过研究文献[19]的球向流场瓦斯压力公式可以解算出,球向钻孔形成后,其边界条件见式(8):

$$\begin{cases} r > R_1 & p = p_0 \\ r_1 \leq r \leq R_1 & p = \left[p_1^2 + (p_0^2 - p_1^2) \frac{r_1(r-r_1)}{r(R_1-r_1)} \right]^{\frac{1}{2}} \\ r < r_1 & p = p_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: p_0 为煤层的原始瓦斯压力 MPa ; p_1 为球形钻孔中的瓦斯压力 MPa 。

假设钻孔刚封孔时,瓦斯压力 $p_1 = 0.1 MPa$ 。将钻孔中瓦斯压力由 0.1 MPa 上升到煤层原始瓦斯压力 p_0 的过程,按压力等分为 n 个微元,即由初始 p_1 上升到 $p_1 + (p_0 - 0.1) / n$ 、 $p_1 + 2(p_0 - 0.1) / n$ 、 \dots 、 p_0 。根据钻孔有效影响半径内瓦斯压力分布可以得到瓦斯含量 Q 分布^[20]:

$$Q = \gamma V \alpha \left[(p_0^2 - p_1^2) \frac{r_1(r-r_1)}{r(R_1-r_1)} + p_1^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

式中: γ 为煤体的视相对密度 t/m^3 ; V 为煤的体积 m^3 ; α 为瓦斯含量系数 $m^3 / (m^2 \cdot MPa^{0.5})$ 。

如果把半球形钻孔有效影响半径 R_1 内的煤体,按距离均匀分为 m 等份的小半圆环,每个小半圆环的厚度为 $(R_1 - r_1) / m$,则可知在钻孔有效影响半径边界处的瓦斯流量:

$$q_m = 2\pi r_1^2 \lambda \frac{m(P_{i1} - P_0)}{R_1 - r_1} \quad (10)$$

式中: P_0 为煤层原始瓦斯压力的平方 MPa^2 ; P_{i1} 为第 i 时刻钻孔中瓦斯压力为 p_i 时,距离边界 $(R_1 - r_1) / m$ 处小半圆环的瓦斯压力的平方 MPa^2 。

对钻孔中任意时刻瓦斯压力 p_i 所对应的瓦斯含量分布求和,得到此刻钻孔有效影响半径内的瓦斯含量:

$$Q_i = \sum_{j=1}^m Q_{ij} \quad (11)$$

在自然升压条件下,钻孔中瓦斯压力慢慢上升,压力每上升 $(p_0 - 0.1) / n$,需要经历的时间为:

$$t = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{q_m} \quad (12)$$

对 t 求和即得到主动法球向流场下钻孔瓦斯压力平衡所需的时间 T :

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma \alpha \left[(p_0^2 - p_i^2) \frac{r_1(r - r_1)}{r(R_1 - r_1)} + p_i^2 \right]^{\frac{1}{4}} (R_1 - r_1)}{2\pi r_1^2 \lambda (P_0 - P_{i1})} \quad (13)$$

式中: δ 表示 i 时刻与 $i-1$ 时刻相应小半圆环的瓦斯

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{3}{2} \gamma \alpha \delta k_1^2 (k - 1)^2 \left[(p_0^2 - p_i^2) \frac{k_1 - 1}{k_1(k - 1)} + p_i^2 \right] \frac{1}{4} r_0^4 l^{\frac{2}{3}}}{2\lambda (P_0 - P_{i1}) m} \quad (15)$$

从式(15)可以看出, 瓦斯压力平衡所需时间与测压钻孔入煤深度成正相关。根据此类函数的特点可以看出, 钻孔入煤深度越大, 瓦斯压力平衡所需时间越大, 但时间增加速率随之减小。这说明随着钻孔入煤深度的增大, 其对瓦斯压力平衡所需时间的影响稍有减弱。同时也可以得到瓦斯压力平衡所需时间与测压钻孔半径有类似的关系, 但据此二者函数图线的特点, 图线中会有一个明显的拐点, 即钻孔半径较小时对瓦斯压力平衡所需时间的影响最显著。

3 现场试验及结果分析

本次试验地点选在具有代表性的神火集团薛湖煤矿, 该矿位于河南省永城市北部, 隶属于永城市。本区域位于淮河冲积平原北部, 地势平坦, 地面标高在+36—+38 m。基本构造形态呈北西向单斜构造, 向北倾斜, 走向北 45°西转向东西, 倾角浅部稍大在 25°左右, 一般 5°~10°。构造复杂程度中等, 断裂构造发育, 有少量岩浆岩活动; 煤层较发育, 煤质好, 可采煤层为 3 层, 分别是二₂、三₂、三₃。现二₂ 煤层为主采煤层, 标高-780 m, 平均厚度 2.6 m, 经鉴定, 此煤层瓦斯压力较大, 相对瓦斯压力可达 2.4 MPa, 瓦斯放散初速度为 14 左右, 软分层普氏系数为 0.22~0.41, 但总体煤体较硬, 瓦斯含量很高, 是典型的突出与高瓦斯矿井。

具体试验测压工作是测定二₂ 煤层的原始瓦斯压力, 测压点布置在 2306 底抽巷。该区域煤层总体赋存稳定, 煤层结构简单, 煤层倾角 1°~7°。底板岩石地质结构简单, 无岩浆岩侵入, 主要为矿山压力显现, 无冲击地压。底抽巷水文条件较简单, 但在掘进中及地质勘探孔均表明煤层底板砂岩及上部砂质泥岩中含有大量的水。故本试验结合文献 [4, 8-9] 封堵裂隙及承压水的研究, 在充分考察实际情况下,

含量之差。

当把卸压时间看作无限长时, 球向卸压半径和半球形钻孔半径之间满足^[17]:

$$\begin{cases} R_1 = k r_1 < 20 r_1 \\ r = k_1 r_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中: k 、 k_1 为与煤层赋存条件有关的系数。

将式(4)、式(14)代入式(13)可得:

做出以下测定压力施工方案如图 3 所示。

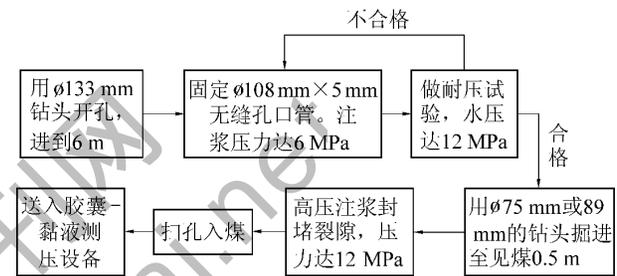


图 3 施工方案

Fig. 3 Construction scheme

为考察钻孔入煤深度与钻孔半径对压力测定的影响, 共布置了 5 个测压点, 其中 3 个点用于入煤深度对压力测定稳定时间的对比, 另外 2 个点则考察钻孔半径对压力测定稳定时间的影响。压力测定方式为被动式测压。试验过程严格按照施工方案进行, 试验遵守《煤矿井下煤层瓦斯压力直接测定方法》的有关要求, 如见煤点间距不少于 20 m, 在 3 d 内压力读数小于 0.015 MPa 视为压力稳定。而且每 2 h 读数, 读数包括瓦斯压力表、水泵、黏液泵, 发现水泵压力不足 3 MPa 及黏液泵压力小于瓦斯压力表读数时会及时补充相应压力。在压力稳定时, 打开压力表旁侧接头观察是否有水, 5 个钻孔压力表观察结果均是气体无水喷出。故此次压力结果真实有效。试验参数与测定结果见表 1。

试验结果表明: 钻孔半径越大压力测定稳定时间越长, 同时钻孔入煤深度对压力测定稳定时间有着显著的影响。由观察结果可知, 相对来说钻孔入煤深度越小, 其瓦斯压力测定结果相对大一些。这也可以说明测定的压力值更准确、更安全。目前测压钻孔半径多是 75 mm, 表中的入煤深度为 0.5 m 时, 是典型的球向流场, 而按此煤层厚度来说, 入煤深度为 2 m 时已接近于径向流场, 不管从测定时间

上或是测定值来看,球向流场具有明显的优势。

表1 试验参数与结果

Table 1 Test parameters and results

孔号	终孔 深度/m	入煤深 度/m	钻孔半 径/m	放空 时间/h	压力稳 定值/MPa	压力稳定 时间/d
1	27.5	1.5	0.075	2	2.07	10
2	28.0	1.5	0.089	2	1.98	12
3	28.4	0.5	0.075	2	2.21	7
4	28.2	1.0	0.075	2	2.10	8
5	28.0	2.0	0.075	2	2.03	16

4 结 论

1) 球向流场钻孔的卸压半径平均增加速率小于径向流场钻孔的卸压半径平均增加速率,在同等的打钻、放空时间下,球向孔放散的瓦斯量更少,瓦斯压力平衡所需时间更短。

2) 对于球向流场的测压钻孔,瓦斯压力平衡所需时间随着钻孔入煤深度的增加相应增加,但增加速率逐渐减小。其与钻孔半径有同样的关系趋势。

3) 现场试验结果表明随钻孔入煤深度与半径的增大,煤层瓦斯压力测定平衡时间越长。

参考文献:

- [1] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992: 1-4.
- [2] 张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 23-30.
- [3] 胡东亮, 周福宝, 张仁贵, 等. 影响煤层瓦斯压力测定结果的关键因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(2): 28-31.
Hu Dongliang, Zhou Fubao, Zhang Rengui, et al. Analysis on key factors affected to measured results of seam gas pressure [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(2): 28-31.
- [4] 李晓伟. 复杂地质条件下石门及井筒揭煤突出危险性快速预测研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009: 80-85.
- [5] Wang Liang, Cheng Yuanping, Wang Lei, et al. Safety line method for the prediction of deep coal-seam gas pressure and its application in coal mines [J]. Safety Science, 2012, 50: 523-529.
- [6] 许彦鹏, 吴宽, 李进. 穿含水层下向钻孔瓦斯压力测定技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3): 66-69.
Xu Yanpeng, Wu Kuan, Li Jin. Study on gas pressure measuring technology with downward borehole drilling through aquifer [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3): 66-69.
- [7] 刘三钧, 薛志俊, 林柏泉. 含水煤层瓦斯压力测定新技术[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(10): 97-100.
Liu Sanjun, Xue Zhijun, Lin Baiquan. New technique of measuring gas pressure in coal and rock seam with water [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(10): 97-100.
- [8] 王浩, 蒋承林, 张建军. 煤层瓦斯压力测定中的钻孔注浆新技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(6): 78-83.
Wang Hao, Jiang Chenglin, Zhang Jianjun. Novel technology studies on drilling grouting in methane pressure measurement of coal seam [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(6): 78-83.
- [9] 杨宏民, 杨峰峰, 安丰华, 等. 煤层瓦斯压力测定的合理封孔注浆压力研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(5): 13-17.
Yang Hongmin, Yang Fengfeng, An Fenghua, et al. Study on reasonable grouting sealing pressure for hole sealing in the determination of coal seam gas pressure [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(5): 13-17.
- [10] Jiang Chenglin, Wang Chen, Li Xiaowei, et al. Quick determination of gas pressure before uncovering coal in cross-cuts and shafts [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18(4): 494-499.
- [11] 齐黎明, 程根银, 陈学习. 瓦斯压力测定时间及其受控因素分析[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(1): 67-71.
Qi Liming, Cheng Genyin, Chen Xuexi. Analysis of gas pressure measurement time and controlling factors [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(1): 67-71.
- [12] 李晓伟, 蒋承林, 陈裕佳, 等. 球向流场在被动法瓦斯压力测定中的时间及准确性优势研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 421-425.
Li Xiaowei, Jiang Chenglin, Chen Yujia, et al. The research of balance time and accuracy advantage of spherical flow field in the gas pressure measurement by passive method of coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 421-425.
- [13] AQ 1047-2007 煤矿井下煤层瓦斯压力的直接测定方法[S].
- [14] 周世宁. 瓦斯在煤层中流动的机理[J]. 煤炭学报, 1990, 15(1): 15-24.
Zhou Shining. The mechanism of gas flow in coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(1): 15-24.
- [15] 何毓俊, 吴立云, 王飞, 等. 瓦斯压力场方程的研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(3): 28-31.
He Yujun, Wu Liyun, Wang Fei, et al. Research on the equation of gas pressure field [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(3): 28-31.
- [16] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998: 59-79.
- [17] 蒋承林. 测定煤层透气性的球向流量法[J]. 煤矿安全, 1990, 21(6): 23-27.
Jiang Chenglin. Spherical flow method of measuring coal permeability [J]. Safety in Coal Mines, 1990, 21(6): 23-27.
- [18] 周世宁, 孙辑正. 煤层瓦斯流动理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1965, 2(1): 24-37.
Zhou Shining, Sun Jizheng. Theory and application of gas flow in coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 1965, 2(1): 24-37.
- [19] 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, 1999: 66-68.
- [20] 韩颖. 钻进过程中孔壁及煤屑瓦斯涌出规律的实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007: 40-49.