

文章编号: 1000-7598(2009)03-0577-05

煤与瓦斯突出的激发和发生条件

鲜学福, 辜敏, 李晓红, 姜德义

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 从影响煤与瓦斯突出的地应力、瓦斯、煤岩物理力学性质和地质构造因素出发, 提出把煤与瓦斯突出的过程划分为突出源的形成发展、突出的激发和发生三个阶段。以南桐煤矿典型突出事故为例, 用演绎法探讨了突出激发与发生的条件。结果表明, 一切由振动产生的岩体裂隙和冲击载荷是导致煤与瓦斯突出的激发条件, 并根据充瓦斯煤的损伤蠕变方程, 得到了预测延期突出的时间。根据突出过程中的能量转换关系, 得到了突出的起动速度和瓦斯临界压力表达式, 对煤与瓦斯突出发生涉及的几个难点问题进行了讨论。揭示了煤与瓦斯突出的主要能量是瓦斯膨胀能, 突出时喷出的瓦斯由多个来源的瓦斯组成, 且地质构造区在采矿过程中容易形成有利于突出的源。

关键词: 煤与瓦斯突出; 激发; 发生

中图分类号: TD 712

文献标识码: A

Excitation and occurrence conditions for coal and gas outburst

XIAN Xue-fu, GU Min, LI Xiao-hong, JIANG De-yi

(Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Engineering,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In view of the factors influencing the outburst of coal and gas, such as crustal stress, gas, physico-mechanical properties of coal rock, and geological structures, it is proposed that the processes of coal and gas outburst consist of three stages including formation and development of outburst source. Based on a typical outburst accident occurred in Nantong mine, the conditions for excitation and occurrence of coal and gas outburst are investigated by deductive method. The results indicate that the rock fractures generated from mining vibration and impact load are the excitation condition for outburst. The delay time for predicting outburst is obtained according to creep damage equation of coal saturated methane gas. The expressions for initial starting speed of outburst and gas critical pressure are obtained according to energy exchange relationship of outburst. Some difficult problems related to coal and gas outburst are discussed. It is shown that the main energy resulting in the coal and gas outburst is expansion energy. The extrusive gas comes from a few sources. The sources of outburst can be formed easily from geological structure region during mining.

Key words: coal and gas outburst; excitation; occurrence

1 引言

煤与瓦斯(煤层气)突出是煤矿井下生产引发的一种工程地质灾害。随着煤炭工业的迅速发展, 不但突出矿井数、突出煤层数及突出次数不断增多, 而且强度愈来愈大, 有的突出之后还引起瓦斯的燃烧和爆炸, 造成重大的财产损失和人员伤亡^[1]。至今, 煤与瓦斯突出、瓦斯及其引起的瓦斯与煤尘爆炸仍然是煤矿井下安全生产的第一杀手。虽经国内外广大科技工作者多年的潜心研究, 对这一科学技

术问题已有了较深刻的认识, 但由于地质材料的复杂性、影响因素的多样性, 问题还未根本得到解决, 煤与瓦斯突出灾害仍时有发生。

作者根据矿山生产实践和多年来研究的成果^[1-8], 从影响煤与瓦斯突出的矿压(地应力)、瓦斯(主要为甲烷)、煤结构及煤岩物理力学性质(所谓三因素)和地质构造出发, 以较普遍接受的综合作用说观点, 把煤与瓦斯突出的过程划分为突出源的形成发展、突出的激发以及其发生3个阶段来加以研究, 并且采用归纳和演绎相结合的研究方法,

收稿日期: 2008-04-22

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No. 50334060); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(No. 50621403); 重庆市科技攻关计划项目(No. CSTC, 2006AA 7002); 重庆市院士专项(No. CSTC, 2005AB6007)。

第一作者简介: 鲜学福, 男, 1929年生, 中国工程院院士, 教授, 主要从事矿井煤层气理论及其工程应用方面的研究工作。E-mail: xianxf@cae.cn

以南桐煤田典型突出事故为例,用归纳法探讨突出发生的规律以及其自组织临界特性;用演绎法探讨突出源的形成发展和其激发与发生的条件^[1],本文仅论述其中煤与瓦斯突出的激发和发生条件部分。

2 煤与瓦斯突出的激发和发生条件

煤与瓦斯突出实质上是一种功能的转换过程,它是将储集在突出源中的物质的势能转变为动能而做功的过程。从突出的实例分析中可以看出,突出的发生一般要经过激发和发生两个阶段,有的可以明显分清,有的因为激发阶段很短暂,界限不是很清楚。这决定于近突出源附近岩壁(或煤壁)载荷的状态和应力水平。采矿工程进行的放炮或其他震动都会产生附加载荷,使该处的应力水平提高,引起处于临界应力状态的岩壁发生突然断裂破坏,从而造成突出源中物质的势能在极短的时间内转化为动能而发生煤与瓦斯突出。下面以图 1 为原型来讨论突出的激发和发生条件^[9]。

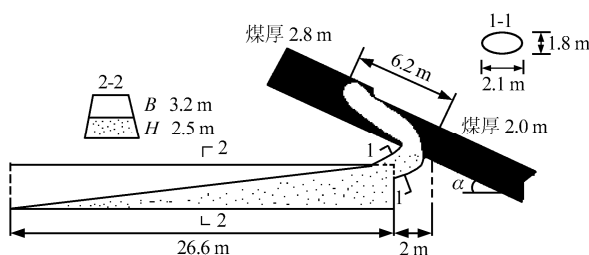


图 1 南桐直属二井石门揭煤突出实例^[9]

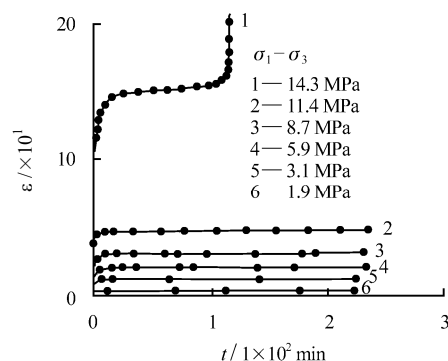
Fig.1 Example for gas outburst of rock cross-cut coal uncovering in Nandong mine^[9]

图 1 为南桐直属二井+310 m 水平十石门一次石门揭煤的突出。当石门(隧道)工作面距 4 号层水平距离 2.8 m 时,打了一曹炮眼,共分 4 圈,放第一、第二圈炮时,工作面无异常变化,当放完第三圈炮后,约 2~3 min,听到巨响,发生煤与瓦斯突出。突出煤 130 t,突出孔为椭圆形,从工作面前方上隅角开始,穿过一层岩柱,伸入煤层,向顶板方向凸起,突出源如舌状。这个例子的激发和发生阶段很清楚,故以它作分析。

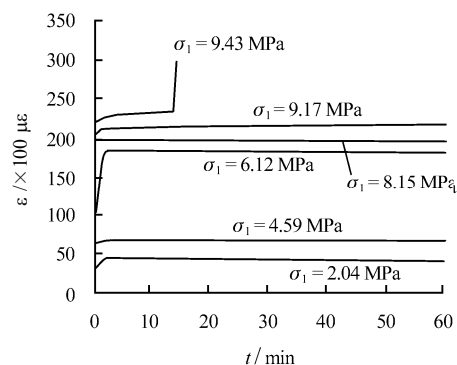
2.1 突出的激发条件

一切振动(包括震动放炮)都要产生两方面的效应,即增生岩体裂隙和产生冲击载荷。已有的试验表明^[7]:煤岩体在一定载荷下,即使是保持载荷值不变也要发生蠕变变形。当载荷值接近或大于屈服应力值时,还要发生加速蠕变,且增加的载荷值越大,发生煤岩体蠕变断裂破坏的时间就越短,这

对含气煤岩体也是一样的,如图 2 所示^[10]。同时因振动产生的冲击将使煤体中的吸附瓦斯解吸为游离瓦斯,从而增加瓦斯压力值。这与在声场作用下煤体中的吸附瓦斯要发生解吸所作的分析是一致的^[6]。以上所述也与突出发生的前兆和突出发生有一段短暂的间隔时间一致。因为蠕变断裂破坏有时间效应,所以能预报出蠕变断裂破坏的时间,这对减少损失和人员伤亡将是很重要的。



(a) 煤充入的 CO₂ 的蠕变曲线($p = 1.9$ MPa)



(b) 复合煤岩体充入的 CH₄ 的蠕变曲线($p = 0.5$ MPa)

图 2 瓦斯煤岩体的蠕变曲线^[10]

Fig.2 Creep curves of gassy coal-rock^[10]

在文献[6-7]中提出了两种应力状态下预报蠕变断裂破坏时间 t 的关系式。因为突出前的隔离煤岩柱厚度不大,所以把它看成一个面来处理是合理的。

这时,对平面应力问题有:

$$t = \frac{\xi'_2(2G'_1G'_2C - AG'_2)}{G'_1G'_2(2B\xi'_2 + A)} \quad (1)$$

式中: $A = \sigma'_1 + \sigma'_2$; $B = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 - \sigma'_s}{\xi'_p}$; $C = \varepsilon'_t / \mu'$;

$\sigma'_i = \sigma_i - P$ ($i = 1, 2$); σ'_i 为有效应力; σ'_s 为有效

屈服应力; p 为瓦斯压力; ε_t 为材料抗拉应变; μ' , G'_1 , G'_2 , ξ'_2 , ξ'_p 为含瓦斯材料材料参数。式中的 ε'_t 和 G'_1 , G'_2 , ξ'_2 , ξ'_p 可由试验确定, σ_i 和 p 可由数值方法计算求得, 因此, 平面应力条件下的蠕变断裂破坏的时间 t 可以预报。

对于平面应变问题有^[5]:

$$t = \frac{\xi'_p \xi'_2 \left\{ \frac{4}{3} \left(\zeta' + \frac{\varepsilon'_t}{\sigma'_i} \right) \pm \left[\frac{16}{9} \left(\zeta' + \frac{\varepsilon'_t}{\sigma'_i} \right)^2 - \frac{4}{3} \zeta'^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}}{2\xi'_2 + \xi'_p} \quad (2)$$

式中: ζ' 为含瓦斯材料的膨胀系数; 其余材料参数的意义同上式。式(2)分子项中“ $\pm$ ”号的选择, 因为从物理意义上来看时间“ t ”不能为负, 也不能有虚根, 所以必须的条件是:

$$(1) \frac{4}{3} \left(\zeta' + \frac{\varepsilon'_t}{\sigma'_i} \right) > \left[\frac{16}{9} \left(\zeta' + \frac{\varepsilon'_t}{\sigma'_i} \right)^2 - \frac{4}{3} \zeta'^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ 或者}$$

$\zeta' > 0$

$$(2) \left[\frac{4}{3} \left(\zeta' + \frac{\varepsilon'_t}{\sigma'_i} \right) \right]^2 \geq \frac{4}{3} \zeta'^2 \text{ 或者 } \xi'_t + 0.143 \zeta' \sigma'_i$$

≥ 0

从岩性上来看, 可以推测较脆弱的岩石蠕变断裂失稳的时间较短, 在式(2)的分子项宜选择“-”号, 这要根据试验来验证。

2.2 突出的发生条件

2.2.1 发生突出时煤粒(块)抛出的初速度

突出的发生, 实质上是储集在突出源中的能量的一种功能转换现象。根据文献[11], 一个封闭的含瓦斯体腔中的比能 N (1 t 煤) 由矿压、重力、气体状态甲烷和吸附状态甲烷创建的比能 N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 所确定, 即:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \quad (3)$$

当突出源形成过程中材料和岩石的弹性变形能已消耗殆尽, 则式中的 N_1 将不存在, N_4 也只有在其转变为 N_3 时才能做功。因此, 在这种情况下存在如下近似关系:

$$N \cong N_2 + N_3 + N_4 \quad (4)$$

根据对式(3)和式(4)的讨论^[1], 可以认为突出发生时能做功的能只有重力能和游离状态的瓦斯才能做动力功。于是, 式(4)应写成:

$$N \cong N_2 + N_3 \quad (5)$$

本文从理论上讨论突出发生时的功能平衡方程。根据文献[12], 突出源中的功能变换较慢, 所以可以近似为等温过程。对理想气体, 在等温过程, 系统由外界(环境)吸收的热量全部转化为对外界做功, 即发生气体膨胀, 于是对单位量气体, 它的膨胀功 N_3 可以表示为

$$N_3 = PV \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (6)$$

式中: p 为瓦斯压力; V 为瓦斯体积; p_1 为突出源处的原始瓦斯压力; p_2 为突出源形成后的瓦斯压力。

对实际的游离瓦斯, 按物理化学的处理方法^[13], $f = p\nu$, f 为逸度; ν 又称逸度系数。这样处理后, 式(6)就可以写成:

$$N_3 = pV \ln \frac{f_1}{f_2} \quad (7)$$

逸度系数 ν 可表示成^[13]:

$$\ln \nu = \int_0^p \frac{(z-1)}{p_r} dp_r \quad (8)$$

式中: z 为游离瓦斯的压缩系数; p_r 为对比压力, 对比压力是在临界温度下使气体液化时施加的最小压力。因为从 z 与对比温度 T_r 和对比压力 p_r 的曲线簇中可以找到 z 与 p_r 的关系, 所以可从式(8)确定出 ν 。

在文献[3]中已经研究了突出源周界的确定方法。只要确定了突出源的周界, 就可以讨论重力势能所做的功。

南桐各矿的实例和文献[3]对砚石台矿实例的数值计算表明: 虽然大多数突出源近似于舌状和(或)梨状, 但实际上形状还是比较复杂的。为此, 把这种形状的体重力等效为一圆柱体的重力, 即 $G = \pi r^2 L \gamma'$ 。这里 γ' 定义为有效重度。所谓有效重度就是要考虑突出源中瓦斯的复杂作用, 而 $\gamma' = \rho' g$, 且 g 仍为重力加速度。

G 的表达式中, r 为圆柱体断面的半径; L 为圆柱体的高。可以看出: 当 G 、 γ' 一定时, r 和 L 是反比例关系, 也就是说, 如果保持 r 为数值计算出的孔洞等效圆断面的半径 r , 那么 L 就不可能等于实际计算出的孔长度 L ; 相反如果保持 L 与计算出的相一致, 则 r 就不一定等于等效圆断面的半径 r , 这是突出源是舌形或梨形的原因。

如图1所示的情况,其突出源轴线与水平面的夹角以 θ 表示,煤层倾角以 α 表示。可以看出, θ 角稍大于煤层的倾角 α 。下面来研究单位体圆柱重力势能所做的功,即 $V = \pi r^2 \times 1$,式中1为取的圆柱体的单位长度,以 l 表示单位体圆柱移动的长度,以 W 表示该单位体圆柱移动 l 所做的功,于是:

$$W = V\gamma' \sin \theta l \quad (9)$$

很显然,该单元圆柱体,在瓦斯膨胀能 N_3 和重力势能的作用下要移动,必须克服阻力所做的负功 A ,其条件是:

$$N_3 + W - A \geq 0 \quad (10)$$

即, $N_3 + W - A = 0$ 是突出的临界条件。

揭石门放震动炮诱发突出,不仅造成隔离岩(煤)柱产生加速蠕变断裂破坏,其产生的振动波也加速突出源中物质及周边物质中瓦斯的解吸逸出。此时突出源中瓦斯的压力也不同于式(6)中的 p_2 ,而是由 p_2 变成煤与瓦斯突出时的临界压力 p_k 。对于近似为等温过程的膨胀能所做的功,这时则为 N'_3 。它也可以用式(6)的形式表示为:

$$N'_3 = -PV \ln \frac{p_2}{p_k} \quad (11)$$

如果有效重度不发生变化,那么 W 不变。这时阻力所做的负功利用式(10)的临界条件就可以表示为

$$A' = -PV \ln \frac{p_2}{p_k} + V\gamma' \sin \theta l \quad (12)$$

因为必须 $N_3 + W - A > 0$,才有剩余的能量供给煤与瓦斯突出。如果这一剩余能量完全用在抛出煤做功上,这只有在突出时的一瞬间还未发生大量瓦斯渗流的情况下,也就是突出的临界条件下才有可能。如上述移动单元体的体积为 $V = \pi r^2 \times 1$,单位体积的密度 $\rho' = r'/g$,则单元体的质量为 $V\gamma'/g$,这个质量乘以加速度 a 就为惯性力,如果采用 $a = (v_t - v_0)/(t - t_0)$,根据研究的初值条件: $v_0 = 0$, $t_0 = 0$,那么消耗在运移单元体煤上做的功 E 可表示为:

$$E = V \frac{\gamma' v_t}{g} l \quad (13)$$

可见突出发生的条件,有下述功能平衡方程,即:

$$N_3 + W - A' = E \quad (14)$$

如果把式(6)、(9)、(12)、(13)代入式(14),

并且,因为在等温过程中以上诸式中的 PV 可以替换为 RT ,所以可以求得抛出单元体煤的初速度,即突出的起动速度为:

$$v_t = \frac{RTt}{ml} \ln \frac{p_1}{p_k} \quad \text{或} \quad v_t = \frac{RTt}{ml} \ln \frac{f_1}{f_k} \quad (15)$$

式中: R 为气体常数; T 为温度; t 为岩(煤)柱的蠕变断裂破坏时间; m 为单元体的质量。其余符号同前。不过,在这里 p_1 为突出源处的原始瓦斯压力。

至于临界瓦斯压力已经有国内外相关多种文献研究过。因此,这些值都可以确定。

2.2.2 对突出发生时的几个问题的讨论

(1) 临界条件下的瓦斯压力和突出源中粉煤的液化条件

式(12)的阻力功亦可写成单元体周界面积与剪应力的乘积,在本研究中为 $A' = 2\pi r \times 1\tau$ 。同时,根据文献[3]建立的强度包络面方程,这个在临界条件下的 τ 在 $I_1 > I_0$ 的情况下(即煤(岩)已发生断

裂失稳) $\tau = \frac{\alpha I_0 + k}{(1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}}$,显然有:

$$A' = \frac{2\pi r(\alpha I_0 + k)}{(1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (16)$$

从而

$$pV \ln \frac{p_k}{p_2} + V\gamma' \sin \theta l = \frac{2\pi r(\alpha I_0 + k)l}{(1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

式中: $\beta = \cot \theta' = \frac{I_1 - I_0}{\tau}$, $\tau = J_2^{\frac{1}{2}}$

在等温过程 pV 可以替换成 RT ,且在这里取 l 为单位长度,经过演算可以获得以下关系:

$$p_k = p_2 \exp \left[\frac{\pi r}{RT} \left[\frac{2(\alpha I_0 + k) - (1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}} r \gamma' \sin \theta}{(1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \right] \quad (18)$$

当 $p_2 = p_k$ 时,必须

$$2(\alpha I_0 + k) - (1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}} r \gamma' \sin \theta = 0 \quad (19)$$

对含瓦斯煤体, $I_0 = \sigma_c - p_k$,相应的 α 和 k 应改为考虑了瓦斯影响 α' 和 k' 。经过演算后可得:

$$p_k = \sigma_c - \frac{1}{\alpha'} \left[\left(\frac{(1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}} r \gamma' \sin \theta}{2} \right) - k' \right] \quad (20)$$

当 $I_1 = I_0$ 时, $\theta' = 90^\circ$, $\cot \theta' = \beta = 0$

$$p_k = \sigma_c - \frac{1}{\alpha'} \left[\frac{r\gamma' \sin \theta}{2} - k' \right]$$

在文献[12]中对含瓦斯粉煤的喷出引入了伪液化的概念。这个概念在土力学中早已存在^[14], 其力学条件是有效正应力降为 0, 在此应该是 $\sigma_c - p_k = 0$, 于是得到:

$$k' = \frac{(1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}} r\gamma' \sin \theta}{2}$$

当 $I_1 = I_0$ 时, 同上 $\beta = 0$, 于是:

$$k' = \frac{r\gamma' \sin \theta}{2} \quad (21)$$

(2) 突出过程的时间预测

本文已在前面研究了突出孔口的确定方法, 只要确定出了孔口的断面积以及抛出煤物质在其中所占的断面积, 就可求出煤物质的重量流量 q_c 。这里设此断面积为 A_c , 显然, $q_c = v_t A_c$ 。已知突出源煤的总重量可以表示为 $Q_c = \pi r^2 L \gamma'$, 那么若设此煤量完全抛出需要经历的时间为 t' , 则:

$$t' = \frac{Q_c}{q_c} \quad (22)$$

(3) 煤与瓦斯突出时喷出的瓦斯来源的探讨

煤与瓦斯突出喷出大量的瓦斯, 一部分是来自突出源的游离瓦斯, 突出时在突出源中以渗流的形式表现, 其压力差应该以 $(p_k - 1)$ 表示; 一部分是被抛掷到采掘空间后, 煤粒因压力差很大迅速由吸附态解吸为游离态; 还有一部分为与煤粒(块)等速运动的游离瓦斯。最后, 还需要考虑到由于煤抛掷到采掘空间后, 突出源形成的空孔洞中的瓦斯压力降低, 造成周边煤岩层的瓦斯释放和解吸而参与到瓦斯的喷出中来, 甚至它还会与周边的集流孔道连通, 造成大量的瓦斯随突出而涌向采掘空间。这就可以解释为什么突出时有时喷出的瓦斯大大地超过了突出源煤层瓦斯的含量。

3 结 论

(1) 采矿工程中产生的振动能够加速隔离岩(煤)柱的蠕变断裂破坏和引起吸附瓦斯解吸, 从而引发突出的发生。

(2) 瓦斯能是突出发生的主要能量。

(3) 突出时喷出的瓦斯由游离瓦斯(它又可以

分成渗流瓦斯和与煤粒同步运移的瓦斯)、煤粒进入采掘空间后因大的压力降而解吸的瓦斯和从突出源周边因压力降低而解吸出的瓦斯、有时还可能有集流管道的游离瓦斯参与等这几部分瓦斯组成。

(4) 地质构造区是在地质演变过程中形成的特殊地段, 在这些地段不仅发生了煤岩层的形态变化, 煤岩层的物理力学性质也发生了变化, 而且在采矿过程中容易形成有利于突出的源, 因而动力现象常在这些地段发生。

参 考 文 献

- [1] 鲜学福. 煤与瓦斯突出的形成、发展、发生条件与自组织临界特性[R]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [2] 鲜学福, 杜云贵. 地电场对煤层中瓦斯渗流影响的研究[R]. 重庆: 重庆大学, 1993.
- [3] 金立平, 鲜学福. 急倾斜煤层巷道围岩应力应变及破坏区探讨[J]. 煤炭工程师, 1995, 1(1): 40—44.
- [4] 鲜学福, 谢晓佳, 刘保县, 等. 复合煤岩损伤蠕变特性及煤与瓦斯延迟突出预测的研究[R]. 重庆: 重庆大学, 1998.
- [5] 鲜学福, 许江, 姜永东, 等. 岩土体蠕滑与三峡库区边坡控制的现代非线性科学研究[R]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [6] 刘保县. 延迟突出煤的物理力学特征和延迟突出机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2000.
- [7] 鲜学福, 李晓红, 姜德义, 等. 瓦斯煤层裸露面蠕变失稳的时间预测研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 841—844.
- XIAN Xue-fu, LI Xiao-hong, JIANG De-yi, et al. Research on prediction of creep collapsing time for uncovering gas coal plane[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(6): 841—844.
- [8] 尹光志, 鲜学福, 代高飞, 著. 岩石非线性动力学理论及其应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004.
- [9] 南桐矿务局, 四川矿业学院. 南桐矿务局矿井特殊瓦斯涌出现象的分析及预防措施初步总结(1955 年—1972 年)[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1973.
- [10] 何学秋. 含瓦斯煤岩流变动力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
- [11] A. Н. зорин, В. Г. Колесников, К. К. Софийский, А. Ф. Папырин, А. А. Прусова. Механика и физика динамических явлений в шахтах[M]. Киев: Издательство «Науков думка», 1979.
- [12] А. Э. петросян, М. ф. яновская, Б. М. Иванов, В. Г. Крупеня. Исследование процессов возникновения внезапных выбросов угля и газа[M]. Москва: Издательство «Наука», Москва, 1978.
- [13] 吉林大学等校编. 物理化学基本原理(上册)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1975.
- [14] 罗国煜. 城市环境岩土工程[M]. 南京: 南京大学出版社, 2000.