

· 研究简报 ·

② 134-140

采场应力和煤结构对煤与瓦斯突出的影响

THE EFFECT OF THE STRESS OF LONGWALL AND STRUCTURE
OF COAL ON THE BUMP OF COAL AND METHANE

邱贤德
Qiou Xiande

庄乾城
Zhuang Qiancheng

吴刚
Wu Gang

肖长富
Xiao Changfu

(重庆大学资源及环境工程系)

TD712

摘要 本文通过具体实例,分析讨论了采场应力对矿井煤与瓦斯突出的控制作用;煤的物理性质对矿井煤与瓦斯突出的影响。研究表明:煤的灰分、挥发分含量直接影响着煤体瓦斯压力、含量及煤与瓦斯的突出。

关键词 采场应力;煤与瓦斯突出;瓦斯压力
中国图书资料分类法分类号 TD323; TD712

ABSTRACT The problems that the bump of coal and methame in the mine is contraled by the stress of longwall and that the coal and methane bump in the mine is affected by the physical properties of the coal are analysed and discussed through some specific bump cases. It is shown that the compressive stress, the content of the methane of the coal, and the bump of coal and methane are directly affected by the content of the ash and the volatile of the coal.

KEY WORDS Stress of longwall; bump of coal and methane; compressive stress of methane

0 引 言

煤与瓦斯突出是煤矿生产中相当严重的自然灾害。煤与瓦斯突出的强度大,频率高,严重影响着我国煤炭工业的发展及国家财产和工人的安全。造成煤与瓦斯突出的因素很多,其中地质、矿压是最重要的因素。它们能改变煤的物理性质、化学结构,形成应力集中而引起煤与瓦斯突出。

1 静应力下煤的突出—压突

目前一些学者、专家对煤突出的力学形式研究较多。有的作为静定性问题研究,有的把突出与各种扰动,如冲击波等联系起来。一般来说,静力学占主导地位,而动力学的扰动不可

* 收文日期 1991-12-10
四川省科委应用基础研究资助项目。

能成为形成突出的主要原因。地下工程的扰动是很频繁的，而突出的发生却不频繁。扰动对突出有影响，一般仅在静应力达到极限的情况下，扰动才有可能诱发突出。因此，从静力学方面讨论突出的机理是很有意义的。

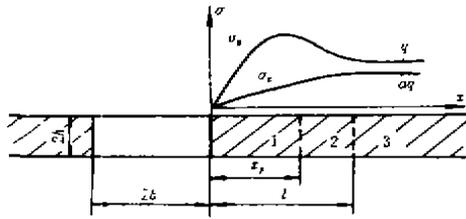


图1 工作面前方应力状态

采掘生产过程中，我们熟知的应力集中是处于工作面或巷道附近的区域内，如图1所示的 σ_x 曲线。 σ_x 曲线为水平方向的应力。设扰动区的长度为 l ，这些变化的应力，在扰动区以外就都变成了原岩应力 q 及 αq ，按照广义虎克定律有：

$$\sigma_y = q = \gamma H \quad (x > l) \quad (1)$$

$$\sigma_x = \alpha \sigma_y = \alpha \gamma H \quad (x > l) \quad (2)$$

式中： γ —岩体密度， t/m^3 ； H —埋藏深度， m ； α —侧压系数， $\alpha = \frac{\mu}{1-\mu}$ ； μ —泊松比。

假设在 x 方向的构造应力为 T_x ，则上两式可改写成：

$$\sigma_y = \gamma H + \alpha T_x \quad (3)$$

$$\sigma_x = \alpha \gamma H + T_x \quad (4)$$

煤体的平衡状态就是处于有侧限的一维压缩状态，即在工作面或巷道壁上， σ_x 为零。扰动作用于受静载的煤层时，使煤层向巷道或工作面产生一个位移，在扰动区范围内将煤岩界面之间粘附摩擦变成滑动摩擦，产生位移后，如果煤层仍处于静定状态，就不会发生突出；如果煤层是处于应力极限状态，此扰动就有可能诱发煤层的突出。基本假设如下：

a) 煤岩交界面上的摩擦满足莫尔—库仑(Mohr—Coulomb)条件：

$$\tau = S_0 + \sigma_y \tan \varphi \quad (5)$$

当 $S_0 + \sigma_y \tan \varphi \geq 0$ 时，上式一般化：

$$\tau = \delta_r (S_0 + \sigma_y \tan \varphi) \quad (6)$$

式中： S_0 —界面的内聚力， $S_0 \geq 0$ ； φ —界面的内摩擦角， $0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2} \text{rad}$ ； $\delta_r = \text{sgn}(\tau)$ 。

b) 服从 Mohr—Coulomb 屈服准则：

$$f(q, \sigma, \tau) = \rho \left[\delta_\sigma \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} + \theta \delta_r \tau \right] - \frac{P + Q}{2} \sin \varphi - S_0 \cos \varphi = 0 \quad (7)$$

式中： $\theta \delta_r \tau$ 是考虑煤层内部剪应力对屈服的影响； $\delta_\sigma = \text{sgn}(\sigma_x - \sigma_y)$ ； θ 为描述内部剪应力沿 y 方向分布的常数， $0 \leq \theta \leq 1$ ； ρ —线性化常数。

c) 煤层上、下岩层为刚性体

d) 微分平衡方程为：

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \frac{\tau}{h} \quad (8)$$

沿 σ_x 方向的应变的弹性部分应该满足虎克定律

$$e^e = A[(1 - \mu)\Delta \sigma_y - \mu \sigma_x] \quad (9)$$

设 A 为只随塑性应变 e^p 有关的系数。

在应力方面还必须满足一个条件：原来由采空区所承受的载荷现在必须转移到两侧的煤层中，即：

$$bq = \int_0^{\infty} (\sigma_y - q) dx \quad (10)$$

将(5)式、(8)式代入上式,并考虑边界条件可得:

$$\frac{l}{h} = \frac{a - (b/h)\tan\varphi}{(S_0/q) + \tan\varphi} \quad (11)$$

从(11)式中看出,当原岩应力增加时,扰动区的长度也将增加。当各参数的值一定时,得出的 l 值的结果 l_m 就为极限应力下扰动区长度。一般来说, l_m 越长,破坏区的范围就越大,发生突出的强度就越大。当存在构造应力场时,如前假设,将用 $q + aT_0$ 代替 q ,使突出的可能性增加。当 l_m 增长时,突出的几率变小,因为这时要在很大的应力下才能产生突出。现在煤矿上的突出事故中大型突出占的比例较小,与此结果相吻合。 l_m 的大小还与 S_0 、 φ 有关,即与煤的物理性质、化学结构有关。

2 煤的结构对突出的影响

煤的形成是在特定的沉积环境下形成的。由成煤植物沉积,经泥炭化作用形成泥炭,再经煤化作用形成煤,其厚度已经压缩了数十倍,而其面积的变化却不大,这种变化致使煤具有各向异性,沿层面方向层理发育。现代煤岩学的发展表明,在煤中存在大量的扁平的微孔隙,这些微孔隙绝大多数平行于层理面。由此特征,煤沿其层面就形成了弱面。

煤化程度不同,其物理性质、化学结构就不同,也就导致了宏观现象的不同。在大多数煤矿中,突出都是首先从煤软分层中开始的。如南桐矿务局可采煤层中,4号煤层为松软煤层,5号、6号煤层为中硬煤层,而且在4号煤层中还有一层更软的分层—槽口炭,其突出的统计见表1、表2。从表1、表2看出:4号层突出次数占总突出次数的42.3%,突出煤量占总突出煤量的70.7%。100t以上的突出次数占的比例为59%,而且该矿务局的7次1kt以上的特大型突出事故都发生在4号煤层,引起突出的原因很多,这里先谈谈煤的物理性质、化学结构方面的原因。

表1 南桐矿务局各煤层瓦斯突出统计表(1955—1989.3)

煤层 编号	突出次数	突出煤量 (t)	最大强度 (t/次)	平均强度 (t/次)	特大型突出次数
3	49	69.8	10	2	0
4	489	56,311.3	8765	126.1	7
5	310	10,990.3	766	36.2	0
6	309	12,358.5	450	43.8	0

表2 南桐矿务局建国以来1kt以上瓦斯突出事故统计表

煤层编号	突出次数	突出煤量(t)
3	0	0
4	93	47,985
5	22	4,738
6	44	8,543

煤的硬度与其煤化程度的高低有关,煤化程度越高,其硬度就越大,而煤化程度的不同

又引起其显微结构的不同。X射线衍射法测定煤的化学结构的结果是煤中有机质基本结构单元的煤晶核和石墨相似,是由多层水平碳网构成,随着煤化程度加深,煤晶核的大小增加。当碳含量 $C_{ad} > 90\%$ 以后则增大的很快,与煤的一些物理性质如密度、硬度、导电性、磁性等的变化步调是一致的。如条件适合,煤化程度高的煤就可能转变成石墨。关于石墨的性质已众所周知。煤化程度低的煤的X射线衍射曲线平滑,反映了其化学结构的不规则,由此分析得出:煤随其硬度的增大,其化学结构规则化程度也增高,各向异性增强。松软的煤体,可视为均质各向同性体,而硬煤却应为各向异性体。压力的作用能促进煤的物理结构的变化,静压力促使煤的芳香族稠环平行层面成有规则的排列。由此可见,硬煤承受平行于层面的力的能力很差,它可以形成很多平行于层面的弱面,通过这些弱面可以使瓦斯得到卸压,从而减小了发生突出的几率。

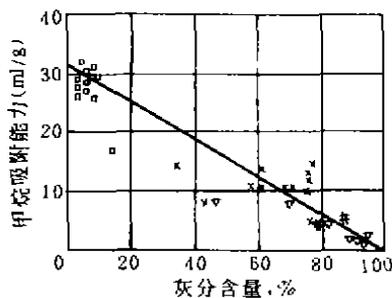


图2 大卫煤层试样的吸附能力与灰分含量关系

□ 煤; > 碳质页岩;
∇ 顶板; # 底板。

$$\text{吸附能力} = 30.58 - 0.306 \cdot \text{灰分含量} \%$$

甲烷的吸附能力还与煤的挥发分的含量有关。随着挥发分含量的增加,甲烷的吸附能力减小。水分含量的大小也影响煤的甲烷吸附能力,在不同的瓦斯压力、温度条件下,1%的水分含量可降低试样甲烷吸附能力的10%~15%。煤的构造破坏主要影响组成煤的平均粒度,导致煤体渗透性增加,但却没有破坏对甲烷吸附起着控制作用的微孔。苏联对正常煤、糜棱煤的孔隙结构研究表明,对任意特定煤层,其吸附能力的变化范围不超过10%,可以说,煤的结构破坏对甲烷的吸附能力没有多大的影响。

从某种意义上说,煤对甲烷的吸附能力的大小对瓦斯突出有很大的关系,瓦斯的主要成分是甲烷。煤中游离瓦斯与吸附瓦斯处于动态平衡之中,在相同的瓦斯压力的情况下,甲烷吸附能力强的煤的瓦斯总含量比甲烷吸附能力差的煤的瓦斯总含量要多。当由于某种原因使瓦斯发生渗流运移时,就会有大量的瓦斯涌出。表3为南桐局鱼田堡矿回采时发生的突出事故的统计。从表3看出,5号、6号煤层的情况基本相同,而与4号煤层的情况相差甚远。4号煤层突出单位煤岩所涌出的瓦斯量几乎是5号或6号的8倍。表4为南桐局原煤样的工业分析和元素分析。从表4可看出,4号层的水分、灰分、挥发分的含量与5号、6号煤层有明显的差别。

瓦斯是煤的伴生物,一般认为煤体内瓦斯绝大多数是在煤化作用过程中形成的。瓦斯存在形式有两种:受压于孔洞、裂隙中的自由状态;以分子引力吸附于煤层裂隙的表面和煤层的微孔隙内,这种微孔隙的直径仅5Å—20Å。研究表明,游离瓦斯仅占少数,这两种瓦斯在一定条件下处于动平衡状态。含碳物质的吸附能力与其灰分含量有密切关系。甲烷吸附在煤层的微孔隙中,并进入固定碳的晶格内,而灰分物质本身不具备吸附甲烷的能力,由图2可得回归方程(相关系数0.988,标准差0.005):

表3 南桐局鱼田堡矿回采时部分突出事故统计

煤层	统计事故次数	突出煤岩量(t)	突出瓦斯量(m ³)	突出单位煤岩的瓦斯涌出量(m ³ /t)
4	11	10,765	2,064,701	191.8
5	8	1,760	45,163	25.6
6	5	765	19,533	24.3

表4 南桐局原煤工业分析及精煤元素分析, %

煤井	煤层	W _{ad}	A _d	V _{ad}	S _d	C _{ad}	H _{ad}	N _{ad}	O _{ad} + S _{ad}
鱼田堡	1号	1.03	14.43	18.31	2.91	89.14	4.35	1.56	4.95
	5号	0.82	26.45	24.55	2.88	89.01	4.73	1.41	4.85
东林	4号	1.03	13.72	19.89	3.96	87.89	5.25	1.46	5.40
	5号	0.94	19.16	26.07	5.50	87.22	4.45	1.12	7.21
砚石台	6号	0.75	17.89	35.20	4.68	86.95	5.25	1.50	6.30

4号煤层的灰分一般在13—16%之间,而5号、6号煤层的灰分一般在22%以上。挥发分的含量4号煤层比5、6号煤层少得多。由于4号煤层这种特殊的组分结构,使其对甲烷的吸附能力大大增加,在地史中保存了大量的瓦斯,同时还使瓦斯的压力较高。表5是南桐矿务局各煤层瓦斯压力及瓦斯含量的表。从这些数据中看出,煤对甲烷的吸附能力与煤层的最高瓦斯压力,以及煤层的最高瓦斯含量基本上成线性增长的关系。

表5 南桐矿务局各煤层瓦斯压力及含量

煤层	最高瓦斯压力(MPa)	最高瓦斯含量(m ³ /t)
4号	6.0	33.19
5号	3.8	18.19
6号	4.6	19.28

3 采场支承压力对煤与瓦斯突出的影响

煤具有明显的塑性特性。在应力作用下,某些煤中充气孔隙彼此隔离,以致使具有这种孔隙的煤层透气率在未扰动状态时几乎等于零。通过观察和分析可得出:突发性突出是由煤层中的游离瓦斯引起的,突出持续时间很短,一般都小于1s,而吸附瓦斯的解吸需要一定的解吸时间。在很多有突出发生的矿井中经常可以看到被突出的煤岩堵塞的巷道,在其顶部有一个椭圆形的瓦斯通道,这就是由于游离瓦斯作用的结果。由此破坏了瓦斯的动态平衡引起吸附瓦斯的大量解吸。

在回采煤层中,随着工作面的推移,支承压力峰值不断向前移动,直到顶板周期来压时,峰值达到最大值。在支承压力峰值的后面又是应力降低的塑性区,所以在周期性压力作用下,破坏了煤的原生结构,同时煤体内贮存和释放的弹性能也是周期性变化的。而且这种周

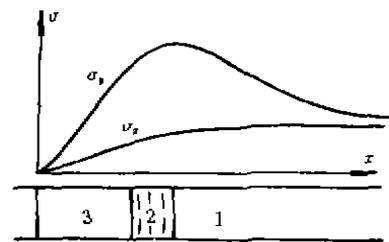


图3 回采工作面应力分布
1—弹性区;2—定向位移裂纹区;
3—塑性区

期性不是一般的周期,是一种螺旋上升的周期性。

煤体在高应力区被压缩,使煤体内裂隙、孔隙受压而闭合,弹性变形能也就积蓄在煤体中。由于煤的塑性,孔隙内的瓦斯不容易流动,这就造成了高应力区内瓦斯压力的增高。这些都是煤体发生突出的动力来源。

在应力峰值之后,煤体又卸压,压力降低到低于原岩压力时,随着煤体弹性能的释放,原有孔隙张开、扩大,并伴有新裂隙的产生,煤体遭到破坏,其承载能力大大降低,这些都为突出创造了条件。

当每次顶板来压时,煤体内弹性能的释放达到了最大值,煤体的破坏程度也最严重,而且顶板来压时,煤体内的弹性能的释放是在很短的时间内完成的,产生了很大的能量,则煤层处于最恶劣的情况下,极易发生突出。事实证明如此。从表6中可看出煤与瓦斯的突出沿工作面走向具有一定的规律性:突出点的走向间距一般为7~8米及其倍数。该矿井煤层的顶板周期来压步距为6~8米,由此可见,顶板的周期来压控制着煤与瓦斯的突出。

表6 红卫煤矿回采工作面煤与瓦斯突出分布

工作面名称	突出次数		各次突出点距开切眼距离(m)								
坦井1164-1	8	3	11	25	27	31	44	168	175		
1161-1	6		12	37	49	74	81	107			
1266-1	10		60	67	75	88	96	103	148	168	184
1268-1	5		8	122	164	186	242				
里井1563-1	3		6	28	48						
1363-1	6		5	12	20	25	47	70			

如前所述,对煤与瓦斯的突出起决定性作用的是静应力,只有静应力达到危险值后,扰动对煤与瓦斯的突出作用才明显地表现出来。各矿井的煤层一般都有一个始突深度。始突深度随地质条件的不同而异,南桐矿务局的4号煤层在缓倾斜与倾斜区的始突深度为140~150m,而在急倾斜区这个始突深度减为120~150m,5、6号煤层的始突深度在缓倾斜与倾斜区为240~300m,在急倾斜区为180~190m。即使在同一采区,突出点的分布也是不均匀的,南桐煤矿1井的采区回采工作面突出危险性可分为3带:依序是自开切眼起沿走向75m内为突出威胁带;自开切眼沿走向75~273m内为突出发生最频繁的危险带;自开切眼沿走向273~375m内为一般突出危险带。

在弹性区和塑性区的交界区有一个过渡区一定向裂纹区,如图3所示的2区。在该区形成了沿高应力方向的定向裂纹。在过渡区使 σ_x 小于原始应力 σ_{x_0} ,而 δ_x 却高于原始应力 σ_{x_0} ,煤体相当于承受单向压缩,同时还由于在塑性区边缘,纵向应力分量 σ_x 小于定向裂纹急剧扩展时的应力,因而形成了一个定向裂纹区。在工作面的推进过程中,定向裂纹区煤体变成分裂状态,塑性区为塑性变形状态,内部成连通的渗流渠道,引起瓦斯解吸。在弹性区,瓦斯处于封闭状态,因此在塑性区瓦斯抽放效果较好,而在弹性区,除在钻孔附近形成裂纹区以外,别的区域都没有受到影响,虽能抽出部分瓦斯,但抽放效果不佳。

如果开采解放层,则煤体层面上解除了部分应力而使煤体发生膨胀,同时由于水平应力的作用,形成了一些平行于层面的定向裂纹,这些定向裂纹的范围就是整个解放的范围,由

于定向裂纹的存在,增加了瓦斯渗流,如果这时预抽瓦斯,效果就会更佳。

4 结 论

1)引起煤与瓦斯突出的决定性因素是静压力,当静压力达到一定值后,就可能发生煤与瓦斯的突出一压突,或由于某种扰动引起突出。

2)随着煤中水分、灰分、挥发分的增加,煤对甲烷的吸附能力减弱,一般将导致煤层中瓦斯的最高含量、最高压力降低,突出的威胁性降低。一般地说,随着煤化程度的增高,煤中的灰分、挥发分降低,也有例外的情况,煤化程度相差不大,但灰分、挥发分、煤的物理力学性质相差甚大。深入地研究环境因素、地质因素对成煤植物沉积、成煤、煤化等煤的形成阶段的影响,对于区域性预测煤的性质,指导预防煤与瓦斯的突出将有重要的意义。

3)采场支承压力对煤与瓦斯突出具有控制作用,采场支承压力破坏了煤体的原生结构,使煤层的孔隙率、透气性和瓦斯流动发生较大的变化。顶板的周期来压使积蓄在煤体顶底板中的弹性应变能发生周期性变化,成为煤与瓦斯突出的动力来源。

参 考 文 献

- 1 赵和松. 采场支承压力对煤与瓦斯突出的控制作用. 煤炭科学技术, 1990(3): 40~43
- 2 G. R 巴克里德, S. A 拉德琴科. 煤的孔隙结构与煤层瓦斯动力特性的关系, 煤矿安全, 1990(10): 37~51
- 3 杨起, 韩德馨主编. 中国煤田地质学. 上册, 北京: 煤炭工业出版社, 1981