

从数量级和量纲分析看 煤与瓦斯突出的机理*

郑 哲 敏

(中国科学院力学研究所)

一、引 言

煤与瓦斯(包括 CO₂)突出是威胁煤矿井下安全生产的一个严重问题。我国煤的年产量居世界第三位。我国的能源结构以煤为主，今后相当长的时期内仍将如此。因此，煤与瓦斯突出问题是一个应该十分重视研究的课题。本文从力学角度对煤与瓦斯突出的机理，从数量级的比较和量纲上加以分析，以期引起力学工作者对这个重要问题的注意。鉴于问题复杂并且缺少可靠的现场实测数据，我们在此只能做些粗略的定性分析。我们认为煤与瓦斯突出的基本模型看来是清楚的。如果今后能有更多的现场观测数据和关于煤的各种力学(及物理、化学)性质的数据，并进行其他必要的实验室研究和分析，从机理研究的角度，对具体矿井中煤与瓦斯突出的可能性和规模做出预报，并建议有效的减弱或防止措施，是可以有所贡献的。

二、一些典型情况和数据

我国多次发生特大型煤和瓦斯突出事件。按照煤炭工业部煤炭科学研究院重庆研究所的归纳，我国特大型煤与瓦斯突出有下述特点^[1]：

1. 绝大多数特大型煤和瓦斯突出都发生在石门穿过危险煤层的过程中；
2. 绝大多数特大型煤和瓦斯突出都是放炮引起的。放炮与突出往往有几分钟甚至几小时的延迟时间；
3. 特大型煤和瓦斯突出时的瓦斯量(有时是二氧化碳)都很大；
4. 多数特大型突出都发生在由地质构造变化而引起的煤层厚度变化地带；
5. 发生特大型突出的煤层几乎都有厚度不等的软分层存在，或是煤层本身就比较松软，破坏类型较高。尤其是软分层结构分散，多呈粒状或粉末状，易于破碎。在地质构造变化地带，往往形成强烈的揉皱煤，层理和节理遭到破坏，这就有利于发生煤和瓦斯突出。

有关报导中还经常提到，突出发生前，有降温的感觉。

表 1 给出摘自[1]的特大型突出事件的数据。考察这些数据时需要注意，煤层厚度是粗

* 基于1982年6月中国力学学会理事会扩大会议上所作报告“我国爆炸力学在国民经济中的应用”的一部分。

略的，瓦斯压力 p_g 的测定往往由于漏气而偏低，突出的瓦斯量数据误差很大。

同一表中，我们根据深度和复盖层的平均密度 $\bar{\rho}$ ，估算了突出处的静水压力 p 。在缺少地应力数据的条件下，鉴于在漫长的地质年代中，由于蠕变，剪应力已经基本消失，因此我

表 1

序号	物理量	数 据								
		1	230	321	295	520	330	216	520	/
2	煤层厚度 t (米)	2.5	3.7	4.1	4.0	6.0	4.6	2-3	4.6	1.5
3	煤层倾角 ϕ (度)	24	30	31	60	12				40
4	瓦斯压力 p_g (公斤/厘米 ²)	24.6		18.5	36	16	17.5	8.0	>8.1	5.0
5	突出强度 M (吨)	1350	1000	2000	5270	1700	4500	12780	2800	1894
6	突出瓦斯量 V (万米 ³)	10.18	1.28	130		18	128	140		16.4
a	p (公斤/厘米 ²)	56.4	78.6	72.3	127.4	80.9	52.9	127.4	134.8	
b	V_c (米 ³)	844	625	1250	3294	1063	2810	7990	1750	1180
c	R (米)	10.36	7.34	9.85	16.2	7.51	4.41	35.6 —29.1	11.02	15.88
d	R/t	4.14	1.98	2.40	4.05	1.25	0.096	17.8 —9.7	2.4	10.5
e	体积比 ξ (等温)	4.82 —8.67		56.2		10.58	26.0	21.9		27.8
f	体积比 ξ_t (等熵)	8.21 —14.8		91.4		16.3	41.9	31.0		36.3
s	V_1/V	0.006 —0.004		0.013 —0.02		0.018 —0.004	0.007 —0.0001	0.09 —0.25		

们假定 p 就是地应力，

$$p = \bar{\rho}gh \quad (1)$$

这里 g 是重力加速度， h 是深度。设 ρ 是煤层密度，于是可以按下述公式计算突出的体积 V_c ，

$$V_c = M/\rho \quad (2)$$

式中 M 是突出强度。又令 t 为煤层的平均厚度，则突出区空腔的平均半径 R 为

$$R = (V_c/\pi t)^{1/2} = (M/\pi \rho t)^{1/2} \quad (3)$$

突出瓦斯的体积在常压 p_0 (一个大气压) 下为 V ，故在瓦斯压力为 p_g 时，按照等温假设，其体积为 $p_0 V / p_g$ ，它与突出煤层体积 V_c 之比 ξ 为

$$\xi = p_0 V / p_g V_c \quad (4)$$

如按等熵假设，则这个体积比为

$$\xi_s = (p_0/p_g)^{1/\gamma} V / V_c \quad (5)$$

其中 γ 是瓦斯的多方指数。我们用下角注 “s” 表示这个体积比是按等熵假设计算的。表 1 中同时列出了 p 、 R 、 V_c 、 ξ 、 ξ_s 和 R/t 的数值。在计算它们时，我们粗略地取 $\bar{\rho}=2.5$ 克/厘米³， $\rho=1.6$ 克/厘米³^[2]， $\gamma=1.2$ 。还应当指出，各次突出的条件不一，因此表中计算所得的数据只能看作是粗的估计。

在进一步分析之前，不妨指出，即使对强度为千吨级的特大型突出， R 也不过十几米。因此，在这个范围内，如能采取措施以防止或减轻突出的话，这种措施在实践上应是现实

的。另外， ξ （或 ξ_s ）的数值很大，因此瓦斯不仅来自突出的煤层，而且更多地是来自未崩塌的煤层。

三、数量级比较与煤和瓦斯突出的机理

任何关于煤与瓦斯突出的机理都必须说明：

1. 煤和瓦斯突出是怎样启动的；
2. 形成煤和瓦斯突出的能量来源；
3. 为何突出的瓦斯远多于突出的煤本身所含有的瓦斯，即为何 ξ 或 ξ_s 那么大；
4. 煤和瓦斯突出为何停止。

第一，让我们首先分析能量的来源问题。

我们用弹性理论估算地层中的弹性和煤层中的弹性，用气体力学理论估算煤层中瓦斯的能量，并进而比较三者之间的比例，从而断定形成煤和瓦斯突出所需的能量来自何处。

根据弹性力学，我们知道在一受均匀静水压力 p 的无限体中形成一个体积为 V_c 的球腔，则地层所提供之功为^[3]

$$W_1 = \frac{8}{3} \frac{1 + \nu_1}{E_1} p^2 V_c \quad (6)$$

其中 E_1 和 ν_1 分别是地层的杨氏模量和泊松系数。另一方面，如果 $R/t \gg 1$ ，可以把突出后形成的空腔看作一半径为 R 、厚度为零的薄圆饼。在这一极端情况下，地层所提供的功为^[4]

$$W'_1 = \frac{4}{3} \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} p^2 R^3 = \frac{4}{3\pi} \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \frac{R}{t} p^2 V_c \quad (7)$$

由于在实际的突出中， R/t 的变化颇大（见表1），因此我们可以粗略的认为，地层实际所做之功介于 W'_1 和 W_1 之间。

在地应力作用下，体积为 V_c 的煤层中所含的弹性能为

$$W_2 = \frac{\kappa}{2} p^2 V_c \quad (8)$$

其中 κ 表示煤的可压缩性。

用 ε 表示煤中的孔隙率。如果忽略瓦斯在煤中微孔表面上的吸附，并假设瓦斯可以作为理想气体，则体积为 V_c 的煤中，瓦斯的内能可表示为

$$W_g = \frac{\varepsilon \gamma}{\gamma - 1} p_g V_c \quad (9)$$

于是我们有

$$\left. \begin{aligned} W_1/W_g &= \frac{8}{3} \frac{1 + \nu_1}{E_1} \frac{\gamma - 1}{\varepsilon \gamma} \frac{p^2}{p_g} \\ W'_1/W_g &= \frac{4}{3\pi} \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \frac{\gamma - 1}{\varepsilon \gamma} \frac{k}{t} \frac{p^2}{p_g} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

根据(10)式，我们计算了几次突出时的这些比值，结果列于表1。计算时我们取 $\varepsilon = 0.10$ ， $\gamma = 1.2$ ， $\frac{1 + \nu_1}{E_1} \approx \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} = 10^{-5}$ 厘米²/公斤。我们看到，在特大型煤和瓦斯突出问题中，这些

比值确实很小。唯一的例外是一万三千吨那次特大突出。

W_2 与 W_1 的比例为

$$W_2/W_1 = \frac{3}{16} \frac{\kappa E_1}{1 + \nu_1} \quad (11)$$

根据[2]， $\kappa \approx 10^{-4} - 10^{-5}$ 厘米²/公斤，因此 $W_2/W_1 \approx 1.9 - 0.19$ 。

上述计算表明，在特大型煤和瓦斯突出问题中，高压瓦斯是所需能量的提供者。

瓦斯的能量既然那么重要，让我们进一步研究一下单位体积的煤中所含的瓦斯能量 e_g 。

根据(9)，我们有

$$e_g = W_g/V_c = \frac{\varepsilon\gamma}{\gamma-1} p_g \quad (12)$$

我们重申，由于忽略了瓦斯的吸附，上式所估的能量是偏小的。由于这个原因，又由于有更多的瓦斯来自没有被推出的煤层(ξ 相当大)，所以(9)式所估的瓦斯总能量也是偏小的。记住这一点对理解表2所列数据是有益处的。

表2给出 e_g 在不同压力下的数值($\varepsilon=0.10, \gamma=1.2$)。在这个表里我们还把 e_g 折合成TNT当量。

表 2

p_g 公斤/厘米 ²	5	10	20	30	40	50
e_g 公斤/厘米 ²	3.0	6.0	12.0	18.0	24	30
e_g 的 TNT 当量公斤/米 ³	0.070	0.145	0.287	0.481	0.574	0.718
$v = 0.10$ 米/秒	6.3	9.0	12.7	15.6	17.9	20.0
d (落差 = 2.5米)米	4.5	6.3	9.0	11.0	12.7	14.1

当量，以便于爆破或矿山工作者掌握。我们知道在爆破工程中，每立方米岩石用几百克炸药已经是相当可观的了。我们假设这个能量用于水平抛掷的利用率为 η ，则水平抛速 v 为

$$v = [2\eta e_g p_g / \rho(\gamma-1)]^{1/2} \quad (13)$$

其中 ρ 是煤的表观密度，在表2中， ρ 取为1.5克/厘米³， η 取为0.10。

根据自由落体公式，以 v 为初始速度(水平)，若落差为 H ，则水平抛距 d 为

$$d = (2H/g)^{1/2} v \quad (14)$$

表2中的 d 是根据 $H=2.5$ 米计算的。

在一般爆破工程中， $\eta \approx 0.03 - 0.05$ 。在现在这个问题里，能量利用率可能高些，故取为0.10。即使如此， v 和 d 的估算都很可能偏低，因为，已如前述，(9)式所估的总能量是偏小的。当然，(14)式只适用于大块。对于粉尘，后续的瓦斯流，虽然流速较低，仍具有携带煤粉的能力。

第二，我们试图解释为何每吨突出的煤带出那么多瓦斯，即 ζ 为什么那么大？

透气率 k 定义为^[4]

$$k = 2Q\mu p_0 L \zeta / F(p_2^2 - p_1^2) \quad (15)$$

其中 F 是做透气性试验煤样的截面积， L 是试样长度， μ 是瓦斯的粘性系数， p_2, p_1 是试件两端的瓦斯压力， Q 是沿长度 L 方向单位时间内瓦斯的体积流量(折合成一个大气压 p_0 条件下

的体积), ζ 是气压为 p_2 和 p_0 时瓦斯可压缩性系数的比例。(15)式中, 若采用 CGS 单位制, k 的单位是厘米²。我们注意到粘性系数的常用单位是泊, 1 泊 = 1 克/厘米·秒, k 的常用单位是达西, 1 达西 = 10^{-8} 厘米²。(15)式的微分矢量表达式显然是

$$\mathbf{q} = -\frac{k}{\mu} \frac{p}{p_0} \frac{1}{\zeta} \nabla p \quad (16)$$

式中矢量 \mathbf{q} 是单位时间内通过单位面积的体积流量, 其方向与压力梯度 ∇p 相反。我们取压缩系数为理想气体的等温压缩系数, 则

$$-\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_\theta = \frac{1}{p}$$

这里 θ 表示温度。因此

$$\zeta = p_0/p \quad (17)$$

以及

$$\mathbf{q} = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \nabla p \quad (18)$$

根据定义(15), 质量流为 $\rho_0 \mathbf{q}$, ρ_0 是等温膨胀到一个大气压 p_0 时的瓦斯密度。于是我们可以写出下述质量守衡方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \nabla \cdot \rho_0 \frac{k}{\mu} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \nabla p$$

或者, 由于 $\rho = \rho_0 p / p_0$, 上式可最后写为

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = \nabla \cdot \rho_0 \frac{k}{\mu} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \nabla p \quad (19)$$

这里 τ 表示时间。

在一维平面渗流的假设下, 微分方程、初始和边界条件中, 都没有其他特征长度。因此, 如果将上式无量纲化, 取瓦斯的原始压力 p_g 为特征压力, T 为特征时间, L 为特征长度, 则由(19)式可得,

$$\frac{1}{T} = \frac{p_0}{L^2} \frac{k}{\mu} \left(\frac{p_g}{p_0} \right)^2 \quad (20)$$

于是 L 与 T 的关系为

$$L = \left(p_0 \frac{k}{\mu} T \right)^{1/2} \frac{p_g}{p_0} \quad (21)$$

L 的物理意义是, 在 T 时刻, 自空腔壁 R 计起深度为 L 的范围内的瓦斯已经基本逸出。故而, 突出的瓦斯体积, 在大气压 p_0 条件下, 可估为

$$(p_g/p_0) \varepsilon \pi (R+L)^2 \quad (22)$$

根据这个公式和 ξ 的定义, 我们进一步得到,

$$\xi = \frac{\varepsilon \pi (R+L)^2}{\pi R^2} = \varepsilon \left(1 + \frac{L}{R} \right)^2 \quad (23)$$

现将典型数据 $k = 50 \times 10^{-11}$ 厘米² (50 毫达西), $\mu = 2 \times 10^{-4}$ 克/厘米·秒, $p_g/p_0 = 30$ 代入(21)式, 并取 T 为 1 小时, 我们得到 $L = 28$ 米。若又取 $R = 10$ 米, $\varepsilon = 0.10$, 则有

$$\xi = 1.44$$

与表 1 中根据实测所得的 ξ 相比, 这个计算值大约小了一个数量级, 尽管特征时间 T 已经取

得相当大了。当然，我们也可以说明，这里是粗估，一个数量级的差别可以允许，特别是考虑到在自然条件下，因为有裂隙存在，有效的 k 值可能比实验室的值要大得多。因此，严格地说， ξ 为何那样大这个问题，还没有令人满意的答案，是值得今后作专门研究的。瓦斯的吸附与解吸也许是个不可忽略的因素。

第三，让我们解释，煤和瓦斯突出为何停止？

我们设想，在突出后期，煤层在 R 处发生堵塞，形成了拱，以支撑外部的压力 p （见图1）。在突出发生之前 $\pi R^2 p$ 这部分地压是由相应的煤层承受的。空腔形成后，这个不平衡力必需部分地由顶板和底板承受，其余则转由留下的煤层负担。根据弹性力学几何相似的原

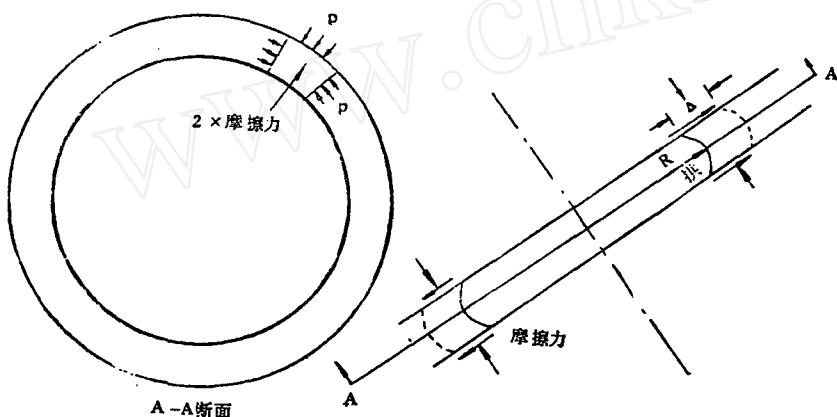


图 1

理，负担这部分力的煤层宽度 Δ 应正比于厚度 t ($R/t \gg 1$ 时)，见图1，其比例常数 α 是岩石和煤层的相对弹性常数，主要是 $E_1 \kappa$ 的函数。

在 $\Delta/R \ll 1$ 的情况下， R 方向上的力的平衡条件是

$$pRt = p\Delta + 2\nu p \left(1 + \frac{\beta R}{2\Delta}\right) R\Delta \quad (24)$$

其中 $\beta\pi R^2 p$ 是不平衡地压 $\pi R^2 p$ 转移到煤层的部分。 β 和 α 一样，也是 $E_1 \kappa$ 的函数。 ν 为摩擦系数。从(24)式解得

$$R/t = (1 - 2\alpha\nu) / \beta\nu \quad (25)$$

其中

$$\alpha = \Delta/t \quad (26)$$

在 Δ/R 并非很小的情况下，根据量纲分析，(25)式可以更一般地改为

$$\frac{R}{t} = f\left(E_1 \kappa, \frac{\sigma}{p}, \nu\right) \quad (27)$$

这里的函数 f 是有待于从实际观测或理论和实验研究确定的。从直观上讲，在其它条件相同的条件下， t 愈大， ν 愈小，则 R 或突出强度就愈大。这一点已经反映在(25)式中。在(27)式中，我们引入了强度因素，这是因为成拱条件是应当与这个因素有关的。

最后，让我们回答这一节开始就提出来的第一个问题，即煤和瓦斯突出是怎样启动的？

在石门未打开前，煤层的受力基本上是静水压 p 。严格说这个压力部分地是由瓦斯负担的，煤层实际所受的静水压是 $p_c = p - \epsilon p_g$ 。在 p_g/p 和 ϵ 相当小的情况下， $p_c \approx p$ 。

但是，当石门被打开后，煤层中出现了自由表面，那里的压力被突然释放，使自由面上的煤从受静水压状态，变为表面应力为零（或 p_0 ），而其他两个主应力为 p 。设这个条件下，煤的抗压强度（以下称为侧向抗压强度）为 σ ，则当

$$\sigma/p < 1 \quad (28)$$

时，这里的煤便被压碎了。

同理，由于石门打开形成自由面，在自由面附近的煤层中，半径方向的压应力也有释放，所以那里的煤层也不再处于静水压状态，因而也发生破坏。但是在破坏条件上，要考虑瓦斯压力这个因素。如果

$$\sigma/(p - p_g) < 1 \quad (29)$$

则显然那里的剪力没有达到使煤层破坏的程度。这就要等瓦斯压力由于渗漏而不断减少至 $\sigma/(p - p_g) < 1$ 时，那个地方的煤层才开始破坏。由于渗漏是个比较慢的过程，又由于地质因素错综复杂，所以煤与瓦斯的突出并不总是在石门打开后立即发生的，有时要延迟几分钟甚至几个小时。

另外，由于破爆的结果， σ 的值大大降低，透气性大大增加，这些都是有利于引发煤和瓦斯突出的。

综上所述，我们把煤和瓦斯突出的机理或过程概括地描述如下：

石门打开使煤层的应力状态发生变化，煤层在近初始空腔壁处开始破坏。

煤层一破坏，瓦斯的流量就增加。在瓦斯能量 $\frac{\epsilon\gamma}{\gamma-1} p_g$ 大的情况下（相对于地层或煤层中单位体积的弹性能），这有两个作用：（1）瓦斯的能量用来推动被破碎的煤，形成速度相当大的抛掷；（2）随着一部分煤被抛出和瓦斯的渗漏，煤层的应力分布进一步发生变化，使破坏区扩大，突出量增加。

当空腔增长到一定程度时，由于地压的转移，抵抗突出的摩擦力在增加，提供了成拱的条件，导致突出终止。

可以把煤和瓦斯的突出过程分为两个阶段。从突出开始到空腔形成为第一个阶段。在这个阶段中，煤连同本身含有瓦斯在短时间内大量涌出，这一部分瓦斯又是所需能量的主要提供者。以 T_1 表示这一阶段的特征时间，则这个特征时间要比弹性波在煤层中传播的特征时间 R/c 要长得多。这里 c 是煤层中的弹性波波速，约等于 $(\kappa\rho)^{-1/2}$ 。这是因为破坏的传播，如前所述，是受瓦斯的渗漏所制约的，而后一过程要比弹性波的传播慢得多。这一事实实际上已经反映在我国自己观测的数据中。根据文献[6]，在一次煤和瓦斯突出的现场实测中，煤层中预埋了两个测压探头，其径向间距约 7 米。两个压力探头都取得了突出过程中的压力波形，其时差约为 5 秒。因此，瓦斯压力变化的传播速度约为 1.4 米/秒，比数量级为每秒千米的弹性波速小得多。但是这个 T_1 又要比(20)所预计的要小得多（以 R 代替 L ），这是因为：（1）在破碎煤层中，透气性要比实验室中煤样的透气性 k 大得多；（2）煤层在不断地被抛出，所以特征长度或有效渗漏深度要比 R 小得多。

空腔形成后，第二个阶段就开始了。在这个阶段中，不再有新的煤参与突出，但瓦斯突

出仍然在进行。从(19), (21)和(22)式可以看到，在理想一维轴对称情况下，瓦斯量渐近的正比于时间，因此 ξ 可以是很大的。这部分瓦斯的危害性本身就是很大的，另外，它还能携带一部分煤粉，虽然对推动大块煤看来是没有什么作用的。

四、量纲分析与突出判据

有了以上关于煤和瓦斯突出机理的基本模型之后，还需要有描述这个模型的物理量，才能进行量纲分析。

我们的目的是通过量纲分析，得出一些工程上有用的判据，它们可以用来判断，例如，某一煤层会不会发生突出，突出的强度估计会多大，瓦斯量会有多少等等。由于煤和瓦斯突出是个很复杂的过程，对于描述它的模型还不够清楚，因此这里要进行的量纲分析和据此得出的各种判据是初步的，某些方面是带有推测性的。

上一节中已经列举了许多我们认为是重要的物理量。这里，在列出我们认为是主要物理量之前，再做一点说明和补充。

前面的讨论表明，瓦斯的解吸可能是个重要因素。本文不准备对这个问题进行深入讨论，而仅作以下修正。单位体积中瓦斯的能量 e_g 可表示为

$$e_g = \frac{\varepsilon\gamma}{\gamma-1} p_g + sA = \frac{\varepsilon\gamma}{\gamma-1} p_g + smB \quad (30)$$

其中 s 是单位体积煤中的附着面积， A 是这个单位面积上可以释放的瓦斯能量。

$$A = mB \quad (31)$$

是 A 的另一种表示法，其中 m 是单位吸附面积上可以释放的瓦斯质量， B 是单位瓦斯质量的能量。于是我们可以定义新的孔隙率 ε' 为

$$e_g = \frac{\varepsilon'\gamma}{\gamma-1} p_g \quad (32)$$

因而

$$\varepsilon' = \varepsilon + \frac{sA(\gamma-1)}{\gamma p_g} \quad (33)$$

并称之为有效孔隙率。这样，在下面的讨论里就用 ε' 代替 ε ，而不再议论吸附和解吸了。这当然是一种简化假设，需要实践或实验验证。

前面还提到，在煤和瓦斯突出过程中，随着一部分煤被抛出，就形成了新的自由面，破碎区跟着扩大。如前所述，破碎区的深度为 at 。在这个破碎区中，透气率大为增加，因此对于这个区域，我们引进一个新的透气率 k' 。另外，我们用 λ 表示破碎区煤块的特征长度（见图2）。严格说， k' 和 λ 的数值取决于煤本身，也取决于外部的受力条件和几何条件。在这里，为了简化起见，我们假设煤层一旦破碎， k' 和 λ 都只取决于煤层本身特性。下面我们将要看到，由于补

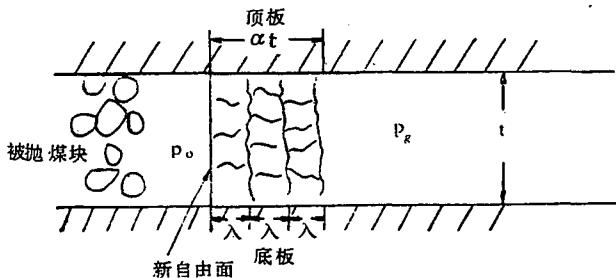


图 2

充了这两个物理因素，我们对煤和瓦斯突出的过程可以更多地有所了解。

表 3

序号	物理量	表达式	量纲	无量纲参数
1	地应力	p	$ML^{-1}T^{-2}$	
2	单位体积岩土应变能	$\epsilon = \frac{p^2}{2K}$	$ML^{-1}T^2$	ϵ/ϵ_g
3	单位体积煤的应变能	$\epsilon_c = \frac{K}{2} p^2$	$ML^{-1}T^2$	$\epsilon_c/\epsilon = K\kappa$
4	瓦斯压力	p_g	$ML^{-1}T^2$	p_g/p
5	单位体积煤的瓦斯能量	$\epsilon_g = \frac{\epsilon' \gamma}{\gamma - 1} p_g$	$ML^{-1}T^2$	$\epsilon_g/p_g = \frac{\epsilon' \gamma}{\gamma - 1}$
6	瓦斯密度	ρ_g	ML^{-3}	ρ_g/ρ
7	煤的侧压强度	σ	$ML^{-1}T^{-2}$	σ/p
8	煤的表观密度	β	ML^{-3}	
9	煤层厚度	t	L	
10	煤层的初始开挖或爆破半径	Ω	L	Ω/t
11	摩擦系数	ν	$M^0 L^0 T^0$	ν
12	渗透系数	$p_0 \frac{k}{\mu} \left(\frac{p_g}{p_0} \right)^2$	$L^2 T^{-1}$	$\frac{p_0 k}{\mu} \left(\frac{p_g}{p_0} \right)^{1/2} \left(\frac{p_g}{p_0} \right)^2$
13	渗透系数(破碎后)	$p_0 \frac{k'}{\mu} \left(\frac{p_g}{p_2} \right)$	$L^2 T^{-1}$	$\frac{p_0 k'}{\mu} \left(\frac{p_g}{p_0} \right)^{1/2} \left(\frac{p_g}{p_0} \right)^2$
14	破碎区煤块的特征长度	λ	L	λ/t

表 3 列出了我们认为是首先应当考虑的物理量(14个)和由它们所组成而大都有明显物理意义的无量纲参数(11个)。

在这个表里我们没有列入煤颗粒对瓦斯流的阻力系数，这是因为从平均意义上来说，这个无量纲参数可以认为是常数。我们也没有列入描述煤粉相互碰撞，进一步破碎和进入巷道并在巷道中运动过程的物理量。因为我们在这里忽略了这个过程以及这个过程对煤层中煤与瓦斯突出过程的反作用。

表 3 中的无量纲量并不都是重要的。对于特大型突出而言， ϵ/ϵ_g 都很小，因而这个比例可以忽略，因为地层所能提供的能量与瓦斯相比是微乎其微的。因此我们只剩下10个无量纲参数了。当然，它们都是自变量，关于突出的各种判据应当是由这些无量纲自变量所决定的，而且不同性质的判据中，各个自变量所起的作用也不同，有的甚至可以忽略。所以在不同的判据中，自变量不超过10个。

首先，我们讨论在什么条件下要发生煤与瓦斯突出的问题。密度和能量只影响过程的快慢，因而不应在这个判据中起作用，渗透系数也一样。于是，发生突出的判据可以写为

$$f\left(\frac{\sigma}{p}, \frac{p_g}{p}, \frac{\Omega}{t}, K\kappa, \nu\right) = 0. \quad (34)$$

这就是说，在其他条件不变的情况下， σ/p 低于一定的值就要发生突出。又可以说，如果其他条件不变， Ω/t 超过一定值，也要发生突出。余类推。 f 的具体形式是需要由实测定的。

其次，我们问，如果发生了突出，突出强度是由哪些因素确定的？显然，这也基本上是个静态问题，惯性和能量也不应当起主要作用。另外，考虑到突出的停止是由于成拱和堵

塞, p_g 与 p 相比只起次要作用。因此突出强度可用下式表示

$$R/\Omega = g(\sigma/p, \Omega/t, K\kappa, \nu) \quad (35)$$

如果突出的强度很大, R 与初始 Ω 的关系就不大, 则(35)式简化到上节提出的(27)式。上式和(27)式中的 g 和 f 都是待定函数。

有了 R , 就能根据上一节的讨论计算瓦斯流量 Q 与时间 T 的关系。我们有(参看(21)式)

$$Q = 2\pi R t \cdot p_0 \frac{k}{\mu} \left(\frac{p_g}{p_0} \right)^2 \frac{1}{L} = 2\pi R t \left(p_0 \frac{k}{\mu} \right)^{1/2} \frac{p_g}{p_0} T^{-1/2} \quad (36)$$

我们已经知道总瓦斯量几乎百分之百来自空腔以外的煤层, 因此

$$V \approx \int_0^T Q dT = 4\pi R t \left(p_0 \frac{k}{\mu} \right)^{1/2} \frac{p_g}{p_0} T^{1/2} \quad (37)$$

最后, 让我们讨论一下孔隙压力在破碎区的传播情况。在图 2 中, 我们表示出飞出的煤块和尚未被抛出的破碎煤层。我们假设当孔隙压力由于渗漏而下降到 p_0 时, 以 λ 为厚度的一层煤便被抛出, 形成新的自由面。以 ΔT 表示完成这层渗漏所需的时间, 则由(20)式得到

$$\frac{\lambda}{\Delta T} = c \frac{p_0}{\lambda} \frac{k'}{\mu} \left(\frac{p_g}{p_0} \right)^2 \quad (38)$$

在这个式子里, c 是比例常数。显然, $\lambda/\Delta T$ 就是孔隙压力在破碎区传播的速度。瓦斯压力或孔隙压力是能够被测到的量^[6], 因此如果在煤和瓦斯突出时, 测量不同点的压力波形, 就能检验(38)式是否成立。

五、结 束 语

我们结合几个特大型煤和瓦斯突出事件, 用数量级和量纲分析方法, 讨论了煤和瓦斯突出的机理。我们认为瓦斯能量大和煤层的强度低是形成煤和瓦斯突出的根本原因。我们提出了一些在工程上有兴趣的判据, 其中包含多个无量纲参数。它们是否都成立, 具体的函数形式又是怎样的, 是需要进一步解决的问题。

我们的目的是通过这个介绍和讨论, 引起我国力学界对煤和瓦斯突出这个重大问题的重视。我以为, 我们力学工作者和煤炭方面的科技工作者一起, 能够在解决下面几方面的问题上做出贡献。

1. 通过进一步的数量级和量纲分析, 把对煤与瓦斯突出的机理进一步定量化。在这方面, 现场地质因素的调查是很基本的。在此基础上, 用半经验的方法建立几种有用的、定量的判据。

2. 深入研究煤的力学性质和它吸附瓦斯的性质和透气性。这种研究既包括破碎前的性质, 也包括破碎后的性质。

3. 建立煤和瓦斯突出的数学模型。这里既要考虑连续介质中的渗流, 又要考虑过渡到松散介质的二相流动, 因此是个要求很高, 理论上也很有意义的问题。

4. 改进和发展现场观测手段。

本文只是初步探讨, 错误之处肯定很多, 望读者, 特别是煤炭界的同志们批评指正。

参考文献

- [1] 摘自煤炭工业部煤炭科学研究院重庆研究所全国特大型煤与瓦斯突出资料汇编, (1981.6.)。
- [2] Berkowitz, N., An Introduction to Coal Technology, Academic Press, New York (1979).
- [3] Timoshenko, S. and Goodier, J.N., Theory of Elasticity, 2nd Ed., McGraw Hill, New York(1951).
- [4] Sneddon, I.N., Fourier Transforms, 1st Ed., McGraw Hill, New York (1951).
- [5] B.B.霍多特, 煤与瓦斯突出, 宋士钊等译, 中国工业出版局, 北京 (1966).
- [6] 中梁山煤矿煤与瓦斯突出预报仪科研小组, 首次实测煤和瓦斯突出, 四川煤矿第二届煤和瓦斯突出学术讨论会, 资料汇编, 煤炭工业部煤炭科学研究院重庆研究所编 (1978.7.)。