第23卷第3期

周围应力与孔隙流体对突出煤力学 性质的影响^{*}

寇绍全** 丁雁生 陈 力 陶 俊 叶东英 (北京科技大学采矿系,北京 100083;中国科学院力学研究所,北京 100980)

摘要

本文在系统的实验与理论研究基础上、考查了周围应力与孔隙流体对突出煤变 形与破坏的影响,提出了一个描述破坏后现象的模型,其判据是一个联系着有效围压 与材料强度的无量纲参数,实验丧明,吸附瓦斯对应力-应变曲线没有明显影响;有 效应力中的孔隙压力项就是游离瓦斯的压力;含气体与液体的多孔介质会有不同有 效应力关系.

关键词 煤与瓦斯突出、周围应力、孔隙流体、有效应力、煤的破坏

当前紧迫的课题是建立一个适于研究煤与瓦斯突出的描述煤力学性质的模型。最近,文 献[1]在断裂与损伤力学基础上提出了一个结构煤的本构模型,可解释一些有趣的实验现象, 但它没有讨论围压与孔隙流体作用下煤的性质.许多工作^(1,4)表明,饱含瓦斯煤的变形与破坏 对研究煤与瓦斯突出是重要的.文献[4]的实验,简要描述了围压与孔隙压对煤力学性质的影 响.关于煤在围压增加时因孔隙流体,特别是吸附瓦斯的作用发生的由脆性破坏到柔性破坏 的转变,以及该转变对煤力学性质的影响,至今还很少探讨.本文则在这方面进行了系统的实 验与理论研究.

1 实验装置与方法

实验用煤取自突出现场——北票的一个矿井. 试样用粒径 0.1—0.2mm 的煤粉制作. 首先在煤粉中均匀掺入 8.1% 的水,再按土力学实验规程^[3]击实成形,最后放在 105℃ 的环境中保温 24h,制成文中所谓的结构煤样. 这类煤样平均密度 1.0±0.1t/m³,直径 49mm,平均高度 97.5±0.25mm. 现场煤的形成条件,包括构造运动、自重应力与构造应力因地而异,煤质很不均匀. 而这样制作的煤样保留着微结构特性,比现场煤质地均匀,可以代表易突出的软煤.

实验采用英国 WF 公司产 10t 无级三轴试验机在室温下进行。实验时固定围压 σ₃ 和加载速率。实验装置与测试系统的示意图见图 1。

¹⁹⁹¹⁻⁰¹⁻⁰⁴ 收稿,1992-08-06 收修改稿。

^{*} 国家自然科学基金资助项目。

^{**} 中国科学院力学研究所兼职。

i i

实验中选用相应的传感器测量轴向载荷、围压、试样两端的相对位移、孔隙流体压力及试 样体积改变等力学参数,并由 HP86 微型计算机通过 A/D 变换器采样和记录。

加载时试样横截面的变化按圆柱休假设计算。 因为试样轴向应变可以达到 30% 甚至更



高,工程应力与应变需要分别用瞬时应力和对数应变代替,亦即

$$\sigma_1 = \frac{(1-\varepsilon_1)F}{(1-\varepsilon_r)\frac{\pi}{4}d_0^2} + \sigma_3, \qquad (1)$$

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l_0}{l_0 - l}, \qquad (2)$$

$$\varepsilon_{\nu} = \ln \frac{\frac{1}{4} \pi d_0^2 l_0}{\frac{1}{4} \pi d_0^2 l_0 - V},$$
(3)

式中 σ_1 , σ_3 , ε_1 , ε_v 分别表示轴向应力、围压、轴向应变和体应变, F 是轴向载荷, d_0 与b是试 样的初始直径与高度, l = V 分别为试样端面的相对位移和体积变化。径向应变 ε_r 、剪应变7 和轴向应变率 $\dot{\varepsilon}_1$ 都可以由 ε_1 和 ε_v 计算.广义杨氏模量 E 和 Poisson 比 v 分别由轴向应力-应变曲线斜率和轴向应变-径向应变曲线的负斜率确定, 于是 E 和 v 均为应力或应变的函数.

2 实验结果

做了一百多个试样的实验,获得了相当大量的数据.为了简明,这里只显示了几条典型的 应力-应变曲线.孔隙与大气连通的煤样在不同围压下的差应力-轴向应变与差应力-体积应变 关系^{III}(图 2 和图 3)说明,随着围压升高煤样的力学性质有很大变化.如果围压相对小,变形 与破坏是脆性的.这时存在 3 个含义不同的强度,把整个变形与破坏过程分成 4 个阶段.3 个强度为屈服强度、极限强度和残余强度;4 个阶段为弹性区、初始损伤区、破坏后区和剪切滑

0

4

0.75MPa

4

265



移区。应力高于屈服强度时的剪胀和破坏后承载能力的下降是脆性破坏的突出特点。当围压 进一步加大时,试样转呈柔性。这一情况的突出特征是随围压升高而体积缩小,且承载能力提 高. 在本文实验条件下,由脆性破坏到柔性变形转变的围压约为 0.4—0.5MPa. 而压制煤样则很少发生脆性变形与破坏.

图 4 是饱含 N₂ 的煤样在 1.2MPa 围压和不同孔隙压力 P_g 作用下的典型应力-应变曲线. 由图可见,在较低的孔隙压力下变形与破坏呈柔性,而孔隙压增高到大于 0.8MPa 时变形与破坏呈脆性。饱含 CO₂ 的煤样的应力-应变曲线,当实验条件(包括围压与孔隙压)完全一样时,与饱含 N₂ 的相同(如后面图 10 所示)。 饱含瓦斯的煤样由脆性到柔性变形的转变 围压与连通大气的煤样的转变围压几乎完全一样。

图 5 和图 6 给出了饱含水的结构煤样在1.2MPa 与 0.8MPa 围压及不同孔隙压 p_{u} 作用下的典型应力-应变曲线,它们有与饱含气煤样相同的趋势。首先,在同一个给定的应变与孔隙 压下,图 4 曲线上的应力显然高于图 5;其次,在同样的有效围压 0.2MPa (即 $\sigma_{s} - p_{e}$ 或 $\sigma_{s} - p_{u}$)下,饱含气煤样呈脆性破坏,但饱含水的呈柔症。这意味着不同孔隙流体对转变围 的影响是不同的。对于与大气连通的含水煤样有类似的情况(见图 7)。

另外, 脆性破坏的结构煤样有一条倾斜的剪切破坏带, 而柔性破坏的煤样保持鼓形。

3 围压的影响

现讨论围压对破坏后区煤力学性质的影响.煤介质可以区分为两部分:母体与裂隙.母体包括煤粒与粘结材料. 假设母体材料是线弹性——理想塑性体,服从 Tresca 屈服准则,并 且在煤样的极限强度点达到其最大承载能力 σ*.煤样变形超过极限强度后,一方面,无论应变 多大,母体材料单位面积承载能力保持常值;另一方面,由于微裂隙随变形加大而迅速成长,母 体材料的承载面积下降. 设轴向载荷将在母体应力与裂隙表面摩擦力共同作用下达到平衡, 亦即

$$(A - A_s)G\sigma_3 + A_s\sigma_s^* = A\sigma_1, \tag{4}$$

式中 σ₁ 为轴向应力, A 与 A, 分别表示整个裂隙体与母体材料的承载截面积, G 是一个描写 σ₃ 引起的裂隙表面间摩擦力在轴向贡献的待定函数. 在讨论中采用线性损伤假设

$$A_s = A_s^0 (1 - D). \tag{5}$$

总截面积A可表为

$$A = \frac{A_s^0}{1 - \eta_0} (1 + v\varepsilon_1)^2, \qquad (6)$$

式中D为损伤变量, η_0 为初始裂隙体密度, ν 为 Poisson 比, ε_1 为轴向应变。引入无量纲变量

$$Q = G_{\sigma_i^*}^{\sigma_j^*}.$$
 (7)

由(4)-(7)式得到下述方程:

$$\sigma_{1} = \frac{(1-D)(1-\eta_{0})}{(1+\nu\varepsilon_{1})^{2}} (1-Q)\sigma_{s}^{*} + Q\sigma_{s}^{*}, \qquad (8)$$

$$E = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = -\Gamma(1-Q)\sigma_1^*. \tag{9}$$

这里

$$\Gamma = \frac{\frac{\partial D}{\partial \varepsilon_1} (1 + v \varepsilon_1) + 2v(1 - D)}{\frac{(1 + v \varepsilon_1)^3}{1 - \eta_0}}.$$
 (10)

由于D小于1,并随 ε ,增长而增长,而且 $\eta_0 < 1$,所以 Γ 大于零. 根据方程(8)—(10)导出下列情况:

(1) 如果 Q < 1,则按(9)式定义的杨氏模量 E < 0. 这意味着当 $G\sigma_1$ 小于 σ_1^* 时, 整个轴向承载能力随应变增加而单调下降。这种情况与图 8 的 1 类曲线 (Warersuck 和



图8 破坏后的两种行为"**

Fairhurst^[6])相对应,另外,杨氏模量的值在给定应变处随围压 σ_3 增加而增加,在给定 σ_3 小于 $\frac{\sigma_i^*}{G}$ 的条件下,由于 $\frac{\partial\Gamma}{\partial \varepsilon_1}$ 小于、等于或大于零,杨氏模量会随应变增加而上升、保持常值或下降,其变化情况决定于材料自身的特征,如果 $\frac{\partial D}{\partial \varepsilon_1}$ 趋于正无穷,则 E 趋于负无穷,这相当于 弹-脆性材料的突然失效,与图 8 虚线描述的情况相对应,此时,达到该应变值,损伤即不能再 维持,

(2) 如果 Q = 1,则 E = 0,亦即在围压 $\sigma_3 = \frac{\sigma_1^*}{G}$ 时试样承载能力不随应变增加而变 化. 当然,这并非损伤不随应变增加而扩大,而是新增裂隙间的摩擦力恰好弥补了母体损伤减 少的承载能力. 这时的 σ_3 就是转变围压,低于它,围压引起的摩擦力就不能补偿母体损伤所 失去的承载能力.

(3) 如果无量纲因子 Q > 1,则 E > 0,亦即此时试样承载能力随应变增加,且其在给 定应变处的杨氏模量随围压增加而增加。图 4—7 的实验曲线证明了这一点。

(4) 当损伤变量 D = 1 时 E = 0,意即试样中形成剪切滑移带时或完且失效后,试件像是 变成了理想塑性体,由图 2 与图 4 可以看到

$$\sigma_r = Q\sigma_r^* = G\sigma_{3\bullet} \tag{11}$$

在脆性条件下^{III}

7

第3期

中国科学(A辑) 第23

$$G = \frac{\operatorname{tg}\theta(\cos\theta + \mu\sin\theta)}{\sin\theta - \mu\cos\theta}, \qquad (12)$$

式中 μ 是摩擦系数, θ 是剪切带与 σ_3 之间夹角. 假设试样属于 Coulomb 材料, θ 与 σ_3 无关, 由与大气接通试验的 Molar 包络线知 θ 近似等于 33°—35°. 另外,对发生脆性破坏的实验 结果进行线性回归,在摩擦系数近似取 0.45 时得到经验公式

$$\sigma_r = 3.87\sigma_3, \tag{13}$$

·其回归系数达 0.97。

基于裂隙间的摩擦机制,对实验后保留下来的试件的形状作如下解释.如若微裂隙在-个剪切面成长,则试样裂隙部分单位面积的局部承载能力在 σ* 到 Go, 范围内变化. 脆性情 况下,由于 Go, 小于 σ*, 沿裂隙的面比其它可能的面要弱,裂隙越长的面越弱,因而利于裂 隙成长.由此,在剪切带形成过程中试件承载能力将逐渐衰减,剪切带一旦形成,试件即裂成 两部分.由于应力减小,其中每一部分均可视为刚体,试件的变形则取决于两刚体块的相对滑 动.柔性情况下,由于 Go, 大于 σ^{*}, 沿裂隙的面变得比其它可能的面更强,因而不利裂隙成 长.这时剪切带无法形成,随应力逐渐增加,整个试样将逐渐垮掉,在应力及与端面摩擦的作 用下最终成为鼓形.

目前的问题是,因G是摩擦系数μ的函数,若进入试样裂隙的流体引起μ变化,材料性质 将怎样变化?另外,σ* 是一个依赖于材料组成,粘结材料和结构的重要材料常数。 这是应 力-应变关系强烈地受样品制作条件影响的原因。例如,没有结构的试样,即σ*=0的试样 在三轴实验中不可能出现脆性。 由于孔隙流体的特性不同,σ* 可能随进入试样孔隙的流体 而变大、减小或保持常值。这是需要研究孔隙流体对煤力学性质作用的另一个因素。

4 孔隙流体的作用

按照 Terzaghi^(M) 提出的有效应力概念,必须区分作用于试样骨架的应力与作用于孔隙 流体的压力的贡献。剪应力必然完全由骨架承受。骨架只是承受了部分正应力,剩余部分必 然由孔隙流体承受。于是,应力变化引起的可测量的效应,诸如可压缩性、应变、剪切强度等都 只取决于有效应力 σ-p₁ 的变化。 这里 p₁ 表示孔隙流体压力。图 9 是饱含水的结构煤在不



268

- 7

同围压 σ_3 与孔隙压 p_w 作用下的典型的轴向有效应力 $\sigma_1 - p_w$ 一轴向应变曲线。 它们依有效 **图**压 $\sigma_3 - p_w$ 而明显分为两族,每族均可按同一有效围压近似地处理成一条轴向有效应力-轴向应变曲线。这表明有效应力概念相当好地适用于饱含水的煤。

通常,煤中吸附瓦斯量比孔隙中游离瓦斯量大一个量级,亦即现场煤层中的瓦斯(多数是 甲烷或二氧化碳)大部分被煤吸附了。这样大量的吸附瓦斯是否影响煤的力学性质?我们知 道,煤对二氧化碳的吸附能力大约5倍于氮气。与二氧化碳相比,氮气的吸附量可以忽略。设 计分别饱含二氧化碳与氮的煤样实验,可以考查吸附瓦斯的影响。图 10 就是实验结果。图中



图 10 不同孔隙气体 N₂(偶数号) 和 CO₂(奇数号)在围压为 1.2MPa 时,应力-应变实验曲线的比较 Pg:1,2----0MPa, 3,4----0.6MPa, 5,6----0.8MPa, 7,8----1.0MPa

标偶数的曲线表示饱含 N_a 的结构煤样的实验结果,标奇数的是饱含 CO_a 的结果。4 对曲线 对应于不同的有效围压,即 1.2,0.6,0.4 与 0.2MPa,其中除标号 5,6 的以外,每对曲线都重合 得相当好。这意味着吸附瓦斯对力学性质没有明显影响。换句话说,孔隙瓦斯的力学效应几 乎完全取决于游离瓦斯。这与瓦斯渗流对煤破坏的实验[®]完全一致。曲线 5,6 对应于 0.4 MPa 的有效围压,恰是煤样由脆性破坏到柔性变形的转换应力。这时煤样成分、结构及实验条件对 煤的行为很敏感。因此,曲线 5 与 6 的差别不宜归因于不同瓦斯的影响。

取图 4,5 与 10 作例子,比较含水与含气煤的实验结果,可以发现:

(1) 在我们的实验条件下,含水煤的转变围压小于 0.2MPa, 明显低于含气煤的转变围压 0.4-0.5MPa;

(2) 在同样有效围压与应变情形下,含水试样的承载能力明显低于含气的试样,意即水削 弱了母体材料的强度;

(3) 含水煤样的残余强度显著低于含气煤样,意即孔隙水减少了裂隙面间的摩擦。

5 结 论

(1) 围压对煤的力学性质有重要影响。它加大了裂隙表面间的摩擦,从而加大了裂隙试 样的承载能力。单位面积上的摩擦力与母体材料屈服强度构成一个无量纲因子 G ^{g3}_σ, 其值 可以影响煤的变形与破坏的特征:

269

$G\sigma_3/\sigma_s^* < 1$,	脆性破坏,
$G\sigma_3/\sigma_i^*=1$,	脆性与柔性转变
$G\sigma_3/\sigma_s^* > 1$,	柔性破坏。

,

不论属于那种破坏类型,试样完全破坏后的承载能力,即残余强度,仅仅取决于与围压相关的 摩擦.

(2) 含在煤中的瓦斯的力学效应几乎全部是由游离瓦斯引起的,吸附瓦斯的作用可以忽略。

(3)含在煤样中的孔隙流体可以有 3 种作用: ①提供静水压力并影响骨架正应力; ②可 以影响母体的结构与强度;③可以影响裂隙表面间的摩擦,从而改变应力--应变关系.由此,流 体的特性将影响有效应力关系.

致谢 作者对郑哲敏、谈庆明教授、俞善炳副研究员与丁晓良博士的富有成效的讨论;对 唐莘庚、<u>乔敏</u>、赵京、向宗琳、张加华、李金华、<u>王轩</u>、邢达、王青山等同志参加实验或在工作过 程中给予帮助及北京科技大学采矿系、中国科学院力学研究所土力学室与北票矿务局的热诚 支持,在此一并深表感谢。

参考文献

[1] Kou Shaoquan, Ye Dongying, Ding Yansheng, Engng. Fracz. Mech., 1990, 35 (4/5): 835-853.

[2] 郑哲敏,从数量级和量纲分析看煤与瓦斯突出的机理,力学与生产建设,北京大学出版社,1982.

[3] 煤与瓦斯突出机理和预测预报第三次科研工作及学术交流会议论文选集,四川,煤炭部重庆煤研所编,1983.

[4] 李中成,煤炭学报,1987,(1): 17-27.

[5] 水利电力部编,土力学实验规程, SD128-184, 第二版,水利电力出版社,北京 1987.

[6] Waversick, W. R., Fairburst, C., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 1969, 17: 561-575.

[7] Terzaghi, K. Van, Theoresical solid mechanics, Wiley, New York, 1943.

[8] 丁晓良、俞善炳、丁雁生等,中国科学,人辑,1989,(6):600-607.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net