

文章编号: 0253-9993(2006)02-0150-04

三轴压缩煤岩强度及变形特征的试验研究

杨永杰, 宋 扬, 陈绍杰

(山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 青岛 266510)

摘 要: 在 MTS815 岩石伺服试验机上对鲍店煤矿 3 煤进行了常规三轴压缩试验, 并对试验结果进行了分析. 结果表明: 煤岩由于含有大量的微孔隙裂隙, 在围压作用下, 孔隙裂隙被压密闭合, 弹性模量随之增大, 但并非呈线性关系. 在常规三轴压缩条件下, 煤样三轴压缩强度与围压之间呈线性关系 (不包括单轴压缩情况), 在实验的围压范围内, 煤岩破坏符合 Coulomb 强度准则, 但由于煤样具有明显的非均质特性, 其内部含有大量的随机裂隙等缺陷, 且煤样黏聚力较低, 煤样沿随机裂隙破裂偏离 $\theta = 45^\circ + \phi/2$ 的可能性很大.

关键词: 三轴压缩试验; 煤岩强度; 变形特征; 围压

中图分类号: TU458 文献标识码: A

Test study of coal's strength and deformation characteristics under triaxial compression

YANG Yong-jie, SONG Yang, CHEN Shao-jie

(College of Resource and Environment Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: The conventional triaxial compression test of No. 3 coal seam of Baodian Colliery was carried out with MTS815 servo-controlled rock mechanical test system and the strength and deformation characteristics were analyzed. The experimental results indicate that under the confining compression, fissures close due to the large quantity of micro fissures, and the modulus increase with it, but presents nonlinear relation. Under general triaxial compression, and triaxial compression strength of coal specimens and confining compression have good linear relation (the case of uniaxial compression excluded), when the confining compression is less than maximum experimental compression, the destroy of coal mine fits the Coulomb criterion, but because of the obvious heterogeneity of coal specimens, there are large quantity of flaws such as random fissures, and the cohesion is low, it is most possible for the random fissures of coal specimens deviate from $\theta = 45^\circ + \phi/2$.

Key words: triaxial compression test; coal strength; deformation characteristics; confining pressure

有关花岗岩、大理岩、红砂岩等坚硬致密且相对均质岩石的力学性质实验研究成果较为丰富. 属于沉积岩的煤岩, 由于其组分和结构有别于这些坚硬岩石, 煤岩层理、节理、孔隙、裂隙等缺陷复杂多变, 组分千差万别, 因此其强度更低, 离散性更大, 有关煤岩力学性质特别是三轴压缩条件下的强度及变形特征的系统实验研究非常匮乏. 同其它沉积岩石一样, 煤岩的强度及变形特征, 除受其组分和结构影响外, 主要受赋存条件的影响, 特别是地应力环境和水的影响, 在煤矿井下采动过程中, 煤体总是处于一定的地应

收稿日期: 2005-06-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50474029)

作者简介: 杨永杰 (1965-), 男, 山东泰安人, 硕士, 副教授. Tel: 0532-86057053, E-mail: yyj.6125@163.com

力作用之下, 受单轴载荷作用的情况是很少的, 大多数处于三轴受力状态^[1]. 因此, 在解决矿井工程地质和技术问题, 并且对煤体质量和稳定性作出评价时, 必须了解煤岩在不同围压作用下的变形及强度特征. 本文采用先进的 MTS815 电液伺服岩石试验系统对鲍店矿煤 3 煤进行了较为系统的常规三轴压缩试验, 并对其强度及变形特征进行了分析.

1 试验方法及煤样制备

(1) 试验方法 煤样常规三轴压缩试验在山东科技大学 MTS815.03 电液伺服岩石试验机上进行. 采用先加围压至预定值, 再以 $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的轴向应变速度加载至煤样破坏的试验方法.

(2) 煤样制备 由于煤的层理、节理非常发育, 各种微孔隙、裂隙也较多, 所以煤相对比较软弱破碎, 强度低, 离散性大. 在进行力学性质试验时, 煤的取样制样十分困难, 且取样制样过程中煤的原生状态极易受人因素扰动影响. 本次煤样取自兖州矿业集团鲍店煤矿 3 煤, 煤块取自该矿 5309 综放工作面上回风巷. 在取样、制样过程中, 为尽可能保持煤样的原始状态, 减少人为扰动影响, 采取了以下主要措施: ① 大块煤样均取自两工作面前 100 m 以外的上回风巷, 以消除工作面前方支承压力的影响, 所取大块煤在垂直方向上均属同一分层煤, 在水平方向上均在同一位置附近; ② 为有效控制取样过程中在煤块中产生的人为裂隙等, 在矿井井下采用打眼机定向密集打眼获取大块煤样, 并立即包装好, 写好标签. 大块煤升井后尽快运抵实验室进行加工; ③ 在实验室内对大块煤样进行钻、切、磨的过程中, 尽可能采用干钻、干切、干磨, 在加工过程中, 尽可能降低机床转速, 以减轻人为扰动影响; ④ 对于加工好的煤样及时进行声波速度测试, 并做好记录; ⑤ 加工后煤样的高度、直径、平整度、光洁度、平行度均能达到岩石试验规范标准.

为尽可能减小煤样力学性质离散性对试验结果的影响, 加工了大量煤样, 选取相邻位置两个大块煤上加工的且纵波速度相近、表面无明显缺陷的 7 个煤样参与三轴压缩试验. 同时根据三轴压缩试验前对大量煤样单轴抗压强度与纵波速度实测结果的回归关系估计参与三轴压缩煤样的单轴抗压强度^[2], 参与三轴压缩试验的煤样条件见表 1.

鲍店煤矿 3 煤常规三轴压缩试验结果见表 2, 主应力差 - 应变曲线如图 1 所示.

表 1 煤样条件

Table 1 Conditions of coal samples

煤样编号	直径 /mm	高度 /mm	纵波速度 /mm · s ⁻¹	围压 /MPa	预计单轴抗压强度/MPa
BDT0	49.7	98.3	2 264.64	0	31.92
BDT1	49.8	97.9	2 180.41	2	29.84
BDT2	49.9	99.5	2 219.59	5	30.79
BDT3	49.8	99.2	2 242.92	8	31.37
BDT4	49.7	100.1	2 290.22	12	32.58
BDT5	49.7	97.5	2 307.37	16	33.03
BDT6	49.8	95.8	2 339.50	20	33.89
BDT7	49.9	98.4	2 355.26	24	34.32

表 2 煤样试验结果

Table 2 Test results of coal samples

煤样编号	峰值强度 /MPa	峰值应变 /mm · mm ⁻¹	弹性模量 /MPa	残余强度 /MPa
BDT0	30.16	0.006 82	4 385	3.1
BDT1	44.38	0.008 39	5 442	24.9
BDT2	63.04	0.010 42	6 265	32.9
BDT3	76.89	0.011 48	6 168	35.9
BDT4	92.51	0.012 59	6 467	56.1
BDT5	106.07	0.013 10	6 990	71.9
BDT6	112.99	0.013 77	7 230	87.6
BDT7	123.16	0.014 20	7 415	97.3

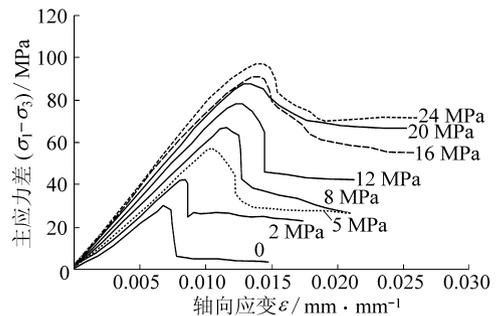


图 1 鲍店煤矿 3 煤不同围压下主应力差 - 应变曲线

Fig. 1 Curves of difference of principle stresses versus strain under different confining pressure of coal samples for Baodian Mine

2 常规三轴压缩条件下煤岩的变形特征

2.1 煤样峰值应变与围压的关系

煤样达到峰值强度时的应变称为峰值应变, 在单轴压缩条件下, 煤样在较小的应变下即发生脆性破坏, 所以峰值应变较小, 鲍店煤矿 3 煤单轴压缩条件下的峰值应变为 0.006 82 mm/mm, 由图 1 可知, 随着围压的增大, 峰值应变随之增大, 煤岩的变形表现为低围压下的脆性向高围压下的塑性破坏转化的特征, 说明煤岩的变形破坏除了与其组分和结构有关外, 还与所处的应力状态密切相关. 由图 2 可知, 峰值应变与围压之间均呈线性正相关性. 围压与峰值应变之间关系的线性回归系数为 0.935 (单轴压缩试验数据不参与回归), 回归关系 $\varepsilon_s = 0.000 2\sigma_3 + 0.009$.

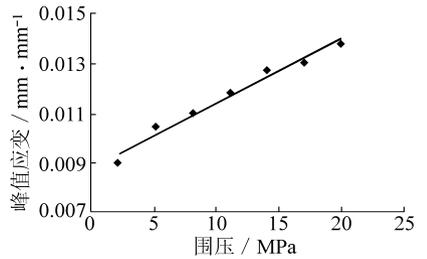


图 2 峰值应变与围压的关系

Fig. 2 The relationship between peak strain and confining pressure

2.2 煤样弹性模量与围压的关系

对于围压对弹性模量的影响, 不同岩石所得出的实验结果明显不同. 德国 Karman 在 1911 年最早做出的经典的大理岩单轴和三轴试验结果^[3]表明, 大理岩的弹性模量并不随围压变化而变化, 与单轴压缩时的弹性模量相同. 另外, 对于石英砂岩、花岗岩、苏长岩、玄武岩等岩石的试验结果^[4]也表明, 随围压的增加, 弹性模量没有明显变化. 但是, 也有许多其它试验得出了不同的结果, 文献[1]对淮南新集井田二叠纪含煤岩系中的中细砂岩与砂质泥岩样的试验结果分析认为, 沉积岩石的弹性模量均随围压增大而增大, 并呈非线性关系.

分析这些大量的岩石力学试验结果, 得出岩石的弹性模量随围压的变化与岩石内部的缺陷和致密程度密切相关. 一般认为, 围压增大有助于岩样内部裂隙、孔隙等缺陷压密闭合, 增大了岩石的刚度, 岩样的弹性模量也就相应增大. 岩石是由矿物颗粒组成的, 是非均质材料, 但是对于未风化的坚硬致密的花岗岩、大理岩、石英砂、苏长岩等, 圆柱体试样在 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 可认为是宏观均匀的^[5], 其内部缺陷尺度很小, 围压对其压密作用影响很小, 对其弹性模量的影响就微不足道. 对于含有大量孔隙裂隙的煤、砂岩等岩石来讲, 在围压作用下, 裂隙被压密闭合, 由于煤岩样内部的变形受裂隙面上的内摩擦力影响, 而裂隙面上的正应力与围压有关, 因而弹性模量与围压有关.

图 3 为鲍店煤矿 3 煤弹性模量与围压关系的散点图. 由于煤中含有大量的原生孔隙裂隙, 微结构非常发育, 当围压的作用下, 空隙裂隙被压密闭合, 而使煤岩刚度增大, 弹性模量随之增大. 但煤的弹性模量与围压之间并非呈线性关系, 当围压较小时, 弹性模量随围压增大而增大的幅度较大, 当围压增大到一定程度后, 弹性模量随围压增大而增大的幅度逐渐变小. 如围压为 5 MPa 时, 与单轴压缩时相比, 弹性模量增加了 42.9%, 而在围压为 24 MPa 时, 与围压 6 MPa 相比, 煤的弹性模量仅增加了 15.5%. 说明煤中的孔隙裂隙被压密闭合到一定程度后, 再增加围压, 被压密闭合的程度变弱. 鲍店煤矿 3 煤弹性模量与围压关系的回归结果表明, 两者符合二次多项式关系 (相关系数为 0.92), 即

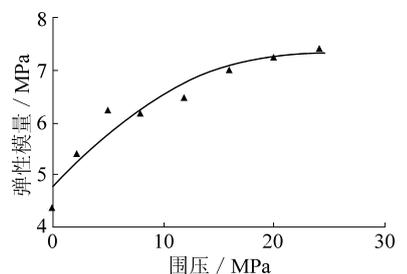


图 3 煤样弹性模量与围压的关系

Fig. 3 The relationship between elastic modulus and confining pressure

$$E = -4.679 7\sigma_3^2 + 217.09\sigma_3 + 4 793.7.$$

3 常规三轴压缩条件下煤岩的强度特征

岩石在三轴压缩条件下的最大承载能力称三轴极限强度或三轴压缩强度 σ_s . 煤样中含有大量的裂隙, 其变形将受摩擦力的影响, 而裂隙面上的正应力与围压有关, 增加围压, 相当于增加了裂隙面上的正应力, 裂隙面的滑移变形受到增大了的摩擦力的抑制而减小, 因而提高了煤样的极限强度. 因此, 煤样的三

轴抗压强度 σ_1 随围压的增大而增大. 由图4可知, 煤样三轴压缩强度与围压之间具有很好的线性关系 (不包括单轴压缩情况), 回归关系 (相关系数 0.966) 为

$$\sigma_1 = 45.217 + 3.477 2\sigma_3. \quad (1)$$

式(1)是以主应力表示的 Coulomb 强度准则. 说明在试验的围压范围内, 煤岩破坏符合 Coulomb 强度准则. 由于煤样在单轴压缩时并非单一的剪切破坏^[6], 因而煤样的单轴压缩强度明显低于三轴强度回归的参数 45.217, 在回归 Coulomb 强度准则时最好不要采用它.

4 常规三轴压缩条件下煤样破坏形式

单轴压缩时煤样的破坏形式较为复杂, 而在三轴压缩条件下一般都是剪切破坏, 并且三轴强度总体上与围压呈线性关系, 因而符合 Coulomb 强度准则. 该准则认为, 岩石能承载的最大剪应力 τ 由黏结力 C 和内摩擦力确定, 后者与内摩擦因数和正应力相关, 即 $\tau = C + \mu\sigma$, 其中 μ 是内摩擦因数, $\mu = \tan \varphi$; φ 为内摩擦角; σ 为破坏面上的正应力.

根据 Coulomb 强度准则, 煤样破裂面与主平面的夹角 $\theta = 45^\circ + \varphi/2$, 由式(1), 鲍店煤矿3煤的内摩擦角 $\varphi = 33.59^\circ$, $\theta = 61.8^\circ$. 由文献[7]研究表明, 在很大的倾角范围内, 围压或摩擦因数对煤样三轴强度的作用差别不大. 由于煤样具有明显的非均质特性, 其内部含有大量的随机裂隙等缺陷, 且煤样黏聚力较低, 因此, 煤样沿随机裂隙破裂偏离的可能性很大, 图5证明了这一点.

5 结 论

(1) 与坚硬致密的花岗岩等岩石不同, 煤岩由于含有大量的微孔隙裂隙, 在围压作用下, 孔隙裂隙被压密闭合, 弹性模量随之增大, 但并非呈线性关系. 鲍店煤矿3煤弹性模量与围压实验结果的回归关系: $E = -4.679 7\sigma_3^2 + 217.09\sigma_3 + 4 793.7$.

(2) 常规三轴压缩条件下, 煤样三轴压缩强度与围压之间具有很好的线性关系 (不包括单轴压缩情况), 在实验的围压范围内, 煤岩破坏符合 Coulomb 强度准则.

(3) 在三轴压缩条件下, 煤岩发生剪切破坏. 由于煤样具有明显的非均质特性, 其内部含有大量的随机裂隙等缺陷, 且煤样黏聚力较低, 煤样沿随机裂隙破裂偏离 $\theta = 45^\circ + \varphi/2$ 的可能性很大.

参考文献:

- [1] 孟召平, 彭苏萍, 凌标灿. 不同侧压下沉积岩石变形与强度特征 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (1): 15~18.
- [2] 杨永杰, 陈绍杰. 同种岩石强度离散性的实验技术研究 [J]. 实验技术与管理, 2005, 22 (1): 34~37.
- [3] 李世平, 吴珍业, 贺永年, 等. 岩石力学简明教程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. 12~13.
- [4] 张 流, 王绳祖, 施良骥. 我国六种岩石在高围压下的强度特性 [J]. 岩石力学与工程学报, 1985, 4(1): 10~19.
- [5] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (1): 53~60.
- [6] 尤明庆, 华安增. 岩石单轴压缩的破坏形式和承载能力降低 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17 (3): 292~296.
- [7] 尤明庆. 岩样三轴压缩的破坏形式和 Coulomb 强度准则 [J]. 地质力学学报, 2002, 8 (2): 179~185.

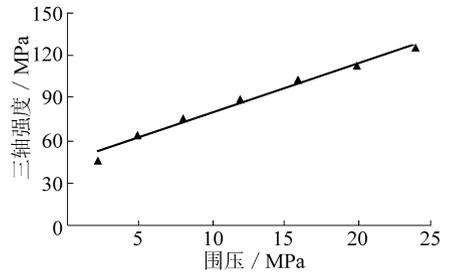


图4 煤样三轴强度与围压的关系

Fig. 4 The relationship between triaxial strength and confining pressure

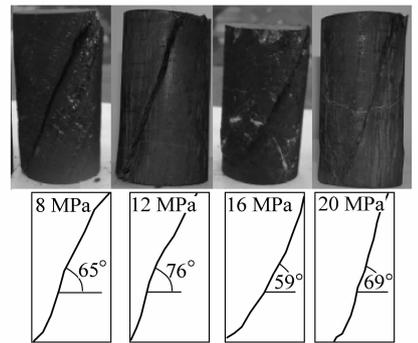


图5 部分煤样三轴压缩破坏形态

Fig. 5 Destroy patterns of partial coal samples under triaxial test condition