

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0344-05

泥岩夹层对层状盐岩体中储库稳定性影响

尹雪英, 杨春和, 李银平

(中国科学院岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 针对盐矿常为不同岩层交替而成的互层盐岩体的基本特点, 利用宏观平均意义下考虑细观弯曲效应的三维 Cosserat 介质扩展本构模型的 FLAC^{3D} 接口程序, 对湖北云应地区的 ZK1075, ZK1083, ZK1099 溶腔进行了计算, 不仅考虑了刚度异于盐岩的泥岩对复合体弹性特征的影响, 并且考虑了由于各层内部位移协调引起泥岩夹层先行破损, 进而引起复合体变形和破坏。计算结果表明, 云应地区的层状盐岩体中的刚度、强度较大的泥岩夹层对层状盐岩复合体具有强化作用, 对盐岩溶腔造腔后的稳定性有利。

关 键 词: 层状盐岩体; Cosserat 介质; 储库; 稳定性

中图分类号: TE 822

文献标识码: A

Influence mudstone interlayer on stability of oil storage in laminated salt rock

YIN Xue-ying, YANG Chun-he, LI Yin-ping

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock & soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Considering the laminated geologic characteristics of salt rocks in China, the stability of ZK1075, ZK1083 and ZK1099 salt caverns in Yun-Ying area of Hubei Province is analyzed by the FLAC^{3D} interface program of the new three-dimensional expanded Cosserat medium constitutive model. Besides dealing with the effect of the stiffness difference between mudstone and rock salt on elastic characteristics of the composite, it also considers that displacement correspondence between layers results in mudstone's fracture firstly and then leads to the deformation and failure of composite. The results show that the mudstone interlayer in laminated salt rock in Yun-Ying area will restrict the deformation of rock salt owing to its larger stiffness and strength; and the presence of mudstone interlayer plays an active role in the stability of the oil/gas storage.

Key words: laminated salt rock; Cosserat medium; oil/gas storage; stability

1 引 言

地下能源储存一般放置在盐岩、非渗透性岩层以及多孔隙岩层中, 其中盐岩具有诸多优点, 其物理特性优良, 结构致密、孔隙率低、渗透性非常小、损伤自恢复及塑性变形能力大、水文地质条件简单、分布广, 且盐岩溶解于水的特性可使盐岩储库的施工开挖更加容易和经济。因此, 国际上公认为盐岩体是石油、天然气储备和高放射性废物处置的理想场所。

到目前为止, Heremann^[1]、Hansen^[2]、Hunsche^[3,4]、C.H. Yang^[5], 杨春和^[6] 等对盐岩的强度、变形特性做了大量的室内外试验研究工作。研究者已从不同

的角度, 研究不同的载荷条件下的盐岩力学特性, 也已初步建立了考虑盐岩的损伤、变形与渗透之间关系的盐岩本构模型。然而, 我国盐岩的赋存特点和欧美国家有很大的不同, 这些模型无论在理论上还是工程应用上均很难直接运用到我国盐岩石油储库中。与国外大量存在的“盐丘型”储层条件不同, 我国盐岩层的基本特点是盐岩层多, 单层厚度薄, 盐岩体中一般含有众多夹层。本文针对我国盐岩层的基本特点, 即由具有不同物理特性的岩层交替而组成的互层岩体, 利用宏观平均意义下考虑细观弯曲效应的三维 Cosserat 介质扩展本构模型接口程序^[7], 对湖北云应 ZK1075, ZK1083, ZK1099 溶腔进行了数值模拟计算。计算表明, 该地区的层状盐

收稿日期: 2005-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50434050, No. 50374064); 国家重点基础研究发展规划 973 项目 (No. 2002CB412704) 资助课题。

作者简介: 尹雪英, 1979 年生, 女, 博士, 1999 年毕业于太原理工大学土木工程系建筑工程专业, 主要从事岩石力学数值计算研究方面的工作。

E-mail: zlmyxy2002@126.com

岩体中的刚度、强度较大的泥岩夹层对层状盐岩复合体具有强化作用, 对盐岩溶腔造腔后的稳定性有利, 为该地区储库的修建提供了理论依据。

2 模型及程序简介

2.1 三维 Cosserat 介质扩展本构模型

Cosserat 理论与经典弹塑性理论相比, 能够在连续介质力学框架下较好地反映材料的尺度效应。该理论的主要特点是: 假定每个材料点除有 3 个位移自由度之外, 还有 3 个独立地旋转自由度; 并在本构模型中通过旋转梯度引入了材料的特征长度, 能够反映材料的尺度效应^[8]。

文献[7]针对由不同岩层交替而组成的含夹层盐岩体, 建立了一种新的代表单元, 考虑具有不同力学特性相邻岩层之间的细观位移协调, 建立了宏观平均意义下考虑细观弯曲效应的 Cosserat 介质扩展本构模型。该模型为分析层状盐岩体提供了一条新思路: 首先, 利用该模型求得平均意义下的 Cosserat 平均应力; 然后, 再回到某材料点, 得到传统意义上的各层岩体的不等梯度的甚至非连续的各层介质的应力-应变; 结合传统的材料强度理论, 可以判定某层岩体介质是否开始破坏。

如图 1 所示 Cosserat 层状介质中的某微元, 是材料 A 和材料 B 的复合体, 由连续介质理论推导三维 Cosserat 介质扩展本构关系时采用如下 3 个假设:

- (1) 互层介质是由力学性质不同的介质黏结而成, 材料界面黏合很好, 没有滑动、张开或者嵌入;
- (2) 发生拉伸变形或者弯曲变形时, 块形单元 4 个侧面仍然保持为平面 (平截面);
- (3) 材料变形很小。

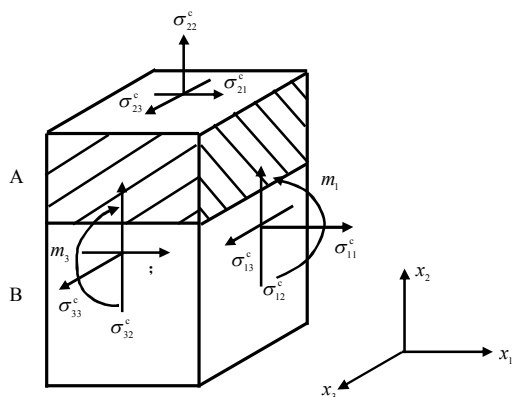


图 1 层状岩体的 Cosserat 介质代表单元

Fig.1 Material point of the Cosserat medium for layered rockmass

2.2 三维 Cosserat 介质扩展本构模型的程序实现

文献[9]中指出, 在均匀或近似均匀的应力场中, 应力梯度很小, 弯曲效应不明显。深部能源盐岩地下储层的溶腔高度可达 200 m 以上, 直径可达 80 m 以上, 而泥岩夹层除了少数几层较厚, 达 2 m 以上, 数值分析时可单列出来建模, 其余大多数厚度都在 1.5 m 以下。因此, 弯曲效应可忽略不计。而且由于商用软件 FLAC^{3D} 中应力、应变张量为对称张量, 作为 Cosserat 介质理论在数值分析中的初步应用, 主要考虑其复合效应, 忽略了偶应力的影响, 由此可得出复合体弹性本构关系为

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{22} & D_{23} & 0 & 0 & 0 \\ D_{13} & D_{23} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} + D_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{45} + D_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

其中, 柔度矩阵等系数均可以通过 A、B 层的体积百分比、弹性模量以及泊松比来确定。

FLAC^{3D} 软件是基于拉格朗日差分法的一种显式有限差分程序, 它的主要计算思路是: 首先, 由初应力或外荷载计算获得节点不平衡力, 并以等效在节点上的力和质量建立以节点位移速率为未知量的节点运动方程, 解得节点位移速率后并进一步求得某一时步的单元应变增量; 然后, 由应变率张量和前一时刻的应力, 通过调用本构方程来计算新的应力, 再以单元应力等求得节点不平衡力; 最后, 由计算所得到的应力, 通过调用运动方程来计算新的节点速率和位移, 如此循环上述过程, 最终得到工程结构的应力与变形结果。基于三维 Cosserat 介质扩展本构模型理论, 笔者利用 FLAC^{3D} 软件提供的自定义本构模型程序接口, 使用 Visual C++ 平台开发了三维 Cosserat 介质扩展本构模型接口程序, 并通过算例验证了程序的正确性与有效性。该接口程序不仅可以考虑层状岩体中不同力学特性的岩层先后损伤破坏对复合体造成的影响, 而且由于引入了夹层体积含量等统计参数, 可以大量节省模型网格单元数目, 并且在程序中引入了夹层、盐岩塑性破坏指标, 可以方便用户查看模型的屈服破坏状态类型。

3 计算概况

3.1 计算模型的建立

根据所给的工程地质条件, 本文采用 FLAC^{3D}

软件对 ZK1075、ZK1083、ZK1099 三个理想溶腔建立了三维分析模型。计算区域设定为一立方体，本文建模时将厚度大于 2 m 的泥岩夹层在模型中单列出来，而其他小夹层则采用 Cosseart 介质模型概化在计算本构模型中。根据地质资料，溶腔附近围岩夹层体积含量约为 30 %。ZK1075、ZK1083、ZK1099 溶腔形状为椭球，其短轴均为 40 m，长轴分别为 86.5，105，100 m，椭球中心距地表分别为 490，688，650 m。计算模型（图 2）坐标原点均选取在椭球溶腔中心，上表面取至地表。模型下表面及四周边界范围，一般认为数值计算模型的边界范围可取为 6 倍洞径。在该范围以外，不受开挖影响，本文选取了 x 方向为 $-400\sim 400$ m。由于结构及荷载对称，所以选取一半作为研究对象， Z 方向的尺寸范围为 $0\sim 400$ m。单元类型采用四面体单元，网格布置主要在盐岩溶腔周围密集，远离溶腔时则按一定的比例逐渐变疏。模型下表面用 Y 向简支约束，四纵表面受相应法线方向上的简支约束，即认为模型前、后、左、右面及下端面以外的地质体为刚性体，不允许其产生法向移动。由于没有实测的地应力资料，本文地应力场选用自重应力场。

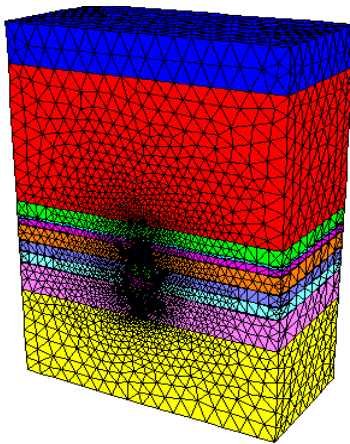


图 2 计算模型
Fig.2 Numerical model

3.2 计算参数的选取

对于黏土和泥岩本文选用 Mohr-Coulomb 模型，含盐泥岩与含泥盐岩均采用了对 FLAC^{3D} 软件二次开发的三维 Cosserat 介质自定义本构模型，以便考虑夹层对溶腔稳定性的影响。该模型程序计算时不仅考虑了刚度异于盐岩的泥岩对复合体弹性特征的影响，并且考虑了各层内部位移协调引起泥岩夹层先行破损，然后对其弹性模量进行折减，进而影响复合体变形和破坏。根据泥岩、盐岩单轴、三轴试验结果^[10]，其静力计算参数如表 1 所示。

表 1 静力计算参数选取
Table 1 Calculation parameters for static analysis

岩性	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	凝聚力 c/MPa	内摩擦角 $\psi/(^\circ)$	抗拉强度 σ_t/MPa
黏土	0.5	0.35	0.5	35	0.5
泥岩	21.78	0.232	2.0	24	1.5
含盐泥岩中泥岩	21.78	0.232	2.0	24	1.5
含盐泥岩中盐岩	5.15	0.312	1.5	35	1
含泥盐岩中泥岩	21.78	0.232	2.0	24	1.5
含泥盐岩中盐岩	5.15	0.312	1.5	35	1

4 静力计算结果分析

水溶法采盐结束后，硐室内可能（部分）充有盐水和盐渣。而硐室进行储存石油时，必须将其中的液体排除。因此，硐室的内压可能会成为 0。储存库的稳定性主要保证储存库在建设期间和运行期间的稳定性，主要考虑储存库的最新内压。内压过小，不利于硐室的安全；内压过高，将使得盐岩的平均应力增加达到某个极限值时，引起盐岩的损伤破坏。为了确保盐岩储存库的密闭性，必须限制储存库的最大存储压力。本文设计最小内压选取地表井口压力为零时为溶腔中心最小内压。最大内压对应于井口压力分别为 4 MPa(ZK1075)，6 MPa(ZK1083)，6 MPa(ZK1099)时的溶腔中心内压。另外，根据国外储油库的建设经验，储油库的内压一般为地层竖向压力的一半，即 $\gamma h/2$ ，依此计算，ZK1075、ZK1083、ZK1099 盐岩溶腔的中心内压分别为 6.36 MPa、7.9 MPa 和 7.47 MPa，也作为一种工况进行计算。具体各种计算工况所对应的溶腔中心内压如表 2 所示。

表 2 各计算工况所对应溶腔中心内压
Table 2 Internal pressure in center of salt caverns of calculation schemes

工况	溶腔中心内压/MPa		
	ZK1075	ZK1083	ZK1099
工况 1	4.36	6.12	5.78
工况 2	5.6	7.12	6.78
工况 3	6.36	7.9	7.47
工况 4	7.36	9.12	8.78
工况 5	8.36	10.12	9.78
工况 6	/	11.12	10.78
工况 7	/	12.12	11.78

图 3 为井口压力为 0，2，4 MPa 时 ZK1083 溶腔腔周破损区及位移矢量分布图(ZK1075、ZK1099 相类似)。由图可以看出，由于云应盐矿的特殊夹层结构，其夹层的力学强度、弹性模量高于盐岩，故虽 Cosserat 复合体中盐岩部分未出现塑性区，而 Cosserat 复合体中刚度相对较大的泥岩夹层已经首先破坏，夹层破坏的区域称之为层状 Cosserat 复合

岩体破坏区。随着井口压力的增加，腔周破坏区逐渐减小。当 ZK1075、ZK1083、ZK1099 井口压力分别达到或超过 2, 4, 4 MPa 时，溶腔围岩仍无明显破坏区。

从位移矢量分布图也可以看出，由于计算模型为一个细长的结构，它的中间部位为软弱部位；并且云应盐矿的盐岩和泥岩夹层的性质相差很大，泥岩刚度高而盐岩刚度相对较低，各溶腔腰部盐岩含量较高而变形较大；腔体顶部盐岩含量较低，变形较小（腔体底部沉渣区位移未计）。当井口压力为 0 时，ZK1075、ZK1083、ZK1099 溶腔腔腰处的水平位移相对移近量分别为 4.87, 7.67, 7.05 cm，且随着溶腔压力的增加，当井口压力增加到 4 MPa 后，ZK1083 溶腔的腔周最大位移由 3.886 cm 降为 2.118 cm。

从最小主应力云图上（图 4）可以看出，在泥岩夹层分布的地方，形成了一定程度的应力集中，当溶腔处于最不利工况，即井口压力为 0 MPa 时，溶腔腔周也未出现拉应力。

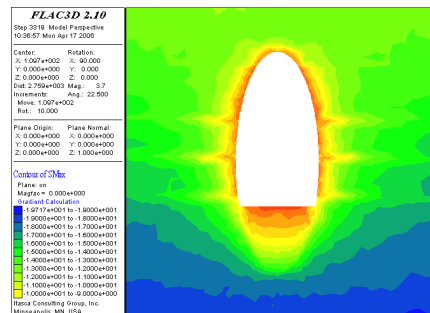


图 4 ZK1083 内压为 6.12 MPa 最小主应力分布图
Fig.4 Contours of minor principal stress for ZK1083 in internal pressure of 6.12 MPa

图 5 给出了 ZK1075、ZK1083、ZK1099 在各计算工况下，溶腔造腔完成后的体积收缩率随溶腔内压的变化曲线。由图可以看出，随着溶腔中心内压的增加，体积收缩率逐渐减小，且随着溶腔压力中心的增加，曲线逐渐变得平缓，这是由于溶腔造腔完成后，溶腔周围将不可避免地产生一定的弹塑性变形，从而使得溶腔将不可避免地产生体积收缩。

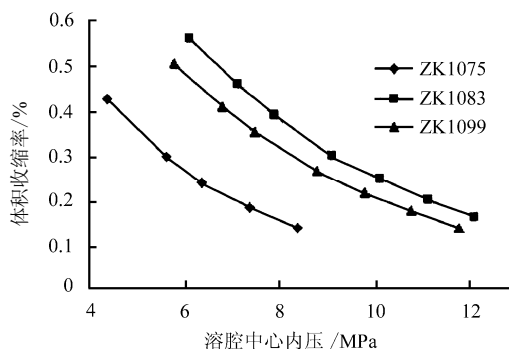


图 5 各溶腔造腔完成后体积收缩率随溶腔中心内压变化曲线

Fig.5 Volume reduce ratio of caverns after excavation in different internal pressures

为了便于比较，本文对 ZK1083 溶腔进行了对比计算。计算时对于采用 Cosserat 介质扩展本构模型接口程序计算时，使用自定义本构模型的含泥盐岩层采用 FLAC^{3D} 软件的内嵌 Mohr-Coulomb 模型，通过比较其塑性区与位移、体积缩小率等计算结果来分析对比 Cosserat 介质扩展模型中泥岩夹层对硐室稳定性的影响。

图 6 给出了溶腔腔周塑性区及位移矢量分布图。由图可以明显地看出，泥岩夹层（厚度大于 2 m

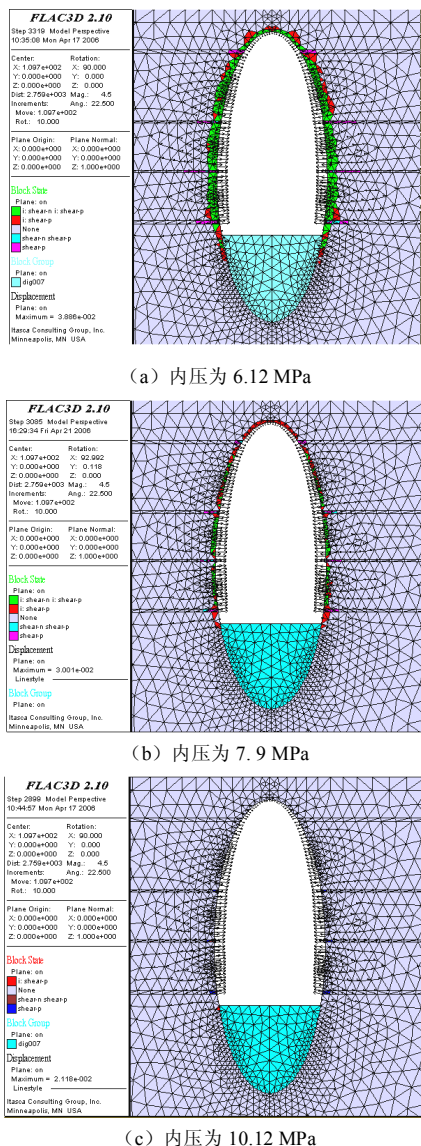


图 3 ZK1083 在不同内压下腔周破坏区及位移矢量分布图
Fig.3 Damage zone and displacement distribution for ZK1083 in different internal pressures

而单列出来建模) 由于其刚度较大而先行屈服出现塑性区, 而盐岩则无塑性区出现。由位移矢量图也可以看出, 腔周的最大位移(不计沉渣位移)为 7.44 cm, 比 Cosserat 本构模型接口程序计算结果增大了将近 2 倍; 溶腔体积收缩率为 0.779%, 比 Cosserat 本构模型接口程序计算结果 0.56% 增大了约 1.4 倍, 这是由于采用 Cosserat 介质扩展本构模型接口程序计算时考虑了层状盐岩体中的刚度较大的泥岩夹层对盐岩体的约束作用, 也表明了层状盐岩体中刚度、强度较大的泥岩夹层对溶腔的造腔后的稳定性起了有利的作用。

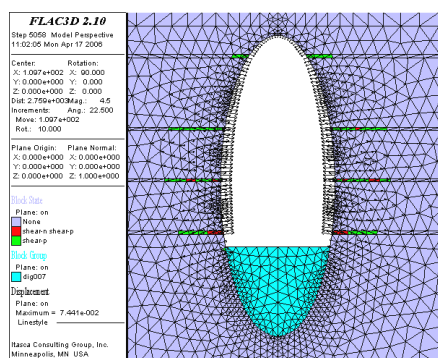


图 6 ZK1083 内压为 6.12 MPa 腔周破损区及位移矢量分布图

Fig.6 Damage zone and displacement distribution for ZK1083 in 6.12 internal pressure

5 结 论

针对我国层状盐岩体的基本特点, 运用 VC++ 平台, 采用大型岩土工程软件 FLAC^{3D} 二次开发的三维 Cosserat 介质扩展本构模型接口程序, 对湖北云应地区的 ZK1075, ZK1083 和 ZK1099 溶腔进行了静力计算, 计算结果表明:

(1) 刚度强于盐岩的泥岩, 对复合体变形特征有明显影响。由于各层内部位移协调, 泥岩夹层将先行破坏, 进而影响复合体变形和破坏。

(2) 与 FLAC 内嵌的 Mohr-Coulomb 本构模型的计算结果相比, Cosserat 本构模型考虑了泥岩夹层的影响。结果表明, 刚度、强度较大的泥岩夹层对盐岩体具有约束和加筋作用, 从而对溶腔造腔完成后的稳定性起了积极的作用。

(3) 通过计算表明, 使用 Cosserat 本构模型的复合效应来分析泥岩夹层对互层岩体中储库的稳定性是可行的, 也是合理的。

参 考 文 献

- [1] Herrmann W, Wawersik W R, lauson H S. Creep curves and fitting parameters for southeastern New Mexico bedded salt[R]. Sandia: [s.n.], 1980.
- [2] Hansen F D, Mellegard K D, Senseny P E. Elasticity behavior of salt[A]. **Proc. 1st Conf[C]**. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech. Publ., 1984. 71—83.
- [3] Hunsche U. Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt[A]. **3rd Conference of Mechanical Behavior of Salt[C]**. [s.l.]: Trans. Tech. Publications, 1993.
- [4] Hunsche U. Determination of the dilatancy boundary and damage up to failure for four types of rock salt at different stress geometries[A]. **The Mechanical Behavior of Salt Proc. 4th Conf[C]**. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech. Publ., 1996.
- [5] Chunhe Yang, Daemen J J K, Jian-hua Yin. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(2): 233—242.
- [6] 杨春和, 陈锋, 曾义金. 盐岩蠕变损伤关系研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(11): 1 602—1 604.
YANG Chun-he, CHEN Feng, ZENG Yi-jin. Investigation of creep damage constitutive theory of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(11): 1 602—1 604.
- [7] 李银平, 杨春和. 层状盐岩体的三维 Cosserat 介质扩展本构模型[J]. **岩土力学**, 2006, 27(4): 509—513.
LI Yin-ping, YANG Chun-he. The three-dimensional expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 509—513.
- [8] 李雷, 吴长春. 基于 Cosserat 理论的应变梯度非协调数值研究[J]. **工程力学**, 2004, 21(5): 166—171.
LI Lei, WU Chang-chun. Incompatible finite element for materials with strain gradient effects[J]. **Engineering Mechanics**, 2004, 21(5): 166—171.
- [9] 余成学, 熊文林, 陈胜宏. 具有弯曲效应的层状结构岩体变形的 Cosserat 介质分析方法[J]. **岩土力学**, 1994, 15(4): 12—19.
SHE Cheng-xue, XIONG Wen-lin, CHEN Sheng-hong. Cosserat medium analysis of deformation of layered rockmass with bending effects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(4): 12—19.
- [10] 李银平, 刘江, 杨春和. 泥岩夹层对盐岩变形和破坏特征的影响分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(12): (待刊).
LI Yin-ping, LIU Jiang, YANG Chun-he. Influence of mudstone interlayer on deformation and failure characteristics of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): (to be published).