

层状盐岩温度应力耦合作用蠕变特性研究

邵保平, 赵阳升, 赵金昌, 徐素国

(太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 在温度应力耦合作用下, 通过对层状盐岩蠕变特性试验研究及理论分析发现: (1) 层状盐岩的蠕变率与其组分、结构密切相关, 盐岩组分、结构不同, 蠕变应变、蠕变率均不同。(2) 在常温下, 随着应力水平的增大, 层状盐岩的蠕变应变、蠕变率逐渐增大, 层状盐岩的稳态蠕变率与偏应力之间成良好的幂函数关系。(3) 在温度和应力耦合作用下, 加载应力水平相同时, 温度对层状盐岩的稳态蠕变率影响很大, 层状盐岩的稳态蠕变率与温度服从指数关系; 在同温同压作用下, 纯盐岩的横向位移、横向蠕变应变和横向蠕变率都比高盐分泥岩夹层的大, 纯盐岩的横向蠕变率是高盐分泥岩夹层的 1.6~1.8 倍。(4) 层状盐岩体各层之间由于组分、结构不同, 在应力和温度耦合作用下, 蠕变率不同, 应变不协调, 导致剪切破坏。最后, 通过试验数据拟合, 建立层状盐岩的稳态蠕变率本构方程, 对我国盐岩矿床中建造油气储库及稳定性分析具有一定的参考价值。

关键词: 岩石力学; 层状盐岩; 蠕变; 温度; 本构方程

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)01 - 0090 - 07

STUDY ON COUPLED THERMO-MECHANICAL CREEP PROPERTIES OF BEDDED ROCK SALT

XI Baoping, ZHAO Yangsheng, ZHAO Jinchang, XU Suguo

(Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: Through coupled creep experiment and theoretical analysis of thermo-mechanical behaviors of bedded rock salt, the results are obtained as follows. (1) The creep ratios and creep strain of rock salt vary with ingredient and structural distribution. (2) Under normal temperature, the creep strain and creep ratios of bedded rock salt increase when its loading stress increases; and the steady creep ratios are with good power function of deviatoric stress. (3) Under thermo-mechanical coupling, the steady creep ratios are affected by temperature when the loading stress is the same; and the steady creep ratios of bedded rock salt are shown with exponential function of temperature. At the same temperature and stress, the transversal displacement, strain and creep ratios are larger than those of bedded salt-mudstone; the creep ratio in landscape orientation of rock salt is 1.6 - 1.8 times larger than that of salt-mudstone interlayer. (4) As the ingredient and structure of each interlayer of bedded rock salt are different, the creep strain is not consistent with the action of stress and temperature, and it will result in shearing failure. Finally, the creep constitutive equation of bedded rock salt is established according to fitting experimental data; and the achieved results can provide some references to the stability analysis of oil and gas storage cavern in bedded salt deposits.

Key words: rock mechanics; bedded rock salt; creep; temperature; constitutive equation

收稿日期: 2007 - 03 - 21; **修回日期:** 2007 - 04 - 29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50304011); 太原理工大学科技基金资助项目(190 - 12901134)

作者简介: 邵保平(1976 -), 男, 2000 年毕业于太原理工大学建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学与地下工程方面的研究工作。

E-mail: masterxbp@yahoo.com.cn

1 引言

层状岩体指的是为节理面分割的岩体, 本文中所述的层状盐岩体指的是由具有不同组分、结构及不同物理特性的盐岩层交替组成的互层盐岩体, 盐岩体一般含有众多夹层, 这些夹层主要由高盐分泥岩、砂岩、硬石膏和钙芒硝等构成, 矿体呈层状、似层状或透镜状, 产状平缓, 这样的盐岩体称为“层状盐岩”。

众所周知, 我国盐岩矿床地质结构的典型特征是: 大部分为薄盐层矿床, 内含大量高盐分泥岩夹层; 单层厚度薄, 软弱夹层多。在我国盐岩矿床内进行能源储存及高放射核废料永久性处置, 不可避免地受到层状盐岩的影响。因此, 层状盐岩温度应力耦合作用蠕变特性及由于各层蠕变率不同导致层间破坏的研究就成为地下处置库稳定性分析的关键问题所在。目前, 国内外对盐岩的力学特性, 尤其是其蠕变特性进行了大量的试验和理论分析^[1~17], 如 U. Hunsche 等^[2, 3]对盐岩蠕变本构模型作了较为详细的研究; 高小平等^[4]对温度作用下盐岩的时效特性作了研究; 马建春^[5]对盐岩的流变特性作了系统研究; 梁卫国等^[6, 7]对盐岩高温及损伤再结晶力学特性作了研究。但对层状盐岩的蠕变特性方面研究很少。为此, 本文对层状盐岩进行了常温蠕变特性及高温下温度应力耦合作用蠕变特性试验研究和理论分析, 为我国油气储备库建造及稳定性分析提供一些参数依据。

2 试验概况

2.1 试验设备

采用太原理工大学设计的由气体稳压的单轴蠕变试验台, 位移测量采用千分表, 加温装置为自行设计、温度可控的加热仪, 功率为 2 kW, 最高温度可达 200 °C, 其温度误差为 ±2 °C。

2.2 试件制备

盐岩及层状盐岩试样全部采自湖北应城地下 600~700 m, 采用地质钻机套取岩芯, 经分析, 盐岩的 NaCl 含量为 98%, 高盐分泥质夹层盐岩的 NaCl 含量为 50%~75%。试件在加工时, 挑选泥岩夹层位于试件中部的盐岩, 夹层厚度约占试件高度的 1/2, 由于层状盐岩含有弱面层, 无法取得标准试件, 依据岩石力学试验标准, 采用高径比为 2:1

的 $\phi 90\text{ mm}\times 180\text{ mm}$ 的圆柱试件。为了避免试件在加工过程中水对盐岩试件结构面的破坏, 采用干式锯磨法进行全部试件的加工。

2.3 试验方法

所有试验均按照 ISRM 试验标准来进行, 试件在加工完毕后将底面打磨平整。常温下, 轴压为 4.47~22.50 MPa, 试验周期为 100 d 以上, 蠕变初期每 12 h 记录一次试验数据, 进入稳定阶段每 24 h 记录一次试验数据, 共进行 5 组试验, 每组用 2 个试件; 高温下, 将温度分别调到 70 °C, 90 °C, 110 °C, 待加热仪保持恒温 24 h 后, 使试件内部形成均匀温度场, 温度应变已对蠕变结果无影响, 然后逐渐加轴压到 19.50 MPa, 层状盐岩很快就进入蠕变状态, 为了保证试验数据的可靠性, 试验数据每 10 min 记录一次, 24 h 值班, 连续记录。高温蠕变进行 3 组试验, 每组 2 个试件。

3 试验结果及其分析

层状盐岩系盐湖或海洋蒸发结晶而成的具有层理状结构的沉积岩, 对流变非常敏感, 国内外学者一致认为, 层状盐岩即使在非常小的应力作用下也具有流变特性^[15]。

盐岩蠕变是一种长期行为, 主要包括 3 个特征阶段: 初始蠕变 I, 稳态蠕变 II, 加速蠕变 III。对于层状盐岩, 其蠕变主要表现在 I, II 阶段, 由于初始蠕变阶段相对于稳态蠕变阶段来说持续时间极短, 在油气储库及核废料处置库稳定性分析中可以不考虑, 而层状盐岩的稳态蠕变阶段对其稳定性研究具有重要意义。

本次试验研究对不同加载应力 σ 、不同温度的 8 组盐岩试件进行了蠕变试验。进行试验数据处理时, 为保证试验数据的准确和可靠, 对每组 2 个试件的试验数据取平均值。其试验结果见表 1~3。

表 1 温度应力耦合作用下层状盐岩横向蠕变情况对比表($\sigma = 19.50\text{ MPa}$)

Table 1 Transverse creep results of bedded rock salt under thermo-mechanical coupling($\sigma = 19.50\text{ MPa}$)

岩性	横向最大位移/mm			横向最大蠕变应变/%			横向蠕变率/(10^{-3} h^{-1})		
	70 °C	90 °C	110 °C	70 °C	90 °C	110 °C	70 °C	90 °C	110 °C
纯盐岩	10.4	10.6	11.1	11.56	11.78	12.33	1.93	2.22	2.94
高盐分泥岩夹层	5.9	6.3	6.9	6.56	7.00	7.67	1.09	1.32	1.83

表 2 常温下盐岩(单轴压缩)蠕变试验结果

Table 2 Creep experimental results of bedded rock salt under normal temperatures(uniaxial compression)

试件	加载应力水平 σ/MPa	试验时间 /d	初始蠕变极限 /%	最大蠕变应变 /%	稳态蠕变率 $\dot{\epsilon}_s/\text{d}^{-1}$
层状盐岩 A 组	4.47	161	0.648	1.371	6.07×10^{-6}
层状盐岩 B 组	9.75	150	0.808	0.982	3.67×10^{-5}
层状盐岩 C 组	20.00	100	1.212	3.564	1.81×10^{-4}
纯盐岩夹层 D 组	22.50	99	0.786	1.352	1.30×10^{-4}
纯盐岩 E 组	22.50	109	1.231	3.685	2.47×10^{-4}

表 3 温度应力耦合作用下盐岩(单轴压缩)蠕变试验结果

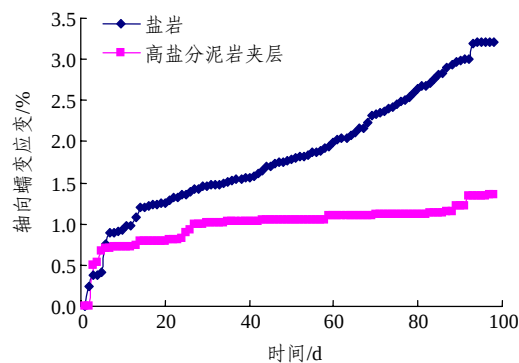
Table 3 Creep experimental results of bedded rock salt with thermo-mechanical coupling(uniaxial compression)

试件	温度 /°C	加载应力水平 σ/MPa	试验时间 /h	初始蠕变极限 /%	最大蠕变应变 /%	稳态蠕变率 $\dot{\epsilon}_s/(10^{-4} \text{h}^{-1})$
层状盐岩 F 组	70	19.50	60	1.042	4.632	9.31
层状盐岩 G 组	90	19.50	53	1.138	5.334	9.88
层状盐岩 H 组	110	19.50	42	1.145	5.612	12.31

3.1 盐岩的组分、结构对蠕变率影响

盐岩主要成分是盐类,如 NaCl,它们结晶成立方晶系,呈晶体结构;高盐分泥岩主要成分为泥质、NaCl 等,以一定的形式胶结在一起。盐岩晶体蠕变可以解释为由于微晶变形或晶间传质而导致的宏观变形,主要源于微晶变形所致的晶格缺陷,其实质就是盐岩晶体内部的位错运动或者耗散过程。由蠕变机制图^[11]可知,不同应力和温度作用下,其蠕变机制是不同的,宏观上就表现为蠕变率的不同。

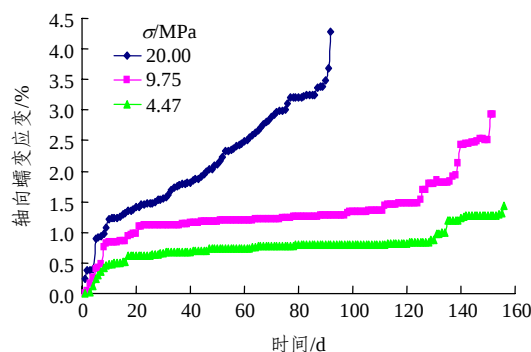
分析图 1 可以发现:首先,在经历了短期的初始蠕变阶段之后,2 组试件几乎同时进入稳态蠕变阶段,初始阶段蠕变率差别不大,进入稳态蠕变阶段,盐岩的蠕变率及蠕变应变均明显大于高盐分泥岩夹层;其次,在常温和 $\sigma = 22.50 \text{ MPa}$ 载荷作用下,盐岩的初始蠕变极限为 1.231%,最大蠕变应变为 3.685%,稳态蠕变率为 $2.47 \times 10^{-4} \text{ d}^{-1}$,高盐分泥岩夹层的初始蠕变极限为 0.786%,最大蠕变应变 1.352%,稳态蠕变率为 $1.30 \times 10^{-4} \text{ d}^{-1}$,前者的稳态蠕变率是后者的 1.9 倍。因此,在同温同压下,盐岩与高盐分泥岩夹层由于组分、结构的不同,其轴向蠕变应变、蠕变率不同;横向蠕变应变、蠕变率也不同。

图 1 常温和 $\sigma = 22.50 \text{ MPa}$ 载荷作用下不同组分、结构盐岩的蠕变试验曲线Fig.1 Creep curves of bedded rock salt with different ingredients and structural rock salt under normal temperature($\sigma = 22.50 \text{ MPa}$)

3.2 常温下层状盐岩的蠕变特性

常温下,加载应力不同,层状盐岩的蠕变应变、蠕变率均不同。

由图 2 可见,常温下,层状盐岩随着应力水平的增大,其蠕变应变、蠕变率逐渐增大。在 $\sigma = 20.00 \text{ MPa}$ 下,13 d 后层状盐岩进入稳态蠕变阶段,88 d 时变形较大,伴有声发射,蠕变应变率明显增大,91 d 时开始破坏;在 $\sigma = 9.75 \text{ MPa}$ 下,20 d 后进入稳态蠕变阶段,稳态阶段明显,持续时间较长,125 d 时开始进入破坏阶段; $\sigma = 4.47 \text{ MPa}$ 下,蠕变持续 161 d,具有明显的蠕变三阶段,30 d 时蠕变进入稳态阶段,127 d 时蠕变进入第三阶段(加速蠕变阶段),常伴有声发射,蠕变率明显增大。在常温下, $\sigma = 20.00 \text{ MPa}$ 时,稳态蠕变率为 $1.81 \times 10^{-4} \text{ d}^{-1}$; $\sigma = 9.75 \text{ MPa}$ 时,稳态蠕变率为 $3.67 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$,是前者的 20.28%; $\sigma = 4.47 \text{ MPa}$ 时,稳态蠕变率为 $6.07 \times 10^{-6} \text{ d}^{-1}$,是 20.00 MPa 时的 3.35%。

图 2 常温下层状盐岩不同加载应力的蠕变试验曲线
Fig.2 Creep curves of bedded rock salt at different loading stresses under normal temperature

由试验观察可知, 层状盐岩的轴向蠕变应变来自两部分: 一部分为纯盐岩部分的蠕变, 另一部分为高盐分泥岩夹层蠕变, 纯盐岩蠕变率高于泥岩夹层, 同时横向应变大于泥岩夹层。因此, 同温同压下, 层状盐岩的蠕变应变、蠕变率介于纯盐岩与高盐分泥岩夹层之间; 层状盐岩的蠕变呈明显的非线性关系。在低应力加载水平下, 随着试验时间的增长, 轴向蠕变速率逐渐趋于 0。

进一步推广可知, 常温下层状盐岩蠕变率由偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的大小决定。由三轴压缩蠕变试验可知, 当围压一定时, 随着轴压的增大, 稳态蠕变率明显增大, 增大轴压, 即 $\sigma_1 - \sigma_3$ 增大, 盐岩晶体内部的位错运动及耗散过程加剧, 导致蠕变率加大。由图 3 可知, 层状盐岩的稳态蠕变率与偏应力之间成良好的幂函数关系, 即

$$\dot{\varepsilon}(t) = a(\sigma_1 - \sigma_3)^n \quad (1)$$

式中: a , n 均为试验常数。对本次层状盐岩稳态蠕变率与应力试验数据进行拟合, 得到试验拟合参数为 $a = 0.2342$, $n = 2.2423$, $R^2 = 0.9884$ 。

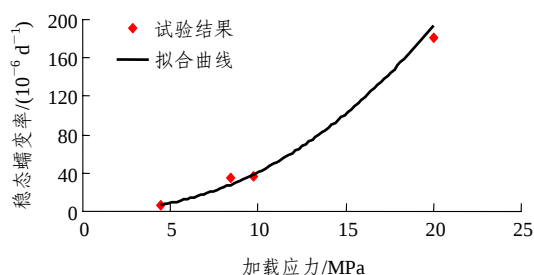


图 3 层状盐岩稳态蠕变率与加载应力关系曲线

Fig.3 Curve of steady strain creep rate and loading stress of bedded rock salt

3.3 温度应力耦合作用蠕变特性

温度应力耦合作用下, 层状盐岩蠕变特性更加显著。加载应力相同时, 温度越高, 开始进入稳态蠕变的时间越早, 持续的时间越短, 稳态蠕变率越大。由表 3 可知, 层状盐岩在达到蠕变破坏时, 70 °C、90 °C 和 110 °C 进行的试验时间分别为 60, 53 和 42 h。

分析图 4 可知: 在 19.50 MPa 加载应力水平下, 随着温度的升高轴向蠕变应变增加很快, 稳态蠕变率增加也很快, 110 °C 时的稳态蠕变率为 $12.31 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$; 90 °C 时的稳态蠕变率为 $9.88 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$, 是前者的 80.25%; 70 °C 时的稳态蠕变率为 $9.31 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$, 是 110 °C 时的 75.63%。

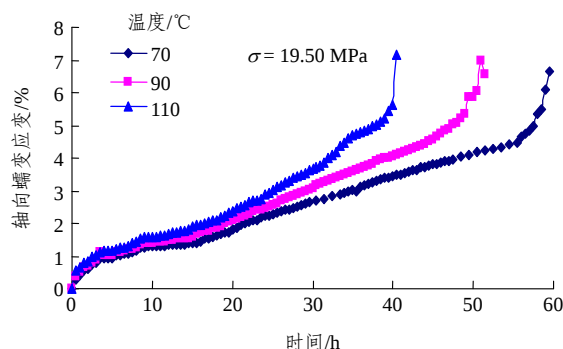


图 4 温度应力耦合作用下层状盐岩蠕变试验曲线

Fig.4 Experimental curves of thermo-mechanical coupling creep of bedded rock salt

由图 5 可知, 在温度应力耦合作用下, 且应力一定时, 层状盐岩稳态蠕变率与温度之间具有良好的指数关系。温度可使盐岩的延性得到提高, 温度升高, 盐岩内部分子的热运动增强, 削弱了它们之间的黏聚力, 使晶粒面更容易产生扩散过程或位错运动增强, 宏观上就表现为盐岩蠕变应变的增加, 相应的蠕变率也增大。对图 5 试验结果进行回归分析, 当应力保持不变时, 层状盐岩的稳态蠕变率与温度服从下列指数关系:

$$\dot{\varepsilon}(t) = b \exp(cT) \quad (2)$$

式中: b , c 均为试验常数; T 为温度。对本次层状盐岩稳态蠕变率与温度试验数据进行拟合, 试验常数为: $b = 5.2728$, $c = 0.0075$, $R^2 = 0.9603$ 。

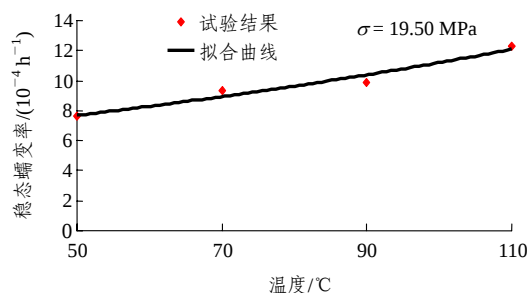


图 5 层状盐岩稳态蠕变率与温度关系曲线

Fig.5 Relationship curve of steady creep strain rate with temperature of bedded rock salt

温度应力耦合作用下, 层状盐岩的横向变形很大。由表 1 可知, 应力一定时, 温度对层状盐岩各层间的横向蠕变应变及横向蠕变率影响程度不同。纯岩盐的横向位移、横向蠕变应变和横向蠕变率都比高盐分泥岩夹层的大, 110 °C 时纯岩盐的横向位移和横向最大蠕变应变分别为 11.1 mm 和 12.33%,

横向蠕变率为 $2.94 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$, 而高盐分泥岩夹层的横向位移和横向最大蠕变应变分别为 6.9 mm 和 7.67%, 横向蠕变率为 $1.83 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$; 90 °C 时纯盐岩的横向位移和横向最大蠕变应变分别为 10.6 mm 和 11.78%, 横向蠕变率为 $2.22 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$, 高盐分泥岩夹层的横向位移和横向最大蠕变应变分别为 6.3 mm 和 7%, 横向蠕变率为 $1.32 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$; 70 °C 时纯盐岩的横向位移和横向最大蠕变应变分别为 10.4 mm 和 11.56%, 横向蠕变率为 $1.93 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$, 高盐分泥岩夹层的横向位移和横向最大蠕变应变分别为 5.9 mm 和 6.56%, 横向蠕变率为 $1.09 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ 。

3.4 层状盐岩温度应力耦合作用蠕变破坏

经过大量的试验研究并总结前人的研究成果可知, 在温度应力耦合作用下, 盐岩晶体的蠕变机制可以总结为由扩散控制的空缺迁移和晶间滑移产生的位错蠕变。

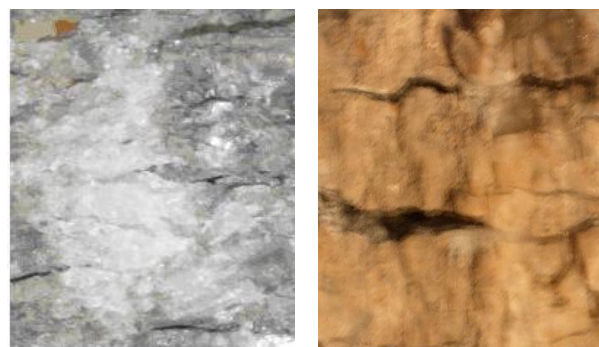
高温下, 层状盐岩的轴向蠕变应变破坏极限几乎相同。70 °C, 90 °C, 110 °C 时轴向蠕变应变破坏极限分别为 6.670%, 6.567% 和 7.167%。在温度应力耦合作用下, 尽管温度不同, 但是轴向蠕变应变破坏极限几乎相同, 为 6%~7%。

图 6 给出了层状盐岩各层层间的蠕变破坏图片^[18]。在温度应力耦合作用下, 纯岩盐的横向位移、横向蠕变应变和横向蠕变率都比高盐分泥岩夹层的大; 同温同压下, 纯盐岩的横向蠕变率是高盐分泥岩夹层的 1.6~1.8 倍; 温度对层状盐岩的蠕变损伤破坏影响很大(见图 7), 达到相同的破坏程度时, 温度可以加快蠕变损伤的速度, 常温下需要 161 d(见



图 6 层状盐岩各层层间的蠕变破坏图片^[18]

Fig.6 Pictures on creep failure of each interlayer of bedded rock salt^[18]



(a) 常温下, $\sigma = 4.47 \text{ MPa}$ (b) 110 °C 时温度应力耦合作用下

图 7 层状盐岩层间蠕变破坏放大图

Fig.7 Enlarged pictures of creep failure of each interlayer of bedded rock salt

图 7(a)), 而 110 °C 时只要 42 h(见图 7(b))。这样, 层状盐岩内部, 纯盐岩与高盐分泥岩夹层之间变形不协调, 产生剪应力, 使纯盐岩和泥岩夹层之间产生剪切破坏, 随着时间的增加, 剪切破坏越来越剧烈, 从而导致整个盐岩体的多重剪切破坏。使盐岩体内裂隙增多, 剪切破坏的网格大量增加, 渗透率加大, 油气泄漏。

根据图 6, 7 的蠕变破坏情况, 可得出图 8 的层状盐岩各层间的蠕变破坏示意图。层状盐岩的蠕变破坏是一个长期过程, 由于层状盐岩体各层之间组分、结构不同, 在应力温度耦合作用下, 层状盐岩各层蠕变率不同, 上、下 2 个部分直径明显不同, 交界面之间产生剪切力逐渐造成损伤, 使得层状盐岩在蠕变过程中, 在交界面处逐渐形成网格状裂纹, 最终导致破坏。

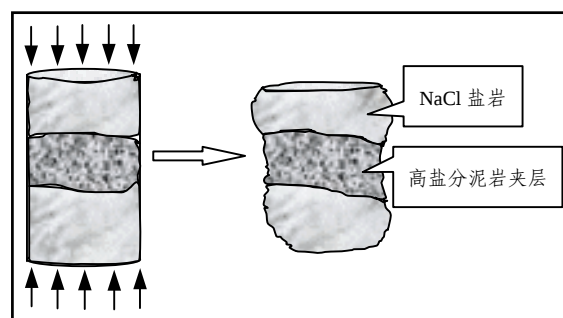


图 8 层状盐岩各层间的蠕变破坏示意图

Fig.8 Schematic diagram of creep failure of each interlayer of bedded rock salt

因此, 在我国这种典型特征的盐岩矿床中进行地下油气储存和核废料处置, 在层状盐岩溶腔的稳定性分析中, 对于层状盐岩在温度应力耦合作用下

的层间蠕变破坏必须给予充分的考虑, 尤其是由于层间破坏造成的渗漏。

4 层状盐岩温度应力耦合作用蠕变本构方程

对于层状盐岩, 研究其蠕变本构方程, 就是确定其稳态蠕变率与盐岩组份、结构及应力和温度的变化关系。大量的试验结果表明: 层状盐岩的蠕变率不仅与盐岩的组份、结构有关, 而且与偏应力及温度有关。因此, 根据乘法原理, 稳态蠕变率可采用如下形式表示:

$$\dot{\varepsilon}(t) = K f(\sigma_1 - \sigma_3) f(T) \quad (3)$$

式中: K 为与盐岩组份、结构有关的系数; $f(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为偏应力的函数; $f(T)$ 为温度的函数。

综上所述, 盐岩的组份、结构、温度和偏应力与其蠕变特性密切相关, 温度和偏应力的增高都使得盐岩的蠕变率增大; 在给定温度下, 层状盐岩的稳态蠕变率与偏应力之间成幂函数关系; 相同加载应力水平下, 层状盐岩的稳态蠕变率与温度服从指数关系; 不同应力、温度条件下的盐岩的蠕变规律取决于不同的变形机制。应用这些蠕变机制, 得到了层状盐岩的稳态蠕变率本构方程是作用在其上的偏应力的幂函数与温度的指数函数关系, 其本构方程为

$$\dot{\varepsilon}(t) = K \exp\left(-\frac{\Delta Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma^*}\right)^n \quad (4)$$

式中: ΔQ 为激活自由能; R 为普氏气体常数, 且 $R = 8.314 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; σ^* 为单位应力, 即 1 MPa。

运用 Matlab 或 Origin 对试验数据拟合即可得到 K , n 和 ΔQ 这 3 个参数。对本次层状盐岩蠕变试验数据进行拟合, 拟合参数为: $K = 5.567 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$, $\Delta Q = 15.9 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $n = 5$ 。

5 结 论

通过对层状盐岩温度应力耦合作用蠕变特性试验研究及理论分析, 可得如下结论:

(1) 层状盐岩的蠕变率与其组份、结构密切相

关。同温同压下, 组份、结构不同, 其轴向和横向蠕变应变、蠕变率不同。

(2) 常温下, 层状盐岩随着加载应力水平的增大, 其蠕变应变、蠕变率逐渐增大。同温不同加载应力水平下, 应力越大, 层状盐岩蠕变应变、蠕变率就越大; $\sigma = 20.00 \text{ MPa}$ 时, 稳态蠕变率为 $1.81 \times 10^{-4} \text{ d}^{-1}$; $\sigma = 9.75 \text{ MPa}$ 时, 稳态蠕变率为 $3.67 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$, 是前者的 20.28%; $\sigma = 4.47 \text{ MPa}$ 时, 稳态蠕变率为 $6.07 \times 10^{-6} \text{ d}^{-1}$, 是 $\sigma = 20 \text{ MPa}$ 时的 3.35%。同时, 层状盐岩的稳态蠕变率与偏应力之间成良好的幂函数关系。

(3) 温度应力耦合作用下, 层状盐岩蠕变特性更加显著。加载应力水平相同时, 温度越高, 开始进入稳态蠕变的时间越早, 持续的时间越短, 稳态蠕变率越大。 $\sigma = 19.50 \text{ MPa}$ 时, 110°C 下的稳态蠕变率为 $12.31 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$; 90°C 下的稳态蠕变率为 $9.88 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$, 是前者的 80.25%; 70°C 下的稳态蠕变率为 $9.31 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$, 是 110°C 时的 75.63%。同时, 层状盐岩的稳态蠕变率与温度服从指数关系。

(4) 层状盐岩体各层间由于组份、结构不同, 在温度应力耦合作用下, 纯盐岩与高盐分泥岩夹层蠕变率不同, 变形不协调, 交界面之间产生剪切力, 导致剪切破坏。同温同压下, 纯盐岩的横向位移、横向蠕变应变和横向蠕变率都比高盐分泥岩夹层的大, 纯盐岩的横向蠕变率是高盐分泥岩夹层的 1.6~1.8 倍; 层状盐岩的轴向蠕变应变破坏极限几乎相同, $70^\circ \text{C} \sim 110^\circ \text{C}$ 时其破坏极限为 6%~7%。

(5) 根据试验结果建立了层状盐岩温度应力耦合作用稳态蠕变率本构方程, 并对本次层状盐岩蠕变试验数据进行拟合, 拟合参数为: $K = 5.567 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$, $\Delta Q = 15.9 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $n = 5$ 。本文的研究对我国在层状盐岩矿床中进行油气储库的建设及稳定性分析具有一定的参考价值。

参考文献(References):

- [1] 王清明. 盐岩矿床水溶开采[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 25 - 61.(WANG Qingming. Solution mining for salt deposits[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 25 - 61.(in Chinese))
- [2] HUNSCHKE U. Measurement of creep in rock salt at small strain rates[C]// The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Second Conference. [S. l.]: Trans. Tech. Publications Inc., 1984: 187 - 196.

- [3] CATER N L, RUSSELL J E. Modified mechanical equation of state for rock salt[C]// The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Second Conference. [S. l.]: Trans Tech Publications Inc., 1984: 409 - 430.
- [4] 高小平, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩蠕变特性温度效应得试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2 054 - 2 059.(GAO Xiaoping, YANG Chunhe, WU Wen, et al. Experimental studies on temperature dependent properties of creep of rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2 054 - 2 059.(in Chinese))
- [5] 马建春. 盐岩流变特性的研究[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 1995.(MA Jianchun. Study on rheological behavior of rock salt[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 1995.(in Chinese))
- [6] 梁卫国, 赵阳升, 徐素国. 240 °C 内盐岩物理力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2 365 - 2 369.(LIANG Weiguo, ZHAO Yangsheng, XU Suguo. Testing study on physical and mechanical properties of heated salt rock within 240 °C[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2 365 - 2 369.(in Chinese))
- [7] 梁卫国, 徐素国, 赵阳升. 损伤盐岩高温再结晶剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 413 - 3 417.(LIANG Weiguo, XU Suguo, ZHAO Yangsheng. Experimental study on heating recrystallization effect on shear characteristics of damaged rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 413 - 3 417.(in Chinese))
- [8] 邱贤德, 庄乾城. 盐岩流变特性的研究[J]. 重庆大学学报, 1995, 18(4): 96 - 103.(QIU Xiande, ZHUANG Qiancheng. Rheological behaviour of rock salt residual elasticity creep relaxation model[J]. Journal of Chongqing University, 1995, 18(4): 96 - 103.(in Chinese))
- [9] 杨春和, 李银平. 互层盐岩体的 Cosserat 介质扩展本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 226 - 4 232.(YANG Chunhe, LI Yinping. Expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4 226 - 4 232.(in Chinese))
- [10] 赵永红, 杨振涛. 含软弱夹层岩石材料的损伤破坏过程[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2 350 - 2 355.(ZHAO Yonghong, YANG Zhentao. Research on fracturing around cemented slot in rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2 350 - 2 355.(in Chinese))
- [11] 邵保平. 含高盐泥岩夹层的盐岩蠕变特性及油气储库稳定性研究[硕士学位论文][D]. 太原: 太原理工大学, 2006.(XI Baoping. Study on creep property of rock salt with salt-mudstone interlayer and stability of oil and gas storage cavern[M. S. Thesis][D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2006.(in Chinese))
- [12] 梁卫国, 徐素国, 赵阳升, 等. 盐岩蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1 386 - 1 390.(LIANG Weiguo, XU Suguo, ZHAO Yangsheng, et al. Experimental study on creep property of rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1 386 - 1 390.(in Chinese))
- [13] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(YANG Chunhe, LIANG Weiguo, WEI Donghou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(in Chinese))
- [14] 吴文, 侯正猛, 杨春和. 盐岩中能源(石油和天然气)地下储存库稳定性评价标准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2 497 - 2 505.(WU Wen, HOU Zhengmeng, YANG Chunhe. Investigations on evaluating criteria of stabilities for energy (petroleum and natural gas) storage caverns in rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2 497 - 2 505.(in Chinese))
- [15] 邵保平, 赵阳升, 徐素国, 等. 含高盐泥岩夹层的盐岩高温蠕变特性研究[C]// 第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集. [S. l.]: [s. n.], 2006: 267 - 272.(XI Baoping, ZHAO Yangsheng, XU Suguo, et al. Study on creep property of rock salt with salt-mudstone interlayer at high temperature[C]// The 9th Chinese Symposium on Rock Mechanics and Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2006: 267 - 272.(in Chinese))
- [16] 吴文, 杨春和. 盐岩的压缩试验研究与损伤模型模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3 709 - 3 713.(WU Wen, YANG Chunhe. Experimental study on salt rock under compression and damage model simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 709 - 3 713.(in Chinese))
- [17] 陈卫忠, 王者超, 伍国军, 等. 盐岩非线性蠕变损伤本构模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 467 - 472.(CHEN Weizhong, WANG Zhechao, WU Guojun, et al. Nonlinear creep damage constitutive model of rock salt and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 467 - 472.(in Chinese))
- [18] LIANG W, YANG C, ZHAO Y. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2007, 44(3): 400 - 411.