

文章编号 :1000-582X(2007)10-0077-06

用于核废料处理的岩盐溶腔力学特性

刘新荣,钟祖良

(重庆大学 土木工程学院 重庆 400045)

摘 要 综合各国研究成果,分析岩盐的蠕变、渗透、防辐射力学效应、盐腔内卤水的热膨胀等力学特性、以及盐层倾角、岩盐溶腔围岩的应力和应变、溶腔的几何形状和溶腔顶板稳定性等影响岩盐溶腔稳定的主要因素,可知岩盐溶腔用于核废料处置是安全的并具有良好的应用前景。

关键词 核废料 盐岩溶腔 蠕变 渗透

中图分类号 :X705

文献标志码 :A

随着经济的快速发展和人类生活水平的提高,人类在寻求水力、火力、风力等发电的同时,也开始开发更高效的核能发电。自 1954 年前苏联在世界上建成第一座核电站并投入运行以来,至今核电已有 40 多年的历史,全世界核电累计运行已超过 7 200 堆/年,发电量 200 000 亿 kWh。截止到目前为止,全世界已有 34 个国家和地区拥有核电,世界上正在运行的核电厂有 431 座机组。据统计,由于核电站的广泛应用,以及与医疗、科研、国防事业相关的核利用,目前全世界产生的核废料已达 20 万 t 之多,预计到 2030 年,全球的核废料总数将达到 50 万 t^[1]。核废料贮存的长期安全性及其对地质环境和生物圈的长期影响是人们十分关注和担忧的问题,已引起各国政府的高度重视。

核废物含有大量半衰期各异的放射性核元素。高放射性废料(HLW)在 1 000 年内其放射性可降至初期值的 1%,在约一百万年之后,其放射水平与花岗岩相当。中、低放射性废料(ILW - LLW)则在数千年后即与围岩的放射水平相当。对于 ILW - LLW,可选择浅部的处置场所,一般选在渗透性很差的粘土岩中,对于 HLW,必须保证其在很长时间内完全与生物圈隔离,宜置放于地下深部且封闭稳定的地质岩层中,而地下岩盐溶腔提供了经济上合理、技术上可行、环境上无害的最佳场所^[2]。

自 20 世纪初国内首创钻孔注水采汲卤水以来,现在世界 80% 以上的岩盐矿床都是采用钻孔水溶法开采。常用生产工艺有单井对流法、油(气)垫对流法和水力压裂法等。其共性都是将水或其它溶剂通过专门装备的钻孔以一定的温度和压力注入岩盐矿床中,使有用矿物原地溶解,转化为溶液状态提出地表,而在原盐矿层中形成溶腔。

已探明的岩盐资源主要分布在北美和欧亚地区的美国、法国、德国、俄罗斯、丹麦、伊拉克、摩洛哥、波兰、中国等。这些国家由于开采地下盐矿,形成了丰富的地下岩盐溶腔资源。采卤后的岩盐溶腔赋存深度通常在距地表几百至上千米的范围内,溶腔半径几十米不等,溶腔高度几十至上百米,容积一般几万至近百万立方米。岩盐矿床与其它地质结构比较,渗透性极小,能有效地阻止地下水渗入,因此溶腔具有很好的隔水性和密封性。利用岩盐溶腔进行废物最终处置,可使被处置物完全封闭隔离,有害物质无法迁移。这种良好的天然地质屏障与地表处置废物时的人工工程设障相比具有无可比拟的长期性和可靠性。根据德国、法国、英国、美国近四十多年在岩盐溶腔中贮存液态和气态碳氢化合物的经验及近年来的固体废物(包含核废物)处置试验证明研究在盐层中处置特殊废物,安全性是有保障的。

收稿日期 2007-05-07

基金项目 国家自然科学基金青年基金资助项目(50104013) 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目
(NCET-05-0763)

作者简介 刘新荣(1969-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事岩土工程、隧道与地下空间工程研究工作,
(E-mail)liuxrong@cqu.edu.cn

表1 利用岩盐建造的地下试验室概况

名称	地点	主岩	深度/m	经营负责单位	时间
Asse	德国、汉诺威东南	岩盐	490-800 洞穴在950	德国环境和健康国家研究中心(GSF)	1965-1978年作低中放废物处置,研究活动到1977年,回填工作等在进行中
Morsleben	德国	盐穹	525之下	德国BFS和DBE	1981-1998用作低中放废物处置库,原为废盐矿
WIPP(废物隔离示范工厂)	美国、新墨西哥州	盐岩	655	美国DOE	1982-1999年开始处置超铀废物
Gorleben	德国汉堡东南100 km	盐丘	900之下	德国联邦辐射防护局(BFS),德国放射性废物最终处置专业工程公司(DBE)	1985-1990原考虑为处置发热和非发热各类放射性废物
Amelie	法国	岩盐	-	法国放射性废物管理局(ANDRA)	1986-1992
	英国	岩盐	915	英国设菲尔德大学	2001处置高放射性固体废物

1 岩盐力学特性

岩盐的力学特性比较复杂,其力学特性的很多方面仍需进一步的研究,国际上为此专门设立了如文献[3]提到的岩盐力学特性研讨会。在大量的试验和理论研究的基础上,国内外专家对岩盐的几个重要的力学性质进行了较为深入研究。

1.1 岩盐的蠕变特性

当岩盐进行短期的压缩试验时,岩盐呈软弹性;当岩盐进行拉伸试验时,岩盐呈脆弹性。如果对岩盐进行长期测试,即使在非常小的偏应力作用下岩盐也具有流体的特性。岩盐的蠕变速率是作用在其上的偏应力和温度的高阶非线性函数。对此,学者们对岩盐的蠕变特性进行了深入研究^[4]。

1) 稳定蠕变阶段。当恒定荷载加在岩盐试件上一段时间后,岩盐试件将处于稳定蠕变阶段。这个阶段是以稳定的蠕变率为标志的,要求试验时保持恒定的温度和施加恒定的应力。

2) 瞬时蠕变阶段。由于加载在岩盐上的应力突然变化引起的。瞬时蠕变阶段是以高初始蠕变率为特征的。高初始蠕变率随着荷载的增加慢慢的减少到稳定蠕变率或更低。但有时相反,初始蠕变率随着荷载的增加慢慢的增加到稳定蠕变率^[5]。

同理,可以把岩盐的稳定蠕变和瞬时蠕变的力学性能的研究应用到盐腔力学特性上来。用盐腔的体积应变率(\dot{V}/V)代替岩盐的轴向应变率;用盐腔深度的地压力(P_∞)与盐腔内卤水压力之间的差值代替施加在岩盐上的单轴压力。尽管如此,力学特性的类推还需要作修正。一方面,任何压力的增大(减小),都会引起充满卤水的盐腔的瞬时蠕变效应伴随着岩盐的溶

解和结晶,从而进一步引起显著地瞬时效应。另一方面,盐腔的瞬时蠕变效应比岩盐持续的时间长,岩腔周围的应力分布也不均匀,与前面所说的单轴试验相比,在还没有达到稳定的蠕变阶段前,由于卤水压力的变化引起的应力变化会扩展到整个岩体。换句话说,岩腔的瞬时蠕变力学行为会引起岩盐的流变特性和盐腔几何性状的变化。

根据岩盐单轴试验,其稳定蠕变段力学行为可以用式(1)来描述,一般称为Norton-Hall准则:

$$\dot{\varepsilon} = A \exp(-\zeta/RT) \sigma^n, \quad (1)$$

其中 A 、 n 和 ζ/R 是3个参数。 σ 为轴向应力, T 为试验时的绝对温度;指数 n 的范围为3~6, ζ/R 的变化范围为4000~10000 K。 A 为Brouard和Bérest已出版的专著里的数据^[6]。

轴向试验的表达式也可以写成三维的形式:

$$\dot{\underline{\varepsilon}} = A \exp(-\zeta/RT) \frac{1}{n+1} \frac{\alpha (\sqrt{3}J_2)^{n+1}}{\partial \underline{\sigma}}, \quad (2)$$

式中 $J_2 = 1/2 S_{ij} S_{ji}$; $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}(\sigma_{ii})\delta_{ij}$ 。

同理,理想化球型(或柱型)盐腔可以用相似的方法进行研究。经过较长的时间之后,盐腔内卤水压力比盐腔深度处的地应力小,应力分布见图1所示。可以观察到,离盐腔壁很长一段距离内,其切线应力比地应力小 $\sigma_{\theta\theta} + P_\infty < 0$,任一横截面都朝应力平衡方向发展。

对于球型的盐腔,其稳定蠕变阶段的体积变化率、温度和压力的关系如下:

$$\frac{\dot{V}}{V} = -\frac{3}{2} \left[\frac{3}{2n} (P_\infty - P_i) \right]^n A \exp\left(-\frac{\zeta}{RT}\right), \quad (3)$$

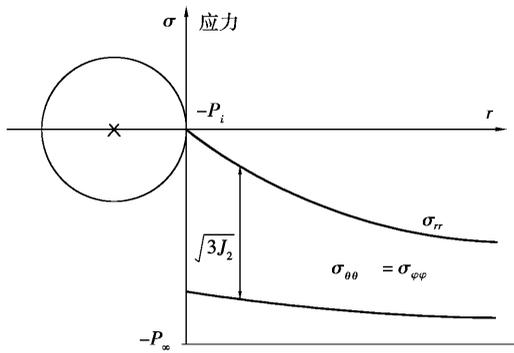


图 1 球型盐腔的应力分析图

对于柱型盐腔, Van Sambeek^[7]给出了相似的公式

$$\frac{\dot{V}}{V} = -\sqrt{3} \left[\frac{\sqrt{3}}{2n} (P_\infty - P_i) \right]^n A \exp\left(-\frac{\zeta}{RT}\right), \quad (4)$$

根据式(3)和(4)以及前面提到的岩盐特性,可以得出结论:只要盐腔内压力与岩石静压存在差值,盐腔终将慢慢收缩,从而导致溶腔压力的升高。

对于 1 000 m 深的盐腔,比较典型的初始收缩率为 $\dot{V}/V = -3 \times 10^{-4}$ 每年(但是 Brouard 和 Bérest 发现随着盐腔场地特性和盐腔形状的不同,初始收缩率的差异较大)。而盐腔的收缩率会引起盐腔压力增长率的变化,其关系为: $\dot{P}_i = -\dot{V}/(\beta V)$, 其中 β 为压缩因子。对于标准的盐腔 $\beta \approx 4 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, 则每年压力增长率为 $\dot{P} \approx 0.75 \text{ MPa}^{[8]}$ 。但实际上,盐腔的压缩率一般都大得多,一是盐腔的形状不规则,二是盐腔里含有其他气体。Wallner 和 Paar 指出:由于随着时间的发展,盐腔内卤水压力的日益增加,盐腔的地应力和其内压力的差值将不断的减小,使得盐腔蠕变率的不断减小。经过几个世纪之后,盐腔的内压力与盐腔深度平均地应力将达到平衡。

盐腔压力的增加是时间和溶腔深度的函数,其中溶腔深度的影响包含了两个方面:1)增加了盐腔地应力($P_z(\text{MPa}) = 0.022H(\text{m})$)和盐腔内静压力 $P_i = P_h(\text{MPa}) = 0.012H(\text{m})$ 之间的初始差值。2)增加了岩石的平均温度,从而影响深部盐腔的岩盐的蠕变和导致更快的蠕变率(并发提高了压力的增长率)。上述因素都将加快深部盐腔的初始压力的增长率,Bérest 等人在参考文献[9]中作了综合的阐述。

1.2 盐腔内卤水的热膨胀性

岩盐的温度随着埋深的增加而提高,一般在埋深为 1 000 m 左右,典型的温度为 45 °C。但是如果盐腔的溶解用水是由浅层蓄水层的软水补给的,则其温度只有 15 °C 左右。盐腔内水温度的转变时间一般是几天(大的盐腔为几周),也就是说,盐腔内卤水的温度

在溶解期间或在溶解结束后很接近于软水的温度(设深度为 1 000 m 处卤水的温度为 20 °C)。若盐腔保持闲置,当溶解完成之后,由于岩盐体与盐腔之间的热传导和盐腔内的热对流作用,盐腔初始温差 $T_R = T_0 = 45 - 20 = 25 \text{ °C}$,慢慢的会减小。

热传递方程可用下式表示

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \Delta T, \quad (5)$$

$$\int_{\Omega} \rho_b C_b \dot{T}_i d\Omega = \int_{\partial\Omega} \tilde{K} \partial T / \partial n da, \quad (6)$$

$$T_i(t) = T_{\text{wall}}. \quad (7)$$

公式(5)用于表述岩盐体内部温度(k 是热扩散率,一般取值为 $k = 3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \approx 10 \text{ m}^2/\text{年}$),公式(6)是岩腔壁边界条件:热量主要通过盐腔壁(\tilde{K} 是盐的热传导率,一般取值为 $\tilde{K} \approx 6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)传递来加热盐腔内的卤水到平均的温度 T_i 。由参考文献[10]可知 $\rho_b C_b$ 为卤水单位体积热容量,一般取值为 $\rho_b C_b \approx 1\,200 \times 4\,000 = 4.8 \times 10^6 \text{ J/m}^3/\text{°C}$ 。公式(7)假设盐腔壁的温度等于盐腔内卤水的平均温度。这个假设把由于热对流引起的盐腔内卤水的流动效应给予理想化。February(1996)对 950 m 深的 EZ53 盐腔的温度分布进行研究,发现由于热传递的作用,盐腔内温度的分布很均匀。

温度的演变过程可以通过数值方法进行模拟预测,温度的预测包络线可以通过热传递方程计算得到。方程(2)的空间分析证明了热传递是由第一特征时间控制的(特征时间 $t_c = V^{2/3}/(4k)$, V 为盐腔的体积, m^3)。对于球型的盐腔 t_c 是指盐腔内卤水和岩盐体的初始温差降低 75% 左右的时间。对于圆柱型的盐腔,卤水的吸热速度更快。特征时间值大意味着要达到热平衡所需时间比较长。如体积为 $V = 8\,000 \text{ m}^3$, 其特征时间为 $t_c = 1 \text{ 年}$,而对于体积为 $V = 500\,000 \text{ m}^3$, 其特征时间为 $t_c = 16 \text{ 年}$ 。平均温度变化率为(t 为 $0 \sim t_c$), $\dot{T}_i \approx 0.75(T_R - T_0)/t_c$, 如,当 $T_R - T_0 = 25 \text{ °C}$ 时,体积为 $8\,000 \text{ m}^3$ 的盐腔的温度变化率为 $\dot{T}_i \approx 18 \text{ °C/年}$ 。体积为 $V = 500\,000 \text{ m}^3$ 的盐腔的温度变化率为 $\dot{T}_i \approx 1.2 \text{ °C/年}$ 。

参考文献[11]指出,对于开放的盐腔,温度的升高会导致热膨胀和卤水外溢。 $Q = \alpha \dot{V} T_i$, α 为热膨胀系数,一般取值为 $\alpha_i \approx 4.4 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$ 。而对于封闭的盐腔,温度的升高会导致压力的增大, $\dot{P}_i = \alpha \dot{V} T_i / \beta$ 。 α/β 的比值接近 1 MPa/°C 。也就是说卤水温度升高 1 °C ,盐腔的压力就升高 1 MPa 。换句话说,经过若干个特征时间之后,初始温差 25 °C 被吸收时,相应的压

力就增加 25 MPa。这就超过了初始地应力和卤水压力差,就有可能导致盐腔的破裂。初始温差被吸收的快慢与盐腔的体积大小有关,对体积为 8 000 m³ 的盐腔,其压力变化率为 18 MPa/年;而对于体积为 500 000 m³ 的盐腔,其压力变化率为 1.2 MPa/年。了解到盐腔的蠕变效应导致盐腔内压力的增长率为每年 0.75 MPa。由此可见,对于溶解刚完成后不久封闭的盐腔,主要是热膨胀对盐腔的力学性能占主导作用。但这种负影响是可以避免的,如埋在 2 000 m 以下的深部盐腔,或是位于易于蠕变的蒸发盐层上。此外为了避免卤水的热膨胀作用的影响,可以在封闭溶腔之前等上足够长的时间,也就是达到了热平衡的状态。

1.3 岩盐的渗透特性

考虑岩盐的渗透特性,则压力升高的负面影响将有所减轻。任何一个标准工程学都假定岩盐为不渗透的。岩盐的渗透率很小,导致实验室测出的岩盐的渗透率数值具有较大的离散性,对岩盐的取样、卸荷等对渗透性有较大的影响。现场的原位试验很少,在 WIPP 岩盐场对未受干扰的岩盐实验给出的渗透率小到 $k = 10^{-21} \text{ m}^2 [12]$ 。SMRI^[13] 在一口井中为期一年的测试得出的岩盐的渗透率为 $k \approx 6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 在水文地质学中,通常定义渗透性小于 $k = 10^{-17} \text{ m}^2$ 为不渗透岩体,这个值比前面提到的数值大 2 个数量级。也就是说,如果把盐腔作为封闭性容器作为短期的烃的储存是十分安全的。

从长远的角度考虑,盐腔就不再是那么安全的了,尤其是那些压力会增加的封闭盐腔。由于卤水具有较高的压缩性,甚至微量的液体流失也可以显著的降低盐腔的蠕变作用,以确保盐腔的压力不会升得太高。

考虑一个半径为 R 的盐腔,其渗透性系数为 k ,盐腔卤水的压力为 P_i ,初始卤水压力为 P_0 , η 为卤水的动力黏性系数 $\eta \approx 1.2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。根据达西定理的假设,稳定蠕变阶段,卤水的渗透率满足下式要求:

$$Q_b/V = 3k(P_i - P_0)/(\eta R^2) \quad (8)$$

可以看出,渗透率很小,如:当 $P_i - P_0$ 为 5 MPa, R 为 12.5 m ($V = 8 000 \text{ m}^3$), k 为 10^{-20} m^2 , Q_b/V 为 $0.2 \text{ m}^3/\text{年}$,几乎与盐腔蠕变率相平衡,盐腔的压力保持一个定值。Bérest, Berguse, Brouard 等人在法国东南部 Etrez 岩盐场的 Ez33 盐腔作了一个为期 18 个月的密封溶腔长期演变的试验,研究表明溶腔在长期的演变过程中确实会达到一定的稳定状态,平衡时的压力远小于岩石静压。

1.4 岩盐的辐射力学效应

辐射损伤引起的膨胀会引起岩盐内各晶粒的膨胀不均一,可能会诱发内应力。在试验中已观测到,受高

能辐照的固体,它的内应力可能会超过作用的外应力。Bathe K J(1981)^[14] 利用经钴 60 辐照过的岩盐进行的蠕变试验和三轴试验,结果表明,辐照或辐照“后效”均可使试样蠕变变形性能降低,受辐照后的试样发生应变硬化较未受过辐照提前,在较小应变时即已发生,并使其变形模量增大,但过屈服点后,随着应变增大,两曲线很快趋于一致,因为空穴产生对位错的钉扎作用。通过现场实验研究发现,辐射只会使洞室有限厚度内的岩盐体受到损伤,辐射通过 30 cm 的岩盐体后,强度已衰减到只有原来强度的 1%。

2 岩盐溶腔结构稳定性

地下岩盐溶腔中储存有害物质或具有放射性的核废料,这就要求岩盐溶腔具有永久的稳定性。而岩盐溶腔的稳定性研究主要包括盐层倾角、岩盐溶腔围岩的应力和应变分析,溶腔的几何形状和溶腔顶板稳定性分析等。

2.1 盐层倾角对溶腔稳定性的影响

文献[15]对长山岩盐矿床,盐层倾角分别取为 2°、3°和 5°进行计算,发现溶腔围岩各节点的稳定性系数非常接近,同时有效应力、最大主应力、弹性应变能密度、最大剪应力也有类似的规律。表明小角度时,盐层倾角对水溶开采形成的溶腔稳定性影响很小;反之,盐层倾角对溶腔稳定性影响是比较明显的。

2.2 岩盐溶腔围岩应力和应变分布

在地下岩盐进行水溶开采活动时,破坏了溶腔围岩原始应力平衡状态,导致溶腔围岩应力重新分布。文献[16-17]从相似模拟试验和有限元分析结果中总结了溶腔围岩的应力重分布和变形规律。

1)溶腔围岩的应力分布特征因围岩所处位置不同而不同。在岩盐层中,支撑压力峰值集中系数、支撑压力峰值位置(离溶腔边界的距离)和支撑压力影响范围均随远离岩盐层上边界而减小。

2)处在同一岩层层位的岩层支撑压力峰值集中系数、峰值点距溶腔边界的距离以及支撑压力影响范围随溶腔顶板跨距增加而增大。

3)岩盐溶腔顶板暴露跨距相同时,处在同一岩层层位的岩层支撑压力峰值集中系数、支撑压力峰值位置距溶腔边界的水平距离以及支撑压力的影响范围随岩盐开采深度增加而增大。

4)岩盐溶腔在直接地压作用下会发生收缩,但不垮塌,并与井深无关,因为塑性变形区是沿着溶腔周围发展的。

5)通过塑性变形区的扩展,足以经受外地压,岩盐溶腔建立起新的结构平衡。

2.3 溶腔几何形状影响研究

1) 溶腔高度对其稳定性的影响

当溶腔高度增大时, 对其侧壁的稳定性的影响很小, 不过高度较大时, 顶板稳定性相对较差, 溶腔两侧的稳定性的表现为两头(顶、底板)小、中间大, 且顶板不如底板稳定。

2) 溶腔跨度对其稳定性的影响

对于薄层岩盐, 随跨度(上底)的增大, 侧壁和底板的稳定性减小, 溶腔跨度对其稳定性的影响远小于高度的影响。对于厚层岩盐, 随跨度(上底)的增大, 侧壁和顶板的稳定性减小, 溶腔跨度对其稳定性的影响大于高度的影响。

3) 溶腔形状对其稳定性的影响

从应力分布上看, 不同形状的溶腔因其对称性不同, 而造成围岩中应力集中程度不同, 致使溶腔稳定性差异较大。研究表明, 球形、圆柱形稳定性最好, 近似台形次之, 组合形(上半部为台形, 下半部为柱形)最不利。

2.4 溶腔顶板稳定性分析

岩盐溶腔顶板的稳定性研究至关重要, 它直接关系到溶腔的长久性稳定。文献 [18] 对顶板复合岩层的力学特性进行了探讨, 采用突变理论研究了岩盐单井溶腔顶板、连通井顶板稳定性, 深入了解顶板岩体运动过程和失稳的发展过程。

3 结 论

综上所述, 盐岩结构致密、孔隙率低、导热性强和塑性大, 随温度的升高($\leq 240\text{ }^{\circ}\text{C}$), 盐岩强度增高, 抵抗变形破坏的能力增强。同时, 在高温($\leq 240\text{ }^{\circ}\text{C}$)作用下, 损伤破裂盐岩具有再结晶自愈特性。有利于在长时高温辐射作用下, 保持盐岩储库的稳定。随着地下溶腔存储技术的发展和完善, 岩盐溶腔用于核废料处置愈来愈受到关注, 逐应进一步如作下研究。

1) 我国岩盐及其顶底板岩石的流变性、渗透性、损伤特性、高温特性和水力压裂特性等。

2) 岩盐溶腔建腔技术、溶腔稳定性及其影响因素等。

3) 利用岩盐溶腔进行核废料地下处置的其他一些基本问题, 以确保环境安全。

参考文献:

- [1] HI2. Project to establish the scientific and technical basis for HLM disposal in Japan[M]. Japan :Adobe Acrobat 2001.
- [2] 罗嗣海, 钱七虎, 周文斌. 高放废物深地质处置及其研究概况[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 831-838.
- [3] HARDY RH, LANGER M. Proceedings of first conference on mechanical behaviour of Salt[C]. Clausthal-Zellerfeld, Germany :Trans Tech Pub, 1984, 901-902.
- [4] P. BÉRESTA, J. BERGUESA, B. BROUARDA. A salt cavern abandonment test [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2001 (38): 357-368.
- [5] VAN SAMBECK LL. Evaluating cavern tests and surface subsidence using simple numerical mode[C]// Proceedings of Seventh Symposium on Salt, vol. I. Amsterdam : Elsevier Science Publishers B. V, 1992 : 433 - 439.
- [6] BROUARD B, BÉREST P. A tentative classification of salts according to their cree properties[C]// Proceedings of SMRI Spring Meeting, New Orleans, 1998 : 18 - 38.
- [7] VAN SAMBEEK LL. A simple method for modeling the pressure build u Por flow of an abandoned solution well[C]// Proceedings of SMRI Spring Meeting, Austin, 1990.
- [8] BEÉREST P, BERGUES J, BROUARD B. Anharmonic oscillations in underground cavities[J]. CR Acad Sci Paris, série II b, 1997, 325 : 701-707.
- [9] GEVANTMAN LH. Physical properties data for rock salt [J]. National Bureau of Standards (U. S.), 1981(167): 288.
- [10] BOUCLY P. Expériences in situ et modélisation du comportement des cavités utilisées pour le stockage du gaz[J]. Rev Fr Géotech, 1982(18): 49 - 58
- [11] YOU T, MAISONS C, VALETTE M. Experimental procedure for the closure of the brine production caverns on the " Saline de Vauvert " site[C]// Proceedings of SMRI Fall Meeting, Hannover, 1994.
- [12] DURU PJG. Long term tests for tightness evaluations with brine and gas in salt[C]// Proceedings of SMRI Fall Meeting, Hannover, 1994.
- [13] VAN SAMBEEK LL. Evaluating cavern tests and surface subsidence using simple numerical mode[C]// Proceedings of Seventh Symposium on Salt, vol. I. Amsterdam : Elsevier Science Publishers B. V. , 1992 : 433 - 439.
- [14] BATHE K J, HO LEE-WING. A Simple and effective element for analysis of general shell structures[J]. Compt Struct 1981, 13 : 673-681.
- [15] 刘成伦, 徐龙君, 鲜学福. 浅埋薄层岩盐溶腔稳定性的数值模拟计算[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2003, 26(3): 143-146.
- [16] 刘新荣, 姜德义, 许江, 等. 岩盐溶腔围岩应力分布规律的有限元分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2003, 26(2): 39-41.
- [17] 刘新荣, 姜德义. 岩盐变形特性的试验研究[J]. 矿冶工程, 1999, 19(4): 12-15.
- [18] 刘新荣, 余海龙, 姜德义. 岩盐顶板复合岩石力学性质试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(3): 32-35.
- [19] 刘新荣, 鲜学福, 马建春. 三轴应力状态下岩盐力学性质试验研究[J]. 地下空间, 2004, 24(2): 153-155, 165.

(下转第 91 页)

Research and Practice of Roadways Supporting of Mine in View of High Geo-stress Soft Rock

YIN Guang-zhi^{a, b}, WANG Deng-ke^a, ZHANG Dong-ming^{a, b}

(1. College of Resource and Environmental Sciences 2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract With the increasing depth of coal mining, underground roadways will be a higher environment of geo-stress, especially in the areas where there have happened intense activities of geological structure. Researching of scientific supporting fashions of soft rock roadways in high geo-stress environment is the key of ensuring coal mining deeply in Coal Mine. Therefore, basic concept of high geo-stress soft rock and its forming conditions have been discussed, basing on mastery of deformation characters and supporting principle of high geo-stress soft rock roadways, three different supporting fashions have also been researched and executed with taking high geo-stress soft rock roadways' supporting of Baijiao Coal Mine in Furong Mining Area as objects. The results indicate that rigid and flexible layer supporting fashion is the best one which can fit effectively high geo-stress soft rock condition.

Key Words high geo-stress; soft rock roadway; combined support; rigid and flexible layer supporting

(编辑 侯 湘)

~~~~~  
( 上接第 81 页 )

## Mechanical Behavior of Rocksalt Cavern for Radioactive Waste Disposal

LIU Xin-rong, ZHONG Zu-liang

( College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China )

**Abstract** As the amount of radioactive waste increased sharply, the safely final disposal method of radioactive waste was being researched, to ensure that the radioactive waste was reserved safely in a long term. According to the research of each country, the mechanical behavior of rocksalt, such as creep, osmosis, mechanical behavior of radiation shield and thermal expansion of brine, was discussed. And then, the primary influencing factors of rocksalt cavern stability, such as obliquity of rocksalt, stress-strain of rocksalt, geometrical shape of rocksalt cavern and cavern roof stabilization, were analyzed. It is concluded that radioactive waste disposal in rocksalt cavern is safe and has well prospects of application.

**Key Words** radioactive waste; salt cavern; creep; permeability

( 编辑 陈移峰 )