

岩盐物理力学性质及其工程稳定性 应用现状及其展望

余冬梅¹ 虎啸天¹ 付江涛¹ 李光莹¹ 胡夏嵩^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 2. 青海大学, 青海 西宁 810016)

摘要: 在分析国内外有关学者关于岩盐的物理力学性质及其工程稳定性应用研究现状基础上, 分别从岩盐物理力学性质、岩盐孔隙度、渗透率、塑性变形能力和损伤恢复等物理特性方面, 论述了近年来有关岩盐的短期强度特性、岩盐的蠕变性能、围压作用下的力学特性, 以及温度效应对岩盐力学特性影响等有关岩盐工程应用中所表现出的物理力学特性; 最后从岩盐在工程应用方面, 提出了岩盐及其工程应用的发展方向。

关键词: 岩盐; 物理力学性质; 稳定性

中图分类号: P642; TU452

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2013)03-0065-08

1 引言

岩盐是一种特殊地质地理条件下的产物, 其矿物成分主要为钠、镁离子的碳酸盐、硫酸盐或氯化物。它是由饱和的多源卤水在长期地质作用下, 历经盐的结晶、沉淀和积聚等过程, 经过上百万年的演变以及后期的覆盖沉积, 在一定的条件下形成的^[1]。岩盐分布广、规模大、构造和水文条件相对简单以及盖层隔水性能好; 物理力学性能表现为结构致密、孔隙度低 ($< 1\%$)、渗透性低 ($K < 10^{-20} \text{ m}^2$)、良好的蠕变性能等^[2]。鉴于上述岩盐物理力学性质等方面的特征, 它不仅作为一种宝贵的矿产资源被开采利用, 还被认为是石油、天然气地下储备和高放射性废物永久性处置的理想介质。

我国是一个地下岩盐资源非常丰富的国家, 岩盐分布范围广泛, 埋藏地下数米至 4 000 m, 具备良好的建设地下能源储存或高放射核废料处置库的地质条件; 但与国外有关岩盐储层条件相比, 我国盐矿岩盐层的基本特点

是岩盐分层多, 单层厚度薄, 岩盐地层中含有非溶性夹层等特点, 因此在合理利用岩盐储存地下能源等方面将面临相对更加复杂的技术难题^[3]。因此开展岩盐的强度特性、蠕变特性、极端条件下的动力学特性等相关物理力学特征研究具有重要理论价值和实际意义。

2 岩盐的短期强度特性

岩盐的短期强度主要根据岩盐在单轴和三轴应力作用下不考虑时间效应所进行的试验和理论分析, 建立岩盐的强度与变形理论。Hansen 等^[4-8]通过对岩盐的短期强度与变形特性开展的岩盐的单轴压缩、三轴压缩和剪切试验, 获得了岩盐的抗压强度参数, 包括岩盐的粘聚力 c 值、内摩擦角 φ 值、极限压缩和拉伸强度、弹性模量和泊松比、剪切模量、体积模量等。研究认为岩盐的变形系数和强度值均属软岩范畴。Hunsche^[9]通过对立方体岩盐试样进行了断裂强度试验研究, 试样立方体边长为 5.75 cm, 试验温度 25 ~ 300 °C, 试验的目的是

收稿日期: 2012-10-17; 修回日期: 2012-12-03

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目(Y110091025) 资助

作者简介: 余冬梅(1986-), 女, 硕士, 主要从事地质工程与岩盐力学性质评价方面的工作。Email: ydm2011@isl.ac.cn。

通信作者: 胡夏嵩。Email: huxiasong@sina.com。

探讨应力路径、温度和岩盐类型对岩盐强度的影响,结果表明:1) 岩盐的强度随八面体正应力的增加而增加;2) 应力路径对其强度有较大影响;3) 除单轴试验强度外,不同地区的岩盐和不同类型的岩盐强度有所不同。

国内学者对岩盐的短期强度和变形特性也进行了一些研究。杨春和、吴文等^[10-12]选取江苏金坛矿区氯化物型岩盐,含量在 90% 以上,通过对其单轴、三轴的强度与蠕变试验结果的分析得出,岩盐是一种软岩,围压对岩盐力学性质影响较大;岩盐表现出良好的延性特征,单轴抗压强度较低,决定了岩盐在单轴压缩状态下的破坏主要是由于轴向压应力引起的横向拉伸应变所致。梁卫国等^[13]针对岩盐进行了单轴压缩、间接拉伸及剪切等试验,得到岩盐平均单轴抗压强度为 17.70 MPa,抗拉强度平均为 1.32 MPa,抗压与抗拉强度之比高达 13.4。钙质无水芒硝单轴抗压强度为 49.1 MPa,钙质无水芒硝抗拉强度为 2.52 MPa,它们的单轴抗压强度和抗拉强度分别为无水芒硝试件的 2.8 和 1.9 倍。研究认为无水芒硝岩盐是一种软岩,强度较低,变形较大。无水芒硝岩盐在单轴压缩变形破坏过程中,具有与普通岩石试件不同的 4 个阶段性特征:1) 刚性变形阶段 轴向应力为 0~5 MPa 时,应变很小,几乎为零,表现为刚性变形特征;2) 弹性变形阶段 轴向应力为 5~10 MPa 时,应力应变成线弹性关系,其弹性模量达 90 GPa;3) 塑性变形阶段 轴向应力为 10~18 MPa 时,试件的应变速率明显加快,开始出现明显的变形,表现出明显的泊松效应;4) 破坏阶段 轴向应力在超过 17.7 MPa 以后,试件表面产生张性破裂,承载能力迅速失去,试件破坏。周时光^[14]采用岩盐单轴压缩的应力试验,对乔后岩盐、一平浪岩盐及乔后盐 3 种岩盐作出全应力—应变曲线。结果表明岩盐的横向变形能力较大,在单轴抗压强度为 80% 左右的应力水平时,3 种岩盐的泊松比接近 0.5。3 种岩盐中最坚硬的一种即乔后岩盐单轴抗压强度的平均值为 36 MPa、变形模量分别为 0.20×10^5 MPa、 0.21×10^2 MPa、 0.095×10 MPa。岩盐变形模量低于一般的石灰岩、砂岩、白云岩等,这表明了岩盐是一种软岩。

综上所述,岩盐的短期强度特征主要是由粘聚力 c 值、内摩擦角 φ 值、极限压缩和拉伸强度、弹性模量和泊松比、剪切模量、体积模量等表示。不同的岩盐,其抗压强度也是不相同的,氯化物型岩盐,单轴压缩峰值应力一般为 20.9 MPa,变形模量为 15.5 GPa。钙质无水芒硝单轴抗压强度为 49.1 MPa,钙质无水芒硝抗拉强度为 2.52 MPa,然而相对于其它岩石类型,无论是氯化物型岩盐还是无水芒硝等,由单轴强度的试验结果表明岩盐其强度较低,是一种软岩。岩盐种类较多,不同类型之间存在差异性,关于对岩盐强度的划分尚需做进一步深入研究。

3 岩盐的蠕变性能

岩盐的蠕变特性对岩盐溶腔长期稳定和运行寿命方面均具有显著性影响,在一定的载荷作用下,蠕变能力可达到岩盐初始值的 30%~40%。岩盐的这种蠕变特性适应在储存过程中储存压力的反复变化^[13]。Berest 等^[15]将岩盐的蠕变分为初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 3 个阶段,对岩盐蠕变特性的试验研究主要集中在岩盐的初始蠕变和稳定蠕变两个阶段。由于矿物成分、应力水平的不同,岩盐进入稳态蠕变时间、蠕变速率及蠕变量均有所不同。Hample 等^[16]在恒定载荷作用下,岩盐很快完成弹性变形后即进入瞬态蠕变和较长时期的稳态蠕变。在瞬态蠕变阶段应变与时间满足幂函数与指数函数关系,而在稳态蠕变阶段应变与时间则呈线性关系,岩盐的瞬态与稳态蠕变耦合本构方程为 $\varepsilon = A(1 - e^{-\alpha t}) + \beta \left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^n t$ 。式中 A 、 α 均为岩盐瞬态蠕变特性参数; β 、 n 均为岩盐稳态蠕变特性参数。Hunsche^[17]、Munson^[18]根据单轴及三轴蠕变试验结果,认为岩盐蠕变损伤特征,即经历一段相对短暂的初始蠕变后,即表现出较长的稳态蠕变,最终进入加速蠕变。蠕变率亦经历从逐渐减少到保持相对稳定,直至逐渐增加成破坏的过程。Yang 等^[19]通过大量的蠕变试验及数值模拟分析,提出了关于岩盐蠕变试验方程,即 $\varepsilon_{c1} = \varepsilon_{ss}t + A(1 + e^{-\alpha t})$ 。式

中 A 、 a 为材料常数; ε_{ss} 为稳态蠕变率。该方程较好地反映了岩盐的瞬态及稳态蠕变变化规律。

国内杨春和等^[20-21]还在大量蠕变力学试验的基础上,选用江苏金坛盐矿,主要为氯化物型岩盐,对深层钻取的岩盐样品进行了单轴蠕变试验、三轴蠕变试验、蠕变试验和变荷载蠕变试验,提出了适合深层岩盐蠕变分析的本构关系,即稳态蠕变三维分析方程为

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = A_2 (\sigma_1 - \sigma_3)^n \left[A_1 + B_1 \exp\left(-\frac{\sigma_3}{B_2}\right) \right] \exp(-Q/RT)。$$

式中 $\dot{\varepsilon}_{ss}$ 为稳态蠕变应变率; A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 均为材料常数; $\exp(-Q/RT)$ 为温度函数。杨春和等^[10,23-24]通过对单轴、三轴岩盐应力路径的应力松弛与蠕变试验结果分析,试验样品选取江苏金坛矿区,主要为氯化物型岩盐,研究了应力状态及加载路径对岩盐时间相关性特征的影响。结果表明,岩盐稳态蠕变率仅是应力状态的函数而与加载历史无关,初始蠕变极限可表示成稳态蠕变率的线性函数。盐岩蠕变可表示为 $\varepsilon_c = \varepsilon_1 + \varepsilon_{ss} + \varepsilon_D$ 。式中 ε_c 为总蠕变; ε_1 为瞬间蠕变; ε_{ss} 为稳态蠕变; ε_D 为在加速蠕变段因蠕变损伤而引起的附加蠕变。稳态蠕变率仅是蠕变应力的函数 $E_1 = C(\sigma_1 - \sigma_3)^n$, 与其加载路径无关。式中 E_1 为稳态蠕变率; σ_1 和 σ_3 为偏斜应力; C 和 n 为材料常数。陈锋等^[24]对某盐矿岩盐进行了三轴试验得出,岩盐蠕变本构模型引入损伤变量,在损伤等效应力中考虑偏应力和围压函数的影响,建立了一种能反映岩盐蠕变和加速蠕变的本构模型,即 $\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_d$ 。式中 ε_s 为稳态蠕变分量; ε_d 为损伤引起的蠕变分量。当损伤或蠕变发展到一定阶段,蠕变进入加速阶段。

刘江等^[25]选取江苏金坛矿区,为氯化物型岩盐,通过不同应力状态下的蠕变试验,获取了蠕变曲线和蠕变特征参数,用粘弹塑性理论建立了岩盐蠕变本构模型。通过大量蠕变试验表明,稳态蠕变率与偏应力和温度呈非线性函数关系。根据岩盐的蠕变特征,稳态蠕变阶段的蠕变应变率可采用如下表达式 $\dot{\varepsilon}_s = f(\sigma_1 - \sigma_3)f(T)$ 。式中 $\dot{\varepsilon}_s$ 为岩盐稳态蠕变应变率; $f(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为偏应力影响函数; $f(T)$ 为温度影

响函数。岩盐蠕变对应力状态和温度有较大响应,蠕变应变随温度和偏应力增加而增加。陈卫忠等^[26]建立了岩盐三维蠕变损伤本构方程和损伤演化方程 $D = 1 - e^{-me^c}$ 。式中 m 为材料常数; e^c 为蠕变应变。试验样品选取江苏金坛矿区,主要为氯化物型岩盐,利用岩盐三维蠕变损伤本构原理对金坛储气库在注采过程中的蠕变的损伤演化影响范围进行研究。韦立德等^[27]在研究岩盐蠕变损伤特征的基础上,利用对应性原理建立了基于细观力学的岩盐蠕变损伤本构模型。

对岩盐蠕变性能的研究,主要反映在通过不同应力、温度、围压、选材、岩盐性质等因素条件下蠕变应变的变化,蠕变的变化经历3个变化过程,初始蠕变,稳态蠕变,最终进入加速蠕变;通过对蠕变变化过程的分析,建立了相应的蠕变损伤本构关系。

4 温度效应对岩盐力学特性影响的试验研究

作为能源储存库的岩盐物理力学性质在国内外已有较深入的研究,但是有关在一定温度作用下岩盐的物理力学特性的研究相对较少。国内吴文^[11]等采用样品为氯化物型岩盐,对岩盐在不同温度的力学性能进行了试验研究。试验结果表明,温度能使岩盐的强度降低,温度取值范围即 25~50℃,温度增加2倍时,岩盐的峰值应力 σ_1 平均减少 14 MPa,反映了温度对岩盐的强度具有显著性的影响。陈剑文等^[28]关于温度和应力试验的研究,选取江苏金坛矿区氯化物型岩盐,围压为 5 MPa、15 MPa、25 MPa,温度则为 25℃、50℃、100℃三级分别进行温度与应力试验,采用正交试验方法,分析了岩盐应力—应变曲线、峰值应力、峰值应变、弹性模量等的变化特征。温度对岩盐的物理力学特性影响较大,随着温度的升高,岩盐的力学性能变化明显,峰值应力和弹性模量降低,峰值应变增加。杨春和等^[22]研究了在地下 1 000 m 左右深处储存一定量的核废料的情况下,由于核废料的放射性所产生的热量,可使核废料处置库周围的岩盐的温度达到 165℃左右。

Wallner^[6]为保证核废料岩盐地下储库的稳定及安全性,研究了高温条件下岩盐晶体结构及其力学特性。研究表明,随着温度的升高,岩盐在高温作用下其峰值应力随温度的升高而降低,岩盐的力学性能变化显著,这说明了温度和荷载因素对岩盐物理力学性能有显著的影响。高小平等^[29]试验样品选取江苏金坛矿区氯化物型岩盐,通过对岩盐的研究认为温度对岩盐的力学性质有明显的影响。岩盐的弹性模量随温度的升高而逐渐减少,在围压为 5 MPa 下弹性模量由 25 °C 时的 14.21 GPa 降低到 100 °C 时的 9.15 GPa,试验中试样平均弹性模量与常温相比降低约 40%,随着温度的增加,岩盐的塑性变形特征明显。

梁卫国等^[2]选取江苏洪泽无水芒硝岩盐,硫化物型,采用了超声波测试、单轴压缩试验、不同角度下的楔形剪切试验以及直剪试验对无水芒硝岩盐进行了不同温度下的试验,温度取值范围为 20 ~ 240 °C,得到了以下结论。1) 超声波速与温度的关系为 $v = 3.38e^{-0.0032T}$ 。式中 v 为超声波速; T 为温度,岩盐试件的超声波速随温度的降低而降低。2) 随着温度的增加,岩盐的单轴抗压强度及轴向应变均在增大,且岩盐单轴抗压强度增长的幅度呈逐渐减小的趋势。岩盐试件在单轴压缩作用下,随温度增高,岩盐单轴抗压强度增大的同时,相应的轴向应变亦增大,岩盐的塑性变形特征愈趋明显。由回归分析得出岩盐单轴抗压强度与温度之间呈对数关系,即 $\sigma_c = 4.54 \ln(T) - 3.04$ 。式中, σ_c 为单轴抗压强度 (MPa); T 为温度参数。3) 岩盐的粘聚力和内摩擦角均增大,尤其是内摩擦角增幅明显,并得到在 20 °C、60 °C、120 °C 时抗压强度关系分别为: $\tau = 6.11 + \sigma \tan 22.5^\circ$; $\tau = 7.06 + \sigma \tan 27.6^\circ$; $\tau = 7.09 + \sigma \tan 33.9^\circ$ 。4) 岩盐的剪切强度增强,剪切峰值强度与温度呈线性关系,即 $\tau_{\text{peak}} = 0.0097T + 6.9609$ 。式中 τ_{peak} 为剪切峰值强度, T 为温度。

陈剑文等^[30]选取了湖北应城钙芒硝粗粒岩盐,硫化物型,利用超声波技术对岩盐进行了升温过程中(温度范围 20 ~ 270 °C)的动力学测试,分析并得出随着温度的升高,岩盐的超声波速、动弹性模量和泊松比都呈不同程度降

低,且具有一定规律性。1) 岩盐的波速随温度的升高而降低,岩盐种类不同,降低幅度亦不同,岩盐纵波、横波波速均随温度的升高而逐渐降低。2) 动弹性参数随温度变化,动态杨氏模量随温度升高而降低显著,降幅较大。3) 动态泊松比随温度变化,岩盐的动态泊松比随温度的变化不显著,在 130 ~ 170 °C 范围内比较快,变化范围较缓慢。高小平等^[31]试验样品选取氯化物型岩盐,对温度作用下岩盐的时效特性做了研究,对温度为 25 °C 和 50 °C 后的岩盐蠕变特性进行了试验,讨论了应力和温度对岩盐蠕变特性的影响,岩盐在围压为 10 MPa、轴压为 15 MPa,温度为 25 °C、50 °C、100 °C 时在偏应力一定的条件下,随着温度的升高,稳态蠕变率增加,温度为 100 °C 的稳态蠕变率为温度 25 °C 时的 13 倍,相应地随着温度的升高,初始蠕变极限值也增加,且岩盐损伤程度更加明显。

温度对岩盐的影响,主要是对岩盐物理力学的影响,即表现在蠕变特性、岩盐纵波及横波波速、岩盐的单轴抗压强度及轴向应变、塑性变形、峰值应力、弹性模量和峰值应变等,岩盐种类不同,变化幅度亦不同。总之,温度对岩盐的强度及其变化具有显著性的影响,即随温度升高,岩盐的力学性能变化明显,主要表现在峰值应力和弹性模量降低,峰值应变增加。

5 岩盐围压影响效应

岩盐矿物形式的地质环境中,由于岩盐受三向应力作用,特别是在深部环境下,高围压对岩盐力学特性有显著的影响。同一维应力相比,围压的主要作用表现在以下几方面。1) 限制了岩盐中裂纹的扩展,提高了岩盐的强度。强度随围压的增长而呈非线性变化,脆性岩盐线性相对较强,塑性岩盐线性相对较弱。在室温条件下,有些学者认为围压只是引起应力-应变曲线斜率某种程度的变化,且围压的影响不及温度的影响显著(特别是在高温下)。2) 岩盐由脆性向塑性的转化条件。桑祖南、邱贤德等对围压试验研究表明,岩盐在脆性与塑性转化中,围压对岩盐强度影响显著,而在塑性变形中影响较小,围压的作用主要体现在体积

变形上。岩盐脆性转化中主要影响因素是温度,其次是围压,而失稳则同时取决于围压和温度。在高温条件下围压对岩盐力学性能影响不及温度,但在低温情况下围压对其影响相对较大。岩盐的试验亦表明即使在单轴试验下也具有韧性破坏的特征^[32-33]。

Gilbert^[34]对岩盐进行了三轴试验研究,岩盐的应力—应变曲线具有阶段性,即随着围压增大,岩盐的弹性模量增大;线弹性变形阶段,岩盐的抗压强度随围压近似呈线性增大。在等围压三轴压缩状态下,岩盐表现出明显的塑性流动,当岩盐试样达到峰值应力后,岩盐不同于其他脆性岩石呈现崩裂现象,而是仍然具有相对较大承载能力,试样并未出现明显的破裂面,而是出现膨胀破坏,也即其破坏不再是纯剪切破坏。Hofer^[35]对岩盐进行了三轴试验研究,在应变软化时随着裂纹的扩展伴随有强烈的扩容变形。随着围压的增高,扩容变形逐渐减小,岩盐表现为从脆性向延性转化。根据三轴试验,当围压低于某值时,围压对岩盐稳态蠕变率的影响相对较大,即随围压增大而减小,超过该值,围压效应减弱。Goodman^[36]进行了岩盐脆性—延性试验研究,岩盐的脆性—延性围压为0 MPa,即从理论上讲,只要有围压的存在,岩盐就会发生应变硬化。围压大于3 MPa的试验中,岩盐在正常三轴压缩试验过程中均不出现峰值,即不发生明显的破坏现象。当岩盐中含有明显的泥质夹层,而泥质夹层的破坏会导致岩盐试样应变曲线出现峰值拐点。

国内学者关于围压作用下岩盐的力学性质研究相对较多。刘新荣等^[37]对四川自贡长山盐矿岩盐采用等围压三轴试验的方法,提出了岩盐的等围压三轴抗压强度 σ_1 计算方法,即 $\sigma_1 = P/A$ 。式中, P 为试件的破坏荷载(MPa); A 为试件横截面积(mm^2)。试验结果表明,随着围压的增大,即分别取值为4 MPa、12 MPa、16 MPa、20 MPa、24 MPa时,岩盐的弹性模量呈增大趋势,即表现为从 0.103×10^4 MPa增大到 0.132×10^4 MPa。岩盐的三轴抗压强度和岩盐破坏时最大主应力与最小主应力之间均随围压近似呈线性增大,等围压三轴压缩状态下,岩盐表现出明显的塑性流动特征,最后

则发生横向张裂破坏。纪文栋等^[38]选用湖北应城岩盐样品,NaCl含量占80%,通过对岩盐进行不同围压下应变加载速率的三轴压缩与变形特性的室内试验,对围压为5 MPa、10 MPa、15 MPa、20 MPa的不同围压下变加载速率的试验表明,高围压下强度随加载速率提高呈增大趋势显著。围压对于应变加载速率变化具有重要影响作用,且围压是加载速率起作用的重要因素,当围压不存在时,岩盐强度、变形、破坏方式等均基本不受加载速率影响;当围压存在时,加载速率对岩盐性质的影响受围压大小的影响相对较为显著。

围压影响岩盐开采,随着围压增大,岩盐的弹性模量增大,当围压为0~3.5 MPa时,岩盐具有应变软化特征,当围压大于3.5 MPa时,岩盐表现为应变硬化特征。围压、温度以及蠕变性能等同时影响着岩盐的力学性能,从而造成岩盐在开采过程中的困难程度。岩盐的种类繁多,围压对岩盐的影响主要体现为氯化物型的岩盐,而对于不同岩盐在相同的围压下对岩盐的影响需要做深入系统的研究。

6 岩盐及其工程应用稳定性

岩盐的工程应用主要表现在岩盐储存工业,在岩盐储存库稳定性研究中,涉及诸多力学问题如岩盐的强度、蠕变特性、围压效应等,岩盐储存的稳定性主要是岩盐溶腔的不可见性和溶腔发展的难以控制性。Staudtmeister等^[39]长期致力于岩盐蠕变特性研究,并用数值方法等分析了岩盐地下溶腔储室的安全性。Lemieux^[40]利用粘弹性—粘塑性模型来研究岩盐溶腔,即在核废料的地下处置中,热—水—力耦合研究得到了广泛的应用和认可。Davidson等^[41]对于利用岩盐溶腔处置固体有毒及放射性物质的安全可靠性做了广泛研究。主要在地下溶腔储室的建造过程中,岩盐的溶腔处置固体有毒及放射性物质的安全性方面得到了认可,并且已经广泛应用到了诸多工程中。Alheid等^[42]采用地震波方法监测溶腔的破坏范围,确保溶腔的安全稳定。国内外学者从岩盐物理力学特性、溶腔设计、溶腔建设、储室营运监测等

方面,做了较为深入研究,且成功地建造了许多大型地下储室,取得了很好的经济和社会效益。

国内学者对我国岩盐矿床地下能源储库稳定性也进行了系统深入研究,邱贤德等^[43]对长山岩盐和乔后岩盐进行了蠕变试验以及岩盐的流变和微观结构进行了研究,结果认为两种岩盐蠕变过程中存在较大差异,主要是因为乔后盐矿中 NaCl 含量低,晶粒尺寸小,钙泥质胶结。余海龙等^[44]通过实验室相似模拟材料试验,采用以砂为骨料,石灰石膏为胶结物的石膏混合料作为相似材料,研究了岩盐溶腔的稳定性,进行了 594 m、650 m、700 m、780 m 和 860 m 5 个不同采深岩盐溶腔稳定性相似模拟试验研究,探讨了岩盐水溶开采过程中的溶腔围岩移动、破坏和应力重新分布特征,随着采深的增加,极限跨度从 180 m 降低至 96 m,溶腔上覆岩层下沉量从 0.2 m 增加到 1 m,下沉速度从 6 mm/d 增加到 15 mm/d。卤井生产服务时间从 600 d 降低到 320 d,试验周期短,成为研究岩盐溶腔稳定性的一种可行办法。梁卫国等^[45-46]在理论分析基础上,建立了岩盐水溶开采的数学模型,并对溶腔变形进行了数值模拟。吴文等^[47]在理论和数值模拟的基础上提出了岩盐矿床地下储库稳定性评价标准,主要涉及到以下方面: 1) 储存库的稳定性; 2) 储存库的密封性; 3) 储存库的可适用性。杨春和等^[48]选定我国江苏金坛盐矿氯化物型岩盐,通过深部岩盐的力学及蠕变试验,研究了深部岩盐的变形规律,建立了深部岩盐溶腔的腔体变形三维计算模型。结合示范工程的具体地质条件,对深部地下岩盐溶腔的洞形、稳定性及长期稳定性进行了数值模拟,研究了不同压力下溶腔容积的变化规律。通过现场储气库压腔试验,验证了计算分析采用的参数合理性。研究表明,从地下工程稳定性方面来看,利用我国岩盐实施能源储备是可行的。姜德义^[49]采用三维有限元法分析了地应力场对溶腔稳定性影响,用相似材料模拟试验研究了溶腔失稳的发生发展过程,采用 FLAC-3D 软件分析了溶腔的大变形问题,将突变理论应用于溶腔稳定性分析。任松等^[50]借鉴巷采沉陷预测的经验和方法,建立岩盐水溶开采沉陷分层传递三维预测模型,并开发模

型数值计算软件,用于岩盐水溶开采沉陷预测。

7 结语及展望

岩盐作为一种特殊类型的岩石,具有良好的蠕变性、低渗透性及损伤自我恢复的特性,不仅可以被开采利用,亦可用于储存能源和处置核废料,故研究岩盐的相关物理力学性质具有重要的理论意义和实际价值。我国拥有丰富的岩盐资源,具有良好的建设地下能源储存或高放射核废料处置库的地质条件,有助于进一步开展岩盐物理力学等相关性质的深入研究。我国盐矿岩盐层具有分层多、单层厚度薄、岩盐地层中非溶性夹层多等特点,故在利用岩盐储存地下能源方面面临着更加复杂的技术难题。综合国内外岩盐相关物理力学性质的研究成果,未来关于岩盐有关物理力学性质与工程应用评价等方面的发展趋势如下。

1) 运用单轴和三轴强度试验,开展研究岩盐不同性质、不同含量、不同分布条件下,岩盐物理力学强度及蠕变特性影响及其变化规律,目的是为了进一步研究岩盐不同地质环境和地貌条件下岩盐及其相应特征。

2) 针对岩盐储气等工程的实际需要,开展周期性动力荷载作用下的岩盐储气时岩盐蠕变损伤本构关系,以及岩盐储气等工程在强动力荷载或者地震荷载作用下的稳定性评估及灾害性评价,确保岩盐地下储存能源及核废料的长期稳定性和安全性。

3) 在开采过程中,开展岩盐的渗透性与损伤特性的力学研究,主要为废弃物在岩盐中的迁移及其物理力学性质研究提供理论基础;此外,采用检测孔隙结构、孔隙率、毛细孔压力、应力状态等条件,来进一步探讨渗透性特征及其强弱变化程度;通过单轴和三轴压力试验方法来检测和分析岩盐的损伤特性,在后期的工程运行中,定期检测有利于工程的稳定运行。

4) 开展对不同温度场条件下,岩盐内部晶体结构变化及其对岩盐强度影响的进一步研究,岩盐自身物理力学性质的变化对其内部结构影响机理方面也有待于做进一步深入探讨。

参考文献:

- [1] 高小平. 盐岩力学特性时效效应试验研究及基本本构方程[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005: 1-4.
- [2] 梁卫国, 赵阳升, 徐素国. 240℃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): 2365-2369.
- [3] 王安明, 杨春和, 黄诚, 等. 层状盐岩力学和变形特性数值试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2173-2178.
- [4] Hansen F D, Mellegard K D, Senseny P E. Elasticity and strength of ten natural rock salt [M]. Clausthal: Tans. Tech. Publications, 1984: 71-83.
- [5] Hunsche U, Albrecht H. Results of true triaxial strength tests on rock salt [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35(4-5): 867-877.
- [6] Wallner M. Analysis of thermo-mechanical problems related to the storage of heat producing radioactive waste in rock salt [M]. Germany: Trans Tech Publications, 1984: 739-763.
- [7] Kerry L D, Kirby D M, Gary D C. Salt damage criterion proof of concept research, Final Report [R]. 2002(11).
- [8] Michael S B. Geomechanical analysis and design considerations for thin bedded salt caverns, Final Report [R] June 15th 2005.
- [9] Hunsche U. Fracture experiments on cubic rock salt samples [M]. Clausthal: Tans Tech Publications, 1984: 169-179.
- [10] 杨春和, 高小平, 吴文. 盐岩时效特性试验研究与理论分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(6): 764-766.
- [11] 吴文. 盐岩的静、动力学特性试验研究与理论分析 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002.
- [12] 吴文, 侯正猛, 杨春和. 盐岩的渗透特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 746-749.
- [13] 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): 1386-1390.
- [14] 周时光, 阳友奎, 季晓东. 岩盐力学特性的刚性试验研究[J]. 西南工学院学报, 1994, 9(2): 42-46.
- [15] Berest P, Minh D N. Deep underground storage cavities in rock salt [M]. Clausthal: Trans Tech publications, 1984: 555-572.
- [16] Hample A, Hunsche U, Weidinger P, et al. Description of the creep rock salt with the composite model-II steady state creep [M]. Clausthal: Trans Tech publications, 1998: 287-299.
- [17] Hunsche U. Uniaxial and triaxial creep and failure test on rock: experiment technique and interpretation [M]. Verlag: Springer: 1994.
- [18] Munson D. Constitutive modeling of salt behavior state of the technology [A]. In: Wittke W ed. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993(3): 127-134.
- [19] Yang C H, Daemen J K, Yin J H. Experimental investigation of creep behavior of salt rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 36(2): 336-341.
- [20] Yang C H, Bai S. Analysis of stress relaxations behavior of rock salt [C]//Proceedings of the 37th U. S. New York: John Willey&Sons, 1999: 935-938.
- [21] Yang C H, Daemen K, Yin J H, et al. Experimental investigation of creep behavior of salt rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(2): 233-242.
- [22] 杨春和, 白世伟, 吴益民. 应力水平及加载路径对盐岩时效特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(13): 270-275.
- [23] 杨春和, 曾义军, 吴文, 等. 深层盐岩本构关系及其在石油钻井工程中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1678-1682.
- [24] 陈锋, 杨春和, 白世伟. 盐岩储气库蠕变损伤分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 945-95.
- [25] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩蠕变特性和本构关系研究[J]. 2006, 27(8): 1267-1271.
- [26] 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.
- [27] 韦立德, 杨春和, 徐卫亚. 基于细观力学的盐岩蠕变损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4253-4258.
- [28] 陈剑文, 杨春和, 高小平, 等. 盐岩温度与应力耦合损伤研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1986-1990.
- [29] 高小平, 杨春和, 吴文, 等. 温度效应对盐岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1775-1778.
- [30] 陈剑文, 杨春和, 冒海军. 升温过程中盐岩动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 231-236.
- [31] 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): 2054-2059.
- [32] 桑祖南, 周永胜, 何昌荣, 等. 辉长岩脆-塑性转化及其影响因素的高温高压试验研究[J]. 地质力学学报, 2001, 7(2): 131-139.
- [33] 邱贤德, 庄乾城. 岩流变特性的研究[J]. 重庆大学学报, 1995, 18(4): 96-103.
- [34] Farmer I W, Gilbert M J. Dependent strength reduction of rock salt [M]. Clausthal: trans tech publications, 1984: 4-18.
- [35] Hofer K H, Thoma K. Tri-axial tests of rook salt [J]. Rock Mechanics and Mining Sciences, 1968: 195-203.
- [36] Goodman R E. Introduction to rock mechanics [M]. Chi-

- chester: John Wiley, 1989: 562.
- [37] 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, 23(23): 153-165.
- [38] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(30): 2507-2513.
- [39] Staudtmeister K, Rokahr R B. Rock mechanical design of storage caverns for natural gas in rock salt mass [J]. Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997, 34(34): 3-4.
- [40] Lemieux B, Davidson M B. Dusseault mechanical behavior of waste blends for salt cavern disposal [J]. Rock Mechanics and Mining Sciences. 1998, 35(35): 4-5.
- [41] Davidson B, Dusseault M, Lemieux B. An examination of the research, development, design, and implementation issues related to solution cavern disposal of toxic industrial wastes [A]. 1997: 197-198.
- [42] Alheid H J, Knecht M. Investigation of the operation period development of damaged zones around underground openings in rock salt [J]. Rock Mechanics and Mining Sciences. 1998, 35(35): 4-5.
- [43] 邱贤德, 姜永东, 阎宗岭, 等. 岩盐的蠕变损伤破坏分析 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(5): 106-109.
- [44] 余海龙, 谭学术, 鲜学福, 等. 岩盐溶腔稳定性模拟试验研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1995: 156-159.
- [45] 梁卫国, 赵阳升. 岩盐水压致裂连通溶解的数学模型 [J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(4): 361-363.
- [46] 梁卫国, 徐素国, 李志萍, 等. 盐矿水溶开采固-液-热-传质耦合数学模型与数值模拟 [J]. 自然科学进展, 2004, 14(8): 945-949.
- [47] 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): 2497-2505.
- [48] 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]. 岩盐力学与工程学报, 2005, 24(24): 4409-4417.
- [49] 姜德义. 岩盐溶腔稳定性及失稳控制研究 [D]. 博士学位论文, 重庆大学, 2001.
- [50] 任松, 姜德义, 杨春和, 等. 岩盐水溶开采沉降新概率积分三维预测模型研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 133-138.

Physical and Mechanical Properties of Rock Salt and Its Application in Promoting Engineering Stability

YU Dong-mei¹, HU Xiao-tian¹, FU Jiang-tao¹, LI Guang-ying¹, HU Xia-song^{1,2}

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China;

2. Qinghai University, Xining, 810016, China)

Abstract: Based on the study trend of the analysis of the physical and mechanical properties of rock salt and its stability at home and abroad, this paper, respectively from the physical and mechanical properties of rock salt, the low porosity, the permeability, plastic deformation capacity and injury recovery, etc. Analyzes the physical and mechanical properties of rock salt appearing in practical application, such as short-term strength, creep property, the mechanical characteristics under confining pressure, and the temperature effect on mechanical properties of rock salt. Finally, the application and research perspective of rock salt in practical engineering were pointed out.

Key words: Rock salt; Physical and mechanical properties; Stability;