

岩盐储库建腔期难溶夹层的软化规律研究

姜德义¹, 张军伟¹, 陈 结¹, 任 松¹, 杨春和^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所
岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要:为揭示盐岩水溶造腔过程中难溶夹层力学特性与卤水浸泡时间的关系,更好地了解夹层的软化规律和范围,为预测和控制夹层的破坏垮塌提供理论支持,以云应盐矿中的泥质硬石膏夹层为研究对象,进行不同浸泡时间下的单轴压缩和巴西劈裂软化试验研究,发现其力学强度随卤水浸泡时间劣化明显,其中,单轴抗压强度、弹性模量、泊松比与卤水浸泡时间呈显著的 DoseResp 函数关系,抗拉强度与浸泡时间呈显著的 Slogistic1 函数关系,且试件的单轴压缩及巴西劈裂试验的破坏形式随浸泡时间的增加有从张拉破坏向剪切破坏的渐变趋势。通过分析试验结果发现,卤水对夹层力学强度的软化作用与夹层可溶物含量、夹层成分遇水膨胀的不均性、卤水的润滑作用和矿物晶键的软化作用均存在密切相关。推导了基于浸泡时间的夹层损伤演化方程,建立夹层轴向和径向的软化深度模型,并将其应用于水溶造腔过程中难溶夹层软化范围的划定。此外,基于夹层抗拉强度与卤水浸泡时间的关系,给出判定和预测夹层局部软化破坏的最大拉应力强度准则。

关键词:岩石力学;浸泡时间;夹层;损伤演化方程;软化深度模型;强度准则

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2014)05-0865-09

DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.05.001

RESEARCH ON SOFTENING LAW OF INSOLUBLE INTERLAYER DURING SALT CAVERN BUILDING

JIANG Deyi¹, ZHANG Junwei¹, CHEN Jie¹, REN Song¹, YANG Chunhe^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The uniaxial compression and Brazilian splitting tests on the argillaceous anhydrite from the interlayers of the mine at Yunying were conducted with the different time lengths of immersion in order to reveal the mechanical characteristics (such as the softening) of the insoluble interlayer upon brine immersion and to provide the theoretical guide for the prediction and control of the interlayer destruction during the process of the cavity building inside the rock salt. It was found that the mechanical strengths of interlayer deteriorated significantly with the increasing of the time length of brine immersion. The relationships of the uniaxial compressive strength, the elastic modulus and Poisson's ratio with the time lengths of brine immersion were fit well with DoseResp function. While the relationship between the tensile strength and the time length of brine immersion was fit with Slogistic1 function. The failure modes of the specimens in the uniaxial compression and Brazilian split tests were gradually changed from the tension failure to the shear failure as the time length of immersion was increased. It was found from the results of the test that the softening effect of brine was closely related with the soluble content of interlayer, the heterogeneity of hydraulic swelling of the interlayer ingredients, the lubrication of brine and the softening effect on the crystal bonding of minerals. An equation of the damage evolution with the time of immersion for interlayers was derived according to the experimental data and a model for softened depth of

收稿日期: 2013-07-02; **修回日期:** 2013-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51304256); 中国博士后科学基金资助项目(2013M540620); 博士点基金-优先发展领域资助项目(20130191130003)

作者简介: 姜德义(1962-), 男, 1982年毕业于重庆大学矿山工程物理专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事矿业工程和安全工程方面的教学与研究。E-mail: deyj@cqu.edu.cn

interlayer in the axial and radial directions was established. The model was applied to determine the softened range of the insoluble interlayer during the process of cavity building in rock salt. In addition, a criterion of maximum tensile stress was presented for the determination and prediction of the local softening damage of interlayers based on the relationship between the tensile strengths and the time lengths of brine immersion.

Key words : rock mechanics ; immersion length of time ; interlayer ; evolution equation of damage ; softening depth model ; strength criteria

1 引言

盐岩体具有孔隙率低、渗透性小、损伤自恢复能力强等优点，加上水文地质条件简单、分布广等优良特性，被国际上公认为是石油、天然气储备和高放射性废物处置的理想场所^[1-2]。目前建造盐岩储库普遍采用单井油垫对流法水溶开采^[3]。我国盐岩层的基本特点是夹层多，单层厚度薄，盐岩体中一般含有如泥岩、石膏、钙芒硝等众多夹层^[3-4]。这些夹层在水溶造腔过程中将改变腔体中卤水流速场和浓度场的分布，给腔体形状控制和造腔速度的提高带来了难度^[5]。而且，建腔过程中夹层的突然垮塌可能造成井下套管的损坏，甚至影响腔体的稳定性。

由于夹层所处的特殊水溶环境，当夹层上、下盐层溶解后，夹层将处于卤水浸泡中，长时间的卤水浸泡会软化夹层的力学强度，甚至造成夹层的破坏垮塌。因此，掌握卤水浸泡时间对难溶夹层力学强度的软化程度和软化范围，进而预测和预防盐岩储库建腔期难溶夹层的破坏垮塌有着十分重要的意义。

目前，国内外关于水-岩相互作用的机制研究很多。在微观机制方面，T. Heggheim 等^[6]研究了海水、乙醇及不同浓度盐水浸泡对灰岩的力学性质与微观结构变化的影响，初步提出了相应的理论模型；刘长武等^[7-8]从泥岩的微观结构及物质组成等方面进行研究，阐述了泥岩遇水的崩解软化机制；乔丽萍等^[9]与杨春和等^[10]分别从微细观及微观层次，对砂岩及板岩的水-物理-化学损伤机制及规律进行了研究。在宏观机制方面，P. S. B. Colback 等^[11-14]对含水岩石的强度及水对岩石具有时间效应的变形特性进行了试验研究；周翠英等^[15]研究了软岩在纯水浸泡下的力学性质软化情况，得出其抗压强度、抗拉强度和抗剪强度随着饱水时间的延长而不断降低，并服从指数变化规律。然而，针对盐岩储库建腔期难溶夹层的力学软化和垮塌机制的研究很少。梁卫国等^[16-17]研究了高温盐溶液浸泡作用下石膏岩

力学特性，发现了高温盐溶液浸泡下石膏夹层的强度软化趋势；施锡林等^[18-19]研究了不同浓度卤水浸泡对各类含盐率泥质夹层试样抗拉强度弱化的影响规律，并对其垮塌的力学机制进行了分析。但是，从工程实用角度看，这些试验研究没有针对时间因素对难溶夹层的软化损伤过程做深入的分析、研究，也没有将其应用到预测盐穴夹层的软化范围上。

本文旨在获得盐岩储库建腔期难溶夹层力学特性的弱化规律和特点，揭示难溶夹层的损伤演化机制，进而建立基于卤水浸泡时间的软化深度模型，并探讨其在盐穴建腔期难溶夹层软化范围划定上的应用。研究结果对进一步认识盐岩储库建腔期难溶夹层的软化规律具有参考意义，对预测难溶夹层的破坏垮塌范围和时间具有重要的现实指导意义。

2 软化试验

2.1 试样和卤水溶液制备

试验所用试件选用云应盐矿埋深 722 ~ 750 m 的天然灰色泥质硬石膏岩，其化学成分见表 1。由于钻孔所取岩芯数量有限，为了保证试验中试样的数量要求，在不影响试验效果的基础上只能将试样尺寸适当做小。为了减少试件制作过程中试件损坏，按照工程岩体试验方法标准^[20]中关于测量岩石单轴抗压强度和抗拉强度的规定，将岩芯手工切割打磨成标准试件，其中，高 60 mm、直径 30 mm 的标准试件用于单轴抗压试验，直径 50 mm、厚度 25 mm 的圆柱形试件用于巴西劈裂试验。试件误差在±0.2 mm 内。部分打磨成形的试件见图 1。

表 1 泥质硬石膏岩化学成分含量分析结果

Table 1 Chemical composition analysis results of argillaceous anhydrite interlayer %

NaCl	Na ₂ SO ₄	CaSO ₄	水不溶物
2.88	0.17	19.88	74.41

注：水不溶物包括黏土矿物、石英以及其他硅酸盐矿物。

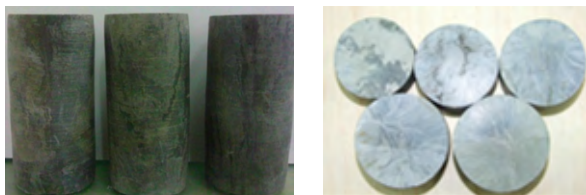


图 1 试验试件
Fig.1 Test specimens

试验所用卤水采用 NaCl 含量大于 99.5% 的化学分析用盐配制，配制的卤水浓度为 0.15 g/mL，与水溶造腔过程中的卤水浓度度相比属于中浓度卤水。

2.2 试验过程

试件和卤水制备好以后，将试件按照浸泡时间分为 6 组，每组 3 个试件，试验方案见表 2。对于需要浸泡的试件，在浸泡前先用配置好的浸泡溶液润湿后擦干，称其质量 M_1 。然后将试件放入盛满卤水的玻璃杯内(见图 2)，加盖密封以防止水分蒸发而改变卤水浓度。将所有试件在室温条件(25 ~ 30) 下做浸泡软化处理。到达预定的浸泡时间后，取出试件，擦干后再称其质量 M_2 。经过浸泡后的试件表面局部有不同程度的溶蚀现象，在力学试验前，需要将试件重新打磨平整，并测量其尺寸。然后在 MTS815 岩石力学试验机上进行单轴压缩试验和巴西劈裂试验，单轴压缩试验加载速率为 0.5 mm/min，巴西劈裂试验加载速率为 0.05 mm/min。

表 2 浸泡软化试验方案
Table 2 Immersion test programs

试验编号	浸泡时间/d
A	0
B	4
C	8
D	12
E	16
F	20

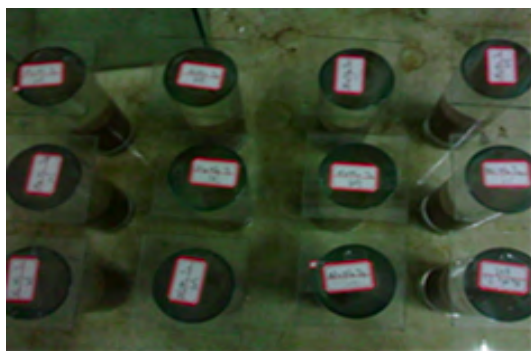


图 2 浸泡试件
Fig.2 Soaked specimens

3 试验结果分析

3.1 质量变化的分析

通过测量浸泡前、后试件的质量，得到试件的质量变化平均值，如表 3 和图 3 所示。从图 3 可见，随着浸泡时间的增加，试件损失的质量越多，速率也随之增加。这主要是试件内少量的 NaCl, Na_2SO_4 等可溶物及泥质胶结物随浸泡时间的增加而不断溶解的结果。一方面，当试件表面有团状可溶物时，由于浸泡卤水浓度未达到饱和，这些可溶物与卤水接触后发生溶解，使得试件表面出现“小溶穴”(见图 4)。另一方面，随着浸泡时间增加，试件原有的微小节理、裂隙会扩张，同时，试件中含有的泥质及石膏成分因膨胀率不同，在试件内部形成不均匀应力而产生更多的微裂隙，因此，卤水会沿着这些节理和微小裂隙不断渗入夹层内部，与试件内部的可溶物和泥质胶结物接触。这些“小溶穴”和微小节理、裂隙增大了试件与卤水作用的表面积，使更多的泥质胶结物与可溶物被软化、溶解，导致试件质量的损失量和速率随着浸泡时间的增加而增大。

表 3 夹层试件浸泡前、后质量变化情况

Table 3 Quality changes of interlayer specimens before and after soaking

浸泡时间/d	浸泡前质量 M_1/g	浸泡后质量 M_2/g	减少质量 $\Delta M/g$
4	167.62	166.84	0.78
8	163.49	162.66	0.83
12	158.43	157.41	1.02
16	162.79	161.58	1.21
20	164.40	162.64	1.76

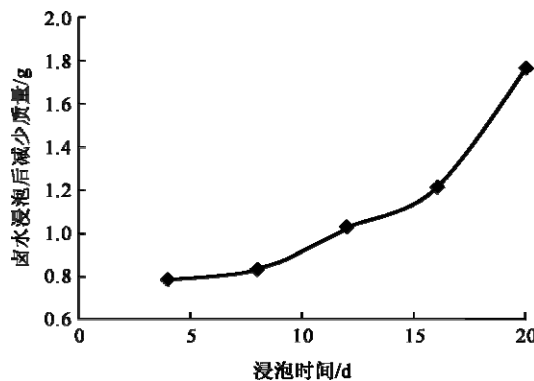


图 3 夹层试件浸泡后减少质量与浸泡时间关系曲线
Fig.3 Mass reduction-immersion time curve of interlayer specimens

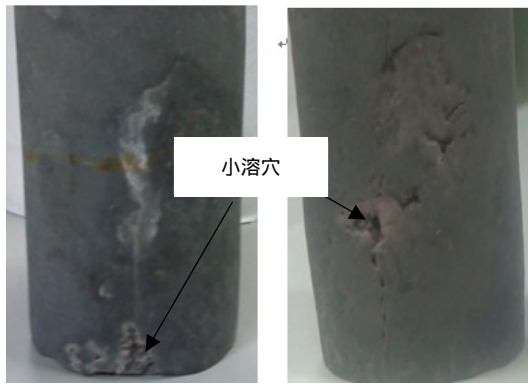


图4 可溶物溶解产生的“小溶穴”

Fig.4 “Small hole” caused by soluble content dissolved

3.2 力学参数变化分析

通过分析单轴压缩试验和巴西劈裂试验数据，得出各个试件的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比和抗拉强度。各组试件的力学参数求取平均值，结果见表4。从表4中可以看到，夹层的单轴抗压强度、弹性模量和抗拉强度随浸泡时间的增加逐渐减小，泊松比随浸泡时间的增加逐渐增大。试验数据表明，泥质硬石膏夹层的力学强度具有明显的时间效应。

表4 夹层试件力学参数软化情况

Table 4 Soften situation of interlayer specimen mechanical parameters

试验编号	浸泡时间/d	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
A	0	33.16	18.237	0.232	5.68
B	4	23.80	12.220	0.306	4.03
C	8	17.92	9.018	0.343	3.20
D	12	8.18	3.843	0.422	2.30
E	16	5.92	1.617	0.453	0.62
F	20	5.63	1.585	0.455	0.21

图5~7分别为夹层的单轴抗压强度、弹性模量和泊松比的浸泡软化曲线。通过Origin软件对试验数据进行拟合发现，试验曲线的变化趋势满足DoseResp函数，分别建立单轴抗压强度、弹性模量、泊松比与卤水浸泡时间的关系式如下：

$$\sigma = 4.08866 + \frac{36.49403}{1 + 10^{0.10999(t - 5.1824)}} \quad (1)$$

$$E = 0.10594 + \frac{26.71124}{1 + 10^{0.08651(t - 3.59515)}} \quad (2)$$

$$\mu = 0.16711 + \frac{0.30704}{1 + 10^{0.0959(5.62253 - t)}} \quad (3)$$

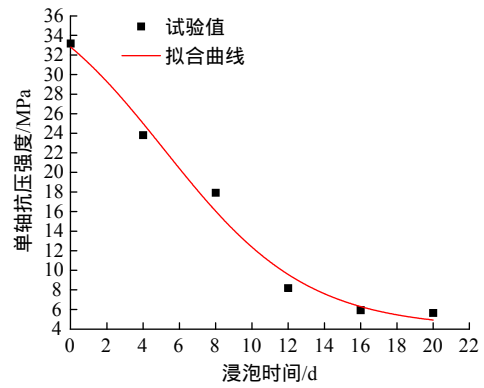


图5 夹层单轴抗压强度与浸泡时间关系曲线

Fig.5 Uniaxial compressive strength-immersion time curve of interlayer

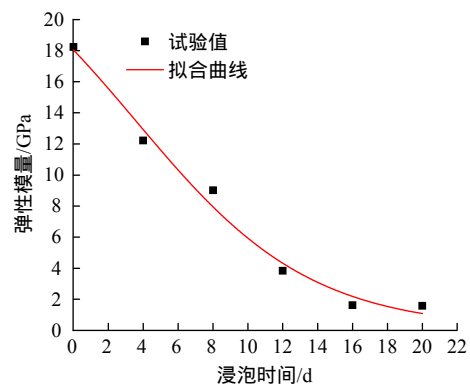


图6 弹性模量与浸泡时间的关系曲线

Fig.6 Elastic modulus-immersion time curve of interlayer

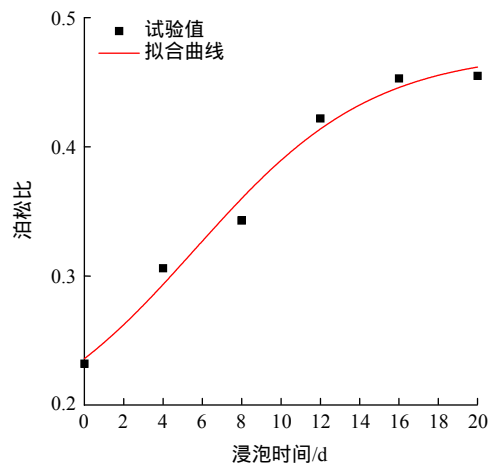


图7 泊松比与浸泡时间的关系曲线

Fig.7 Poisson's ratio-immersion time curve of interlayer

式中： σ 为泥质硬石膏夹层的单轴抗压强度(MPa)， E 为泥质硬石膏夹层的弹性模量(GPa)， μ 为泥质硬石膏夹层的泊松比， t 为浸泡时间(d)。

图8为夹层的抗拉强度与浸泡时间的关系曲线，通过Origin软件对试验数据拟合发现，试验曲线的变化趋势满足Slogistic1函数，二者的关系式如下：

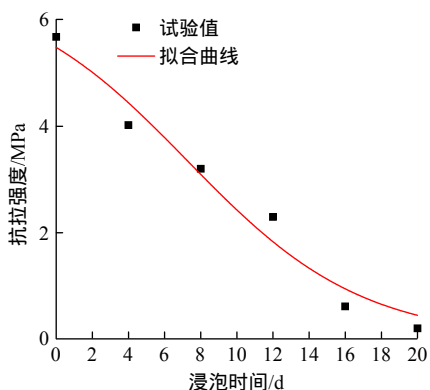


图 8 夹层抗拉强度与浸泡时间关系曲线

Fig.8 Tensile strength-immersion time curve of interlayer

$$\sigma_t = \frac{6.7074}{1 + \exp[0.20634(t - 7.25902)]} \quad (4)$$

式中： σ_t 为泥质硬石膏夹层的单轴抗压强度(MPa)。

各拟合曲线的相关参数及显著性检验结果见表 5。从表 5 中可以看出，各拟合曲线的相关系数 R^2 均大于 0.97，接近 1，且经 F 检验，P 值均小于 0.008 45，显著性强，说明拟合曲线的效果很好。

表 5 拟合相关系数及显著性检验结果

Table 5 Correlation coefficients and significance test results of curve fitting

拟合关系	R^2	F 值	P 值
$f(\sigma, t)$	0.987 8	137.877	0.007 21
$f(E, t)$	0.988 9	117.458	0.008 45
$f(\mu, t)$	0.984 6	681.645	0.001 47
$f(\sigma_t, t)$	0.971 8	104.847	0.001 68

从图 5~8 可以看出，在浸泡时间为 4~8 d 时泥质硬石膏夹层的力学参数软化趋势较快，并在浸泡时间达到 16~20 d 后趋于平缓。由节 3.1 可知，夹层试件浸水后，首先是其表面的少量可溶矿物被溶解，随后溶液沿着微裂隙、孔隙及层理面向其内部渗透。当卤水充填于微裂隙时，其对夹层的软化作用可分为以下 4 个方面：(1) 在外部应力场的作用下传递孔隙水压力，使裂隙末端受水的压胀作用而容易扩展；(2) 在夹层内部产生不均匀膨胀应力；(3) 增加润滑性，使裂隙两壁之间的摩擦力降低；(4) 弱化夹层内部矿物晶键^[21]。卤水的这些软化作用使得更多的微裂隙出现，进一步破坏了岩石的内部结构体系。随着浸泡时间的增加，夹层的饱水度不断增加，其破坏程度不断加深，表现为力学强度的快

速衰减，当浸泡时间达到某一定值后，夹层饱水度达到最大，其单轴抗压强度、弹性模量、泊松比和抗拉强度等力学参数基本稳定。

3.3 力学破坏特征分析

泥质硬石膏的单轴压缩破坏形式主要是拉伸破坏和压剪破坏。当浸泡时间较短，试件裂隙和微裂隙发育较少，层理面被软化的程度低，整体强度较高时，其抗剪强度大于抗拉强度，在轴向压力作用下，试件将在横向产生拉应力，导致拉伸破坏，如图 9(a)所示。当浸泡时间增加后，试件微裂隙增多，充水裂隙面、层理面在卤水的软化作用下，黏聚力和内摩擦角相应降低，导致试件破坏面所承受的最大剪应力下降，这样就会导致在有裂隙、层理的区域出现剪切破坏，而在无裂隙层理的区域出现拉伸破坏，如图 9(b)所示。随着浸泡时间的进一步增加，试件的饱水度达到一定程度后，其内部裂隙充分发育，裂隙、层理面强度进一步受到软化，导致试件抗剪强度小于抗拉强度而出现压剪破坏，如图 9(c)所示。

泥质硬石膏夹层巴西劈裂试验的破坏形式主要是张拉破坏，如图 9(d)和(e)所示。而随着浸泡时间的增加，夹层裂隙增加，黏聚力和内摩擦角也不断降低，使得试件抗剪强度和抗拉强度急剧劣化而出现碎裂，如图 9(f)所示。

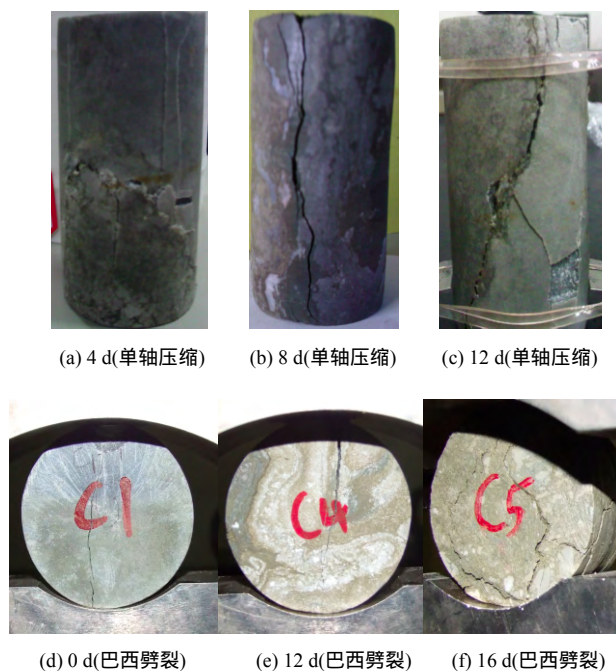


图 9 泥质硬石膏夹层不同浸泡时间下的破坏形式

Fig.9 Failure modes of argillaceous anhydrite interlayer with different soaking times

4 基于浸泡时间的损伤演化方程

由前面分析可知，当卤水浸泡时间较长时，夹层内部将出现微小孔洞和裂隙，并随着浸泡时间的增加而不断扩展，使得夹层的弹性模量降低，这说明卤水浸泡时间对夹层造成了损伤。由式(2)可知，弹性模量与浸泡时间存在着显著的函数关系，因此可选择弹性模量作为损伤变量来描述卤水浸泡时间对泥质硬石膏夹层力学强度的影响。

定义浸泡时间损伤为 $D(t)^{[22]}$ ，其表达式为

$$D(t) = 1 - \frac{E_t}{E_0} \tag{5}$$

式中： E_t 为浸泡时间为 t 时的泥质硬石膏夹层的弹性模量(GPa)； E_0 为浸泡时间为 0 时的弹性模量，为 18.237 GPa。

联立式(2)和(5)得损伤演化方程为

$$D(t) = 0.994\ 19 - 1.464\ 67 / [1 + 10^{0.086\ 51(t-3.595\ 15)}] \tag{6}$$

式(6)反映了泥质硬石膏夹层小试件在卤水浸泡作用下损伤度随浸泡时间的变化关系。对式(6)求导可得：

$$\dot{D} = \frac{dD(t)}{dt} = \frac{0.126\ 71 \times 10^{0.086\ 51(t-3.595\ 15)}}{[1 + 10^{0.086\ 51(t-3.595\ 15)}]^2} \tag{7}$$

式(7)为泥质硬石膏夹层小试件随浸泡时间的损伤率演化方程，反映了试件在浸泡过程中损伤率的变化规律。

用 Matlab 或 Excel 软件对式(6)和(7)处理后，绘制出损伤、损伤率与卤水浸泡时间的关系曲线，如图 10 所示，从图中可以直观地看出，泥质硬石膏小试件的损伤演化过程大致可以分为 3 个阶段：第一阶段为加速损伤阶段，试件的损伤度较小，但是损

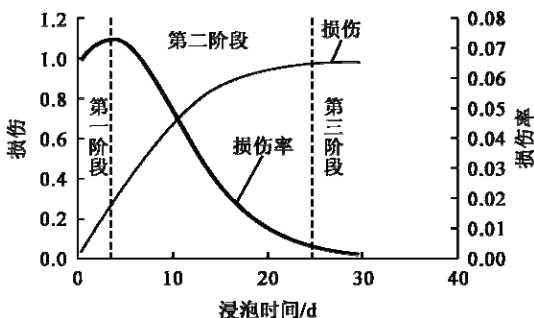


图 10 泥质硬石膏试件损伤、损伤率与卤水浸泡时间关系曲线
Fig.10 Damage and damage rate-brine immersion time curves of argillaceous anhydrite specimens

伤率较大，反映了浸泡初期，卤水对试件表面及原生裂隙面处可溶物的快速溶蚀过程；第二阶段为减速损伤阶段，此阶段损伤率逐渐降低，但损伤值不断累积增加，反映了卤水缓慢浸入试件内部，不断弱化试件结构面，导致微裂隙不断发生、扩展的过程；第三阶段为稳定损伤阶段，此阶段损伤率趋于稳定，损伤值达到最大，试件基本趋于破坏。

5 浸泡软化深度模型

5.1 夹层小试件浸泡软化深度的推导

在实际水溶造腔过程中，盐穴难溶夹层通常会达到几米厚，夹层的浸泡软化由表及里，因此，掌握夹层浸泡软化深度随时间的关系，能为预测、预报夹层的破坏垮塌提供一定的理论依据。

由于天然泥质硬石膏岩并不是各向同性的，在受卤水浸泡的过程中，试件各个方向的软化深度也会有所差异。为了方便研究，这里分别从圆柱形试件轴向和径向 2 个方向建立夹层试件浸泡软化深度模型，如图 11 所示，图中 $d_1(h)$ 为轴向软化深度， $d_2(h)$ 为径向软化深度，二者均为浸泡时间的函数。

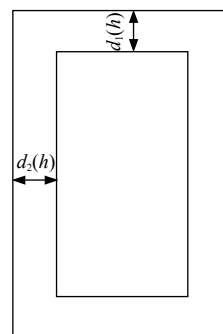


图 11 夹层圆柱形试件浸泡软化深度模型示意图
Fig.11 Sketch of corrosion depth model of interlayer rock sample

(1) 小试件轴向软化深度

设 Δl 为应力 σ 对应的轴向变形量， L_0 为未受卤水浸泡试件的轴向有效承载长度， L_t 为浸泡时间 t 后试件的轴向有效承载长度。由弹性模量的计算公式可知：

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\Delta l / L_0} \tag{8}$$

$$E_t = \frac{\sigma}{\Delta l / L_t} = \frac{\sigma}{\Delta l / [L_0 - 2d_1(h)]} \tag{9}$$

由式(8)，(9)可得

$$\frac{E_t}{E_0} = \frac{L_0 - 2d_1(h)}{L_0} = 1 - D(t) \quad (10)$$

联立式(6)和(10)得

$$d_1(h) = \frac{L_0}{2} \left[0.994 19 - \frac{1.464 67}{1 + 10^{0.086 51(t-3.595 15)}} \right] \quad (11)$$

(2) 小试件径向软化深度

图 12 为夹层圆柱形试件径向浸润软化深度示意图， r_0 为夹层初始半径。对软化深度模型做如下假设：

软化深度 $d_2(h)$ 范围内已不具备承载能力，试件有效承载和变形半径为 r ；

不同浸泡时间下的试件有效径向变形量相同。

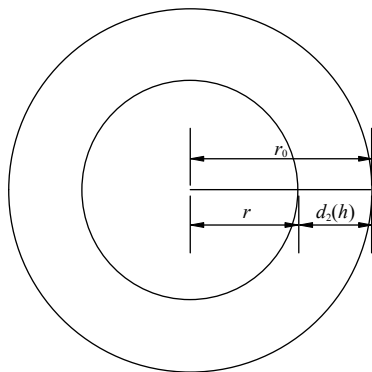


图 12 夹层圆柱形试件径向浸泡软化深度模型

Fig.12 Sketch of corrosion depth model of interlayer rock sample in radial direction

由泊松比的计算公式可知：

$$\mu_0 = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = \frac{D'/D}{\varepsilon_y} \quad (12)$$

$$\mu_t = \frac{D'/[D - 2d_2(h)]}{\varepsilon_y} \quad (13)$$

式中： μ_0 为泥质硬石膏夹层未浸泡时的泊松比， μ_t 是泥质硬石膏夹层浸泡时间为 t 时的泊松比， ε_x 为试件径向应变， ε_y 为试件轴向应变， D' 为试件径向有效变形量， D 为夹层试件初始直径。

由式(12)和(13)可得

$$\frac{\mu_t}{\mu_0} = \frac{D}{D - 2d_2(h)} = \frac{r_0}{r_0 - d_2(h)} \quad (14)$$

因此有

$$d_2(h) = r_0 \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu_t} \right) \quad (15)$$

将式(3)代入式(15)可得

$$d_2(h) = r_0 \left\{ 1 - 0.232 \sqrt[0.167 11 + 0.307 04 \left(1 + 10^{0.539 2 - 0.095 9t} \right)^{-1}] \right\} \quad (16)$$

5.2 建腔期盐穴夹层浸泡软化范围的计算

图 13 为盐穴建腔期夹层软化扩展示意图。由于夹层上部侧溶底角^[23]的存在，夹层上部被残留盐岩覆盖而未浸泡于卤水中，所以卤水主要从夹层下表面和夹层中心孔处分别沿夹层的轴向和径向向夹层内部不断渗透、软化。在研究盐穴夹层任一纵剖面(见图 13)的软化深度时，难溶夹层可以近似地看作是水平放置的长为 R 、半径为 H 的圆柱体，其中， R 为夹层暴露半径， H 为夹层厚度。因此，可以借鉴圆柱体小试件的软化深度模型。由式(11)，(16)，结合图 13 所示的夹层软化扩展情况，可以建立建腔期盐穴夹层浸泡软化深度 $D(h)$ 模型：

$$D_1(h) = k_1 H \left[1 - \frac{a_0}{a_1 + a_2 (1 + 10^{a_3 - a_4 t})} \right] \quad (17)$$

$$D_2(h) = \frac{k_2 R}{2} \left[b_1 - \frac{b_0}{1 + 10^{b_2 (t - b_3)}} \right] \quad (18)$$

式中： $D_1(h)$ 为难溶夹层竖直方向软化深度； $D_2(h)$ 为难溶夹层水平方向软化深度； k_1, k_2 均为修正系数，根据尺寸效应和具体地质条件取小于 1 的正数； $a_0 \sim a_4, b_0 \sim b_3$ 为与夹层材料有关的常数。

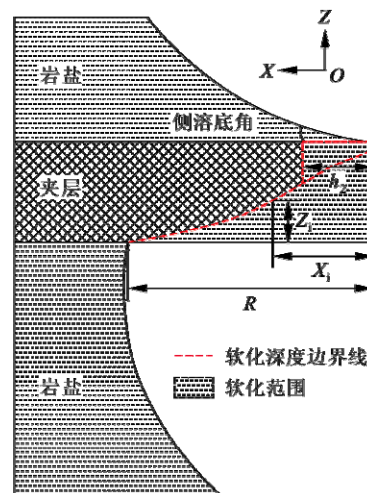


图 13 盐穴建腔期夹层软化扩展示意图

Fig.13 Expandable illustration of interlayer softening during salt cavern building

盐穴夹层浸泡软化深度与浸泡时间紧密相关，而夹层不同部分受卤水浸泡的时间长短取决于其所处的空间位置、夹层暴露半径和水溶造腔平均侧溶速度 V 。暴露夹层的边缘浸泡时间为 0，直至夹层中心套管孔处，受卤水浸泡时间逐渐增加。

如图 13 所示，建立以夹层底面中心为坐标原点的直角坐标系 XOZ 。结合夹层浸泡软化深度模型可得出盐穴夹层浸泡软化范围。

(1) 竖直方向软化深度 h_1

竖直方向上的软化深度为

$$z_i = D_1(h_i) = k_1 H \left[1 - \frac{a_0}{a_1 + a_2 (1 + 10^{a_3 - a_4 t})} \right] \quad (19)$$

$$t_i = \frac{R - x_i}{V} \quad (20)$$

式中： z_i 为 $x = x_i$ 时夹层竖直方向的软化深度； t_i 为软化深度达到 z_i 时所经历的时间； V 为水溶造腔过程中平均侧溶速度。

由式(19)，(20)得

$$z_i = k_1 H \left[1 - \frac{a_0}{a_1 + a_2 \left(1 + 10^{a_3 - a_4 \frac{R - x_i}{V}} \right)} \right] \quad (21)$$

故

$$h_1(x) = k_1 H \left[1 - \frac{a_0}{a_1 + a_2 \left(1 + 10^{a_3 - a_4 \frac{R - x}{V}} \right)} \right] \quad (22)$$

由式(22)可知，盐穴夹层竖直方向的软化深度离夹层中心越远越小。

(2) 水平方向软化深度 h_2

水平方向的浸泡软化存在于夹层的整个扩展过程中，即 $t=R/V$ ，所以有

$$h_2 = D_2(h) = \frac{k_2 R}{2} \left[b_1 - \frac{b_0}{1 + 10^{\frac{b_2(R - b_3)}{V}}} \right] \quad (23)$$

综上所述，盐穴夹层建腔期的浸泡软化范围是由竖直方向和水平方向的浸泡软化深度共同确定，如图 13 中的虚线包络的范围。

5.3 夹层破坏垮塌的判定方法

由前面的研究成果可知，盐岩水溶造腔过程中，难溶夹层受卤水的浸泡作用后力学强度会随浸泡时

间的增加而降低。在卤水软化范围内的夹层各点，当其应力状态满足了破坏条件后，该点附近会发生局部破坏，局部破坏的累积会影响夹层整个受力状态的改变，进而引起夹层的大面积垮塌。由于夹层的抗拉强度相对于其抗压强度普遍较低，再加上夹层中心靠下位置易发生局部的张拉破坏^[19]，而该处受卤水浸泡软化的时间又最长，因此，应用最大拉应力准则可以很好地反映此特点。最大拉应力强度准则认为当最大拉应力达到岩石的抗拉强度之后就会发生张拉破坏，强度条件用公式表示为

$$\sigma_{\text{tmax}} = \sigma_t \quad (24)$$

式中： σ_{tmax} 为夹层内最大拉应力。对于卤水软化深度范围内的泥质硬石膏夹层，结合式(4)，可以将上式修改为

$$\sigma_{\text{tmax}}(t) = \frac{6.7074}{1 + \exp[0.206(t - 7.25902)]} \quad (25)$$

利用式(22)，(23)和(25)，只要知道夹层内拉应力分布情况，就可以预测和判定难溶夹层软化范围内的破坏情况，进而预测整个夹层的破坏垮塌时间。

6 结 论

(1) 通过卤水浸泡软化试验，发现泥质硬石膏夹层的单轴抗压强度、弹性模量和抗拉强度随浸泡时间增加而降低，泊松比与之相反，其破坏形式由张拉破坏向压-剪破坏转化。

(2) 给出了泥质硬石膏夹层各力学参数与卤水浸泡时间之间显著的拟合函数关系，揭示了卤水浸泡软化作用与与夹层可溶物含量，夹层成分遇水膨胀的不均性，卤水的润滑作用和对矿物晶键的软化作用密切相关。

(3) 推导了难溶夹层基于卤水浸泡时间的损伤演化方程和损伤率演化方程，揭示了难溶夹层损伤随卤水浸泡时间的演化规律。

(4) 建立了夹层软化深度模型，将其应用于水溶造腔不同阶段难溶夹层受卤水浸泡软化范围的划定，并给出了基于浸泡时间的夹层破坏垮塌的最大拉应力准则，为盐岩水溶造腔过程中预测夹层的破坏垮塌范围和时间提供了理论基础和创新性的研究方法，具有重要的现实指导意义。

本文仅从夹层单轴力学强度和抗拉强度的角度对卤水的软化规律进行了分析研究，后期将对夹层三轴力学特征及抗剪特征的软化规律做深入分析，

从而更加全面地研究卤水浸泡对盐穴夹层的软化、破坏及垮塌的影响规律。

参考文献(References)：

- [1] THOMS R L , GEHLE R M. A brief history of salt cavern use[C]// The 8th World Salt Symposium. [S. l.] : Elsevier , 2000 : 207 – 214.
- [2] 杨春和 , 梁卫国 , 魏东吼. 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. 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))
- [3] 王清明. 盐类矿床水溶开采[M]. 北京 : 化学工业出版社 , 2003 : 18 – 21.(WANG Qingming. Solution mining in salt deposits[M]. Beijing : Chemical Industry Press , 2003 : 18 – 21.(in Chinese))
- [4] LI Y P , YANG C H , QU D A. Experimental research on deformation and failure characteristics of laminated salt rock[C]// Proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behaviors of Salt. London : Taylor and Francis Group , 2007 : 69 – 74.
- [5] 刘艳辉 , 李 晓 , 李守定 , 等. 盐岩地下储气库泥岩夹层分布与结构特性研究[J]. 岩土力学 , 2009 , 30(12) : 3 627 – 3 632.(LIU Yanhui , LI Xiao , LI Shouding , et al. Distribution and structural fabric features of mudstone interlayer of rock salt in underground gas storage[J]. Rock and Soil Mechanics , 2009 , 30(12) : 3 627 – 3 632.(in Chinese))
- [6] HEGGHEIM T , MADLAND M V , RISNES R , et al. A chemical induced enhanced weakening of chalk by seawater[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering , 2004 , 46(3) : 171 – 184.
- [7] 刘长武 , 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机制的研究[J]. 岩土力学 , 2000 , 21(1) : 28 – 31.(LIU Changwu , LU Shiliang. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J]. Rock and Soil Mechanics , 2000 , 21(1) : 28 – 31.(in Chinese))
- [8] 黄宏伟 , 车 平. 泥岩遇水软化微观机制研究[J]. 同济大学学报 : 自然科学版 , 2007 , 35(7) : 866 – 870.(HUANG Hongwei , CHE Pin. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone[J]. Journal of Tongji University : Natural Science , 2007 , 35(7) : 866 – 870.(in Chinese))
- [9] 乔丽萍 , 刘 建 , 冯夏庭. 砂岩水物理化学损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2007 , 26(10) : 2 117 – 2 124.(QIAO Liping , LIU Jian , FENG Xiating. Study on damage mechanism of sandstone under hydro-physico-chemical effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26(10) : 2 117 – 2 124.(in Chinese))
- [10] 杨春和 , 冒海军 , 王学潮 , 等. 板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J]. 岩土力学 , 2006 , 27(12) : 2 090 – 2 097.(YANG Chunhe , MAO Haijun , WANG Xuechao , et al. Study on variation of microstructure and mechanical properties of water-weakening slates[J]. Rock and Soil Mechanics , 2006 , 27(12) : 2 090 – 2 097.(in Chinese))
- [11] COLBACK P S B , WIID B L. Influence of moisture content on the compressive strength of rocks[C]// Proceedings of the 3rd Canadian Rock Mechanics Symposium. Toronto : University of Toronto , 1965 : 385 – 391.
- [12] LAJTAI E Z , SCHMIDTKE R H , BIELUS L P. The effect of water on the time-dependent deformation and fracture of a granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 1987 , 24(4) : 247 – 255.
- [13] 王泳嘉 , 冯夏庭. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性——第二部分 : 时间分形分析[J]. 岩石力学与工程学报 , 2000 , 19(5) : 551 – 556.(WANG Yongjia , FENG Xiating. Chemical environment erosion characteristics of rock fracture—part II : time fractal analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2000 , 19(5) : 551 – 556.(in Chinese))
- [14] 陈四利 , 冯夏庭 , 李邵军. 岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应[J]. 岩石力学与工程学报 , 2004 , 23(4) : 547 – 551.(CHEN Sili , FENG Xiating , LI Shaojun. Effects on chemical erosion on uniaxial compressive strength and meso-fracturing behaviors of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2004 , 23(4) : 547 – 551.(in Chinese))
- [15] 周翠英 , 邓毅梅 , 谭祥韶 , 等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报 , 2005 , 24(1) : 33 – 38.(ZHOU Cuiying , DENG Yimei , TAN Xiangshao , et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2005 , 24(1) : 33 – 38.(in Chinese))
- [16] 梁卫国 , 张传达 , 高红波 , 等. 盐水浸泡作用下石膏岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2010 , 29(6) : 1 156 – 1 162.(LIANG Weiguo , ZHANG Chuanda , GAO Hongbo , et al. Experimental study of mechanical properties of gypsum saturated in brine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2010 , 29(6) : 1 156 – 1 162.(in Chinese))
- [17] 高红波 , 梁卫国 , 杨晓琴 , 等. 高温盐溶液浸泡作用下石膏岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2011 , 30(5) : 935 – 943.(GAO Hongbo , LIANG Weiguo , YANG Xiaojin , et al. Experimental study of mechanical property of gypsum rock soaked in hot saturated brine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2011 , 30(5) : 935 – 943.(in Chinese))
- [18] 施锡林 , 李银平 , 杨春和 , 等. 卤水浸泡对泥质夹层抗拉强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2009 , 28(11) : 2 301 – 2 308.(SHI Xilin , LI Yinping , YANG Chunhe , et al. Test study of influence of brine on tensile strength of muddy intercalation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2009 , 28(11) : 2 301 – 2 308.(in Chinese))
- [19] 施锡林 , 李银平 , 杨春和 , 等. 盐穴储气库水溶造腔夹层垮塌力学机制研究[J]. 岩土力学 , 2009 , 30(12) : 3 615 – 3 620.(SHI Xilin , LI Yinping , YANG Chunhe , et al. Research on mechanical mechanism of interlayer collapse in solution mining for salt cavern gas storage[J]. Rock and Soil Mechanics , 2009 , 30(12) : 3 615 – 3 620.(in Chinese))
- [20] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京 : 中国计划出版社 , 1999.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T50266—99 Standard for test methods of engineering rock mass[S]. Beijing : China Planning Press , 1999.(in Chinese))
- [21] 张国军. 夹层软泥化过程及其化学动力学模拟[硕士学位论文][D]. 南京 : 河海大学 , 2007.(ZHANG Guojun. Softening and argillitization processes of sandwich and chemical kinetics simulation[M. S. Thesis][D]. Nanjing : Hohai University , 2007.(in Chinese))
- [22] 楼志文. 损伤力学基础[M]. 西安 : 西安交通大学出版社 , 1991 : 20 – 21.(LOU Zhiwen. Damage mechanics[M]. Xi'an : Xi'an Jiaotong University Press , 1991 : 20 – 21.(in Chinese))
- [23] 班凡生 , 耿 晶 , 高树生 , 等. 岩盐储气库水溶建腔的基本原理及影响因素研究[J]. 天然气地球科学 , 2006 , 17(2) : 261 – 266.(BAN Fansheng , GENG Jing , GAO Shusheng , et al. Studying on basic theory and influence factor of gas storage in salt caverns building with water solution[J]. Natural Gas Geoscience , 2006 , 17(2) : 261 – 266.(in Chinese))