

石膏矿岩水致老化效应试验

周意超^{1,2}, 陈从新¹, 刘秀敏¹, 段淑倩¹, 张海娜¹, 夏开宗¹

(1. 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;

2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘 要: 为研究石膏岩的水致老化效应, 在室内模拟石膏矿采空区的水环境条件, 包括不同空气湿度环境和饱和地下水环境。将石膏岩岩样置于其中, 定期取出测定其力学性质指标, 得到石膏岩老化的宏观力学表现, 并结合核磁共振技术测定试验过程中石膏岩岩样内部的孔隙结构变化, 分析石膏岩的水致老化机制。研究表明, 水对石膏岩的老化效应具有显著的影响。老化程度随时间递增, 石膏岩的单轴抗压强度、巴西抗拉强度和弹性模量与置于水环境中的时间基本呈负指数关系, 泊松比则无明显变化规律; 石膏岩老化程度和老化速率与水的状态密切相关。相对湿度越高, 石膏岩的老化越显著, 老化速率也更快, 尤其是被液态水浸泡时, 石膏岩的老化最显著, 老化速率最快。水对石膏岩的老化过程是水的物理作用与化学作用的耦合, 而化学作用是水致石膏岩老化的根本原因。石膏岩与水接触时, 石膏的溶解、重结晶作用的不断进行改变着石膏岩的矿物组成结构, 使其结构由紧密变得松散, 孔隙率增大, 力学性质不断弱化。该试验研究结果可为石膏矿开采的设计及采后空区的长期稳定性评估提供参考。

关 键 词: 石膏岩; 老化效应; 核磁共振; 溶解; 重结晶; 相对湿度

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 06-2124-08

Experiments on ageing effect of gypsum rock induced by water

ZHOU Yi-chao^{1,2}, CHEN Cong-xin¹, LIU Xiu-min¹, DUAN Shu-qian¹, ZHANG Hai-na¹, XIA Kai-zong¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410076, China)

Abstract: To investigate the water-induced ageing effect on gypsum rock, different water environment conditions were simulated in the laboratory, including different air humidity conditions and saturated groundwater conditions which may exist in the gypsum mines. Mechanical parameters of gypsum rock specimens were obtained under the pre-set conditions for different times. Meanwhile, the variation of pore structure in gypsum rock specimens was measured by nuclear magnetic resonance equipment. Then, the water-induced ageing mechanism of the gypsum rock was revealed. The results showed that the effect of water on the ageing of gypsum rock was obvious. Firstly, the ageing extent of gypsum rock increased with time, whereas mechanical parameters including uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength and elastic modulus decreased with time in a negative exponential relation. However, the Poisson's ratio of gypsum rock had no clear relation with time. Secondly, the ageing extent and ageing rate of gypsum rock were closely related to the state of water. The higher the relative humidity was, the more pronounced the ageing extent was and the faster the ageing rate was. In particular, the ageing extent of gypsum rock was the most significant and its ageing rate was also the fastest when fully submerged in water. Generally, the water-induced ageing mechanism of gypsum rock was caused by the coupling of physical and chemical effects of water, and the chemical effect was the primary cause for the ageing effect. When the gypsum rock was exposed to water, the continuous dissolution and recrystallisation of the gypsum rock changed the mineral composition of the gypsum rock. As a result, the rock structure became loose, the porosity increased, and mechanical properties gradually weakened. The research results provide references for designing the gypsum mining and the evaluation of the long-term stability of gypsum goaf.

Keywords: gypsum rock; ageing effect; nuclear magnetic resonance; dissolution; recrystallization; relative humidity

收稿日期: 2016-11-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.51274188)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51274188).

第一作者简介: 周意超, 女, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事边坡工程和地下工程等方面的工作。E-mail: yichao.zhou@yahoo.com

1 引言

岩石的风化作用常使岩石矿物发生物理化学性质的改变，风化后岩石力学性质劣化，风化作用愈强，岩石的力学性质愈劣化^[1]。风化作用的程度取决于岩石所处的外部环境、时间和岩石自身的矿物组成及孔隙裂隙结构。一般把考虑时间的风化作用称为老化作用，岩石风化作用的时间越长，老化程度越深。

石膏岩为软岩，且为微溶岩，石膏矿的开采方式多为房柱法^[2]，开采后留下大量未处置的采空区，其稳定性由预留的石膏矿柱-护顶层支撑体系保证。Auvray 等^[3-4]对多个不同时期石膏矿采空区内的矿柱取样研究其物理力学性质，发现开采时间越早及越靠近矿柱表面的石膏岩，其溶蚀老化现象越显著，相应的其力学性能亦越劣化，在对比分析采空区内相对湿度与矿柱位移的长期监测资料后发现，相对湿度及其变化对矿柱变形具有显著影响。周意超等^[5]的研究表明，石膏岩泡水会发生显著的软化。因而采空区内石膏岩在水的作用下会发生老化，这可能导致原本稳定的支撑体系逐渐失稳，对老采空区上方及周边的生命财产安全造成严重威胁。为合理评价石膏矿老采空区的稳定性，需要掌握水作用下石膏岩的老化性质。

国内外已有许多针对石膏岩物理力学性质的研究^[6-11]，其中，梁卫国等^[8]为研究盐岩溶腔油气储库建造过程中盐溶液对石膏夹层的侵蚀效应，对石膏岩在不同浓度盐溶液中浸泡不同时间后力学特性进行了研究；俞凌杰等^[9]研究了温度及围压对膏岩强度及变形特性的影响。以上研究多是基于特定工程需要而开展的，针对与之赋存环境不同的石膏矿采空区条件下水致石膏岩老化效应的研究较少，因此，开展相关研究具有重要的意义。

本文以湖北荆门荆花石膏矿为依托，在室内模拟采空区可能的水环境条件，将石膏岩样置于其中，定期取出测定其力学性质，获得不同水环境下石膏岩的长期软化（即水致老化）规律，并结合核磁共振技术测定试验过程中岩石内部的孔隙结构变化，研究石膏岩的水致老化机制。

2 试验概述

2.1 试样简介

试样取自湖北荆花石膏矿正在开采的工作面，为白垩系上统跑马岗组革集亚组粒状石膏，常用作水泥生产，亦称为水泥石膏。乳白色或灰色，半透

明至不透明，团块状、似层状产出，不等粒结构。X 射线衍射矿物测定试验（XRD）及 X 射线荧光元素分析（XRF）结果表明，该石膏岩含石膏 90.38%、白云石 8.21%、石英 1.4%，经水化程度试验测得石膏岩水化程度完全，为熟石膏岩 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

2.2 试验设计

依托工程的现场调查表明^[12]，影响矿柱-护顶层力学性质的水主要有两种存在状态，液态水和蒸汽水。其中，蒸汽水含量的衡量指标为空气中的相对湿度（relative humidity，简称 RH）。现场相对湿度测试表明，相对湿度会随着有无强制通风条件而发生变化，正在开采的采空区（有强制通风），相对湿度可能超过 90%，而在废弃的采空区（无强制通风），相对湿度则基本保持约为 70%。此外，相对湿度亦会随着季节发生微小的波动；液态水则为地下水浸泡环境。

考虑到采空区的现场环境条件，设置室内试验温度为 20℃（地下采空区基本恒温在 20℃），相对湿度分别为 70%、85%、100% 的非饱和环境以及液态水浸泡环境（groundwater immersion，简称 GWI）。利用恒温恒湿箱营造恒温恒湿环境，液态水为现场所取地下水样，溶液化学分析表明，其矿化度较高，其中硫酸盐含量高，测定结果显示，20℃ 下硫酸根离子及钙离子的乘积达到了二水硫酸钙的溶度积，故可视该地下水为硫酸钙饱和溶液。每个相对湿度环境中放置 12 个大圆柱试样（ $\phi \times h = 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ）、12 个小圆柱试样（ $\phi \times h = 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ）。泡水环境中放置 15 个大圆柱试样和 12 个小圆柱试样，其中，比相对湿度环境中多的 3 个大圆柱样，泡水 150 d 后取出，于 45℃ 烘箱中烘干 72 h 后进行单轴抗压强度试验，探究水对石膏岩的化学软化程度。4 种环境中试样共计 99 个，按设定的时间取出进行相关试验。受试验仪器使用时间限制，实际试验时间与设定时间有些微差异，不影响试验目的，处理数据时按实际时间分析。

本次试验包括核磁共振测定试样的含水情况和孔隙结构变化、单轴压缩试验和间接拉伸试验。非破坏性试验所有试样都测定，破坏性试验每次对 3 个试样进行测定。具体的试验设置如表 1 所示。

表 1 试验设置
Table 1 Experimental setup

类别	内容
水环境	$RH=70\%$ 、 $RH=85\%$ 、 $RH=100\%$ 、GWI
试验	核磁共振测试、单轴压缩试验、间接拉伸试验
试验时间间隔/d	15、30、75、150

2.3 试验设备

本文试验中单轴压缩试验在数字控制式电液伺服试验机 RMT-150C 岩石力学试验系统上进行,可直接观察石膏岩样的变形破坏过程。试验采用位移控制加载,加载速率为 0.002 mm/s。核磁共振(nuclear magnetic resonance, 简称 NMR)技术^[13]为岩石物理试验分析检测的新手段,可测定岩样的含水率、孔径分布等参数,具有无损检测、样品可重复使用、检测速度快等优点。此次试验所采用的核磁共振测试分析系统(见图 1)磁场强度为 0.5 T,射频场为 1~49 MHz,大口径探头线圈最大可达 $\phi 60$ mm,样品管内径为 25 mm,外径为 45 mm,最大耐压为 10 MPa。



图 1 核磁共振测试分析系统
Fig.1 NMR test and analysis system

3 试验结果分析

3.1 物理性质测定

NMR 岩芯测量的基础是原子核的磁性及其与外加磁场的相互作用,主要测量岩石孔隙中含氢核流体(水)的弛豫特征。核磁共振 T_2 分布曲线围成的面积与探测范围内孔隙流体中的氢原子数量成正比,弛豫时间谱的积分和,代表了岩石中的流体含量,且积分和与流体含量满足线性关系。通过饱和岩样(含水率 $\omega = 0.5\%$, 峰总积分面积 $A = 146.13$)和干燥岩样(含水率 $\omega = 0\%$, 峰总积分面积 $A = 4.11$)可标定出石膏岩 NMR 峰总积分面积 A 与含水率 ω 之间的关系式为

$$\omega = 0.028\ 2A - 0.014\ 1 \quad (1)$$

核磁共振仪测得的岩样峰总积分面积通过式(1)可转换得到岩样相应的含水率及其随时间的变化,如图 2 所示。从图可见,相对湿度为 70% 时岩样含水率随时间增加变化微弱;相对湿度为 85%、

100% 及泡水环境下,岩样的含水率随时间增加为折线型递增的趋势,约以 20 d 为转折点,20 d 以内含水率增加速率快,之后含水率增加速率慢;相对湿度越高,岩样含水率越高,泡水环境下岩样含水率高于各相对湿度环境。

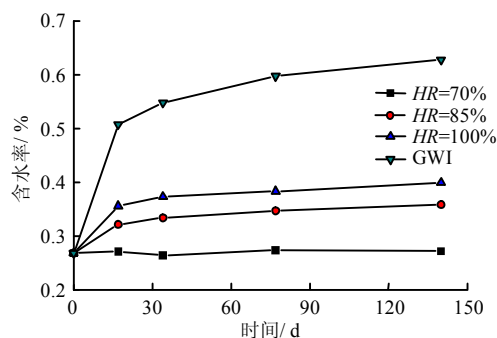


图 2 不同水环境下石膏岩含水率随时间的变化曲线
Fig.2 Water content-time curves of specimens under different water conditions

由核磁共振基础理论^[11]可知,当岩石孔隙充满流体时,弛豫时间与岩石孔隙大小的分布是一致的,即 T_2 分布反映了岩石孔隙大小的分布,孔隙小,则 T_2 值小,孔隙大,则 T_2 值大。由上述岩样含水分析可知,设定相对湿度环境下,岩样均远离饱和状态,所测得 T_2 分布不能用于孔隙结构的分析。泡水条件下,岩样吸水在 15 d 时已达到了饱和含水率,故测得的 T_2 分布可用于分析泡水岩样的孔隙结构变化。

从泡水石膏岩样 D-12 的核磁共振 T_2 分布图(见图 3)及峰面积统计表(见表 2)可见,泡水初期 T_2 图谱包含 3 个峰,峰值点分别为 0.31、1.15、98.85 ms。前两个峰代表微小孔隙,峰面积占总面积的 79.48%,表明石膏岩主要发育微小孔隙;第 3 个峰代表中孔隙,峰面积占 20.52%,表明石膏岩亦发育部分中孔隙。随着泡水时间增长,峰总积分面积增加,说明岩石中孔隙流体增加,岩石的含水孔隙度增大。 T_2 图谱整体右倾,峰值呈增大的趋势,大

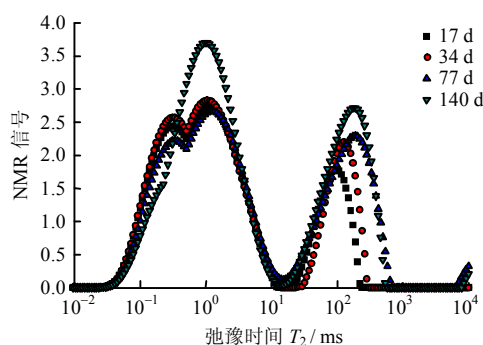


图 3 GWI 石膏岩样 D-12 核磁共振 T_2 分布
Fig.3 NMR T_2 distribution of GWI specimen D-12

表 2 GWI 石膏岩样 D-12 核磁共振 T_2 分布峰面积统计
Table 2 Statistics on NMR T_2 distribution peak area of GWI specimen D-12

时间 /d	峰总面积 面积	第 1 个峰			第 2 个峰			第 3 个峰			第 4 个峰		
		积分面积	峰值/ms	占比/%	积分面积	峰值/ ms	占比/%	积分面积	峰值/ ms	占比/%	积分面积	峰值/ ms	占比/%
17	148.28	49.19	0.31	33.17	68.29	1.15	46.05	30.42	98.85	20.52			
34	159.70	51.27	0.31	32.10	70.05	1.06	43.87	35.54	126.04	22.25			
77	173.83	43.91	0.34	25.26	69.86	1.25	40.19	58.96	188.97	33.92	0.01	10 000.00	0.01
140	182.37				116.55	1.06	63.91	64.76	188.97	35.51	1.06	10 000.00	0.58

峰值面积及其占比均增加，尤其是泡水 140 d 后，前两峰化为一个孤峰（见图 3），说明石膏岩的含水中大孔隙占比增多。泡水半个月之后其岩样含水率逐渐超过石膏岩真空强制饱和含水率，且随着时间仍在递增。

3.2 力学性质测定

表 3~6 分别为置于 4 种水环境下石膏岩的强度参数（单轴抗压强度 σ_c 、单轴抗拉强度 σ_t ）和变形参数（弹性模量 E 、泊松比 ν ）在不同时间的试验结果，每个值由 3 个同条件试样的试验结果平均所得。将试验结果绘制成图表可直观展示各力学指标的变化。

表 3 不同水环境下岩样单轴抗压强度

Table 3 Uniaxial compressive strength of specimens under different water conditions

时间 t /d	单轴抗压强度/MPa				
	RH=70% RH=85% RH=100%			GWI	
				烘干前	烘干后
0	17.25	17.25	17.25	17.25	
17	17.11	16.51	16.17	15.29	
34	17.22	15.98	15.63	14.26	
77	16.27	15.12	14.43	11.77	
140	16.71	14.35	13.47	9.83	14.53

表 4 不同水环境下岩样单轴抗拉强度

Table 4 Tensile strength of specimens under different water conditions

时间 t /d	单轴抗压强度/MPa			
	RH=70%	RH=85%	RH=100%	GWI
0	1.70	1.70	1.70	1.70
17	1.65	1.47	1.29	1.13
34	1.65	1.38	1.16	0.98
77	1.71	1.26	1.05	0.75
140	1.67	1.11	0.90	0.61

表 5 不同水环境下岩样弹性模量

Table 5 Elastic modulus of specimens under different water conditions

时间 t /d	弹性模量/GPa			
	RH=70%	RH=85%	RH=100%	GWI
0	6.83	6.83	6.83	6.83
17	6.64	6.39	6.23	5.75
34	6.56	6.26	6.03	5.45
77	6.26	6.00	5.80	5.06
140	6.50	5.84	5.43	4.74

表 6 不同水环境下岩样泊松比

Table 6 Poisson's ratio of specimens under different water conditions

时间 t /d	泊松比			
	RH=70%	RH=85%	RH=100%	GWI
0	0.26	0.26	0.26	0.26
17	0.27	0.28	0.28	0.30
34	0.31	0.25	0.33	0.34
77	0.26	0.31	0.30	0.36
140	0.29	0.30	0.32	0.32

由图 4 可知，石膏岩的单轴抗压强度 σ_c 在设定相对湿度及泡水环境下随着时间增加而递减。相对湿度为 70% 时， σ_c 随时间变化较平缓，只有微弱的波动。随着相对湿度增加， σ_c 下降幅度增大，泡水环境时下降幅度最大。设定水环境下，石膏岩单轴抗压强度随时间均基本呈负指数递减，拟合优度较高，具体关系见表 7。

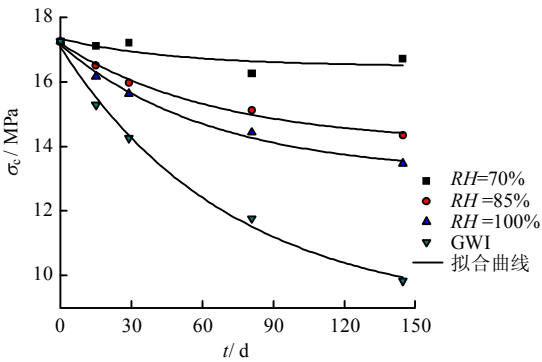


图 4 不同水环境下岩样单轴抗压强度与时间的关系曲线
Fig.4 Uniaxial compressive strength-time curves of specimens under different water conditions

石膏岩在不同时间的单轴抗拉强度 σ_t 和弹性模量 E 如表 4 和表 5 所示，其随水环境和时间的变化（见图 5、6）与单轴抗压强度相似。随着时间的增加，二者亦基本呈负指数递减（见表 7），且相对湿度越高，降低得越显著，在泡水环境中降低的幅度最大。相较于 σ_c 、 σ_t 、 E ，泊松比 ν 随时间及水环境不同则无明显的变化规律，基本在 0.26~0.36 之间随机波动（见表 6 和图 7）。

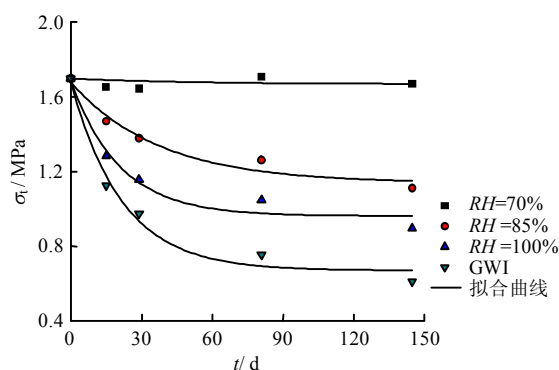


图5 不同水环境下岩样单轴抗拉强度与时间的关系曲线
Fig.5 Tensile strength-time curves of specimens under different water conditions

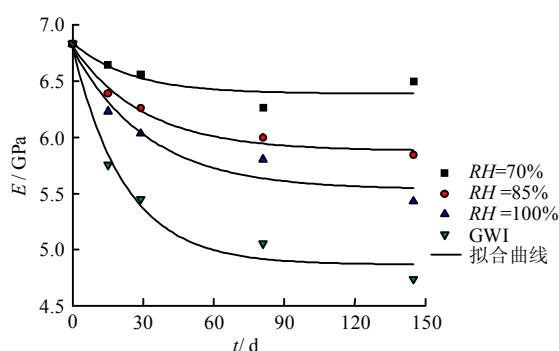


图6 不同水环境下岩样弹性模量与时间的关系曲线
Fig.6 Elastic modulus-time curves of specimens under different water conditions

表7 设定水环境下石膏岩力学参数与时间的拟合关系
Table 7 Fitting relationship of gypsum rock mechanical parameters and time under a special water condition

水环境	拟合关系式 $y=A+B\exp(-t/C)$	可决系数 R^2
RH=70%	$\sigma_c=16.48+0.86\exp(-t/48.80)$	0.280
	$\sigma_t=1.68+0.00\exp(-t/0.43)$	0.000
	$E=6.39+0.45\exp(-t/24.42)$	0.619
RH=85%	$\sigma_c=14.07+3.12\exp(-t/65.79)$	0.985
	$\sigma_t=1.14+0.54\exp(-t/37.64)$	0.932
	$E=5.88+0.93\exp(-t/30.32)$	0.970
RH=100%	$\sigma_c=13.14+4.01\exp(-t/63.83)$	0.985
	$\sigma_t=0.96+0.73\exp(-t/20.72)$	0.944
	$E=5.54+1.25\exp(-t/31.98)$	0.903
GWI	$\sigma_c=8.86+8.22\exp(-t/71.82)$	0.990
	$\sigma_t=0.67+1.01\exp(-t/21.69)$	0.967
	$E=4.87+1.94\exp(-t/22.21)$	0.961

取出泡水140 d后的试样置于45℃烘箱中风干后,试样的平均单轴抗压强度为14.53 MPa(见表3),较天然状态降低15.76%;弹性模量为5.22 GPa,较天然状态降低23.57%。

以上通过强度参数(单轴抗压强度和单轴抗拉强度)及弹性模量的变化衡量了石膏岩的软化程度,

结果表明:①每一种设定水环境下,水对石膏岩的软化都具有较明显的时间效应,且与时间基本呈负指数关系。②不同水环境下,石膏岩的软化程度不同,相对湿度越高,石膏岩的软化越显著;当处于液态水浸泡环境时,软化最剧烈。③石膏岩的软化程度随置于环境的时间递增,而软化速率随时间递减。

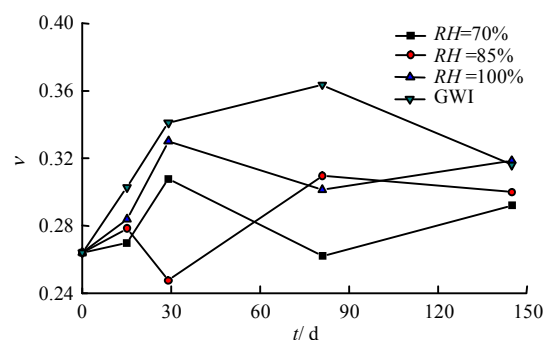


图7 不同水环境下岩样泊松比与时间的关系曲线
Fig.7 Poisson's ratio-time curves of specimens under different water conditions

需要指出的是,文中对石膏岩各水环境下力学指标随时间的拟合关系仅依据半年期限试验的结果,根据后续老化机制及实际采空区勘察推测的渐近值与该拟合关系所推求的渐近值并不吻合,故而目前的拟合关系仅适用于较短期限的石膏矿采空区稳定性评价,对于更长期的评估则可能造成误差过大,后续仍需要细致研究。

4 石膏岩水致老化机制分析

水致岩石软化是通过水-岩相互作用而发生的,而老化问题则是在软化的基础之上考虑了水-岩作用的时间效应。文献[5]中探究了石膏岩的饱水软化机制,主要分析出其溶解-重结晶的软化机制,石膏的微溶特性使石膏岩在不同水溶液中会因为溶解或溶解-重结晶的方式弱化内部结构而造成力学性质软化。本文则是基于石膏岩的饱水软化机制进一步展开实际石膏矿采空区中不同水环境下石膏岩的长期软化(即水致老化)规律研究,并结合试验过程中核磁共振技术测定结果,分析水-石膏岩作用过程,探讨石膏岩的水致老化机制。

石膏岩物理性质和力学性质试验结果见图2~6,由图可知,在设定水环境下,石膏岩含水随时间呈折线递增(递增速率先快后慢),力学性质随时间呈负指数递减(递减速率先快后慢)。将含水率与力学软化关联分析则可得出,石膏岩的力学软化与含

水率呈正相关,含水率越多,力学软化越强(见图8)。

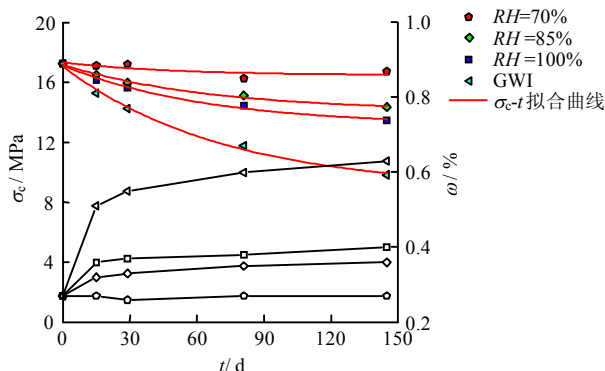


图8 石膏岩含水率及单轴抗压强度随时间的变化曲线
Fig.8 Curves of uniaxial compressive strength and water content of specimens with time under different water conditions

从物理角度分析,石膏岩孔隙越大、连通性越好,越利于水分进入其内发挥软化作用。水对非饱和石膏岩(处于相对湿度环境)的物理软化表现为,水分子附着于矿物颗粒表面形成水膜,减少了矿物颗粒间的摩擦阻力,从而降低石膏岩的强度,含水越多,形成水膜的面积及厚度越大,石膏岩的强度则降低越多。对于饱和石膏岩(处于泡水环境)而言,水的物理软化不仅包含润滑作用,还包括岩石受力时,因孔隙水未消散而在孔隙内产生的超孔隙水压力而导致的有效应力的减少效应,两者综合作用使得岩石的强度降低。泡水140 d后石膏岩的单轴抗压强度为9.83 MPa,较天然状态降低43%,当45℃干燥后岩样强度为14.53 MPa,仅水的物理软化则使石膏岩的强度比天然状态降低27.2%,占总软化的63.3%,表明了水对石膏岩的显著物理软化效应。

从化学角度分析,水对石膏岩的软化是基于石膏的微溶性质,含水越多,水与石膏的接触越多,水-石膏作用越强。

对于泡水石膏岩,核磁共振测定结果表明,随着时间增加,石膏岩的含水孔隙度增大,中大孔隙占比增多。泡水15 d之后其岩样含水率逐渐超过石膏岩真空强制饱和含水率,且随着时间仍在递增。导致这样的现象可能有3个原因:①石膏岩在非饱和和硫酸钙溶液(溶解>重结晶)(见图9(a))导致矿物流失而使孔隙度增大,中大孔隙增多;②石膏岩的矿物组成结构因其发生溶解等于重结晶(见图9(b))而变的松散,导致孔隙增加,类似于“碎胀效应”;③石膏岩原本无水的闭合孔隙随着时

间发展为开口孔隙后逐渐被水侵入,石膏岩中绝对孔隙率为3.02%,开口孔隙是真空条件下水能到达的区域,仅占总孔隙的37.7%,其余62.3%为闭合孔隙(见表8),这种情况下总孔隙度变化虽较小,但使部分闭合孔隙变为开口孔隙而充满水,水岩作用增强,物理软化及化学软化均被加强。前两个原因也是第3个原因成立的前提,即石膏溶解、重结晶作用是闭合孔隙转化为开口孔隙时必需的连通通道形成的原因。在本试验中,地下水溶液的离子浓度测定显示地下水可视为饱和硫酸钙溶液,即石膏岩置于地下水环境时基本为溶解结晶平衡状态,溶解量与结晶量相等,因而上述现象主要是后两个原因造成的。总之,上述各原因都需要基于水与石膏的化学作用,溶解和溶解-重结晶作用时间越长,石膏岩的孔隙结构越趋松散而弱化,这个过程是自发的使原本有序且紧密的结晶结构变得无序而松散,是热力学第二定律的一个表现。泡水145 d后经45℃烘干的岩样强度比天然状态降低15.76%,从宏观上证明了泡水导致石膏岩结构弱化的现象。

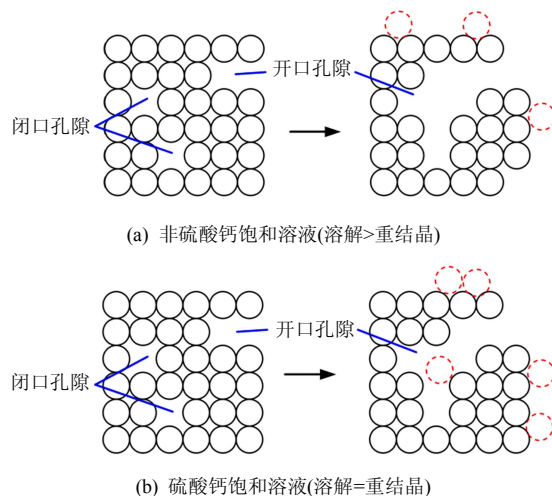


图9 不同溶液中溶解、重结晶过程示意图
Fig.9 Schematic of mineral dissolution and recrystallisation in different solutions

表8 新鲜石膏岩的物理性质指标

Table 8 Physical properties of fresh gypsum rock

天然密度 /(g/cm ³)	土粒相对 密度	含水率/%		孔隙率/%		
		天然	饱和	绝对	开口	闭合
2.32	2.38	0.28	0.50	3.02	1.14	1.88

对置于一定相对湿度环境的石膏岩,也会由于空气中的水分子与石膏发生溶解-重结晶作用而使岩石结构弱化。Auvray等^[3]对石膏矿废置采空区内的矿柱从表面到里面取一系列样进行扫描电镜观察,发现试样多具溶蚀特征,且越靠近矿柱表面的

试样溶蚀现象越显著, 开采时间越久远的采空区, 溶蚀越发育, 力学试验则表明岩样的力学强度与溶蚀的强弱呈负相关, 溶蚀越强, 强度越弱。

综上所述, 水对石膏岩的老化过程是水的物理作用与化学作用的耦合, 老化程度和老化速度与水的状态和作用时间密切相关。化学作用是石膏岩发生老化的根本原因, 一方面不断弱化岩石的组成结构, 另一方面弱化后的结构又促进了水与岩接触, 加剧了物理软化效果及化学软化效果。根据热力学第二定律, 只要水与石膏岩接触, 石膏的溶解、重结晶作用便不断进行着并改变着岩石的矿物组成结构, 使其结构由紧密变得松散, 孔隙增多, 力学性能不断劣化。

5 结 论

本文通过石膏岩水致老化效应的试验研究, 揭示了水对石膏岩物理力学性质的影响效应, 具有重要的理论意义。此外, 该研究对于相关工程如石膏矿开采的设计及采后空区的长期稳定性评估具有重要的实践意义。主要结论如下:

(1) 水对石膏岩的老化效应显著, 老化程度随置于环境的时间递增, 老化速率随时间递减。石膏岩的单轴抗压强度、单轴抗拉强度和弹性模量与置于水环境中的时间基本呈负指数关系, 泊松比则无显著变化规律。

(2) 石膏岩的老化程度和老化速度与水的状态密切相关。相对湿度越高, 石膏岩的老化越显著, 老化速率也更快; 被液态水浸泡时, 石膏岩的老化最显著, 老化速率最快。

(3) 水对石膏岩的老化过程是水的物理作用与化学作用的耦合, 化学作用是水致石膏岩老化的根本原因, 只要水与石膏岩接触, 石膏的溶解、重结晶作用便不断进行着并改变着岩石的矿物组成结构, 使其结构由紧密变得松散, 孔隙增多, 力学性能不断弱化。

参 考 文 献

- [1] 宋青春, 邱维理, 张振春. 地质学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
SONG Qing-chun, QIU Wei-li, ZHANG Zhen-chun. Essentials of geology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [2] 王官宝. 石膏矿冒顶引发冲击地压机制及防治措施研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
WANG Guan-bao. Study on rock burst induced by roof falling and its control methods in gypsum mine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [3] AUVRAY C, HOMAND F, SORGI C. The aging of gypsum in underground mines[J]. **Engineering Geology**, 2004, 74(3): 183—196.
- [4] AUVRAY C, HOMAND F, HOXHA D. The influence of relative humidity on the rate of convergence in an underground gypsum mine[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2008, 45(8): 1454—1468.
- [5] 周意超, 陈从新, 刘秀敏, 等. 荆门石膏矿岩遇水软化力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2847—2854.
ZHOU Yi-chao, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, et al. Experimental study on mechanical properties of water-softening gypsum rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2847—2854.
- [6] HOXHA D, FRANÇOISE HOMAND, AUVRAY C. Deformation of natural gypsum rock: Mechanisms and questions[J]. **Engineering Geology**, 2006, 86(1): 1—17.
- [7] YILMAZ I. Influence of water content on the strength and deformability of gypsum[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2010, 47(2): 342—347.
- [8] 梁卫国, 张传达, 高红波. 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): 1156—1163.
LIANG Wei-guo, ZHANG Chuan-da, GAO Hong-bo. Experimental study of mechanical properties of gypsum saturated in brine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(6): 1156—1163.
- [9] 俞凌杰, 张文涛, 范明, 等. 膏岩三轴压缩试验及高温相变特征研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3318—3322.
YU Ling-jie, ZHANG Wen-tao, FAN Ming, et al. Study of gypsum rock triaxial compression experiment and characteristic of high temperature phase transition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(11): 3318—3322.
- [10] 祝艳波, 吴银亮, 余宏明. 隧道石膏质围岩强度特性试验研究[J]. 长江科学院报, 2013, 30(9): 53—58.
ZHU Yan-bo, WU Yin-liang, YU Hong-ming. Strength behavior of tunnel's gypsiferous surrounding rock[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2013, 30(9): 53—58.