张娜，王水兵，赵方方，等．软岩与水相互作用研究综述[J]．水利水电技术，2018，49(7)：1-7.
ZHANG Na，WANG Shuibing，ZHAO Fangfang，et al. Review on study of interaction between soft rock and water[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2018，49(7)：1-7.

软岩与水相互作用研究综述

张　娜[1,2]，王水兵[1,2]，赵方方[1,2]，李家斌[2]，孙冻炎[2]
(1. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，北京　100083；
2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院，北京　100083)

摘　要：软岩是一类松散、破碎、软弱及风化膨胀性的强度较低的岩石，在水环境作用下软岩易产生大变形失稳破坏。大多数岩土工程事故都涉及到软岩与水的相互作用，研究软岩与水相互作用对于分析某些由软岩失稳引起的工程事故具有重要的理论和现实意义。针对软岩与水相互作用这一问题，从软岩与水相互作用的分类、软岩吸水特性的影响因素及其软岩吸水失稳机理等方面，对国内外具有代表性的研究成果进行了梳理。结果表明：软岩与水相互作用可分为力学作用、物理作用和化学作用。在各种影响软岩吸水特性的因素中，主要因素是黏土矿物的含量和种类、孔隙结构，其他影响因素有水压变化、软岩的干湿循环次数、软岩的块体尺度(尺度效应)和吸水时间等。软岩吸水失稳的根本原因是吸水后黏土矿物微观结构发生变化，而是否含蒙脱石等吸水性极强的黏土矿物并非直接原因；后者只是对软岩吸水过程起到促进作用。

关键词：软岩水理作用；水岩相互作用；黏土矿物；微观结构；煤矿地下软岩巷道；高渗透水压；深部高应力软岩巷道支护；地下水溶质运移
doi：10.13928/j.cnki.wrahe.2018.07.001
中图分类号：TU46　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-0860(2018)07-0001-07

Review on study of interaction between soft rock and water

ZHANG Na[1,2]，WANG Shuibing[1,2]，ZHAO Fangfang[1,2]，LI Jiabin[2]，SUN Dongyan[2]
(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering，Beijing　100083，China；
2. School of Mechanics aand Civil Engineering，China University of Mining and Technology，Beijing　100083，China)

Abstract：Soft rock is a type of loose，broken，weak and weathering expansive low-strength rock. In the water environment，soft rock is easy to produce large deformation and instability. Aiming at the problem of the interaction between soft rock and water，the representative study achievements at home and abroad are sorted out herein from the aspects of the classification of the interactions between soft rock and water，the impacting factors of the water absorption behaviors of soft rock，the instability mechanism of soft rock after water absorption，etc. the result shows that the interaction between soft rock and water can be divided into mechanical effect，physical effect and chemical effect. Among all the factors to impact the water absorption behavior of soft rock，the major factors are the content and type of clay mineral and pore structure，while the other impacting factors are variation of water pressure，number of dry-wet cycles，block size of soft rock (scale effect)，water absorption time，etc. The fundamental cause of

收稿日期：2018-04-30
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目(41502264)；中央高校基本科研业务费专项基金(2010QL07)；中国矿业大学(北京)大学生创新训练(C201706340)
作者简介：张　娜(1978—)，女，副研究员，硕士研究生导师，博士，主要从事流体与岩石的相互作用方面的研究。E－mail：zhangn@cumtb.edu.cn

soft rock instability is the variation of the microstructure of clay mineral after water absorption, and then whether soft rock contains the clay minerals with high water absorption behavior, such as montmorillonite, etc. , or not is not the direct cause, which only plays a promoting role during the water absorption of soft rock.

Keywords: water-physical property of soft rock; water-rock interaction; clay minerals; microstructure; underyround rock roadway of coal mine; high permeable water pressure; deep and high stress soft rock roadway support; solute transport in groundwater

0　引　言

近些年，随着矿山开采深度的增加和铁路隧道等的建设，许多地下工程遇到了越来越多的软岩地质情况，吸引了许多国内外岩石力学科研工作者致力于软岩的研究，并在各方面取得了不错的成绩。特别是在煤矿(深部)地下软岩巷道方面，开展了许多软岩巷道支护的研究[1-2]，逐渐形成了软岩巷道支护理论和支护技术[3]。煤矿深部开采不同于浅部开采，在深部条件下，会遇到高地应力、高地温、高渗透水压和开采易扰动的地质环境(即“三高一扰动”)。因此，无论是地下工程的开挖，还是软岩巷道的支护都会变得非常困难。深部高应力作用下，最明显的负面作用就是在露天和地下工程开挖的时候易引起应力集中，如在隧道开挖时，水平应力的集中很可能导致隧道顶板的屈曲开裂与底板的屈曲底鼓[4]；此外，在高应力水平软岩巷道支护方面，如果应力水平超过了围岩强度，会出现大松动圈，从而造成软岩巷道支护的失稳和全断面收缩破坏[5]。同时，在深部高应力条件下，许多浅部表现为硬岩特性的岩层也会表现出软岩的特性。这是因为岩石所受的应力水平超过了自身的软化临界荷载，岩石呈现出了明显的塑性变形加速现象，即产生不稳定变形[6]。因此，深部高应力条件使得煤矿开采难度加大，也给巷道支护提出了更高的要求。

虽然地下水和高应力都会不同程度的造成岩体强度的损伤，但水对岩体强度的损伤比力学因素的作用更为严重，因此有必要研究水与岩石的相互作用。国内外对水岩相互作用的研究主要集中在两个方面：一是从水文地质方向出发研究水与岩土介质作用对地下水溶质运移的影响；二是从工程地质和岩土力学出发研究水与岩土介质相互作用对岩土介质力学特性的影响。从工程地质和岩土力学方面来看，研究最多的主要是在对含水岩石力学特性[7-11]、岩石遇水之后微观结构特征[12-16]、水岩化学作用的力学效应[17-21]等方面。近几年，国内许多学者又开展了许多软岩吸水特性方面的研究[22-24]。

1　软岩定义

软岩的定义可区分为地质软岩和工程软岩。地质软岩是指强度较低的一类松散、破碎、软弱及风化膨胀性的岩体的总称。国际岩石力学学会将软岩定义为单轴抗压强度为 0.5 ~ 25 MPa 的一类岩石，属于地质软岩的范畴。然而工程实践表明：一方面，如果工程所处深度不大，而且地应力水平也不高时，则强度低于 25 MPa 的岩石也不会产生出软岩的特征；另一方面，如果工程深度和地应力水平较高时，单轴抗压强度大于 25 MPa 的岩石也可以产生软岩的大变形、难支护的特征，因此这种软岩的定义存在明显的局限性，不能用于指导工程实践。何满潮等[6]纠正了地质软岩定义的缺陷，提出了工程软岩的概念，即在工程力作用下能产生显著塑性变形的工程岩体。该定义揭示了软岩的相对性实质，能正确的指导工程实践。

软岩单从字面意思来理解是相对较“软弱”的一类岩石，主要表现在遇水之后强度降低或体积增大，如软化、崩解和膨胀等。软岩与水的这种相互作用也被称为软岩的水理作用(以下称为水岩相互作用)。工程施工中，水岩相互作用是导致工程事故的重要原因之一，由此可见，对水岩相互作用的研究具有重要的理论价值和实践意义。

2　水岩相互作用分类

水岩相互作用在自然界中广泛存在，既是力学和地球科学研究的前沿课题，也是岩土体稳定性研究程度最高的领域之一。仵彦卿[25]将地下水与岩土体的相互作用分为 3 种，即力学作用、物理作用和化学作用；王思敬等[26]将水库地区的水岩相互作用总结为以下几种：岩土软化、渗压效应、渗透潜蚀、水力冲刷，以及岩土失水固结、干裂和崩解。

2.1　力学作用

水对岩石的力学作用主要是指通过孔隙静水压力和孔隙动水压力作用来影响其力学性质。孔隙静水压力对岩石力学效应影响可以通过有效应力原理来分析，即：如果岩石中的孔隙水在外荷载(工程力)作

用下难于排出或者完全不能排出，则孔隙中的水压力会急剧升高，从而产生很大的超静孔隙水压力，在此作用下，岩石中的固体颗粒或颗粒骨架所能承受的有效应力会减小，从而岩石的强度随之降低。此外，在孔隙静水压力作用下，一些软岩由于具有大变形能力，可能会使得其发生扩容变形，进一步增加了软岩中的含水量，从而不断降低岩石强度，直至破坏。然而孔隙动水压力则是通过对岩土体产生切向的推力以降低岩土体的抗剪强度。一方面，在孔隙动水压力作用下可使岩体中的细颗粒或者一些可溶性物质产生运移和溶蚀作用，甚至会被携带出岩体外，从而在岩体内形成流水通道的过程，称为潜蚀；另一方面，在动水压力足够大时，岩体中的松散物质在动水压力作用的通道中流动，并被悬浮冲走而发生渗透破坏，称为管涌。

毫无疑问，这种力学作用是导致岩石发生变化破坏的一个主要原因。然而随着研究的深入，水岩相互作用不仅只是通过有效应力原理简单考虑的力学作用，而且还有更为复杂的物理化学作用。

2.2　物理作用

水岩物理作用主要是指水通过对岩石软化、泥化、润滑、干湿和冻融等过程，从而改变岩石的物理力学性质，使岩石固有的力学特性劣化。岩石软化是指在岩石浸水后强度降低的性能；岩石泥化则是指含有的泥化夹层等充填物的岩石遇水之后发生的由固态向塑态直至液态的弱化效应；岩石润滑是可溶盐、胶体矿物连结的岩石，当有水浸入时，可溶盐溶解，胶体水解，使原有的连结变成水胶连结，导致矿物颗粒间连结力减弱，摩擦力减低；岩石的干湿和冻融分别是岩石经受外界湿度和温度变化的一个过程。一直以来，国内外对水岩物理作用研究比较多[27-30]，这些研究都最后得出一个结论，物理作用对岩石力学性质的影响主要与温度和湿度有很大关系，且一部分是可逆的，另外一部分是不可逆的。

2.3　化学作用

地质环境中的活跃因素是地下水，它是一种成分复杂的化学溶液，即使是纯水，它与岩体相互作用，除了物理上的以外，还有更为复杂的水－岩化学作用或水－岩反应，往往对岩石(体)的力学效应比单纯的物理作用产生更大的影响[31]。水岩化学作用包括溶蚀作用、离子交换、水化作用和水解作用等，它们改变了岩体的成分与结构，从而影响岩体的力学性能。溶蚀作用是指渗透水经过岩体时将岩体中的可溶物质溶解带走，从而使岩石强度降低的作用；离子交换是由物理力和化学力吸附到矿物颗粒表面的离子和分子与地下水的一种交换过程；水化作用是水渗透到矿物结晶格架中或水分子附着到可溶性岩石的离子上，使岩石结构发生微观、细管和宏观的改变的一种作用；水解作用是水与岩体中的阴阳离子之间发生的一种化学反应，如果阳离子与水发生水解作用，则使岩体的水环境酸化；如果阴离子与水发生反应，则使岩体的水环境碱化。

与物理作用相比，化学作用一般是不可逆的，并且水岩化学作用常常伴随新矿物的产生，因此将破坏岩石原有的内部结构组成。因此化学作用对岩石力学性质的影响是更为严重的，占主导作用。

3　软岩吸水失稳

3.1　软岩吸水特性影响因素

软岩吸水之后变形失稳是许多软岩工程破坏的根本原因，因此有必要研究影响软岩吸水特性的影响因素。何满潮等[22]采用自主开发研制的软岩水理作用测试仪，对深井泥岩的吸水特性进行了研究，得出了影响深井泥岩吸水特性的主要因素是孔隙率的大小、矿物含量与种类及黏土矿物的产状等。张娜等[32]等研究了不同岩石的气态水吸附特性，进一步验证了软岩的吸水特性与黏土矿物的种类和含量及孔隙率的大小等有很大关系。王桂莲等[33]分析了软岩和泥岩的吸水特性及其影响因素，结果表明岩石的孔隙结构(孔隙率和孔隙形态)是影响岩石吸水特性的主要因素。综合前人的研究成果，基本可以确定软岩吸水特性的主要影响因素有矿物(主要是黏土矿物)含量和种类、孔隙结构和微观结构等。

3.1.1　黏土矿物的影响

黏土矿物按照结构不同可分为：蒙脱石、高岭石、伊利石、绿泥石、海泡石族和混合晶层黏土矿物等。黏土矿物大多具有水化膨胀性，根据遇水之后黏土矿物的膨胀性，可分为膨胀性黏土矿物和非膨胀性黏土矿物。此外，从黏土矿物微观结构可以看出，膨胀性黏土矿物又分为层间膨胀性黏土矿物和粒间膨胀性黏土矿物等。

3.1.1.1　黏土矿物种类对软岩吸水的影响

不同种类的黏土矿物，其亲水性、吸附性、膨胀性的强弱都不同，因此不同的黏土矿物对岩石吸水特性的影响程度也不相同[34]。研究表明：层间膨胀性黏土矿物吸水之后膨胀量较大，粒间膨胀性黏土矿物吸水后膨胀量较小[22]。如果岩石中含有较多层间膨胀性黏土矿物，则岩石在吸水过程中吸水速率相

对变化较大；反之，如果软岩中含有较多粒间膨胀性黏土矿物，则软岩在吸水过程中吸水速率相对变化较小。

3.1.1.2　黏土矿物含量对软岩吸水的影响

黏土矿物的含量也是影响软岩吸水特性的一个重要因素。一般来说，若黏土矿物含量高，则其相同时间内的吸水量较小、吸水速率较低；若黏土矿物含量低，则其相同时间内的吸水量较大、吸水速率较高。

3.1.1.3　黏土矿物产状对软岩吸水的影响

一般黏土矿物的产状大致分为 3 种：分散质点式、薄膜式和黏土桥式[35]。分散质点式产状一般多为高岭石和少量的针状云母、蒙脱石等。这些矿物像“补丁”一样不连续地附在孔隙壁或充填在孔隙之间，使孔道变窄。薄膜式产状的黏土矿物主要是伊利石、绿泥石、蒙脱石等。它们颗粒较小，排列规则，围绕颗粒或孔隙边缘呈环带薄膜生长，使通道变窄，对流体流动有一定影响。黏土桥式的产状矿物多为绿泥石、伊利石(水云母)，呈纤维状、针状在颗粒间延伸，有时两边的黏土矿物还连结起来，像“桥”一样横跨孔隙空间。孔隙空间内又形成许多微孔隙，使流体在孔隙内迂回流动，因而严重影响流体的渗流。除上述产状之外，其它的还有高岭石叠片状、伊蒙混层的絮凝状等，而且几种黏土矿物的产状类型也不是单一出现的，有时候以某种类型为主，有时是几种类型共存。不同的黏土矿物产状对岩石吸水特性的影响程度是有差别的。

3.1.2　孔隙结构的影响

岩石中存在孔隙，必然形成一定的空间，即孔隙空间。这部分空间未被矿物颗粒、胶结物或其他固体物质充填，因此能够被水等流体渗透通过。岩石的孔隙结构是指岩石孔隙的大小、形状、孔间连通情况、孔隙的类型、孔壁粗糙程度等全部孔隙特征。

孔隙有广义孔隙和狭义孔隙之分，广义孔隙是指岩石中未被固体物质充填的空间，包括狭义的孔隙、裂缝和洞穴；狭义孔隙是指沉积物中颗粒间、颗粒内和充填物内的空隙。孔隙按照孔隙之间组合关系可分为孔道和喉道：孔道是被矿物颗粒或其他固体物质所包围的较大的空洞；喉道则是连接两个大孔隙的狭窄通道。按照孔径大小可分为：孔径大于 500 μm 的是超毛细管孔隙，此类孔隙的特点是流体在重力作用下可以自由流动，岩石中的大裂缝、溶洞及未胶结或胶结疏松的砂层孔隙多属此类；孔径小于 0.2 μm 的是微毛细管孔隙，流体若在这类孔隙中移动，则需要非常大的压力梯度，泥页岩中的孔隙一般属此类型；孔径在 0.2 ~ 500 μm 范围内的称为毛细管孔隙，流体需要有超过自身重力的外力作用才能在孔隙中流动，一般砂岩孔隙属此类。此外，按照孔隙之间的连通情况也可分为：连通孔隙、死胡同孔隙、微毛细管束缚孔隙和孤立的孔隙四种。

评价岩石的孔隙结构时，孔隙度是一个不可缺少的参数。通常，孔隙率大的岩样，吸水量较大，吸水速率也相对较高；孔隙率小的岩样，吸水量较小，吸水速率也相对较低。孔隙度的表达式为

$$\varphi = \frac{V_p}{V_b} \times 100\% = \left(1 - \frac{V_s}{V_b}\right) \times 100\% \qquad (1)$$

式中，φ 为岩石的孔隙度；V_p 为岩石的孔隙体积；V_b 为岩石的外表体积；V_s 为固体颗粒体积。

表征岩石孔隙度的指标包括有效孔隙度、绝对孔隙度和流动孔隙度等。研究表明，有效孔隙度对岩石的吸水特性的影响最大，且表现为：有效孔隙度越大，岩石的吸水能力越强。

岩石孔隙结构影响岩石的吸水特性，同时，岩石吸水之后孔隙结构也会发生明显变化：一是填充于粒间孔隙的颗粒和胶结物等会因流体的运移而溶解、破碎和迁移，使主要流体的运移通道扩大，变得更加光滑，连通性变好，孔径变大；二是填充于岩石颗粒间的黏土矿物，如高岭石，对岩石颗粒的附着力很差，在流体剪切力作用下极易从颗粒上脱落和破碎，并随流体在孔隙中移动，造成孔隙通道的堵塞、连通性变差，孔径变小；三是岩石内部和岩石颗粒表面由于流体淋滤、冲蚀等作用，产生了大量新的孔隙，造成孔隙数量大大增加；四是具有膨胀性的黏土矿物吸水之后体积膨胀(如蒙脱石吸水之后，在自由膨胀状态下的体积可达到原体积的成百上千倍)，从而引起岩石内部孔隙空间减小，孔径变小，水流受阻[36]。因此，岩石吸水之后孔隙结构的变化情况不同，会使得岩石吸水过程中各个时间段上的吸水速率有所差异，如果将岩石吸水量与时间的关系绘制成图形，一般有三种形式：上凸型、直线型和下凹型。

3.1.3　黏土矿物微观结构

不同黏土矿物内部微观结构上的差异使黏土矿物的显微形貌有其各自特征。黏土矿物微观结构包括黏土矿物晶粒本身的形态、大小和表面，黏土颗粒在空间的排列方式，孔隙状况以及黏土颗粒的接触与连接，黏土矿物微观结构直接影响微孔隙的形态与尺

寸，进而影响岩石的吸水性。如蜂窝状结构不易形成孔角毛细水，对水流的阻力小，相同吸水时间内吸水量大，试样吸水速率较高。絮团状结构由于孔多且孔径大孔隙连通性好，吸水速率均匀，吸水曲线多呈直线型[37]，因此吸水率较大。

3.1.4　其他影响

ZHANG 等[38]利用自主研发的软岩气态水吸附系统研究了泥岩吸附气态水的特性。试验得出：随着时间的推移，岩石吸附的水蒸气的量在不断增加，直到达到一个峰值，之后趋于平缓(见图1)，同时得出吸附水蒸气的量与蒙脱石含量的关系(见图2)。这说明了软岩吸水(气态水)特性与时间也有很大关系。

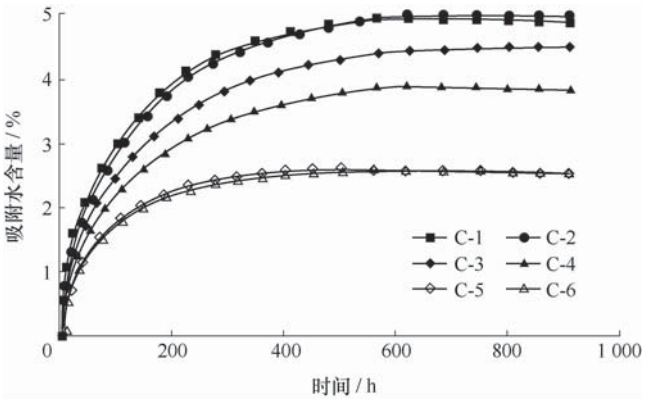

图1　吸附水蒸气含量与时间的关系

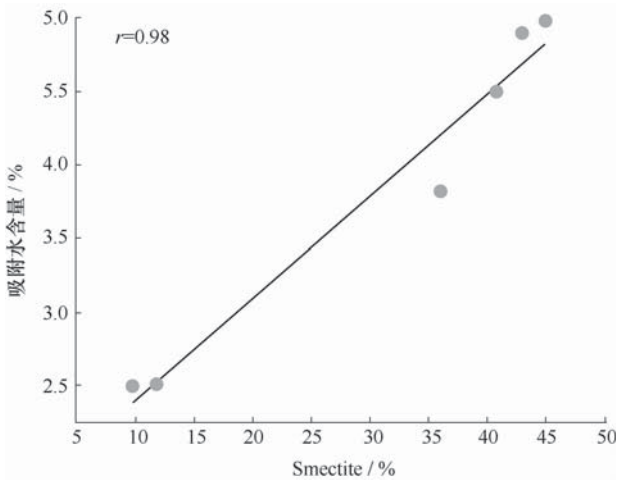

图2　吸附水蒸气含量与蒙脱石含量的关系

连清旺等[39]通过研究发现高岭石软岩的吸水特性具有明显的尺度效应，饱和吸水率随软岩块体尺度的增加而降低，并趋于一个稳定值；同时也发现，随着干湿循环次数的增多，岩样块体的饱和吸水率增大，增速逐渐变缓，并趋向于某一恒定值。

柳培玉等[37]对砂质泥岩岩样进行了有水压和无水压2种条件下的吸水试验，得出了不同水压条件下岩样吸水量和吸水速率随时间的变化特性(见图3、图4)。研究表明：有压吸水试验的吸水速率剧增，随后又开始呈下降趋势。无水压试验曲线平缓发展，吸水速率一直呈下降趋势。有压吸水的吸水量明显大于无压吸水的吸水量，同一时间有压吸水曲线与无压吸水曲线的落差，反映的就是水压对岩石吸水量的影响 。

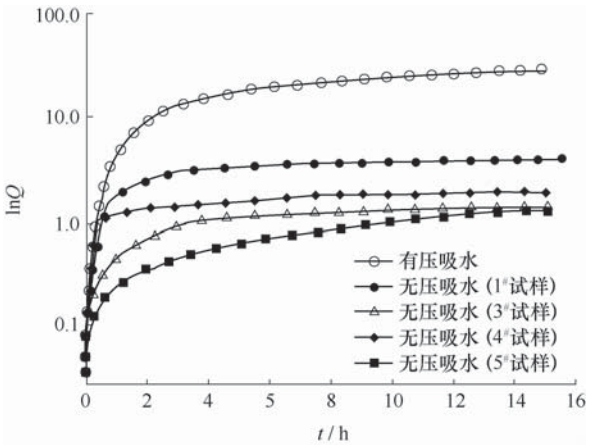

图3　有压吸水 $\ln Q-t$ 曲线

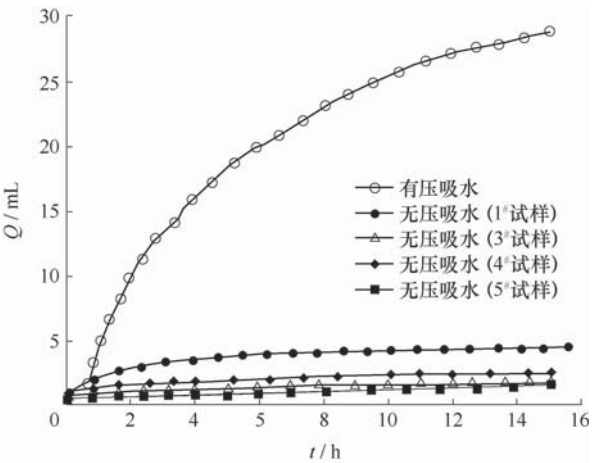

图4　无压吸水 $\ln Q-t$ 曲线

综合前人研究可知，软岩吸水特性与外界各种环境的变化也有很大关系。已有的研究主要集中在黏土矿物或孔隙结构对岩石吸水特性的影响上，因此今后我们还需要多考虑外界环境的变化对软岩吸水特性的影响，因为软岩所处的工程地质环境总是复杂多变的。此外，由于影响岩石吸水特性的因素复杂，若单一地分析某一种因素对其吸水性的影响是不合理的，只有综合分析多个因素对岩石吸水性的影响，才能正

确指导我们进行工程设计与施工。

3.2　软岩吸水失稳机理

软岩吸水失稳机理比较复杂，然而综合现有的研究，基本可知：软岩在水环境作用下的失稳是因为水对岩石产生的力学作用、化学作用和物理作用使得岩石内部微观结构发生变化，从而导致岩石发生变形失稳。黄宏伟等[13]对不含蒙脱石的华北中生代煤系地层的泥岩进行了研究，通过分析其遇水软化过程中微观结构随时间变化的动态特征，得出泥岩中的矿物颗粒在水的作用下，颗粒间的连结将逐渐破坏，使水分进入层状颗粒之间，从而在岩石内部产生不均匀内应力以及大量的微孔隙。这些微孔隙的出现破坏了岩石的内部结构体系，从而使泥岩在宏观上产生软化崩解的现象。因此，软岩吸水失稳与是否含蒙脱石等膨胀性极强的黏土矿物并无直接关系。此外，有学者从损伤力学角度出发来研究二者相互作用机理，如康红普[40]首次运用损伤力学理论分析了水对岩石强度和变形的影响，证明损伤力学理论能较好的反映岩石遇水损伤特征。综合多方面的研究来看，随着对软岩吸水失稳的研究越来越多，形成的理论也越来越完善，因此对软岩吸水失稳机理的探索会更加容易，这对于解决工程实际问题有重大的意义。

4　结　论

(1)软岩与水的相互作用可分为力学作用、物理作用和化学作用。

(2)孔隙结构和矿物成分(主要为黏土矿物)等是影响软岩与水相互作用的重要因素。此外，水压力、软岩块体尺度、软岩的干湿循环次数和吸水(浸水)时间等也会不同程度的影响软岩吸水。

(3)软岩吸水失稳的原因是黏土矿物微观结构发生劣化的过程，而是否含蒙脱石等吸水性极强的黏土矿物只是起到一个促进作用，但并非软岩失稳的根本原因。

5　研究展望

综合前人的研究成果发现，对于软岩与水相互作用的研究已经较为完善，许多领域已经形成了一致的结论。然而，依然存在部分不足，未来一段时期，水岩相互作用的研究还应该向以下几个方向发展：

(1)目前对软岩与水相互作用的研究主要集中在力学、物理或化学作用单方面对其力学特性的影响上。在实际工程中，水岩力学、物理和化学作用对岩石的劣化通常并非单一出现，而是相互影响、相互促进的过程。因此，在理论研究中更应该考虑它们之间的多场耦合作用，而不应该局限于单一作用。

(2)随着核磁共振技术的不断发展，水岩相互作用对岩石的强度劣化过程可以通过核磁共振测试试验来分析。即通过对岩样在劣化损伤过程中的孔隙变化进行扫描，得到相应的 T_2 谱曲线、孔隙度以及孔隙成像等数据，从而准确的反映岩石的动态损伤特征。与传统的称重法、CT 扫描法等相比，核磁共振试验研究具有快速直观、高精度、信息全面等优势，因此在今后的研究中应大力推广。

(3)对各类软岩吸水的规律已有较为全面的认识。但是，软岩本身的微观结构对其吸水及流体运移的影响机理还有待进一步的深入研究，如何能够定量的将软岩微观结构对软岩吸水的影响反映出来，是需要深入研究的地方。

(4)随着数值分析方法越来越多的应用于岩土工程，已经能够借助数值分析软件来模拟工程实际情况。如果能够利用数值模拟软件研究水岩相互作用，如用 FLAC 软件来模拟水岩相互作用时的流固耦合，将会给下一步研究带来很大的突破。

(5)对软岩遇水之后的吸水特性及破坏机理的研究比较多，但对如何采取措施改善软岩吸水特性或者找到合适的处理方法从微观上改变软岩的结构进而控制软岩的失稳变形的研究还比较少。显然，对软岩改性的研究更具有实用价值。

参考文献：

[1]　柏建彪，王襄禹，贾明魁，等．深部软岩巷道支护原理及应用[J]．岩土工程学报，2008，30(5)：632-635.

[2]　李学彬，杨仁树，高延法，等．杨庄矿软岩巷道锚杆与钢管混凝土支架联合支护技术研究[J]．采矿与安全工程学报，2015，32(2)：285-290.

[3]　何满潮，景海河，孙晓明．软岩工程力学[M]．北京：科学出版社，2002.

[4]　李焯芬，王可钧．高水平地应力对岩石工程的影响[J]．岩石力学与工程学报，1996，15(1)：26-31.

[5]　王文龙，靖洪文，杨大林．高水平应力软岩巷道破坏机理分析及对策[J]．煤矿安全，2010，41(9)：129-132.

[6]　何满潮，景海河，孙晓明．软岩工程地质力学研究进展[J]．工程地质学报，2000，8(1)：46-62.

[7]　熊德国，赵忠明，苏承东，等．饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究[J]．岩石力学与工程学报，2011，30(5)：998-1006.

[8]　CIANTI M O，CASTELLANZA R，PRISCO C D. Experimental study on the water-induced weakening of calcarenites[J]. Rock mechanics and rock engineering，2015，48(2)：441-461.

[9] HUANG X L, LIU J J, YANG C H, et al. Experimental investigation of Daqing Oilfield mudstone's creep characteristic under different water contents[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(S1): 471-474.

[10] HADIZADEH J, LAW R D. Water-weakening of sandstone and quartzite deformed at various stress and strain rates[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 1991, 28(5): 431-439.

[11] 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.

[12] 朱宝龙, 李晓宁, 巫锡勇, 等. 黑色页岩遇水膨胀微观特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3896-3905.

[13] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 866-870.

[14] 杨建林, 王来贵, 李喜林, 等. 遇水-风干循环作用下泥岩断裂的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3606-3612.

[15] 刘镇, 周翠英, 朱凤贤, 等. 软岩饱水软化过程微观结构演化的临界判据[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 661-666.

[16] 吴礼舟, 李部, 孙萍. 甘肃甘谷裂隙泥岩剪切蠕变行为及其修正模型研究[J]. 地质力学学报, 2017, 23(6): 923-934.

[17] 王伟, 李雪浩, 朱其志, 等. 水化学腐蚀对砂板岩力学性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2559-2566.

[18] 刘新荣, 傅晏, 郑颖人, 等. 水岩相互作用对岩石劣化的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 77-82.

[19] 汤连生, 张鹏程, 王思敬. 水-岩化学作用的岩石宏观力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 526-531.

[20] 王伟, 刘桃根, 吕军, 等. 水岩化学作用对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3607-3617.

[21] FENG Xiating, LI Shaojun, CHEN Sili. Effect of water chemical corrosion on strength and cracking characteristics of rocks: A review[J]. Key engineering materials, 2004, 261-263: 1355-1360.

[22] 何满潮, 周莉, 李德建, 等. 深井泥岩吸水特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1113-1120.

[23] 张娜, 柳龙标, 侯东文, 等. 深部煤矿钙质页岩吸水特征实验研究[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(5): 10-15.

[24] 郭志飚, 王炯, 邓小卫, 等. 深部软岩巷道围岩吸水后抗压强度变化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(3): 40-42.

[25] 仵彦卿. 地下水与地质灾害[J]. 地下空间与工程学报, 1999, 19(4): 303-310.

[26] 王思敬, 马凤山, 杜永廉. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 1-9.

[27] PRICK A. Dilatometrical behaviour of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles[J]. Catena, 1995, 25(1): 7-20.

[28] PARDINI G, GUIDI G V, PINI R, et al. Structure and porosity of smectitic mudrocks as affected by experimental wetting-drying cycles and freezing-thawing cycles[J]. Catena, 1996, 27(27): 149-165.

[29] 周翠英, 朱凤贤, 张磊. 软岩饱水试验与软化临界现象研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1709-1715.

[30] 傅晏. 干湿循环水-岩相互作用下岩石劣化机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

[31] 周翠英, 彭泽英, 尚伟, 等. 论岩土工程中水—岩相互作用研究的焦点问题: 特殊软岩的力学变异性[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 124-128.

[32] 张娜, 赵方方, 张毫毫, 等. 岩石气态水吸附特性及其影响因素实验研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(4): 336-347.

[33] 王桂莲, 李德建, 何满潮, 等. 岩石吸水特性及其孔隙结构变化研究[C]//何满潮. 中国软岩工程与深部灾害控制研究新进展. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2009: 251-255.

[34] 张娜, 何满潮, 郭青林, 等. 敦煌莫高窟围岩吸水特性及其影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 222-229.

[35] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 北京: 石油大学出版社, 2005.

[36] 赵杏媛, 张有瑜. 黏土矿物与黏土矿物分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.

[37] 柳培玉, 张娜, 何满潮, 等. 平庄煤矿砂质泥岩吸水特性试验研究[J]. 金属矿山, 2011, 40(9): 49-53.

[38] ZHANG N, HE M, LIU P. Water vapor sorption and its mechanical effect on clay-bearing conglomerate selected from China[J]. Engineering geology, 2012, 141/142(4): 1-8.

[39] 连清旺, 柴肇云. 高岭石软岩吸水尺度效应试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2011(6): 53-55.

[40] 康红普. 水对岩石的损伤[J]. 水文地质工程地质, 1994(3): 39-41.

(责任编辑　王海锋)