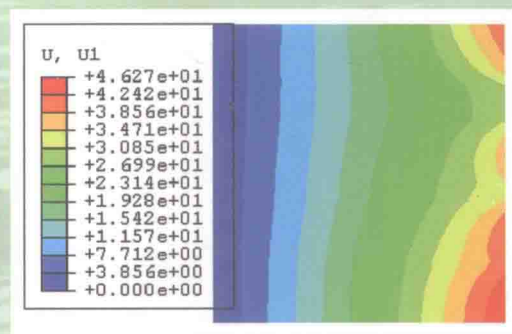
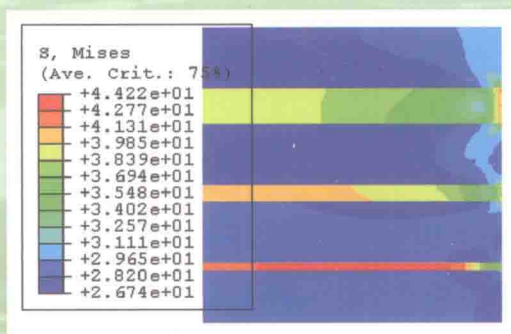
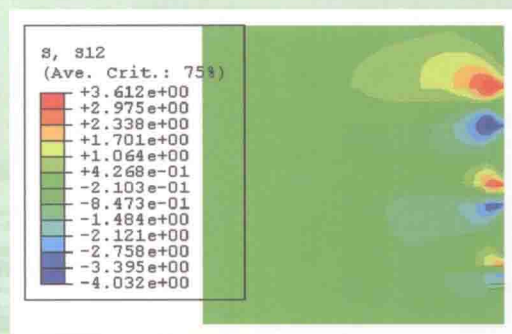
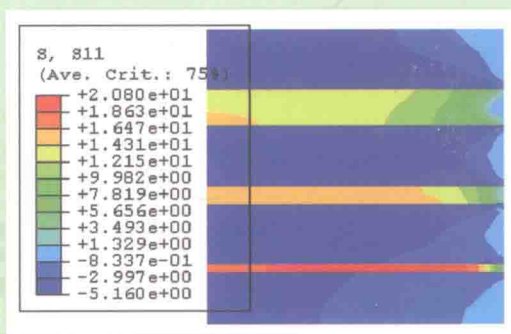


CENGZHUANG YANYAN LIXUE TEXING JI BIANXING JILI

层状盐岩力学特性 及变形机理

王安明 著



地质出版社

层状盐岩力学特性及变形机理

王安明 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书针对我国能源地下储存中的层状盐岩力学特性和变形机理进行研究, 主要包括: 盐岩力学特性试验研究(包括压缩试验、蠕变试验、声发射试验等)、层状盐岩因弹性参数不匹配引起的差异变形问题研究、层状盐岩因蠕变率不匹配引起的差异变形问题研究、层状盐岩非线性蠕变本构模型以及平顶山盐矿废弃盐腔稳定性研究等。另外还开展了平顶山盐矿物探试验及盐岩电阻率试验。

本书可供从事层状盐岩地下能源储存研究、设计和施工的科研人员和工程技术人员参考, 也可供该专业高等院校教师、研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

层状盐岩力学特性及变形机理/王安明著. —北京:
地质出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-116-09318-8

I. ①层… II. ①王… III. ①层状构造—岩石力学—
研究—中国 IV. ①P583

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 152135 号

责任编辑: 韩 博 白 铁

责任校对: 王素荣

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010) 66554528 (邮购部); (010) 66554623 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 66554686

印 刷: 北京地大天成印务有限公司

开 本: 889 mm × 1194 mm $1/_{16}$

印 张: 7.25

字 数: 250 千字

版 次: 2015 年 8 月北京第 1 版

印 次: 2015 年 8 月北京第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-09318-8

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

能源是一个国家的经济命脉,一旦发生能源危机,将引起社会的严重动荡,破坏经济持续发展,保障能源安全的重要手段之一是建立国家战略石油储备。盐岩由于其低渗透特性和良好的蠕变行为,成为能源储存的理想介质,利用深部盐岩洞穴进行能源地下储备成为国际上广泛认可的能源储备方式。西方发达国家如美国、德国、法国等都已建起了大量的盐岩地下油气库群,用于国家战略能源储备。在我国,由于国家能源储备的巨大需求,能源盐岩地下储备也已成为能源战略储备的重点部署方向,盐岩地下储库群大规模兴建已经开始,如已经建成并储气的江苏金坛盐岩储气库,同时大型地下盐岩石油储库群也将在金坛盐矿兴建。

然而值得注意的是,国外一般是在巨厚的、NaCl 含量很高的深部盐丘(盐岩单层厚度大于200m)中建造溶腔型储库;我国盐岩矿虽然分布广泛,但至今尚未发现巨盐丘构造的盐岩矿床。我国盐岩的基本特点是“盐岩层数多,单层厚度薄,不可溶夹层含量多,一般为含有众多夹层的互层盐岩体,通常称之为层状盐岩体”。众多夹层的存在将对溶腔储库的围岩稳定性及渗透特性等产生显著的影响,由于我国盐岩储存特点与国外有很大的不同,国外成熟的盐岩能源储存技术不能用于我国,显然在我国层状盐岩中实施能源储备将更具复杂性。因此针对我国层状盐岩储存特点有针对性地进行研究,对于实施国家盐岩能源战略储备和商业储存有重要的理论意义和实际价值。

本书通过试验研究、理论分析及数值模拟方法,对层状盐岩力学特性及变形机理进行研究,主要内容包括:第1章,绪论;第2章,盐岩及泥岩夹层力学特性试验研究;第3章,平顶山盐矿物探试验;第4章,层状盐岩因弹性参数不匹配引起的差异变形问题;第5章,层状盐岩因蠕变率不匹配引起的差异变形问题;第6章,层状盐岩非线性蠕变本构模型;第7章,平顶山盐矿废弃盐溶腔长期稳定性研究。

本书是在国家自然科学基金(51004049)、河南省科技创新人才计划(154100510006)、河南省重点科技攻关项目(152102210111)、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开放基金研究课题(Z013010)、河南省教育厅2010年度自然科学研究计划项目(2010A480002)等的资助下完成的,在此对上述资助单位表示衷心感谢!

本书的部分研究内容是在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完成的,期间得到导师杨春和研究员、李银平研究员等的大力指导和帮助,也得到华北水利水电大学刘汉东教授、黄志全教授等的指导支持和鼓励;部分内容是与河南省煤田地质局资源环境调查中心、中盐皓龙盐化有限公司和河南省煤田地质局四队等一起合作过程中完成的。在此一并致以衷心的感谢!

本书第3章平顶山盐矿物探试验得到河南省煤田地质局张先哲教授级高工、张利民高工、宋建军教授级高工及北京合地威技术开发有限公司河南分公司蒋传琳高工等指导与帮助,本书还得到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施锡林博士、纪文栋博士、华北水利水电大学于怀昌博士和雷家华硕士等的帮助。在此对他们表示感谢!

由于作者水平限制,书中难免有疏漏及不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者
2015 年 4 月于郑州

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 层状盐岩力学特性试验研究	(2)
1.3 层状岩体力学特性理论研究	(2)
1.4 层状盐岩溶腔建设	(3)
1.5 层状盐岩一些关键问题研究	(3)
第2章 盐岩及泥岩夹层力学特性试验研究	(5)
2.1 概述	(5)
2.2 平顶山盐岩和夹层单轴、三轴压缩力学性质试验	(5)
2.2.1 试样准备	(5)
2.2.2 单轴压缩试验	(6)
2.2.3 三轴压缩试验	(8)
2.3 平顶山盐岩蠕变力学试验	(12)
2.3.1 试验概述	(12)
2.3.2 样品采集、加工要求	(12)
2.3.3 蠕变试验设备	(12)
2.3.4 试验过程	(12)
2.3.5 试验结果	(13)
2.4 层状盐岩单轴压缩过程声发射试验	(13)
2.4.1 试验方案	(13)
2.4.2 声发射事件试验结果分析	(14)
2.5 层状盐岩蠕变过程的声发射试验	(20)
2.5.1 试验方案	(20)
2.5.2 层状盐岩蠕变声发射试验结果分析	(21)
2.6 层状盐岩界面微观分析	(29)
第3章 平顶山盐矿物探试验	(32)
3.1 平顶山盐田地质概况	(32)
3.1.1 平顶山盐田区域地质概况	(32)
3.1.2 研究靶区盐矿地质	(34)
3.1.3 试验区地质可储性分析	(37)
3.2 物探方法的选取	(37)
3.3 地面物探工程的布置	(38)
3.4 可控源音频大地电磁法 (CSAMT)	(38)
3.5 CYT 法	(39)
3.6 TEM 法	(41)
3.7 平顶山盐岩电阻率测定试验	(43)

3.7.1	测试仪器	(43)
3.7.2	测试样品	(43)
3.7.3	测试过程	(43)
3.7.4	测试结果及分析	(44)
第4章	层状盐岩因弹性参数不匹配引起的差异变形问题	(45)
4.1	概述	(45)
4.2	层状盐岩体细观应力场和位移场有限元分析	(45)
4.3	第一类层状盐岩模型分析	(46)
4.3.1	单轴压缩模拟结果分析	(46)
4.3.2	三轴压缩模拟结果分析	(48)
4.4	第二类层状盐岩模型分析	(50)
4.4.1	单轴压缩模拟结果分析	(50)
4.4.2	三轴压缩模拟结果分析	(51)
4.5	对层状盐岩圆柱型试样的单轴压缩模拟结果分析	(53)
4.6	层状盐岩加载破坏机理分析	(56)
第5章	层状盐岩因蠕变率不匹配引起的差异变形问题	(57)
5.1	概述	(57)
5.2	两相或多相复合蠕变相互作用问题研究简述	(57)
5.3	有限元模型建立和计算工况	(57)
5.4	单轴压缩下层状盐岩蠕变过程分析	(58)
5.4.1	因蠕变率不匹配导致应力重分布问题	(58)
5.4.2	因蠕变率不匹配对层状盐岩蠕变效应的影响	(64)
5.5	三轴荷载下层状盐岩蠕变分析	(65)
5.5.1	对三轴加载第一种模型的分析	(65)
5.5.2	对三轴加载第二种模型的分析	(68)
5.6	有关问题的进一步讨论	(68)
第6章	层状盐岩体非线性蠕变本构模型	(70)
6.1	概述	(70)
6.2	层状盐岩体非线性蠕变本构模型	(70)
6.2.1	层状盐岩体细观力学非线性蠕变模型基本框架	(70)
6.2.2	泥岩夹层与盐岩层本构模型建立	(71)
6.3	层状盐岩体非线性蠕变本构方程具体推导过程	(73)
6.4	层状盐岩体各向异性非线性蠕变本构模型增量形式	(76)
6.5	固体蠕变的有限元分析方法基本理论	(78)
6.5.1	弹性域中的有限元分析	(78)
6.5.2	含蠕变应变的有限元分析	(79)
6.5.3	非线性问题的增量迭代解法	(79)
6.5.4	蠕变分析显式算法	(80)
6.6	ABAQUS 有限元计算基本原理	(80)
6.6.1	有限元软件介绍	(80)
6.6.2	UMAT 子程序设计	(81)
6.7	本构模型二次开发增量迭代算法主要实现步骤	(82)
6.8	试验验证与讨论	(82)

第7章 平顶山盐矿废弃盐岩溶腔长期稳定性研究	(84)
7.1 废弃盐岩溶腔井组工程概况	(84)
7.2 计算模型的建立	(84)
7.3 本构模型及参数确定	(89)
7.4 溶腔稳定性分析计算方案	(89)
7.5 溶腔稳定性分析	(91)
7.5.1 盐岩溶腔溶蚀完毕后位移应力分布	(91)
7.5.2 溶腔废弃2年后位移应力塑性区分析	(93)
7.5.3 溶腔在注采气运行10年后应力位移塑性区分析	(96)
7.5.4 D1-2单井溶腔在某压力下不同运行时间的体积变化分析	(99)
7.5.5 D1-1与D1-2溶腔群在运行10年后的应力位移塑性区分析	(99)
参考文献	(103)

第1章 绪 论

1.1 引 言

能源是一个国家的经济命脉,一旦发生能源危机,将引起社会的严重动荡,破坏经济的发展,争夺国际石油资源,保障能源安全,已经成为大国间政治和经济斗争的重要方面,而保障能源安全的重要手段之一是建立畅通的石油进口渠道并建立国家战略石油储备。美国、日本、德国、法国等能源消费大国把建立国家战略石油储备当成保障国家能源安全的重要组成部分,据资料显示,作为世界第一、二大石油消费国的美国和日本,以及欧盟各成员国,都以法律的形式规定其石油储备量为各国60~90天的消费量,以应对紧急事态和突发事件,满足非常时期国家对石油的需求。国际经合组织也要求成员国储备90天的石油进口量作为应对石油危机的重要措施。作为第三大消费国的中国,在进口原油日益增长的情况下,20世纪末期石油储备能力只能满足18天的需求,与其他国家相比差距甚远。从1993年开始,我国已成为石油进口国,2002年进口原油近 $6000 \times 10^4 \text{t}$,预计2020年石油供需缺口为 $2 \times 10^8 \text{t}$ 。对外国石油资源的依赖程度由过去的20%分别上升到40% (2010年)和50% (2020年)。国内能源资源短缺,原油供应的稳定性,安全性问题愈加突出(雍自权等,2004),石油、天然气等能源的战略储备就成了当务之急。对外国石油的供应依赖程度越高,我国原油市场受国际市场影响程度也将越深,这显然与中国未来的经济发展对能源的需求不相适应。因此,中国必须建立石油战略储备和民间商业储备,以应对可能发生的突发事件,以保证我国国民经济持续稳定发展。

能源(石油、天然气)储存方式主要有三种,即陆上储罐、海上储罐和地下储备。而“9·11”恐怖事件表明,陆上和海上能源储罐也有可能成为恐怖袭击的目标,能源地下储存一般放置在盐岩、非渗透性岩层以及多孔隙岩层中。盐岩非常适合地下能源储存和核废料地下处置。盐岩具有非常低的渗透特性(渗透率小于 10^{-20}m^2) (P Berest et al., 1996; Ph. Consenza et al., 1998)与良好的蠕变行为,能够保证储存硐库的密封性;其力学性能较为稳定(损伤与损伤自我恢复),能够适应储存压力的变化;而盐岩溶解于水的特性使盐岩硐库的施工开挖更加容易和经济。盐岩地下能源储存库具有许多优点,特别重要的是安全性高,十分有利于战备,被称为“高度战略安全的储备库”。因而盐岩作为(石油、天然气)能源地下储存的理想介质在欧美等西方发达国家得到了广泛应用。

当前,国外盐岩地下储存从总体上看有两种类型:一种是盐丘(主要分布在德国,美国,英国,加拿大等国家);另外一种为层状盐岩,层状盐岩在美国和加拿大很多地区都有分布包括:横跨得克萨斯(州)、俄克拉何马(州)、堪萨斯(州)、科罗拉多(州)和新墨西哥的二叠纪盆地,横跨南得克萨斯(州)、路易斯安娜(州)、密西西比(州)、亚拉巴马的海湾沿岸盆地和横跨密歇根(州)、俄亥俄(州)、宾夕法尼亚(州)和纽约的密歇根和阿巴拉契亚盆地所有这些地区的层状盐岩结构都是分层的,而且有一些非盐材料(泥岩,页岩,石膏等)作为夹层(G Han et al., 2006)。

与国外大量存在的“盐丘型”储层条件和层状盐岩储层条件不同,我国盐岩层分布存在着盐岩层多,单层厚度薄,盐岩体中一般含有众多夹层(如泥岩层等)的独有特点,其一般为盐岩中含有不同厚度水平泥岩夹层和盐岩层交替出现的互层盐岩体(刘江,2006)。由于我国盐岩层分布具有层数多、杂质多的特点,在这种特殊地层中建腔进行长期能源储存国际上没有先例可循,国外储气库的建设经验不能直接借鉴到我国储气库的建设中。因此,针对层状盐岩能源储存中的围岩力学及变形机理和地质可储性等关键科学问题开展相关研究是十分必要的。

1.2 层状盐岩力学特性试验研究

在地下工程、矿山工程、石油天然气核废料贮存等工程结构设计与施工中,都大量存在着与沉积岩层有关的层状岩石力学问题,一种是分布有一组占绝对优势结构面(如层面、片理面等)的层状岩体(Richard, 1987; 肖树芳, 1987; 孙广忠, 1983; 沈明荣, 1993; 张玉军等, 2002)。另外一种则是层状复合岩体问题(解学福等, 1989; 刘立, 2000), 本书的层状盐岩体属于后者。由于复合岩石是由多种不同属性、不同厚度、不同组分并以不同结合方式按某种顺序组合而成的天然层状材料,其力学和变形特性显然不同于前者的单一岩石,复合岩石力学的研究重点在于反映复合岩石的多相不均匀性、各向异性、层间界面力学性质、复合体力学效应以及力学性质的不匹配性质(刘立, 2000),非层状的岩土工程复合体也有类似的问题(李新平等, 2006)。

一些专家学者对层状岩体的这些问题进行了系统的研究,在盐岩和泥岩相关力学试验研究的基础上,刘江、杨春和等对层状盐岩进行了单轴及三轴压缩试验,单轴及三轴蠕变试验,同时进行了层状盐岩界面抗剪强度试验,扫描电镜试验,结果显示湖北云应层状盐岩界面不是一个弱面等;关于界面的研究也同样引起了其他学者的兴趣,易成、谢和平(2006)等进行了轴向受压两体力学模型相互作用的试验研究,主要研究界面黏结性能与整体力学模型之间关系;刘立、邱贤德等(2006)分别模拟强力、中力、弱力3种层间黏结强度(合计3层),以测试层状复合岩石力学参数、变形特性、层间滑动特性等;刘彬、聂德新(2006)开展了软硬相间层状岩体原位变形试验研究和软硬相间层状岩体变形参数的物理模拟试验;Yong Ming Tien (2001)、Hakala M (2007)进行了层状岩体破坏准则和等效弹性参数的相关实验研究。

1.3 层状岩体力学特性理论研究

层状岩体的研究起始于20世纪60年代,主要研究内容是如何确定层状岩体的弹性参数,如 Lekhnitskii (1963)的正交各向异性理论(1963, 1987), Lekhnitskii 从连续介质的广义胡克定律出发,推导出各向异性弹性体的一般方程,为以后层状岩体各向异性的研究奠定了基础;Pinto (1966)研究了层状正交各向异性体, Wardle 等(1972)研究了层状介质等效各向异性体, Salamon (1968)研究了层状介质等效模型等,其中 Salamon 的研究成果影响较大,他将层状岩体简化为一种等效均质横观各向同性介质,进而得到等效横观各向同性介质的五个独立弹性常数。80年代, Gerrard (1982)将 Salamon 的等效模型方法推广,认为层状岩体可以由一种等效的均质正交弹性材料代替,而这种材料的特性可以通过分层岩石的弹性参数来表达。

除关心层状岩体的等效弹性参数以外,随后人们开始选择建立其本构关系,在这方面,国内相应的研究始于20世纪80年代,孙广忠(1987, 2004)对水平和垂直层状岩体本构方程进行过研究;解学福、谭学术(1989)对水平层状岩体的本构关系进行过研究;贺少辉、李中林(1994),余成学、熊文林、陈胜宏(1996),王宏图、解学福等(1999)都对层状岩体的弹塑性本构关系进行过研究。另外,张玉军(1999)建立了用于层状岩体的弹塑性模型、黏弹-黏塑性模型和破坏准则;肖长富、邱贤德等(1991)以不可逆热力学为基础的内时本构理论来研究复合岩石本构方程;刘立、邱贤德(2000)对层状复合岩体的损伤演化方程进行了试验研究,推导了复合岩石三维非线性损伤本构方程及损伤演化方程。

另外应用于层状岩体研究的一个理论是1909年 Cosserat 兄弟提出的 Cosserat 介质理论,由于引进了偶应力及曲率概念, Cosserat 介质理论可以考虑层状岩体间弯曲效应的影响。20世纪80年代将偶应力应用于岩土工程,这方面的研究以葛修润、刘俊(2000);陈胜宏、王鸿儒;D P Adhikary 等(1997)为代表,余成学等用 Cosserat 介质理论解决具有弯曲效应的层状结构岩体变形问题;针对湖北云应盐矿含众多夹层的互层盐岩体,杨春和、李银平等建立了基于 Cosserat 介质扩展本构模型,包括二维、三维

弹性本构模型,并在上述研究和试验研究基础上对层状盐岩压缩破损特征进行了理论分析。

对于层状复合岩体及多相复合岩土体,赵平劳和姚增(1990)较早地提出了用复合材料力学方法来进行研究,他们以层状结构岩体为对象,应用复合材料力学原理,采用动、静态力学试验获得了层状结构岩体的本构关系;刘考学(1990)研究了互层和节理岩体的黏弹性模型,将层状复合岩体宏观上看成复合材料,其实质是将细观上非均匀介质进行均匀化处理,即只关心其宏观等效性质,这一思想在其他岩土工程复合体研究中得到较好的应用,沈珠江等提出岩土材料二元介质模型的一般应力应变关系;Weidinger P, Hunsche(德国)根据细观力学方法对不纯净盐岩建立了一个弹黏塑性复合模型;李新平、杨海天等基于复合材料思想分别对锚杆岩体和节理岩体宏观复合本构模型进行了数值研究,这些研究对于层状复合岩体的研究也有借鉴意义。

1.4 层状盐岩溶腔建设

由于在层状盐岩中有盐岩材料和非盐类材料的相互作用,较盐丘型盐岩相比,层状盐岩力学性质及其溶腔稳定性分析要复杂得多,刘飞,宋桂华(2004)提到,国外已经开发出针对含有夹层的薄盐层中盐穴储库三维地应力数值模拟分析软件,运用该软件对国外含有夹层的薄盐层中盐穴储库进行分析,作者认为选择使用合适的地质模型进行评估是层状盐层安全建造和运行盐穴储气库的关键;Kerry L DeVries, Kirby D Mellegard等(2002)针对 Michigan and Appalachian Basins 对含大夹层层状盐岩溶腔进行了试验研究,理论分析和数值模拟,作者发展了一个新的基于应力的破坏准则,并用这个准则来估算储气库中盐岩应力的损伤临界值,从而通过数值模拟来估算层状盐岩中溶腔的最小容许内压。Gang Han, Mike Bruno(2006)对 WIPP 项目层状盐岩溶腔变形进行数值模拟,主要考虑了盐岩层和非盐层(石膏、灰岩等)以及界面层,其中盐岩层大多还含有一些不溶物,用 WIPP 蠕变黏塑性模型主要是改进溶腔设计和增加储气量;陈锋、杨春和等对金坛大夹层层状盐岩进行了试验、理论和数值模拟分析;对于含众多小夹层层状盐岩的研究,杨春和、李银平、尹雪英等(2007)开发了等效 Cosserat 介质扩展弹塑性本构模型并对云应层状盐岩溶腔进行了稳定性分析。

1.5 层状盐岩一些关键问题研究

关于层状盐岩体,国内外盐岩力学专家对其中的一些关键岩土力学问题发表了自己的观点:

Michael S Bruno 用 FLAC3D 对美国 Midland Basin Cavern 层状盐岩溶腔进行了三维数值模拟,并检查了层状平面的滑移以及由于压力循环和盐岩的长期蠕变导致的溶腔变形问题,作者认为在层状盐岩溶腔中下面的岩土力学问题会限制最大和最小内压:

- 1) Fracture in heterogeneous materials;
- 2) Differential deformation and bedding plane slip;
- 3) Propagation of damage around single and multiple cavern;
- 4) The minimum cavern pressure that may induce roof instability or excessive closures;
- 5) Improved design recommendations for single and multiple cavern configurations in various bedded salt environments.

Guangjie Y, Shen R, PetroChina(2006)认为与比较均匀的盐丘相比,金坛层状盐岩溶腔的建成和运营将面临更多工程挑战:

- 1) The layered, heterogeneous lithology(层状不均匀的岩性);
- 2) Differential deformation, creep, and bedding plane slip between individual layers;
- 3) Somewhat larger lateral to vertical cavern dimensions.

Langer M 认为储藏库建设的核心是围岩的模拟,这样的模拟应该是尽可能地接近现场的条件,包括地质条件、应力条件和本构模型。

杨春和、李银平认为建立反映我国层状盐岩体本构模型及长期强度方程是层状盐岩废弃溶腔油(气)地下可储性研究中的关键理论问题。

梁卫国、杨春和、赵阳升等认为在对层状盐岩储库进行数值模拟中需要更仔细地考虑夹层的性质,但选择层状盐岩这一区域的力学特性其困难是相当大的。

峪保平、赵阳升(2006)认为我国地下能源储存库及核废料处置库无论采用垂直硐室还是水平硐室,都不可避免地受高盐分泥岩夹层的影响,高盐分泥岩夹层及含高盐分泥岩夹层的盐岩的研究就成为盐岩矿床油气储库硐室稳定性分析的关键性问题所在。

这些年来,围绕这些关键问题,研究者们开展了一系列的研究工作,取得了丰硕的研究成果,但是由于各个地方盐岩层分布的多样性和复杂性以及溶腔建造的特殊性,仍然可以进一步开展有针对性的研究工作。目前深部盐矿油气储库水溶造腔控制理论与技术是一个研究热点,与传统的盐矿采卤不同,由于造腔更加注重溶腔体积和形状、顶板保护,对水溶造腔技术提出了诸多挑战。李银平、杨春和等(2012)认为研究主要集中于盐矿夹层分布特征、夹层垮塌机制与控制、造腔管柱动力特性及工程应用等5个方面的关键问题:

- 1) 层状盐岩沉积特征及盐岩—夹层界面力学特性。研究表明,油气储库建腔目的层所含夹层类型众多,盐岩—夹层界面的特性也大相径庭,有的是弱面,而有的相互嵌入没有明显的界面,这就要求众多学者应就我国陆相沉积盐矿沉积特征开展系统的探测和研究。

- 2) 关于夹层的溶蚀及力学特性弱化,目前仅就金坛地区含盐泥质夹层开展了研究,在云应、潜江等储气库还存在大量泥质硬石膏及泥质钙芒硝等难溶夹层,下一步应针对不同成分的夹层进一步开展研究,用于指导不同赋存特性盐矿的水溶造腔控制。

- 3) 水溶造腔施工是一个漫长和不可见的过程,造腔设计经验不足,且过度依赖造腔模拟数值软件,会导致施工难以顺利开展。关于造腔实施效果模拟和验证的室内实验方法尚十分缺乏,如何配置合适的模型材料开展室内造腔模拟,应是近期需要突破的技术瓶颈之一。

- 4) 造腔管柱动力特性的研究目前只是一个初步探讨,如何综合考虑正、反循环对造腔工艺的影响,水锤与管柱横向振动耦合的影响,以及造腔管柱水平支撑的可行性及对管柱动力特性影响,研究实际造腔施工中如何规避管柱失稳破坏,也是值得深入探讨的问题。

第2章 盐岩及泥岩夹层力学特性试验研究

2.1 概述

在能源地下储存及废弃物地下处置库的设计、施工和运行中,正确获取和运用盐岩以及夹层的强度与变形参数直接关系到这些硐库的安全稳定性。为了研究盐岩以及夹层的强度与变形特性,本章在对平顶山盐矿地质资料进行充分调研的基础上,对盐岩和泥质硬石膏夹层岩样(以下称夹层)开展力学性质试验研究,主要的试验项目包括:盐岩样和夹层样室内单轴、三轴压缩试验,盐岩样单轴蠕变试验,层状盐岩单轴压缩声发射试验及蠕变声发射试验等。

试验按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—1999)、《水利水电工程岩石试验规程》(SL 264—2001)和国际岩石力学学会《岩石力学试验建议方法》的要求控制试验各个环节,以此确保每项试验指标的准确性。

2.2 平顶山盐岩和夹层单轴、三轴压缩力学性质试验

2.2.1 试样准备

试验所需盐岩样和夹层样取自平顶山盐田,属于平盐1井,样品分为盐岩样和夹层样两种,部分盐岩和夹层样从道1井取出,样品深度为1198~1520 m。

试样单、三轴压缩试验所取岩心为圆柱形,直径 $D=100\text{ mm}$, $L:D=1:2\sim 1:2.5$ 。由于盐岩和泥岩具有遇水溶解的特点,采用干式锯磨法进行全部试样的加工。先切割两端面,然后对两切割端面进行手工打磨到符合试验要求的标准,环表面仅进行简单加工打磨,试样加工如图2.1所示。泥岩和盐岩两种岩石试样特征,见表2.1和表2.2。

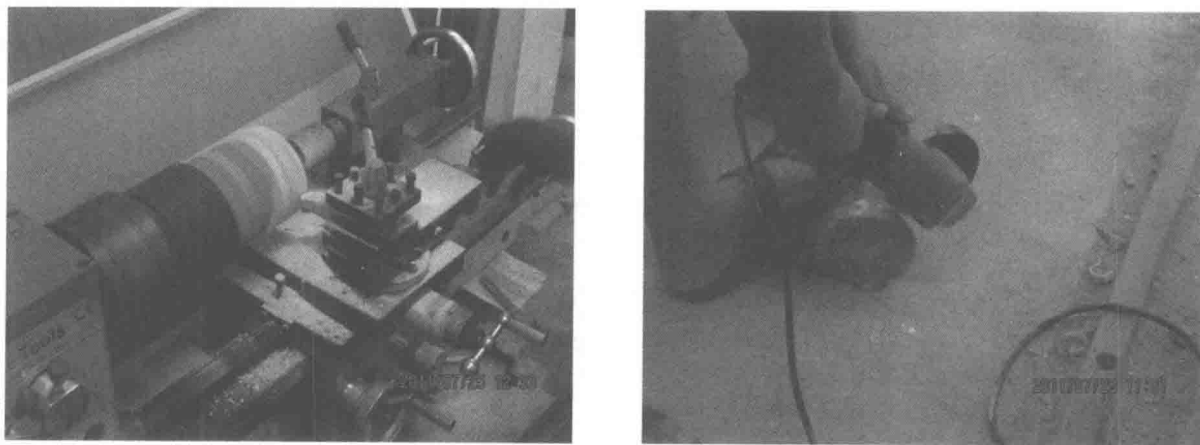


图2.1 试样加工

表 2.1 夹层试样特征

试样编号	长度 L/mm	直径 d/mm	质量/ g	密度/ $10^3 \text{ g}/\text{mm}^3$	岩性描述
37-10	226.8	92.6	3888	2.54	泥质硬石膏岩
41-8-1	234.1	89.5	3667	2.49	泥质硬石膏岩
26-4	232.0	90.5	3742	2.50	泥质硬石膏岩
47-16	191.5	92.1	3415	2.67	泥质硬石膏岩
23-6	191.8	89.7	3066	2.53	泥质硬石膏岩
34-7-1	203	88.6	3160	2.52	泥质硬石膏岩

表 2.2 盐岩试样特征

试样编号	长度 L/mm	直径 d/mm	质量/ g	密度/ $10^3 \text{ g}/\text{mm}^3$	岩性描述
26-6-3	231.4	87.3	3091	2.23	含钙质芒硝盐岩
44-7-1	213.0	87.6	2845	2.21	含钙质芒硝盐岩
28-15	205.0	84.3	2576	2.25	含钙质芒硝盐岩
7-8	235.8	87.2	2997	2.13	含钙质芒硝盐岩
25-17	227	88.3	2988	2.15	含钙质芒硝盐岩
28-7	174.1	88.3	2322	2.18	含钙质芒硝盐岩
20-13	189	88.0	2374	2.07	含钙质芒硝盐岩
26-6	192.9	88.3	2613	2.21	含钙质芒硝盐岩

2.2.2 单轴压缩试验

2.2.2.1 试验介绍

将圆柱形试样两端加上压头然后用密封套密封, 安装上应变传感器, 放入压力室, 轴向加压直至试样破坏, 在试验过程中记录试样的荷载和应变值。单轴压缩试验的目的是为了确定: ①单轴抗压强度; ②弹性模量; ③泊松比。试验的温度为常温 (20°C), 单轴压缩试验采用应变速率控制, 本次单轴压缩试验的加载应变速率均为 $2.5 \times 10^{-5}/\text{s}$ 。

根据试验得到的数据可以用来估计单轴抗压强度 σ_c 、杨氏模量 E 和泊松比 ν , 其计算公式为:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_1} \quad (2.2)$$

$$\nu = -\frac{E}{\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_3}} \quad (2.3)$$

式中: P 为峰值荷载; A 为试样横截面面积; $\Delta\sigma$ 为应力差; $\Delta\varepsilon_1$ 和 $\Delta\varepsilon_3$ 分别为轴向和径向的应变差。

2.2.2.2 单轴压缩试验结果

分别对泥岩试样 (2 个)、盐岩试样 (2 个) 进行单轴压缩试验, 试样如图 2.2 ~ 图 2.5 所示, 试验结果见表 2.3 和表 2.4, 单轴应力应变曲线如图 2.6 ~ 图 2.9 所示。

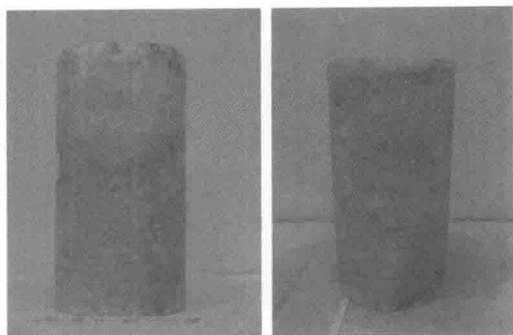


图 2.2 盐岩试样



图 2.3 单轴压缩试验后的盐岩试样

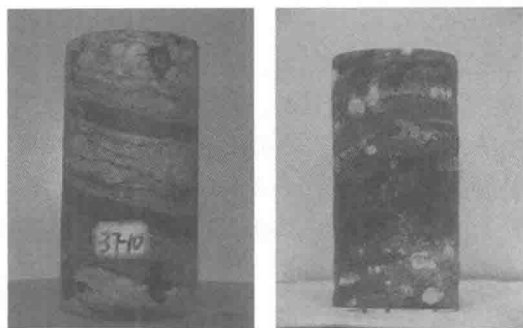


图 2.4 夹层试样



图 2.5 单轴压缩试验后的夹层试样

表 2.3 夹层单轴压缩结果

	试样编号	峰值应力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
夹层	37-10	27.03	15.84	0.190
	41-8-1	16.04	4.52	0.269
平均值		21.54	10.18	0.230

表 2.4 盐岩单轴压缩试验结果

	试样编号	峰值应力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
盐岩	26-6-3	17.71	5.28	0.411
	44-7-1	21.88	8.06	0.313
平均值		19.80	6.67	0.362

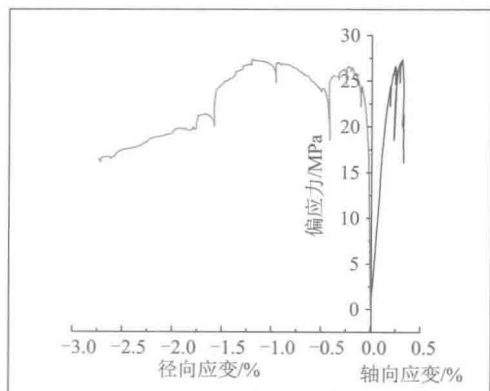


图 2.6 37-10 夹层单轴压缩应力应变曲线

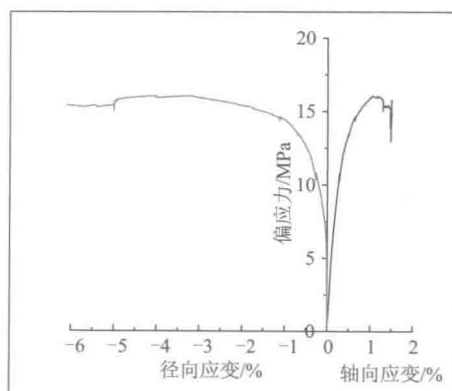


图 2.7 41-8-1 夹层单轴压缩应力应变曲线

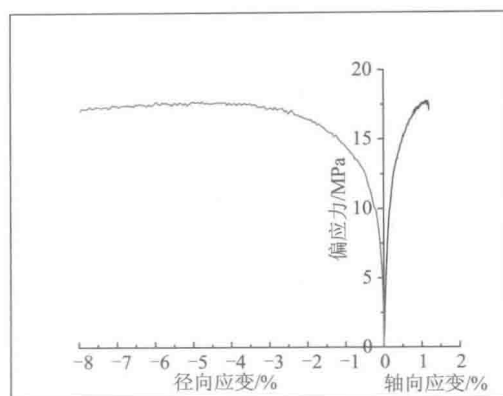


图 2.8 26-6-3 盐岩单轴压缩应力应变曲线

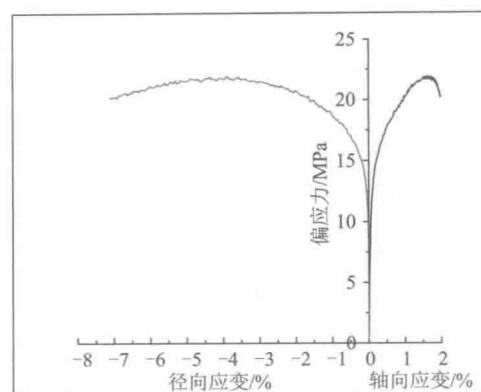


图 2.9 44-7-1 盐岩单轴压缩应力应变曲线

从试验结果可以知道, 夹层的平均抗压强度为 21.55 MPa, 平均弹性模量为 10.18 GPa, 平均泊松比为 0.230; 盐岩的平均抗压强度为 19.80 MPa, 平均弹性模量为 6.67 GPa, 平均泊松比为 0.362。

比较两种岩石试样的单轴压缩应力应变曲线可以知道, 当应力达到峰值应力时, 盐岩轴向应变较大, 泥岩较小。泥岩弹性模量是盐岩的 1.5 倍左右, 泥岩的泊松比是盐岩的 0.64 倍左右, 相同的单向应力下变形能力盐岩比泥岩大许多, 单轴抗压强度泥岩也比盐岩大, 因此层状盐岩在单轴压缩应力下, 其变形主要由层状盐岩中的盐岩层贡献。

从图 2.6、图 2.7 与图 2.8、图 2.9 对比来看, 单轴压力作用下, 随轴向应力的增加, 盐岩与夹层的轴向应变和体应变均增加, 但无论是轴向应变和体应变, 盐岩层均比夹层的大很多。可以看出, 无论是轴向变形能力还是体积扩容能力, 盐岩层均比夹层大很多, 盐岩层比夹层体现出更好的延性变形特征。而从应力应变曲线特征来看, 在达到峰值应力之前, 夹层的应力和应变曲线近于直线, 体现出脆性变形的特征 (图 2.6, 图 2.7)。因此当两者组成软硬互层两相复合盐岩体时, 其中的夹层将对盐岩的变形能力有重要的影响, 在压缩应力状态下其轴向变形将主要是盐岩层的变形起控制作用。

从总体上看, 盐岩试样与夹层试样的单轴压缩应力应变曲线大致可以分为压密、弹性、屈服和破坏四个阶段。

1) 压密阶段。应力应变曲线呈下凹状, 主要是由于岩石试样内部原生空隙、微裂纹受压闭合造成的。这一阶段岩石微裂纹受压闭合, 产生瞬时压缩变形, 使岩石矿物颗粒间紧密接触, 岩石的变形是不均匀的, 随着应力的增加, 变形增加较快。

2) 弹性阶段。这一阶段, 由于岩石矿物颗粒间的黏结发生破坏产生新的微裂纹, 应力增加较快而应变增加较为缓慢, 应力应变曲线呈直线状。

3) 屈服阶段。这一阶段, 随着新微裂纹不断产生和扩展, 应力增加变得缓慢而应变迅速增加。盐岩由于晶体颗粒间胶结边界面被削弱, 发生弹性破坏, 从而导致晶体颗粒的位错运动, 产生塑性变形流动, 屈服阶段较长。

4) 破坏阶段。盐岩在达到单轴抗压强度后, 在应变不断增加的情况下应力缓慢降低, 表现出较好的延性特征, 而泥岩夹层则表现出较为明显的脆性破坏。

2.2.3 三轴压缩试验

2.2.3.1 试验介绍

将试样两端加上压头然后用密封套密封, 安装上应变传感器, 放入压力室; 先向试样施加侧压力达到预设值, 在保持侧压力不变的条件下向试样施加轴向压力直至试样破坏, 在试验过程中记录试样的荷载和应变值。三轴压缩试验的目的是为了确定不同围压下岩石的强度参数: ①三轴抗压强度; ②黏聚力 c ; ③内摩擦角 φ 。根据三轴压缩试验得到的数据, 可以通过莫尔-库仑破坏准则来计算盐岩和泥岩的黏聚力 c 和内摩擦角 φ , 其计算公式为:

$$\sigma_1 = A\sigma_3 + B \quad (2.4)$$

式中: $A = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$, $B = \frac{2C\sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$ 为单轴抗压强度。

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{A - 1}{A + 1}\right) \quad (2.5)$$

$$C = \frac{\sigma_c}{2\sqrt{A}} \quad (2.6)$$

2.2.3.2 三轴压缩试验结果

在四个围压 (5 MPa、10 MPa、20 MPa、30 MPa) 状态下分别对平顶山盐矿的夹层试样和盐岩试样进行了三轴压缩试验, 试样如图 2.10 ~ 图 2.13 所示, 试验结果见表 2.5。根据式 (2.4) ~ 式 (2.6) 可以计算出盐岩和夹层的强度参数 C 、 φ 值。结果见表 2.6, 部分应力应变曲线如图 2.14 ~ 图 2.23 所示。

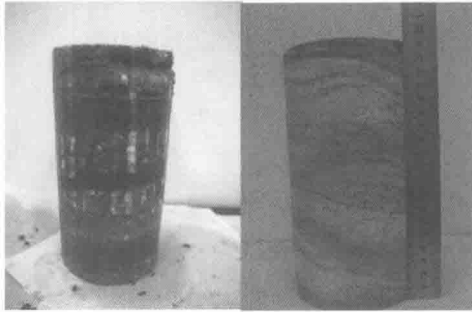


图 2.10 夹层试样

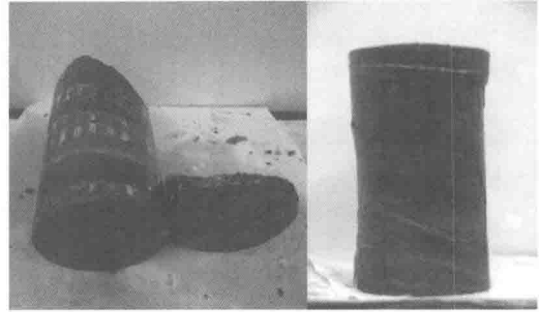


图 2.11 三轴压缩试验后的夹层试样

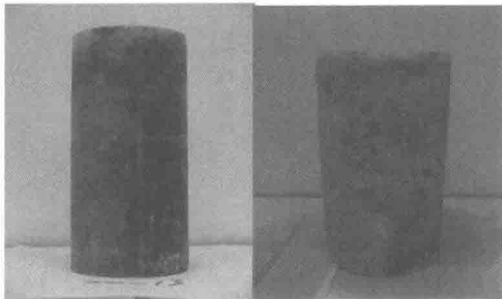


图 2.12 盐岩试样

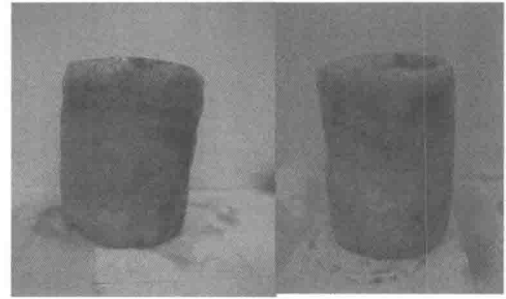


图 2.13 三轴压缩试验后的盐岩试样

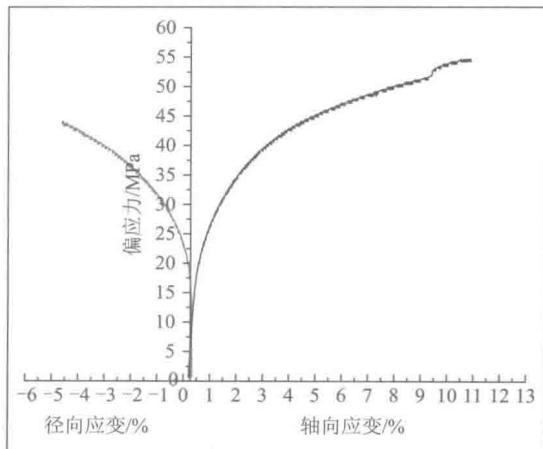


图 2.14 26-4 夹层三轴应力应变曲线 (围压 10 MPa)

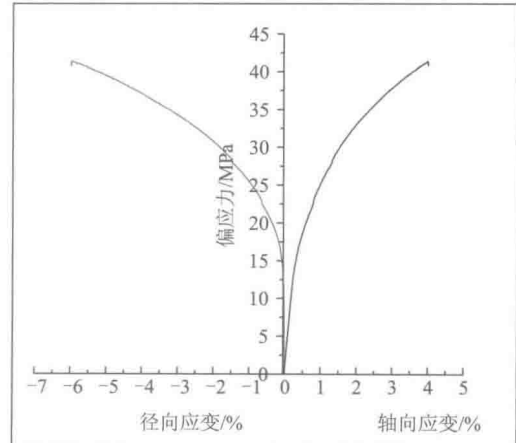


图 2.15 47-16 夹层三轴应力应变曲线 (围压 10 MPa)

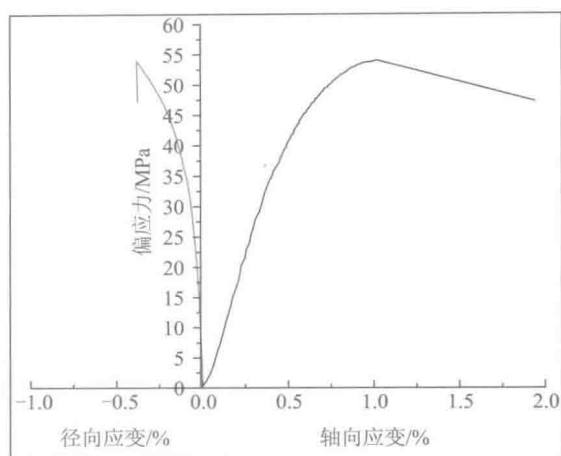


图 2.16 23-6 夹层三轴应力应变曲线
(围压 20 MPa)

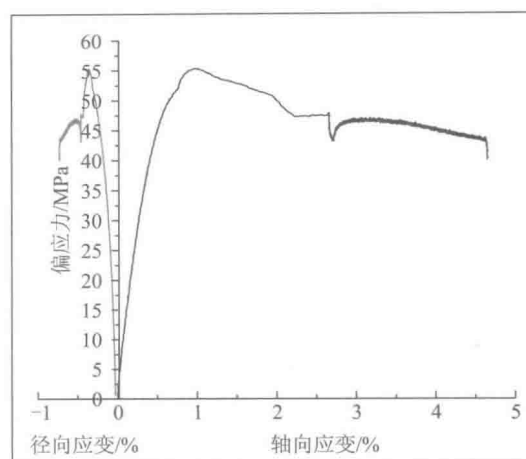


图 2.17 34-7-1 夹层三轴应力应变曲线
(围压 20 MPa)

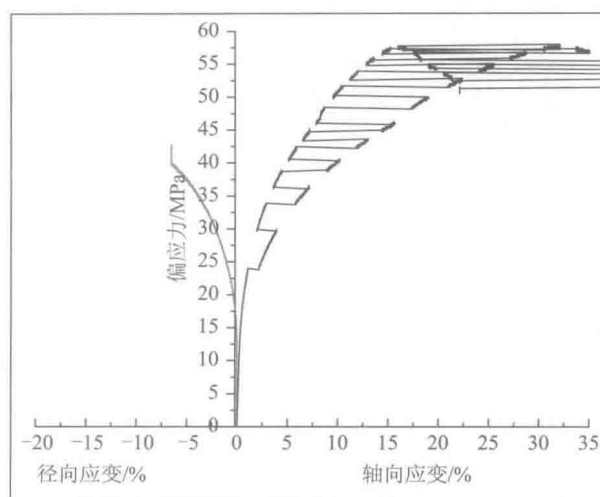


图 2.18 28-15 盐岩三轴应力应变曲线 (围压 5 MPa)

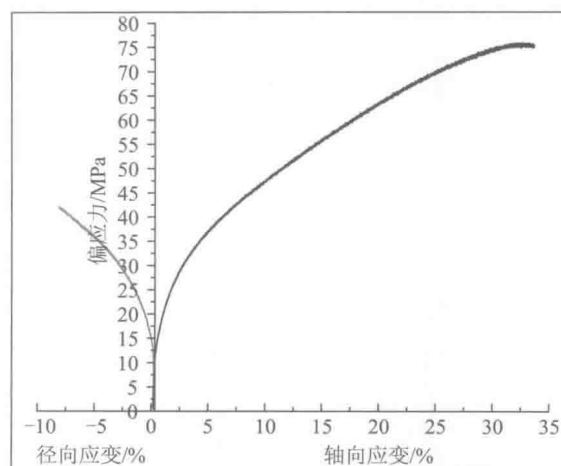


图 2.19 7-8 盐岩三轴应力应变曲线 (围压 10 MPa)

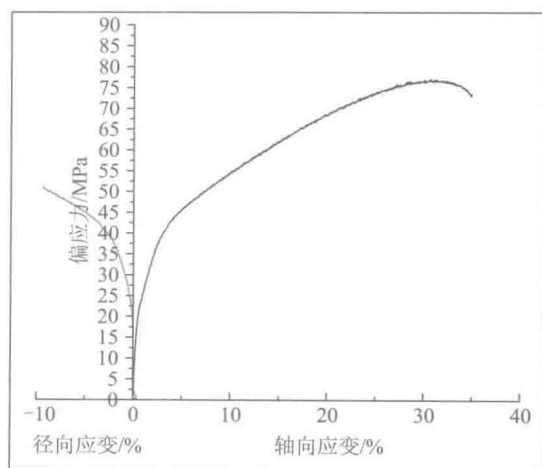


图 2.20 25-17 盐岩三轴应力应变曲线 (围压 10 MPa)

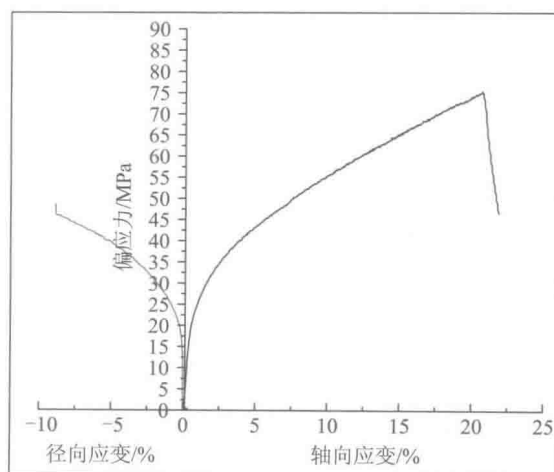


图 2.21 28-7 盐岩三轴应力应变曲线 (围压 20 MPa)