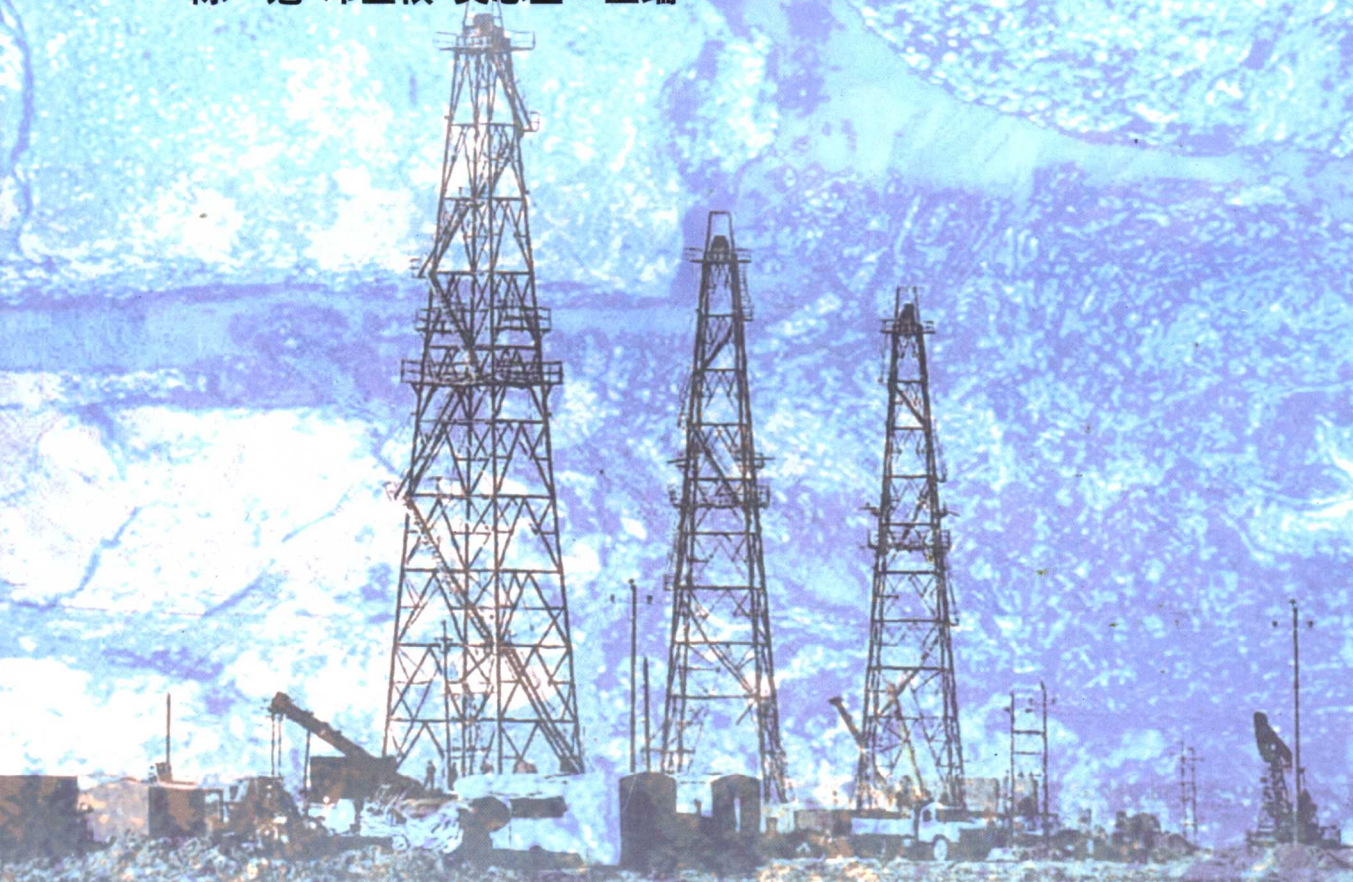


岩石力学 在石油工程中的应用

YANSHI LIXUE ZAI SHIYOU GONGCHENG ZHONG DE YINGYONG

陈 勉 邓金根 吴志坚 主编



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

岩石力学在石油 工程中的应用

陈 勉 邓金根 吴志坚 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本论文集是在第四届全国岩石力学会议论文基础上精选而成。反映了近年来岩石力学研究的新方法、新成果及少量相关学科的发展动向。

本书可供广大从事岩石力学、石油工程的工程技术人员、研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩石力学在石油工程中的应用/陈勉,邓金根,吴志坚主编.

北京:石油工业出版社,2006.4

ISBN 7-5021-5469-8

I. 岩…

II. ①陈…②邓…③吴…

III. 岩石力学-应用-石油工程-文集

IV. TE-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第025966号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心

印 刷:北京晨旭印刷厂

2006年4月第1版 2006年4月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:16.25

字数:410千字 印数:1—500册

定价:40.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

近年来,我国石油工业在钻井及开发工程中遇到了许多世界性的难题。随着勘探开发目标更进一步面向山前复杂地区、面向滩海、面向煤层气、面向深层和低压低渗储层,石油工程面临着提高技术与进一步降低成本的压力,因此加强石油工程新技术的学术交流,促进石油工程技术的发展具有十分重要的意义。

石油工程的工作对象是岩石,加强岩石的力学特性研究及其应用于解决油气开采过程中的工程问题对加快破岩效率,提高钻井速度,保持钻井井壁稳定等都是十分必要的。本论文集收集了与石油工程相关的岩石力学研究论文及部分石油工程技术方面的论文,一定程度上展示了我国石油工程岩石力学的研究动态及技术水平,可为广大从事岩石力学、石油工程的工程技术人员,研究人员提供参考。

本论文集由中国岩石力学与工程学会深层岩石力学学会、中国石油天然气集团公司井壁稳定重点研究室、中国石油储层改造重点实验室共同组织出版。在编辑过程中马春红、李志勇、郭健康、李菊花、陈军海、马强等做了大量工作,在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促和编者水平所限,难免有漏误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2006年2月18日

目 录

石油天然气地下储库建设中的岩石力学问题

.....	于广明	张 莉	路世豹	张拥军	刘 宁	(1)
通过神经网络反演技术钻前预测井壁稳定性	吴 超	陈 勉	金 衍			(8)
声发射技术综述及其在套管损坏研究中的应用探讨	李 军	吴 勇	曾玉祥			(12)
利用出砂管理技术提高油田产能	王治中	邓金根	田 红			(16)
岩石裂纹扩展与破坏机理研究	林英松	阮新芳	朱天玉	蒋金宝	丁雁生	(22)
聚类分析在地层特性评价中的应用	苏新亮	葛洪魁	张召平			(28)
热—流体耦合作用下的页岩应力敏感性分析	薛世峰	R. C. K. Wong	于来刚	孙 峰		(32)
岩石爆破本构模型及数值模拟方法研究	林英松	朱天玉	阮新芳	蒋金宝	丁雁生	(38)
鄂尔多斯盆地前陆区岩石机械特性与地应力分析	张小莉	查 明	王玉环			(43)
重复压裂裂缝转向与地应力场转向关系之探讨	李培超	宋振云	吴增智			(46)
同井同层重复压裂技术中裂缝转向机理研究	许建红	程林松	陈守雨	刘 妍		(50)
致密砂岩储层岩石形变特征对近井区的影响研究	何顺利	田 冷	郑祥克			(56)
基于统计损伤的凝灰岩应变软化本构方程研究	陈要辉	阎 铁	刘 颖	毕雪亮		(61)
大港油田官 88 断块井壁稳定预测研究	侯 冰	刘艳红				(64)
国内外油气井出砂预测方法研究现状综述	陈军海	陈 勉	金 衍			(67)
裂缝性地层应力敏感性研究综述			曹 晶			(75)
油层保护伤害评价新方法——高温高压岩心动态伤害实验仪的研制	吴志坚	余维初				(79)
基于反向工程的钻井复杂情况专家系统	王宝毅	张宝生				(84)
一种牙轮钻头失效实时监测方法	王文广	李树盛	翟应虎			(88)
直井防斜钻具与技术综述			吴筱坚			(92)
K × × 水平井钻井工艺及泥浆技术			陈 浩			(96)
聚磺多元醇钻井液在胜利油田深探井中的应用			李晓明			(99)
振荡波在井筒流体中传播的数值模拟	沈 跃	黄中伟				(103)
水力射孔参数对油水井压裂影响的数值试验	宫俊峰	黄中伟	李根生			(106)
高聚物网络凝胶堵水技术试验与应用			冯永明			(110)
不同裂缝形态压裂水平井的渗流研究	高海红	程林松	曲占庆			(113)
水力裂缝“层内爆炸”采油技术实验研究	林英松	蒋金宝	丁雁生	阮新芳	朱天玉	(119)
吐哈低渗透油田注气提高采收率开发应用技术研究	刘 滨	李菊花	何淑华	王 鹏		(125)
压裂水平井节点系统分析数值模拟方法	雷征东	李相方	张 翼			(133)

智能柱塞气举在低能产液气井上的应用	张金良	吴晓东(138)
端部脱砂压裂纤维复合防砂技术的力学分析	李金发 齐宁 张琪 周福建	蔡文斌(146)
流线法确定超前注水时机的计算模型	田冷 何顺利	顾岱鸿(157)
勘探开发一体化系统运行机制研究	陈胜男 宋杰鲲 张琪	何君(161)
单泵单电机井下油水分离系统设计方法	李恒 薄启炜 曲占庆	张琪(168)
低渗油气藏产能影响因素分析的灰色关联法	于君田	刘广峰(174)
排水采气技术研究与应用		张瑛(177)
文东油田沙三中油藏储层特征对开发的影响	魏金辉 李远超	马春红(182)
超前注水技术在西峰油田的应用效果分析	曲占庆 王在强	潘宏文(188)
小直径尾管采油的原理与应用	齐宁 王在强 曲占庆	潘宏文(193)
低渗透油田丛式井压裂技术研究	文化武	徐胜强(197)
核磁共振技术在低渗透油层改造中的应用	杨晓刚 慕立俊	刘建安(203)
优快复合钻井技术在吉林莫里青油田的应用	杨雄	沈雪(208)
西峰油田三叠系长8储层特征及压裂技术研究		张宏忠(211)
低渗透油田 CO ₂ 吞吐影响因素实验研究	窦武 李良文 梁明 王庆华 牟燕	李晓东(217)
新型防气窜水泥浆体系的研制及现场应用		张学亮(221)
测井方法研究火成岩储层现状及进展	王建国 何顺利	刘广峰(225)
安五油田清防蜡技术应用及效果评价	丑世龙	张文科(230)
安五油田正韵律沉积层水驱效果探讨	丑世龙	张文科(237)
套管头密封失效原因分析		黎小刚(243)
油水乳状液黏度预测方法研究概况及进展	窦丹	宫敬(247)

石油天然气地下储库建设中的岩石力学问题[●]

于广明¹ 张莉² 路世豹¹ 张拥军¹ 刘宁¹

(1 青岛理工大学;2 中国石油天然气华东勘察设计研究院)

摘 要:根据我国对石油天然气地下储备的急需,论述了石油天然气地下储备的重要意义和国内外研究现状,给出并深入分析了石油天然气地下储备工程开挖应考虑的基本岩石力学问题,分析了地下开挖对地应力、岩土环境的破坏机理,进而交待了地应力评价和围岩稳定分析的方法,应用地质动力区划方法分析了地下开挖对地应力扰动的机理和地应力重新分析的规律,评价了区域地应力的稳定性,提出了保持围岩稳定性的岩体与支护系统共同作用原理。

关键词:地下储库 洞室 渗流 耦合 红外辐射

一、前言

随着我国经济的迅速发展,石油消费量也在快速增长。中国目前已经成为世界第二大石油消费国,世界上第三大石油进口国。国内石油产量日益不能满足能源消费需求,石油供需之间的矛盾十分突出。据预测分析^[1],2010年和2020年石油需求量将分别达到3亿吨~3.2亿吨和4亿吨~4.3亿吨,国内石油高峰产量预计达到1.7亿吨和1.8亿吨,石油供需缺口分别为1亿吨和2亿吨以上。与石油的短缺相比,国内天然气资源在短期内可以满足国内需求,长期仍然需要依赖进口。据预计,2010年全国天然气市场需求量为1000亿立方米,2020年达到2000亿立方米。到2010年,中国天然气供需缺口将为150亿立方米,到2020年,供需缺口将加大到800亿立方米。

目前世界上主要石油进口国都已经建立了自己的石油储备,把建立战略石油储备作为控制石油风险给政治、经济和国家安全带

来负面影响的重要手段之一。由于我国的石油天然气资源相对短缺,对国外石油资源的依赖度日益提高。为保障石油、天然气资源安全和稳定供应,提高对国际突发事件的应变能力,保障国民经济安全、稳定、可持续发展,尽快建立我国石油天然气储备体系,建设地下油气储备库具有十分重大的意义,也可谓大势所趋。

地下能源储存(包括各种油气储存及压气蓄能等)并非始自今日,1915年北美的加拿大利用改造过的油气田来储存天然气,这是人类最早尝试将天然气储存到地下^[2]。到1999年底,全球投入运营的储气库共有602个,工作气储存能力达到3004亿立方米,相当于世界天然气消费量的12.5%。

由于地下储库洞室被包围于岩土体介质(围岩)中,会遇到许多比较复杂的岩石力学问题,既要考虑如何防止周围介质对地下工程的不良影响,如围岩塌方、地下水渗漏等,又要考虑如何尽量利用周围介质的有利功能,如把围岩改造成洞室本身的支护结构,发

● 国家自然科学基金重点项目(项目编号:50434020)、国家自然科学基金面上项目(项目编号:50274044),山东省自然科学基金重点项目(项目编号:Z2003F02),国家安全生产监督管理局研究计划。

作者简介:于广明,青岛理工大学土木工程学院院长,电话:0532-85071278,手机:13306428008,邮箱:yu-guangming@263.net。

挥围岩的自承能力。由此可见,为确保地下洞室的安全和使用,研究地下储库洞室建设过程中与岩石力学有关的问题具有重大意义。

二、地下储库的选址

在进行地下储库洞室总体位置选择时,首先要考虑的是区域稳定性问题。此项研究的进行主要是收集当地的有关地震、区域地质构造史及现代构造运动等资料,运用区域地质动力区划的方法进行综合地质分析和评价^[3]。特别是对于区域性深大断裂交会处,近期活动断层和现代构造运动较为强烈的地段,尤其要引起注意。

一般认为,具备下列条件是宜于建洞的:

- (1)基本地震烈度一般小于8度,历史上地震烈度及震级不高,无毁灭性地震;
- (2)区域地质构造稳定,工程区无区域性断裂带通过,附近没有发震构造;
- (3)第四纪以来没有明显的构造运动。

区域稳定性问题解决以后,即地下工程总体位置选定,进一步就要选择修建地下储库洞室的岩体,一般认为理想的建洞岩体具有以下条件:

- (1)在区域稳定性评价基础上,将洞室选择在安全可靠的地段;
- (2)区域构造简单,岩层厚且产状平缓,构造裂隙间距大,组数少,无影响整修正工程稳定的断裂带;
- (3)岩体完整,成层稳定,且具有较厚的单一坚硬或中等坚硬的地层,岩体结构强度不仅能抵抗静力荷载,而且能抵抗冲击荷载;
- (4)地下水影响小,无有害气体及异常地热;
- (5)其他有关因素。

选址评价技术是建设地下油气储备库关键技术之一,上述因素实际上往往也不能做到十全十美,因为,它所涉及的学科包括地震学、地质力学、沉积学、岩石力学、工程力学、

水文地质学、构造地质学等。我们在具体选择时应根据选库区的地质条件,利用各种资料,综合考虑分析,评价各项建库可行性技术指标,确保工程的建设有一个良好的地质工程环境。

三、地下储库洞室的优化设计

地下储库洞室的优化设计研究是当前地下洞室稳定性研究课题的重要内容,这不仅关系到地下洞室工程的安全,而且对后期的管理运行起着决定作用,对工程投资及施工也有重要的现实意义。在原岩应力为已知的情况下,巷道洞室的二次应力场与洞室的几何形状有密切的关系^[4],地下工程的洞室形状选择对地下工程的稳定性有很大影响,这是在工程实践中被人们所认识到的合理的洞室几何形状可以改善地下工程的受力状态,最大限度地减少围岩的破坏,充分发挥围岩的自承能力,以利于洞室的维护。

对地下储库洞室群的优化,最优先考虑的两个主要问题是:一是洞室断面形态的优化;二是相邻洞室开挖后,相互之间带来的影响,即洞室之间的间距优化。而断面形态与间距两者调整变化之中又存在相互依赖的因果关系。

然而,要很好地处理这两个问题首先要遇到的问题是地下应力场的大小测量、地下应力场与渗流场之间的耦合关系以及地下洞室围岩体岩体物理力学参数的选取,它关系到工程投资及安全运行等问题。

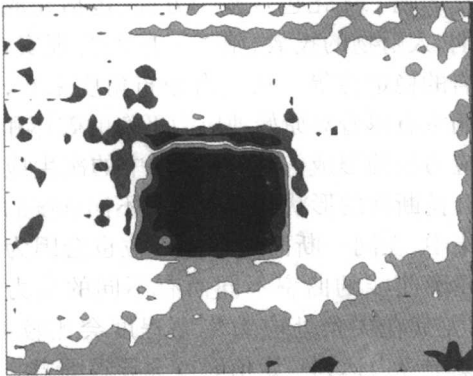
1. 原始应力场与次生应力场^[5]

原始应力是引起地下储库洞室围岩变形和破坏,产生各种地质动力现象的根本作用力。矿山各种岩石力学计算和岩体稳定性分析依据的载荷条件主要就是测量得到的地应力。实际上,地下洞室开挖是一个十分复杂的动态开挖过程,即便忽略了地应力场测量过程中与实际值之间产生的可能较大误差,地应力场经过多次开挖扰动后,次生应力场

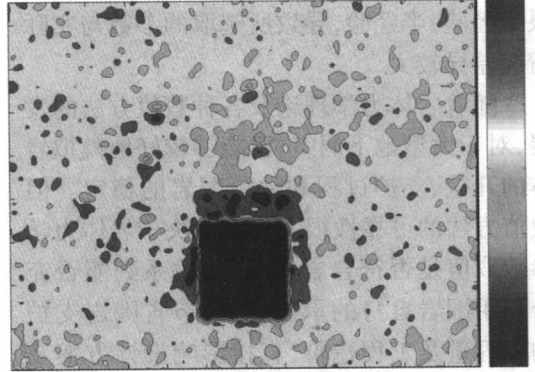
与测量值之间的差别也比较显著,而具体到某一地下工程稳定与否,实际上是受次生应力场控制的。

鉴于地应力原位测量方法的局限性,寻求一种经济实用而又相对可靠的地应力场实时分析确定方法近年来一直是岩体工程界研究的热点问题之一。无论空心包体法、全波列声波法,还是水力致裂法、井壁崩落地应力反演、压磁应变计法、声发射法等,都无法有效地进行采动应力的实时检测和判断围岩的稳定性。本文提出将红外辐射探测技术应用在地下储库建设的围岩稳定性监测中,通过

开挖过程中围岩在不同红外波段的红外辐射频谱特征及其温度场变化的规律,研究围岩变形至破坏过程中的红外辐射特征,来确定不同的作用区域,例如弹性区、塑性区、塑性区以及破碎区等。根据相似理论和相关理论及技术,归纳和分析现场数据,使用模糊理论等算法,结合图像处理,找到适合于现场的围岩次生应力的测试方法。图1是锚杆支护前后巷道围岩的红外辐射温度变化规律,从图中直观地判断出弹性区、塑性区和破碎区,从而指导支护方式、工艺和参数。



(a) 没有支护时的巷道红外辐射温度变化



(b) 锚杆支护后的巷道红外辐射温度变化

图1 锚杆支护前后巷道围岩的红外辐射温度变化规律

2. 洞室围岩体内渗流场与应力场的耦合关系

大量的研究表明^[6,12],岩体渗流场与应力场之间存在着耦合作用。洞室周围的位移场、应力场及岩体中渗流水头都要受渗流荷载影响。地下水在岩体中会产生渗流,由于大多数岩石本身的渗透性很小,因此,岩体的水力学性质主要取决于其中的节理空间几何分布、节理间的充填物和力学性质。一方面,在地应力作用下,节理变形会引起节理的水力开度的变化,进而影响节理的渗透性;另一方面,地下水的渗流又会影响节理中的孔隙水压力和节理的物理力学性质。因此,岩体中的应力场和渗流场相互作用、相互影响,岩体的整体变形和总体稳定性是二者耦合作用

的结果。这是因为由于岩体中分布有众多的裂隙,应力作用导致裂隙几何特性发生变化,如裂隙开度的张开或闭合、裂隙粗糙性的改变等,从而影响裂隙的透水性而引起整个岩体渗透性发生重大改变。进行应力场—渗流场耦合分析的必要性和重要意义。事实上,由于人类对岩体的水力学效应缺乏足够的认识已经付出了惨痛的教训,如 Malpasset 拱坝的溃决,瓦依昂大坝上游库岸滑坡造成的涌浪等,无一例外地造成重大的损失。所以在明白了研究裂隙岩体渗流与应力耦合作用的重要性和迫切性之后,渗流场与应力场耦合特性的研究这一基础性课题首先成为人们理论和实验研究的重点。由此可见,研究节理岩体在渗流区的变形与破坏规律,科学地分

析节理岩体与地下水的耦合作用关系,客观地评价节理岩体的稳定性,不仅有重要的理论价值,同时也具有重大的现实意义。

3. 洞室围岩体力学参数的选取

目前,岩体力学参数取值主要依据试验成果,辅以工程岩体分级、工程类比、经验判断等评估方法,但依据现有的设备和采集数据的手段,获取地下洞室岩体物理力学参数往往与工程岩体实际性状有较大的出入。究其原因就是人们在处理实际工程时,只考虑了岩体本身的复杂性。而没有考虑岩体的不确定性,从而使得获取参数的手段和方法局限于经验、半经验,导致所选取的参数与实际情况差异较大^[11]。

随着岩体力学理论及各种数值方法的发展,对于大型地下洞室,已能够较好地模拟岩体的开挖、支护过程和评价围岩的稳定。但数值方法的可靠性很大程度上取决于岩体力学参数取值是否符合岩体实际,关系到能否充分利用围岩自身的承载能力,节省围岩支护的工程量及工程造价,直接影响设计方案及其优化。所以,在地下储库洞室优化设计过程中,参数取值一直十分困难,这个问题至今仍是岩石力学领域中的一个研究点^[7]。

四、地下储库洞室开挖与支护

1. 开挖与支护施工顺序与优化

地下储库洞室断面面积往往比较大,并且在大断面洞室周围还交叉建有一些小断面洞室,形成洞室群。尽管通过选址工作,这些大断面洞室的建造通常都选择在了强度高、完整性好的岩体中,但如此大断面,无论是从维护围岩稳定角度,还是从施工安全和施工便利的角度,都不可能一次爆破形成。地下洞室的开挖与支护过程是一个多步骤的,每次开挖都对以后各次开挖产生影响的复杂过程。地下工程结构在施工过程中始终处于加载、卸载的复杂变化过程中,由于开挖具有加

载途径性,所以施工过程不同,开挖顺序不同,支护和充填步骤不同,都有各自不同的应力、变形历史过程和最终不同的力学效应。在一定条件下,改变施工工艺及施工顺序可以使不稳定的岩土工程变为稳定的;相反,不合理的施工工艺和施工顺序可能导致岩土空间的不稳定。在复杂的工程条件下,只依靠简单的工程类比是远远不够的。究竟采用什么样组合才是最好,这需要进行优化,在这一方面国内不少学者做过很多的工作,有不少研究成果^[8]。

对建造一个大型地下储库洞室群来说,完整的施工优化包含多个方面,包括完成的工期、人财物的投放、施工工序的合理安排、围岩的稳定性等。从应力分布角度来看,开挖洞室意味着对原始地应力平衡的破坏和次生应力场的形成,分布在围岩中的次生应力随开挖断面的形状不同而产生不同程度的应力集中,在同一断面的不同部位也会因为断面轮廓曲线的曲率不同而有不同的应力集中,尤其在尖角处应力集中程度会比较大。当集中应力达到一定值时就会导致围岩的塑性破坏,破坏通常自洞室壁向内延伸,在同一断面上存在一定的破坏区面积;另一方面,在形成次生应力场的过程中,也就是围岩向临空面发生变形的过程,在洞室壁的不同部位发生的位移也不同,通常在拱顶或高边墙中部变形较大。而无论次生应力场还是洞壁位移均与开挖的顺序不同有关,因此,利用岩石力学知识深入研究出的合理施工顺序,并制订以岩石力学参数为基础的洞室围岩动态观测支护加固方案,有利于围岩在开挖过程中保持稳定。同时,也能够加快施工进度,降低工程成本。

2. 洞室围岩体稳定性问题

1) 围岩稳定性分类

地下洞室围岩分类,实际上就是应用工程地质类比法进行围岩稳定性评价,为工程的设计和施工提供基础依据,所以具有很重要的实用价值。地下洞室围岩分类在国外

20 世纪 40 年代就很通用,随着对岩体力学特性认识的不断深入、地下工程经验的积累和地下工程施工技术的发展,围岩分类的原则和系统在不断地改进和完善。从单因素分类转变为综合的多因素分类;从定性分析过渡到采用多种手段获取定量指标的定量与定性相结合的分类。在分类研究方面,从单纯的现象学分类研究向与采用数理统计和模糊数学的数学研究方法相结合的方向发展。20 世纪 60 年代以前,大多以岩石的强度作为分类的主要因素,如长期以来一直沿用的前苏联的普氏分类方案,由于分类指标只有一个,即岩石的坚固性系数 f ,指标容易获得,使用直观方便,因此在我国及其他国家的煤炭、冶金等部门至今仍在使用。

众所周知,岩体材料的结构和性质是异常复杂的,影响岩体变形和破坏的因素也是多种多样的,用单一的分类指标不可能准确而全面地反映洞室围岩岩体质量的本质。20 世纪 60 年代以后,从事工程地质、岩土工程等的科技工作者通过不断的探索,选取了能表征洞室围岩工程性质主要特征的各种因素,按照它们对围岩稳定性的影响程度,逐项评分,以总分的高低进行分类,并通过大量实际工程的应用逐渐完善,形成了各种各样较为完善的分类体系。

迄今为止,国内外提出的地下洞室围岩分类方法达百种之多,有代表性的分类方案大致可分为六类^[9]。我国的水电、冶金、煤炭、铁道、建设等部门都结合本部门的特点,分别制订了适合本系统的分类方案,这些分类考虑的主要因素与国外围岩分类基本相同。结合各种岩体工程的特点,我国在 1995 年提出了地下洞室的岩体分类方案 BQ 公式,作为工程岩体分级的国家标准推广执行。现阶段国内外使用较多的仍为 Deere 的 RQD 分类、Barton 的 Q 系统分类、Bieniawski 的地质力学权值分类系统。纵观这些分类系统,它们的共同点在于考虑了三大因素:岩石强度、岩体完整性及结构面性状、岩体赋存的环

境条件(地下水、地应力)等。

2) 围岩稳定性分析

不论是岩体结构类型划分,还是围岩分类,其最终目的都是为了解决地下工程岩体稳定性的评价问题,不仅要定性、半定量地表征岩体稳定状况,还要结合各种工程措施为不同工况下的围岩稳定性计算提供可靠的力学参数。

天然岩体在初始应力场作用下处于平衡状态,经人工开挖后,原始平衡状态被破坏,围岩应力调整后重分布,产生二次应力。若岩体强度能满足调整后的二次应力的要求,洞室围岩进入新的平衡状态;否则,就会发生变形甚至破坏,因此地下洞室围岩稳定性的实质就是围岩二次应力与岩体强度的一对矛盾。与之相关的各种地质因素和工程因素诸如岩性、结构面、初始地应力、地下水、洞室形状和开挖顺序等,都是通过改变围岩应力和岩体强度的对立关系从而影响洞室围岩的稳定性。

目前国内外对地下工程围岩稳定性的分析评价总体上是采用经验判别、数值分析及监测预报三者相结合的办法,其中地下工程岩体结构特征研究、围岩质量分类和稳定性分析计算是三个重要的方面,而且取得了丰硕的成果。

3. 洞室开挖引起的地表沉降

地下储库洞室工程施工是在岩土体内部进行,施工不可避免地使岩土体产生扰动,势必引起地表沉降和变形,地表沉降一定程度时,将影响地面建筑物的安全和地下管线的正常使用。尤其是在地面建筑设施密集的城市中进行开挖施工,一直是人们十分关心的课题。因此,洞室施工时,为减少由于开挖而引起的地表沉降和变形所造成的对地面建筑物及地下设施的损害以及对周围环境的不良影响,必须与保护地面的设施协调起来,同时,对地表移动与变形进行正确预计。为此,人们进行了广泛而长期的研究^[10]。

地表移动可以分为两个组成部分,即地表沉降和水平位移;地表变形主要指不均匀

地表沉降和不均匀水平位移所形成的地表倾斜和水平变形,以及地表的曲率变形。地下洞室施工造成地表移动与变形的发生,主要是由于施工引起的地层损失和施工过程中洞室围岩受扰动或者受剪切破坏所造成的。地层损失是由于多种因素作用的结果,开挖面岩体向洞室内移动,施工断面产生收敛,可以引起地层损失;另一方面,在含水地层中进行洞室施工时,可能引起周围岩体内部孔隙水压力的变化,使地层发生排水固结引起地表沉降,而且岩体蠕变也可能导致地表发生一定的沉降。

影响地表移动和变形的因素很多,地表移动和变形的大小不仅与洞室的埋深、断面尺寸和施工方法、支护方式有关,而且受地质条件的影响。由于国家环境保护意识的不断增强,对于地下洞室开挖施工引起的地表位移与变形及其对周围环境影响预计便显得更加必要。也要求科学技术人员对沉降变形规律及机理的研究要更加深入,使工程的施工对地表环境的影响降低至最小程度。

五、储备库施工及运行期间的监测技术

监测是地下储备库洞室施工和运行的眼睛。设计一套监测系统对储备库洞室围岩变形进行监测,是保证地下储备库安全运行的必备

措施,以便发现异常现象,及时分析处理,及时预报洞室围岩的变形情况,防止产生重大事故和灾害。同时根据已经取得的监测资料,可以预测和预报地下储备库的未来性及发展趋势,并为洞室的鉴定和加固处理提供科学依据。

施工期临时安全监测的主要目的是保证开挖期的施工安全,主要手段有:在重要部位埋设围岩监测仪器(基岩变形计、收敛计等);测量仪器观测;安全员巡视观测。工程的永久监测是保证工程永久运行安全的监测措施,施工期也作为施工安全监测的一部分,这就要求永久观测仪器的埋设必须紧跟开挖工作面,但又必须保证开挖过程中仪器不被损伤和损坏。其主要监测手段有:埋设围岩变形计、收敛计、钢筋计、多点位移计等监测仪器,测量仪器观测等。储备库在运行过程中也要不断进行监测,主要是分析监测储备库的温度、压力、库区水质、土壤,目的是确保储备库的安全运行和不对环境产生危害。

在研究岩石在加载变化中的红外辐射变化规律及特征的基础上,本文提出围岩稳定性的红外监测法。图2是砂岩在单轴加载中的红外辐射温度变化规律,可以看出,随着载荷的增加,岩石的红外辐射强度越大。

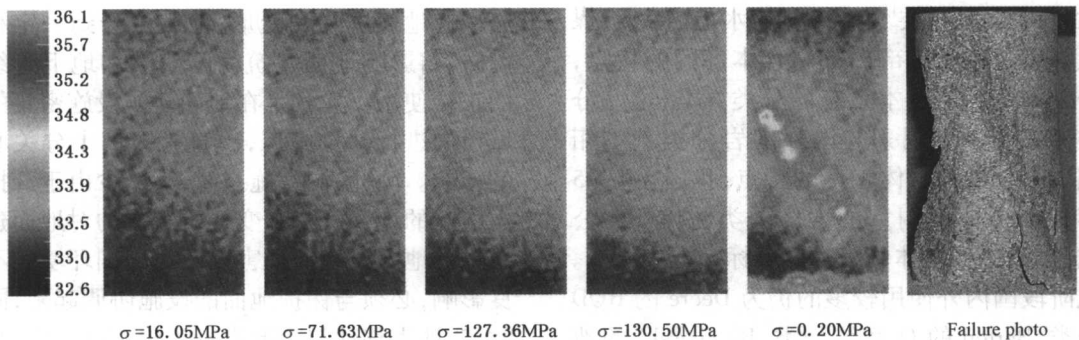


图2 砂岩在单轴加载中的红外辐射温度变化规律

六、结论

总之,建设地下储备库是一项系统工程,需要多学科的配合,整体系统周密地考虑,深化研究,全面展开论证。本文仅地下储库洞室建设运行过程中可能设计到的一些岩石力学问题做了全面的分析及探讨。其实,在文中所涉及到的每一方面的问题还有待我们更进一步深入研究。目前,各学科的发展,各种先进技术的出现及高速计算机在该领域的应用,这些都为我们提供了良好的研究平台。借助这些力量,在我们的共同努力下,地下储库建设过程中出现涉及到的岩石力学问题会得到很好的解决。

参考文献

- 1 李文阳,丁国生等. 我国石油资源地下储备的可行性. 石油化工技术经济,2002,18(1):1418
- 2 李仲奎,刘辉,曾利,廖宜. 不衬砌地下洞室在能源储存中的作用与问题. 地下空间与工程学报,2005,1(3):350357
- 3 于广明,杨伦,苏仲杰等著(2000). 地层沉降非线性原理、监测与控制,吉林大学出版社,2000年10月第1版
- 4 李华晔主编. 地下洞室围岩稳定性分析,煤炭工

业出版社. 1999年10月第1版

- 5 叶源新,刘光延. 岩石渗流应力耦合特性研究. 岩石力学与工程学报,2005,24(14):25182525
- 6 王媛. 单裂隙面渗流与应力的耦合特性. 岩石力学与工程学报,2002,21(1):8387
- 7 周火明,盛谦,熊诗湖. 复杂岩体力学参数取值研究. 岩石力学与工程学报,2002,21(增):2045-2048
- 8 朱万成,唐春安. 地下洞室开挖与支护有限元分析. 岩土工程技术,2001,(1):27
- 9 宋国新,杨子荣,孙祥. 模糊神经网络法在隧洞围岩分类中的应用. 岩土工程技术,2004,18(5):224227
- 10 吴文等. 盐岩中能源(石油和天然气)地下储库稳定性评价标准研究. 岩石力学与工程学报,2005,24(14):24972505
- 11 Broth, E., Use of the underground in Norway. Nilsen, B. and Olsen, J. Proceedings of the international conference of storage of gases in rock caverns. Trondheim, 1989, 313
- 12 Goodall D. Prospects for LNG storage in unlined rock caverns. Nilsen, B. and Olsen, J. Proceedings of the international conference of storage of gases in rock caverns. Trondheim, 1989, 237243
- 13 Liang J, Lindblom U. Critical pressure for Gas Storage in Unlined Rock Caverns. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1994, 31(4):377386

通过神经网络反演技术钻前预测井壁稳定性

吴超 陈勉 金衍

(中国石油大学石油天然气工程学院,北京)

摘要: 声波速度和地层密度是进行井壁稳定预测所必需的重要参数,根据地震记录与声速及密度之间存在的非线性关系,以地震资料为基础,可以通过小波神经网络反演声速和密度资料。从井旁地震道中提取能全面反映地震记录非线性特征的分形和混沌属性,运用反向传播神经网络建立已钻井地震属性与声速及密度的映射关系,通过此模型反演待钻地层的声波速度和地层密度。利用反演结果结合井壁稳定力学模型,确定安全泥浆密度窗口,实现钻前井壁稳定预测。利用该方法钻前反演出塔里木油田某井的声波和密度测井曲线并预测了该井的安全泥浆密度窗口,与实测数据进行对比分析的结果表明,该预测方法有较高的预测精度。

关键词: 井壁稳定预测 地震属性 小波神经网络 反演 安全泥浆密度窗口

一、引言

利用地震层速度钻前预测井壁稳定性已得到广泛应用^[13],这种方法基于层速度与安全泥浆密度窗口上下限的关系模型直接通过层速度进行预测,但是该方法从速度资料获取到预测精度都存在一些问题。另一方面,利用测井资料进行井壁稳定分析相对较为成熟,它以从测井资料中得到声波速度和地层密度为基础进行井壁稳定计算,但该技术无测井资料的情况下无法直接预测井壁稳定。

探区内的地震记录资料非常丰富,地震记录与界面反射系数密切相关,而反射系数又由声速和密度所决定,所以地震记录和声速及密度之间存在紧密的非线性关系,可以运用神经网络这一有效的非线性建模工具通过地震资料反演声波速度和地层密度。地震资料具有较强的非线性性质,从地震记录中提取的分形和混沌属性参数可以深刻反映其非线性特征^[46],因此利用地震记录的分形

和混沌属性反演声波速度和地层密度并经一步预测井壁稳定性有着坚实的物理基础。

二、地震非线性属性的提取

从井旁地震道中提取 Hurst 指数、关联维数、Lyapunov 指数和 Kolmogorov 熵这四种具有代表性的分形和混沌属性用于神经网络反演。

1. Hurst 指数

设已知地震记录序列为 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 则其前 τ 个时刻的均值为

$$(Ex)_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} x_i \quad (1)$$

由此可求得累积离差

$$X(i, \tau) = \sum_{i=1}^i (x_i - Ex_{\tau}) \quad (2)$$

极差为

$$R(\tau) = \max X(i, \tau) - \min X(i, \tau) \quad (3)$$

标准差为

作者简介:吴超,中国石油大学在读博士,手机:13161788405,邮箱:wuchao9138@sina.com。

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - Ex_{\tau})^2} \quad (4)$$

根据统计分析存在 $\frac{R}{S} \propto \left(\frac{\tau}{2}\right)^H$, 其中 H 为 Hurst 指数, 它反映了地震分形序列是否存在长久的长程相关性。

2. 关联维数

地震记录的关联维是把地震时间序列通过重建相空间的方法所构成的混沌吸引子的分形维数, 它体现了地震序列的复杂程度。首先将地震记录 $x_i (i=1, 2, \dots, k)$ 重建为一个 m 维的相空间

$$X_n(m, \tau) = (x_n, x_{n+\tau}, \dots, x_{n+(m-1)\tau}) \quad (5)$$

式中 τ ——时延, $n=1, 2, \dots, l, l=k-(m-1)\tau$ 。

重建相空间后在无标度区内设定一系列不同的标度 r , 计算相空间中有多少点对之间的距离小于 r , 把这些点对在相空间所有点对中所占比率记为关联积分函数 $C(r)$ 。关联积分函数与 r 有下面的关系 $C(r) \propto r^D$, 其中 D 为关联维。

3. Lyapunov 指数

以关联维计算中重建的相空间为基础, 取初始点 A_0 为参考点, 选取其最近邻点 B_0 , 设在下一时刻 A_0 和 B_0 分别演化到 A_1 和 B_1 , 利用下式计算该时段的指数增长率

$$\lambda = \frac{1}{\Delta t} \lg \frac{A_1 B_1}{A_0 B_0} \quad (6)$$

式中 Δt ——演化时间间隔;

$A_1 B_1, A_0 B_0$ ——相空间 A_1 与 B_1, A_0 与 B_0 两点之间的距离。

在 A_1 的若干邻近点中, 找出一个与其夹角很小的邻近点 C_1 , 若没有则仍选取 B_1 。再下一时刻 A_1 与 C_1 分别演化到 A_2 和 C_2 , 则可按上式计算此时段的指数增长率。将此过程进行到序列终点, 然后取平均值作为最大 Lyapunov 指数的估计值。增加嵌入空间维数, 重复上面步骤, 直到估计值平稳为止, 此

时的估计值即为最大 Lyapunov 指数, 该指数反映混沌系统的动力学变化不可预测的尺度。

4. Kolmogorov 熵

计算 Kolmogorov 熵通常也以关联积分法为基础。重建相空间后, 对于给定的时间延迟 τ , 在无标度区内给出一个标度 r , 改变嵌入维数 m 的值计算关联积分函数 $C_m(r)$, 在此基础上由下式计算 $K_{2,m}$

$$K_{2,m} = \frac{1}{\tau} \ln \frac{C_m(r)}{C_{m+1}(r)} \quad (7)$$

当 $K_{2,m}$ 不随 m 改变时得到 $K_{2,m_0}(r)$, m_0 是 $K_{2,m}$ 达到饱和的最小嵌入维数。在无标度区内减少 r 的值, 再按上述方法计算 $K_{2,m_0}(r)$, 当其不随 r 改变时的值即可作为 K_2 的估计值, 在实际应用中一般以 K_2 熵作为 Kolmogorov 熵的近似值。该熵是相空间中刻画混沌运动的重要度量。

三、安全泥浆密度窗口的预测

本文中的神经网络反演方法是利用神经网络建立已钻地层的测井数据与对应地震属性的关系模型, 基于此模型利用待钻地层的地震属性直接反演出该段地层的测井曲线, 为钻前预测坍塌和破裂压力等井壁稳定参数提供依据, 这里选择小波神经网络来实现反演过程。小波神经网络是基于小波分析这一重要数学成果而构建的, 它采用非线性小波基函数代替传统的 Sigmoid 传递函数来构造网络结构的新型前向神经网络, 它将小波变换良好的时频局域化特征和神经网络的自学习功能有机结合起来, 通过小波的平移和伸缩构成径向基函数族, 网络参数的最优化通过能量函数的最小化来实现^[7], 小波神经网络的结构如图 1 所示。

本文采用如下算法进行小波网络学习:

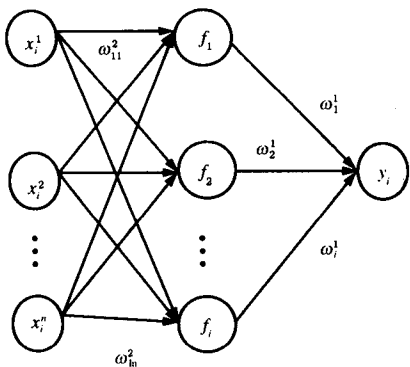


图1 小波神经网络的结构

(1) 将小波的伸缩因子 a_k , 平移因子 b_k 和网络权值 $\omega_k^1, \omega_{ij}^2$ 赋予随机值, 实现网络参数的初始化, 选择小波基函数 f_k , 其中 $j=1, 2, \Lambda, n, k=1, 2, \Lambda, l, n$ 为地震属性个数, l 为基函数个数。

(2) 将已钻地层的地震属性 x_i^j 以及对应深度的声波和密度测井期望输出 y_i 分别作为网络的学习样本对, 其中 $i=1, 2, \Lambda, m, j=1, 2, \Lambda, n, m$ 为样本对个数。

(3) 设 $f(t) = \cos(1.75t) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$, 则当前网络输出 y_i' 为

$$y_i' = \sum_k \omega_k^1 f_k \left[\sum_j (\omega_{kj}^2 x_i^j - b_k) / a_k \right] \quad (8)$$

(4) 选取误差函数为 $E = \frac{1}{2} \sum_i (y_i' - y_i)^2$, 计算瞬时梯度向量。

(5) 误差反向传播修改网络参数 a_k, b_k, ω_k^1 和 ω_{kj}^2 。重复进行以上学习步骤直到误差小于设定值为止。

网络学习成功后, 将待预测地层的地震属性组合输入神经网络, 即在网络输出端得到所预测的声波和密度测井数据。

以预测声速和密度测井数据为基础, 运用井壁稳定力学模型^[8], 可以确定岩石物理参数、岩石力学参数、地层强度参数、地层孔隙流体压力梯度和原地应力状态, 进而计算出井壁的坍塌压力和破裂压力, 确定安全泥浆密度窗口, 最大限度地控制钻井过程中的

井壁失稳现象。

四、实际应用

利用某油田一口探井的实际资料来验证该预测模型的可行性。图2和图3分别是利用本井和邻井测井资料以及该区块地震资料连续反演得到的该井2000-5000m井段的声波速度和地层密度曲线。图4是利用反演结果钻前所预测的安全泥浆密度窗口, 并将其与实钻过程中使用的泥浆密度进行对比。测井结果显示该井在实钻过程中井径扩大率基本平稳, 因此图4中所反映的预测效果非常理想, 证明本预测方法是可行的, 可适用于现场井壁稳定钻前预测。

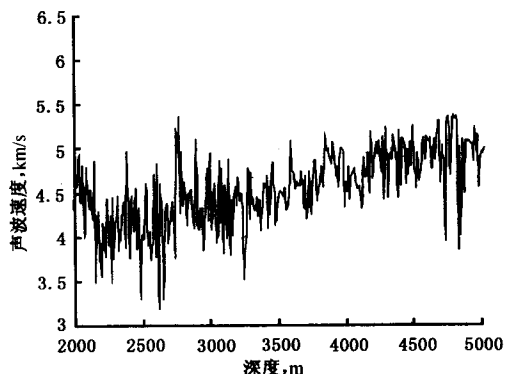


图2 反演的声波速度曲线

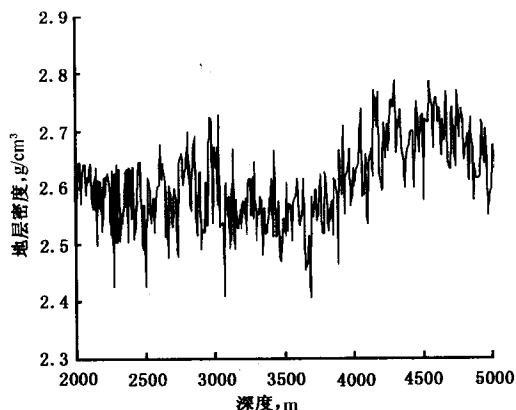


图3 反演的地层密度曲线

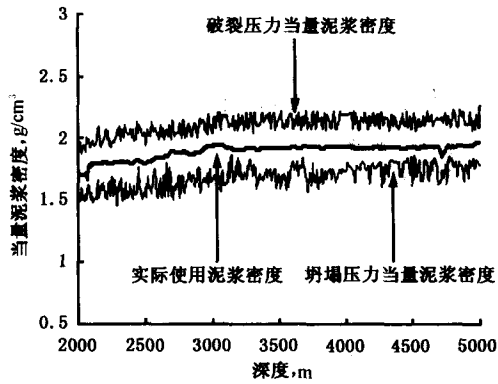


图4 预测的安全泥浆密度窗口

五、结束语

基于神经网络反演技术的钻前井壁稳定预测模型综合利用地震和测井资料,运用非线性分析方法,通过地震的分形和混沌属性结合神经网络技术同时反演出井壁稳定分析中的两个关键参数—声波速度和地层密度,在此基础上钻前预测安全泥浆密度窗口。本

方法预测精度较高,操作简便,有良好的推广前景。

参考文献

- 1 金衍,陈勉. 工程井壁稳定分析的一种实用方法. 石油钻采工艺,2000,22(1):31~33
- 2 金衍,陈勉,张旭东. 钻前井壁稳定预测方法的研究. 石油学报,2001,22(3):96~99
- 3 金衍,陈勉,杨小奇. 利用层速度钻前预测安全泥浆密度窗口研究. 岩石力学与工程学报,2004,23(14):2430~2433
- 4 曾锦光. 地震记录的分形和混沌性质. 石油地球物理勘探,1995,30(6):743~748
- 5 胡平. 地震过程动力学行为和可预报性问题研究. 地球物理学报,1990,33(6):647~655
- 6 刘式达. 地球系统模拟和混沌时间序列. 地球物理学报,1990,33(2):144~152
- 7 Zhang J, Walter G G, Lee W N. Wavelet neural network for function learning. IEEE Trans. on Signal Processing,1995,43(6):1485~1497
- 8 徐同台,崔茂荣,王允良等. 钻井工程井壁稳定新技术. 北京:石油工业出版社,1999:113~128