

沉积岩体力学 理论与方法

孟召平 苏永华 著



科学出版社

www.sciencep.com

沉积岩体力学理论与方法

孟召平 苏永华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从沉积岩石学特征入手,采用多学科理论与综合研究方法,主要研究了沉积岩体力学的基本理论和方法以及有关的沉积岩体力学问题。在对沉积岩体岩石学特征研究的基础上,系统分析了决定沉积岩石力学性质的主要地质控制因素,建立了沉积岩石成分、结构和赋存环境(地应力、地下水和地温)等因素与宏观力学性质之间的相互关系。系统介绍了沉积岩体力学特性及其工程响应,揭示了结构面分布的地质统计规律及其力学效应,对工程沉积岩体稳定性和有关沉积岩体力学问题,如回采工作面顶板稳定性问题、巷道围岩稳定性问题和边坡岩体稳定性问题等进行了细致的分析,并研究了岩体工程稳定可靠度评价理论与方法。

本书可供地质、采矿、土木、交通运输、水利和油气开发以及核废料地质处置等专业的师生和工程技术人员参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

沉积岩体力学理论与方法/孟召平,苏永华著. —北京:科学出版社,2006
ISBN 7-03-017440-2

I. 沉… II. ①孟… ②苏… III. 沉积岩-岩石力学 IV. P588.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 063541 号

责任编辑:张 敏/责任校对:赵燕珍

责任印制:安春生/封面设计:嘉华永盛

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006年9月第一次印刷 印张:22 3/4

印数:1—2 000 字数:428 000

定价:56.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

序

沉积岩是在地壳表层条件下,由母岩(岩浆岩、变质岩、沉积岩)的风化产物、火山物质、宇宙物质以及有机物等原始物质,经过搬运作用、沉积作用和成岩作用而形成的层状岩石。由于其生成和赋存环境与岩浆岩或变质岩不同,以往有关岩石(体)力学研究都是针对组成地壳的三大类岩石即沉积岩、岩浆岩和变质岩进行的研究,因此,目前尚没有专门针对沉积岩特点对沉积岩体力学特性及其相关岩体力学问题进行专门研究的专著。

1999年6月,我参加孟召平教授的博士学位论文答辩,对他的博士学位论文《煤层顶板沉积岩体结构及其对顶板稳定性的影响》的研究内容和成果很感兴趣。该论文针对煤层顶板稳定性问题,应用沉积岩石学、岩体力学和采矿工程学等理论与方法,研究了煤层顶板沉积岩体结构特征及其力学效应,提出了煤层顶板稳定性的沉积岩体结构控制论的思想。当时,我在答辩会上就提出了如何拓宽沉积岩石学在工程中的应用研究和建立沉积岩体力学的想法。

随着矿井开采深度的增加和工程规模的扩大,地质条件发生急剧的变化,人们所遇到的沉积岩体力学问题势必更加复杂,因此,有必要从沉积岩体的地质特征入手,把沉积地质学与岩石(体)力学结合起来研究,建立可靠的沉积岩体力学理论支撑体系,这样才能很好地把握工程岩体力学性质的本质,使复杂的岩体工程设计与施工决策更趋于合理与可靠。

孟召平教授是从事矿井工程地质、岩石(体)力学和煤油气资源研究领域的青年学者。近些年来,孟召平教授及其研究集体在前人研究的基础上,以国家自然科学基金和教育部专项基金等科研项目为依托,针对煤炭资源开发中遇到的问题,采用多学科理论与综合研究方法,对沉积岩体岩石学及其力学特征、沉积岩体结构及其力学特征、工程沉积岩体稳定性、有关沉积岩体力学问题(如回采工作面顶板稳定性问题、巷道围岩稳定性问题和边坡岩体稳定性问题)以及岩体工程稳定非确定性问题等沉积岩体力学理论与方法进行了潜心研究和探索,取得了可喜的阶段性研究成果:

(1)通过对沉积岩体岩石学特征的研究,系统分析了决定沉积岩石力学性质的主要地质控制因素,建立了沉积岩石成分、结构和赋存环境(地应力、地下水和地温)等因素与宏观力学性质之间的相互关系;

(2) 研究了沉积岩体力学特性及其工程响应, 提示了结构面分布的地质统计规律及其力学效应;

(3) 对工程沉积岩体稳定性和有关沉积岩体力学问题进行了系统分析, 建立了相关评价理论和方法;

(4) 在对岩体工程确定性分析的基础上, 进一步研究了岩体工程稳定可靠度评价理论与方法。

孟召平教授和苏永华博士将这些研究成果综合归纳成《沉积岩体力学理论与方法》一书, 希望与专家和同行们共同探讨, 以促进沉积岩体力学理论与方法的发展。

我相信, 该书的出版必将进一步拓宽沉积岩石学研究的领域, 推动岩体力学的研究和发展。



中国矿业大学(北京)教授

2006年5月8日于北京

前 言

沉积岩体力学是研究沉积岩体在各种力场作用下变形和破坏规律的一门科学。沉积岩是组成地壳的三大类岩石之一，与岩浆岩、变质岩不同，它是在地壳表层条件下，由母岩（岩浆岩、变质岩、沉积岩）的风化产物、火山物质、宇宙物质以及有机物等原始物质，经过搬运作用、沉积作用和成岩作用而形成的层状岩石。在沉积岩中蕴藏着大量矿产，如能源矿产中的煤、石油、天然气、油页岩等可燃有机矿产，全是沉积成因的。沉积岩占地壳岩石体积的 5%（到 16km 深度），而岩浆岩和变质岩则占 95%；但沉积岩在地壳表层分布甚广，占陆地面积的 75%，其余的 25% 是岩浆岩和变质岩，已探明的海底、洋底几乎全部由沉积岩所组成。可以说，人类工程活动与沉积岩关系密切，研究沉积岩及其力学性质对于指导人类工程活动具有理论和实际应用价值。

岩体是在不连续结构面的切割下，形成一定的岩体结构，并赋存于一定的地质环境之中的地质体。沉积岩体形成于地壳浅部，具有明显的层状特征和不均一性，其生成和赋存环境与岩浆岩或变质岩显然不同，岩性较为软弱，变化较大，成分复杂，这使得沉积岩具有不同于其他岩类的变形力学特性。除受沉积岩石材料（岩性）力学性质影响外，主要受结构面力学性质、岩体中结构面的发育组合情况、岩体结构类型和赋存环境，如水和地应力等因素的影响。其中，岩体中结构面，尤其是沉积结构面的存在削弱了岩体的力学强度，控制着岩体的变形和破坏规律；原始沉积作用又对结构面在岩体力学性质形成上起着一定的控制作用。过去，在分析岩体工程地质问题时往往忽视了原始沉积作用影响这个主要因素，使对解决问题的认识受到局限。因此，在进行沉积岩体工程及其稳定性评价时，只有从沉积岩体岩石学特征入手，把沉积地质学与岩石（体）力学结合起来，才能很好地把握沉积岩体力学性质的本质。

沉积岩体力学研究涉及许多学科和生产领域，概括起来可分为两个方面：一方面是研究组成地球外壳的沉积岩体的变形与流动——沉积地质岩体，如地球动力学研究范畴，在这种情况下主要研究沉积岩体在构造应力作用下的构造变形与破坏现象，还需考虑时间因素与温度因素；另一类是把沉积岩体看作是工程材料，或是工程结构物的承载体——工程沉积岩体，在这种情况下主要研究沉积岩体工程的承载力和稳定性。

由于沉积岩体受形成时沉积环境和成岩后多次构造运动的影响，沉积岩体结构复杂，这就要求我们从沉积岩体的地质特征入手来研究它的力学特征。因此，

本书主要从工程沉积岩体角度出发,就其中最基本的沉积岩体力学理论和问题进行探索,如沉积岩石力学特性、结构面分布的地质统计规律及其力学特征,回采工作面顶板稳定性问题、巷道围岩稳定性问题和边坡岩体稳定性问题等,同时就岩体工程稳定可靠度评价理论和方法也进行了探讨。本书共10章:第1章绪论;第2章沉积岩体岩石学特征;第3章沉积岩石力学特性;第4章结构面分布的地质统计特征;第5章沉积岩体力学性质;第6章工程沉积岩体稳定性分析与评价;第7章回采工作面顶板稳定性分析;第8章巷道围岩稳定性分析;第9章边坡岩体稳定性分析;第10章岩体工程稳定非确定性的理论与方法。其中1~7章由孟召平教授撰写,第8~10章和第6.3节由苏永华副教授撰写,全书由孟召平教授统稿。

本书是作者负责承担的国家教育部全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目——深部煤炭开发中矿井工程地质理论与方法研究(项目批准号:200247),高等学校博士学科点专项科研基金资助课题——深部煤炭开发中冲击地压与地质因素之间的耦合关系与受控机制研究(编号:20050290009),教育部留学回国人员科研启动基金资助项目和国家自然科学基金资助项目——沉积岩体结构地质力学模型及其对煤顶板稳定性控制(编号:40172059)以及湖南省交通厅课题——山区公路半填半挖路基建造关键技术研究(编号:200503)等课题研究成果的整理和总结。需要指出的是,本书是我们研究集体的共同成果。参加这方面研究的成员还有博士研究生易武、李国富和潘结南以及雷志勇硕士、李国庆硕士、郭彦省硕士和黄为硕士等。硕士研究生马辉、孟凡彬、苏欢、王振勉、田军啟、张润钊、雷暘和于倩倩等为本书的插图进行了计算机清绘和部分资料的收集整理。在此特表谢意!

本书初稿经张鹏飞教授审阅,并精心为本书题序,还提出了许多宝贵的意见。一直以来,张教授都非常关心和鼓励我从事本项研究工作,值本书出版之际,谨向张鹏飞教授致以深切的敬意和由衷的感谢。

本书研究工作自始至终得到中国矿业大学韩德馨院士、金奎励教授、张鹏飞教授、任德貽教授、宁书年教授、彭苏萍教授、何满潮教授、曹代勇教授、唐跃刚教授、武强教授、秦勇教授、胡社荣教授、邵龙义教授和刘钦甫教授;湖南大学土木学院赵明华教授、陈昌富教授和曹文贵教授;北京科技大学土木工程系王金安教授;德国柏林工业大学应用地球科学系 Joachim Tiedemann 教授和 Helmut Wolff 教授、美国知信公司张金才博士、淮南矿业(集团)有限责任公司张炳光教授级高工和孙茂也高级工程师,以及中国煤炭地质总局地球物理勘探研究院霍全明教授级高工、汪洋高级工程师的关心和指导,在此表示衷心的感谢。

本书的出版得到了教育部国务院学位委员会、教育部研究生工作办公室、全国学位与研究生教育发展中心和教育部科技发展中心以及教育部留学服务中心的

关心和支持，同时，也得到了国家自然科学基金项目（项目编号：40172059）的资助，在此表示衷心的感谢。

由于沉积岩体力学理论与方法研究涉及多学科理论与方法，有许多理论和实践问题仍有待于深入探讨与揭示。因此书中不妥之处，敬请读者批评指正。

孟召平

2006年5月于北京

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 沉积岩体力学研究目的与意义	1
1.2 国内外研究现状及其进展	2
1.3 沉积岩体力学研究的内容和方法	6
第 2 章 沉积岩体岩石学特征	9
2.1 引言	9
2.2 沉积岩的一般特征	9
2.3 陆源碎屑岩特征.....	19
2.4 研究区沉积岩体岩石学特征.....	28
第 3 章 沉积岩石力学特性	39
3.1 引言.....	39
3.2 沉积岩石力学性质.....	39
3.3 沉积岩石的动弹性力学特征.....	52
3.4 陆源碎屑岩石力学性质与其沉积特征之间的关系.....	61
3.5 围压对岩石力学性质的影响.....	71
3.6 温度对岩石力学性质的影响.....	76
3.7 水对岩石力学性质的影响.....	79
第 4 章 结构面分布的地质统计特征	82
4.1 引言.....	82
4.2 沉积岩体结构面的成因及特征.....	82
4.3 沉积岩体结构面的几何描述与分布模型.....	87
4.4 结构面发育程度的曲率分析.....	93
4.5 沉积岩体结构面蒙特卡罗模拟.....	98
4.6 岩石块度估算与岩体结构张量	105
4.7 沉积岩体结构分类	108
第 5 章 沉积岩体力学性质	113
5.1 引言	113
5.2 沉积岩体的变形特征	113

5.3	沉积岩体的强度特征	117
5.4	沉积岩体中的能量积聚与释放规律	122
5.5	沉积岩体力学性质的结构效应	125
5.6	霍克-布朗岩体强度准则 (Hoek-Brown Criterion)	131
第6章	工程沉积岩体稳定性分析与评价	134
6.1	引言	134
6.2	极限平衡理论分析	134
6.3	层状岩体的薄板弯曲理论与模型	139
6.4	工程沉积岩体稳定性的地质分析	156
6.5	工程沉积岩体稳定性的地质模拟分析	168
6.6	工程岩体稳定性的岩性——结构评价	172
6.7	岩体的工程分类	175
第7章	回采工作面顶板稳定性分析	180
7.1	引言	180
7.2	长壁回采工作面围岩应力分布	180
7.3	顶板岩体变形与破坏	188
7.4	沉积岩性及其相变对回采工作面顶板稳定性影响	197
7.5	断层对回采工作面顶板稳定性影响	206
7.6	节理发育程度对回采工作面顶板稳定性影响	216
7.7	地应力对回采工作面顶板稳定性的影响	222
第8章	巷道围岩稳定性分析	228
8.1	概述	228
8.2	围岩应力	229
8.3	围岩压力	239
8.4	巷道围岩变形与破坏	245
8.5	巷道围岩稳定性分类	247
8.6	支护设计分析	256
8.7	支护实例分析	262
第9章	边坡岩体稳定性分析	268
9.1	引言	268
9.2	层状岩体边坡类型及破坏形式	268
9.3	地下水对岩体边坡稳定性的影响	272
9.4	力学参数对岩体边坡稳定性的影响	275
9.5	层状岩体边坡稳定性分析方法	278
9.6	边坡加固方法及计算	285

9.7 工程实例分析	289
第10章 岩体工程稳定非确定性的理论与方法	303
10.1 引言	303
10.2 岩体力学介质的不确定性	303
10.3 岩体参数的不确定性分布	305
10.4 岩体工程稳定可靠性分析建模方法	320
10.5 工程分析实例	330
参考文献	340

第 1 章 绪 论

1.1 沉积岩体力学研究目的与意义

沉积岩、岩浆岩和变质岩代表了三大类成因条件不同的岩石,具有不同的工程力学特性。沉积岩体力学是研究沉积岩体在各种力场作用下变形和破坏规律的一门科学。沉积岩是组成地壳的三大类岩石之一,与岩浆岩、变质岩不同,它是在地壳表层条件下,由母岩(岩浆岩、变质岩、沉积岩)的风化产物、火山物质、宇宙物质以及有机物等原始物质,经过搬运作用、沉积作用和成岩作用而形成的层状岩石。沉积岩占地壳岩石体积的 5% (到 16km 深度),而岩浆岩和变质岩则占 95%;但沉积岩在地壳表层分布甚广,占陆地面积的 75%,其余的 25% 是岩浆岩和变质岩,已探明的海底、洋底几乎全部由沉积岩所组成。在地表,沉积岩是最常见的一类岩石,平均厚约 0.8km,局部可达 12km,在造山带中更厚^[1]。沉积岩中分布最广的是页岩、砂岩和石灰岩。根据化学计算的结果表明,页岩占沉积岩的 77.2%、砂岩占 13.2%、石灰岩占 7.7%,其余的沉积岩只占 1%~2%^[2]。在沉积岩中蕴藏着大量矿产,不仅矿种多,而且储量大,据第 19 届国际地质学会的资料统计,世界资源总储量的 75%~85% 是沉积和沉积变质成因的^[3]。能源矿产中的煤、石油、天然气、油页岩等可燃有机矿产,全是沉积成因的。沉积岩体力学涉及许多学科和生产领域,如水利水电工程、铁道交通工程、土木建筑工程、矿业工程、石油与天然气开发、国防工程和地震预测预报等领域。因此可以说,人类工程活动与沉积岩关系密切,研究沉积岩体力学特性对于人类工程活动具有理论和实际应用价值。

我国是一个煤炭资源大国(资源量约为 5×10^{12} t),自 1988 年以来,我国煤炭的产量和消费量在世界上一直居首位。2004 年全国累计原煤产量达到 19.6 亿 t,分别占全国一次能源生产和消费总量的 70% 和 65% 左右。据预测,2010 年和 2020 年中国煤炭消费需求将达 23 亿 t 和 30 亿 t 左右。且煤炭资源埋深在 1000m 以下的为 2.95×10^{12} t,占煤炭资源总量的 53%,其中 90% 以上的煤炭产量是由井工开采。随着煤炭资源的不断开发,越来越多的矿井,其中有相当一部分为大型骨干矿井(如开滦和淮南等)已进入深部开采,1980 年国内煤矿开采的平均深度为 288m,1995 年达到 428m,20 世纪末已经近 500m,目前煤矿开采深度以每年 8~12m 的速度增加。我国东部煤矿区具有新生界覆盖层厚、煤层埋藏深、基底为奥陶系承压含水层的特点。目前,区内新建矿井多为深井

开发,首采区多在距地表 400m 以下深度,大部分生产矿井的开采深度达 500~1000m,东部矿井正以每 10 年延深 100~250m 的速度发展^[4]。随着矿井开采深度增大,地质条件急剧变化,地应力、地温、水压和瓦斯都相应加大,高应力所导致的矿压显现、冲击地压等矿井动力现象也就愈严重,为了控制矿井工程围岩稳定和确保安全生产,对岩石(体)力学提出了更多更高的要求。长期以来,岩石(体)力学的发展与矿业发展密切相关,地下矿井常常是观测岩体不同组成部分极限状态的理想试验场所;同时,岩石力学理论的发展和完善为矿业的健康发展奠定了基础和条件。在地下开采过程中人们最为关心的问题都可以粗略地称为“地层控制”,即控制由于采矿活动所形成的各种地下硐室的围岩变形;而目前煤炭开采矿压理论中更多的是采用结构力学的原理和方法,将煤层上覆岩层简化为一定结构的矿压模型。沉积岩性及其结构的不同直接决定了各种矿压模型理论应用的适用性和准确性。因此,准确了解沉积岩性及其结构特性,并在开采设计中加以考虑,对于煤炭开采地下岩层的控制与管理具有重要的理论和实际应用价值,将为我国煤矿高产高效矿井地质保障系统的建立提供可靠的理论基础和条件,对我国煤炭工业乃至国民经济可持续发展具有重要意义。

1.2 国内外研究现状及其进展

岩体力学的发展是和人类工程实践活动分不开的。最初,由于工程数量少,规模也小,从事工程建筑时,测试技术受到当时技术水平的限制,人们往往凭经验来解决问题。岩石(体)力学的研究历史不长,早期多为零星研究,主要围绕天然岩石的基本力学特性进行,且多数借用土力学理论,发展缓慢。20 世纪 50 年代以后,由于世界采矿工程的发展,尤其是受到大型水电工程和军事工程的推动,岩石(体)力学无论是在实验手段上还是在理论上,都有了比较显著的进展,如英国、美国、苏联等矿业大国,为解决地下开采对围岩的维护及露天开挖对边坡稳定的影响等一系列技术问题,加强了对岩石(体)力学问题的研究,并随着矿山开采中所面临的重要问题的研究和解决极大地推动了岩石(体)力学的发展。目前一般认为,岩石(体)力学是在 20 世纪 50 年代后期形成的,并且以法国 J. Talobre 的岩石力学著作的出版为标志^[5]。

早期的岩石(体)力学研究是以岩块为研究对象,人们还没有认识到岩体的特殊性和复杂性,仅把岩体看成一种材料,直接引用材料力学研究中发展起来的连续介质力学理论,其结果与实际情况有很大出入。随着工程建筑事业的发展,工程规模越来越大,所遇到的工程地质条件越来越复杂,特别是像 1959 年法国 Malpasset 坝的溃坝,以及 1963 年意大利 Vajont 坝的大滑坡等重大工程

事故留下的惨痛教训,人们开始重视岩体的裂隙性,逐渐认识到岩体的不连续性、不均匀性、各向异性,并提出岩体是在这些不连续结构面的切割下,形成一定的岩体结构,并赋存于一定的地质环境之中的地质体^[6~11]。人们认识到,为了选择相对优良的工程场址,防止重大工程事故,保证顺利施工,必须从岩体的地质特征入手来研究它的力学特征,对建筑场地进行系统的岩体力学试验研究和理论分析,准确预测工程岩体的应力、应变及其稳定性,并注意对碎裂岩体基本力学特性的研究^[6,7]。事实上,岩体与完整的岩石材料不同,它带有鲜明的地质特征,其中存在着断层、节理和层面等各种不连续面(或称结构面),岩体的成因及其地质历史上的历程对目前的岩体工程力学性质产生了重要影响。奥地利 J. Stini 一再强调,应该对岩体的结构面,如断层、节理和裂隙等进行观测和考查,研究它们的作用及其对岩石力学性质的影响^[12]。意大利的 L. Broili (1974) 曾提出过五条岩体力学地质定理,强调岩体结构对岩体力学性质的影响大于岩石性质的影响;岩体强度和变形取决于岩体结构特征等。在大量的实验和实践基础上,在 20 世纪 70 年代末和 80 年代初,中国科学院地质研究所孙广忠研究员等明确地提出了,岩体结构控制论是岩体力学的基础理论^[7,10],推动了岩体力学进入岩体结构力学的研究阶段。

结构面和结构体是岩体结构的两个基本单元,是岩体力学规律形成的基础,结构面是岩体研究的重要内容,它包括所有的地质界面如裂纹、裂隙、节理、断层和层面等不连续面^[6,7]。谷德振^[6]、孙广忠^[7,11]、陈昌彦^[13]等提出不同级别的结构面对岩体结构效应的贡献是不同的,研究内容和方法也不同。为此按结构面自然规模将其分为五级。一般认为 I、II 和 III 级结构面为不同规模的断层和断裂带,目前主要根据地质力学传统理论和物探方法来研究,其中应用三维地震勘探技术,能查清 5m 以上落差的断层和破裂带^[4,14]。多元化的地质构造理论代表了大陆构造研究方向。IV 和 V 级结构面多为随机分布的节理、裂隙等,是岩体结构研究的热点。随着新的学科、新的技术和新的计算方法不断被引入,这方面的研究已取得了很大进展。人们已经可以通过应用数理统计学方法研究结构面的力学特征和工程地质性质,建立结构面几何参数的各种统计模型^[15~25]。其中,结构面间距和密度是表征岩体破坏程度的物理量,在这方面许多学者提出了各种数学分布函数。关于结构面的形态,国内外众多学者主要就粗糙角 i 和粗糙度系数等开展研究^[26,27],尤其是近年来,用分形理论来研究岩体结构面的几何形态和力学性质,并已建立了一定的分形模型^[28~32],从而形成了刻划岩体结构的一种理论和方法。在岩体力学计算中,除了将结构面单独处理外,还可以采用降低弹模的方法,建立节理岩体等效模型和等效本构关系进行模拟,均取得了良好的效果^[33~36]。

沉积岩是在地壳表层条件下由母岩（岩浆岩、变质岩、沉积岩）的风化产物、火山物质、宇宙物质以及有机物等原始物质，经过搬运作用、沉积作用和成岩作用而形成的层状岩石。沉积岩体为不同岩性的沉积岩层组合体，其中存在着断层、节理和层面等各种不连续面（或称结构面），其力学性质除与结构面密切相关外，与其中每一岩层的变形强度特性、几何参数（如厚度和层理类型等）以及层与层间的相互作用有关。B. A. 布克林斯基用衰减函数描述的岩体内部移动等值线，当考虑岩体分层性时，计算出的移动等值线不是平滑的，而是出现折线形状，线的转折发生在两个岩性不同的接触面处。Reik (1981) 应用一种实验模型计算了组合层状岩体的强度；Gerrard C. M.^[37] 给出了以复合材料为基础的混合层数学模型；谭学术^[38] 探讨了层状复合岩体的宏观强度及其当量物理力学性质，对不同岩石组成的层状岩体，在假设层内均质条件下，给出了三维应力状态最大应力理论的强度条件表达式。何满潮^[39] 对含结构面的岩体进行连续性概化，提出了连续性模型和连续微元尺寸条件，对不同尺度和不同结构的工程岩体，其连续微元尺寸有所不同，从而为结构面的处理提供了理论依据。在结构面地质统计研究的基础上，为概化岩体结构特征，提供准确的岩体力学计算模型，国内外许多学者提出了各种分类方案^[40~43]。许兵^[44] 针对目前分类方案的不统一，从结构面入手，提出了以软弱结构面为主线的岩体结构分类统一标准。与此同时，将岩体结构和解决井下煤炭开采工程实际问题结合起来研究也已取得了一定的进展。邓喀中^[45] 在现场实测、相似模拟试验和计算机模拟基础上，获得了层面滑移规律，分析了层面对岩层及地表移动的影响。于广明^[46] 通过相似模拟试验研究采动断层活化分形界面效应，揭示了地表移动规律。但是目前对岩体结构面的几何形态和力学性质的描述依然十分粗糙；特别是，环境因素对它们的影响尚缺乏可靠的实验依据^[47]。对沉积岩体沉积结构特性认识不够深入，岩体力学至今所强调的是连续介质理论，虽然考虑了材料的物理非线性问题，但从几何场理论的角度来看，它仍然为小变形近似理论^[48]。

在岩体结构研究的同时，为了取得岩体系统的内部规律，达到最佳化，研究岩石（体）力学的实验手段也获得了发展，利用三轴试验机和刚性试验机对岩石三轴强度和残余强度特性进行的研究，奠定了理论研究的基础。早在 20 世纪 30 年代，施匹斯（1935）从铁的塑性变形中就发现材料破裂后的特性被试验机刚度所掩盖，但直到 1962 年布兰克斯才第一次测得混凝土的载荷—位移全过程曲线，首次揭示了材料破裂后的力学行为。而关于岩石的研究，最早由南非的库克（1965）提出，并第一次测得了岩石的全过程曲线，此后波尔丁（1956, 1966）、宾尼阿斯基（1966）、瓦韦尔斯基（1968, 1969）、布雷迪（1971）以及赫德森（1971）先后研制出刚性试验机，并进行了研究。到了 70 年代初期，随着电液伺服控制刚性试验机的出现，岩石破裂后行为的研究得到了广泛的开展^[49~52]。我

国在这方面的起步较晚,70年代中期才用刚性组件提高试验机刚度,随后又仿制液压和热头混合加载的刚性试验机,直到1985年才研制出电液伺服控制的200T岩石刚性试验机。与此同时,不少单位已向国外进口了较先进的刚性试验机,如1987年中国矿业大学由美国MTS公司引进的815.02型电液伺服岩石力学试验系统,开展了一些研究,取得了可靠的实验结果。

通过节理的试验研究,使人们对岩体力学性质的认识日渐深入;通过各种应力解除方法及水压致裂法的应用,能获得不同地区和深度位置岩体应力分布,在其他原位测试技术方面,除现场三轴、剪切、点荷载、钻孔变形测试等外,采用深基静载、高压旁压、自钻旁压仪等均可以方便地获取较大深度以下地基岩体的承载、变形等参数^[53];现在,物探技术在岩石(体)力学工程中的应用也十分广泛,如声发射、三维地震、地质雷达等方法在岩体工程地质调查等应用中均取得了较好的效果^[54~59]。在理论研究方面,随着对弹塑性力学理论和流变学以及大变形力学理论研究的进展,有限单元法、有限差分法、边界单元法、离散单元法和无界元法等数值计算方法的应用,已使岩石(体)力学从过去只能分析均质、各向同性、线弹性以及简单断面形状的工程问题,发展到目前已经能分析某些不均质、非线性、各向异性、弹塑性、黏弹性、黏弹塑性,以及上述多种因素组合的、断面形状复杂的工程问题^[60~65]。目前,应用基于物理和数学方法为基础的模型技术也得到了较快的发展。在考虑较大位移情况下,可以把数学模型技术和物理模型技术结合起来模拟岩体工程,并将取得的模型成果数据准确地预测实际岩石压力的大小和规律^[66];可以对工程施工和加固进行动态模拟分析,提前预测可能出现的工程问题,通过及时改进设计和施工方案,就可能避免或减少工程事故的发生。随着岩体工程施工的地质环境复杂性的增加,出现了以“新奥法”为代表的施工方法,它以全新的围岩支护结构论来指导地下工程施工的全过程。以“新奥法”理论为指导、以锚喷支护为手段的地下工程施工全面开展起来,并取得了巨大成功^[67~72]。

尽管国内外学者在岩石(体)力学研究方面有所成就,但在沉积岩体力学研究方面,有许多理论和实践问题仍有待于深入探讨与揭示。例如,随着矿产资源的勘探开发向深部发展,建筑工程规模进一步扩大,都使岩石(体)力学面临许多前所未遇的问题,如地下岩体强度问题、岩体大变形问题、大埋深高地压、高地温问题、地下突水和煤与瓦斯突出问题以及软岩问题等。因此,从沉积岩石学特征分析入手,研究沉积岩体岩性、结构和赋存环境因素及其对岩石(体)力学性质的影响,通过正确方法评价岩体工程地质条件,获取符合实际的工程岩体力学参数,建立可靠的沉积岩体结构力学理论和方法等,已成为当前沉积岩体力学研究的重要课题。

1.3 沉积岩体力学研究的内容和方法

岩体是在不连续结构面的切割下,形成一定的岩体结构,并赋存于一定的地质环境之中的地质体。沉积岩体力学研究的对象是沉积岩体。沉积岩体形成于地壳浅部,其生成和赋存环境与岩浆岩或变质岩显然不同。沉积岩岩性较为软弱,变化较大,成分复杂,无论是岩石还是岩体均具有明显的层状特征和不均一性,岩石力学性质明显受沉积结构所控制,岩石试件在加载一开始就出现不可恢复的塑性变形,常伴有扩容和粒间摩擦,这样,经典力学理论就不完全适用于沉积岩石的应用。岩体力学性质除受沉积岩石材料(岩性)力学性质影响外,主要受结构面力学性质、岩体中结构面的发育组合情况、岩体结构类型和赋存环境,如水和地应力等因素的影响,其中岩体中的结构面,尤其是沉积结构面的存在削弱了岩体的力学强度,控制着岩体的变形和破坏规律;岩性和赋存环境因素又对结构面在岩体力学性质形成上起着一定的控制作用。因此,只有从沉积岩体的地质特征入手,把沉积地质学与岩石(体)力学结合起来,才能很好把握沉积岩体力学性质的本质。

沉积岩体力学研究涉及许多学科和生产领域,概括起来可分为两个方面:一方面是研究组成地球外壳的沉积层的变形与流动——沉积地质岩体,如地球动力学研究方面,在这种情况下主要研究沉积岩体在构造应力作用下的构造变形与破坏现象,还需考虑时间因素与温度因素;另一类是把沉积岩体看作是工程材料,或是工程结构物的承载体——工程沉积岩体,在这种情况下主要研究沉积岩体工程的承载力和稳定性。由于沉积岩体受形成时沉积环境和成岩后多次构造运动的影响,沉积岩体结构复杂,这就决定了沉积岩体力学研究内容具广泛性和复杂性。从工程沉积岩体来看,沉积岩体力学具体的研究内容如下:

1. 沉积岩体岩石学及其力学特征

岩石是组成岩体的物质材料,沉积岩石的力学性质主要受沉积岩石的物质成分、结构、构造和赋存环境等因素影响。本书着重从沉积岩石学特征入手,通过三轴岩石力学试验,研究沉积岩石的力学性质,揭示沉积岩石力学性质与其沉积特征之间的关系,探讨赋存环境等因素如地应力、地下水和地温对岩石力学性质的影响。对沉积岩体岩石学及其力学特征的研究是沉积岩体力学分析的基础。

2. 沉积岩体结构及其力学特征

结构面和结构体是岩体的两个基本单元,是岩体力学规律形成的基础,结构面是岩体力学研究的重要内容。本书从沉积岩体结构面的成因及特征入手,应用