

矿山 岩石流体力学

Rock Fluid Mechanics in Mine

赵阳升 著

煤炭工业出版社

矿山岩石流体力学

Rock fluid mechanics in mine

赵阳升 著

煤炭工业出版社

(京)新登字 042 号

图书在版编目(CIP)数据

矿山岩石流体力学/赵阳升著. —北京:煤炭工业出版社,1995

ISBN 7-5020-1125-0

I. 矿… II. 赵… III. 矿山-岩石力学:流体力学 IV. TD31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 15794 号



矿山岩石流体力学

赵阳升

责任编辑:田克运

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街 21 号)

北京密云春雷印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $850 \times 1168 \text{mm}^1/32$ 印张 $11^{3/4}$

字数 313 千字 印数 1—1,100

1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月第 1 次印刷

书号 3893

定价 13.50 元

内 容 简 介

本书是新兴的岩石力学分支学科——岩石流体力学的一本专著。书中以力学学科的基本思想、理论与方法为依据,严格推演与论证了岩石流体力学的理论,叙述了该方面的主要研究成果。全书共分十一章,第一、二章介绍了岩石流体力学的基本特性及实验方法;第三、四章叙述了孔隙、裂隙岩体的岩石流体力学的基本理论与数值解法;第五章叙述了新型的岩体控制压裂理论与方法及在煤成气开发、油气田开发、废料处置、干热岩石地热开发、地应力测量诸方面的应用;第六章至第十一章重点介绍了煤体瓦斯力学、冲击地压与突出的统一失稳理论、煤层渗透性分类、煤层注水理论,详细阐述了这一学科在瓦斯抽放,瓦斯突出冲击地压与防治煤层注水、坚硬顶板控制、承压水上开采等方面的应用。

本书可供采矿工程、建井安全、水文与工程地质、水利水电、环保、油气田开发、建筑、资源开发、岩土工程、岩石力学等专业的科技人员、大学生与研究生参考,也可作为相关研究方向的研究生用教材。

前 言

本人深深感到作为岩石力学的新兴分支学科——岩石流体力学的好几个方面都处在科学技术的前沿。近年来,它越来越受到国内外学者的高度重视,人们在不同的领域中从事着这方面的研究工作。因此,特别需要有一本书系统总结这些零散的成果,并形成较为完整的体系。这对该学科的发展无疑很有裨益。本人围绕着该学科一直进行辛勤的研究工作已十余年,在硕士生章梦涛教授,博士生导师孙钧教授指导下,分别完成了岩体水力学、煤体瓦斯力学方面的硕士与博士论文,先后主持或直接参与完成了一项国家自然科学基金项目,一项煤炭科学基金项目,一项山西省青年基金项目,两项山西省自然科学基金项目,两项煤炭工业部一般项目,一项山西省重点项目,10余项局矿的协作项目,这些项目经鉴定均达到国内领先或国际先进水平。还先后指导四名硕士生完成了此方面的硕士论文。几年来,我们学科组先后在国内期刊与会议共发表论文70余篇,这些工作奠定了本书写作的基础。

在本书构思与写作过程中,作者从深刻的力学科学的思想出发,对岩体介质提出了一种新的分类思想与方法,并以此为骨架,构造了岩石流体力学的理论体系,贯穿于全书。

本书另外一个特点是不仅致力于理论体系的严谨,而且更注重于它的应用,特别是在新兴领域中的应用,这样安排使理论与实践融为一体,使理论与实践相长,互得裨益,无疑对学科的发展是十分有利的。

本书的完成,与孙钧院士、章梦涛教授的指导密切相关,也依赖于课题组成员马光第教授、靳钟铭教授、段康廉教授、张文教授、白其峥教授的密切合作与大力帮助,也依赖于助手胡耀青讲师,康天合讲师,张惠轩工程师,贺军博士与申晋博士等的辛勤工作,书中凝聚了

他们大量的劳动成果,作者对他们表示衷心的感谢。

本书成稿后,承蒙张文教授,段康廉教授,章梦涛教授,靳钟铭教授等的费心审阅,作者对他们表示衷心的感谢。

岩石流体力学学科涉及面十分广泛,工程应用领域更是如此,而作者只能立足于矿业科学认识这一学科,无疑会有许多缺点,渴望能得到有关专家与同行的指教,作者不胜感激。

赵 阳 升

1994 年 10 月 于太原

序

我高兴地粗读了山西矿业学院赵阳升教授送来他新近写作的这部学术专著《矿山岩石流体力学》，感到确实是一本好书，应该尽早问世以应当前这方面的工作急需。赵教授三年前曾在同济大学我处攻读博士学位，并以优异成绩通过了他在这一子学科领域进行深入研究而完成的博士学位论文，他的论文答辩受到了与会评委们的高度赞许。这样，赵教授的这本新作对我来说就更倍感亲切和受到鼓舞。

赵教授在离开同济以后的几年内，又百尺竿头、更上一层楼，除了主持矿院采矿工程研究所的学术领导工作外，在岩石流体力学领域潜心进取，默默奉献，承担并完成了多项基金研究课题，不断发表高水平的学术论文，很快晋升为教授。他在这一子学科的研究工作中已经崭露头角，年青有为，实在可喜可贺。

众所周知，“他山之石可以攻玉”。当今各相关学科之间的学术交叉和彼此融合，进而在其结合点上派生新的学科分支，正是衍生和发展新兴学科的一种趋向，岩石流体力学学科也不例外。它的研究范畴十分广泛：在理论探讨上，它研究各类流、固相介质相互作用的耦合问题，包括建立繁复的物性方程，确定合适的模型理论及其参数，以及寻找问题的求解方法；在工程实践方面，它涉及研制各类新型测试设备，开发新型工艺技術措施，以指导工程设计与施工。一些

• 孙 钧教授系中国科学院院士，中国岩石力学与工程学会理事长、国际岩石力学学会中国国家小组主席。

主要内容在本书中都有详尽细致的阐述。因而,正如作者在本书前言和绪论中已经写述的,这一学科既极富理论内涵,又有重要的工程实用前景。它的发展正方兴未艾,这将是可以预期的。

我衷心祝愿本书的出版,它将给繁荣昌盛的我国岩石力学与工程界增添一股浓郁的学术芬芳,深信它必将得到广大岩石力学工作者的欢迎,并从中受到教益。

孙钧 谨识

一九九四年十二月十五日

目 录

绪 论	1
第 1 章 流体与岩体骨架的性质	4
1.1 流体的基本性质	4
1.2 孔隙岩体的基本性质	10
1.3 岩体裂缝	14
第 2 章 岩石流体力学特性	35
2.1 岩石的基本力学特性	35
2.2 岩体介质性态分类	46
2.3 岩体渗流的物性方程	52
2.4 有效应力规律	68
2.5 流体作用下的岩体特性	71
第 3 章 岩石流体力学基础	79
3.1 不变形多孔介质中的质量守恒	79
3.2 可压密介质中的质量守恒	83
3.3 承压含水层和越流含水层中的流动	89
3.4 流函数与势函数	92
3.5 初边值条件	97
3.6 裂隙岩体的渗流模型	101
3.7 岩体变形的基本方程	108
第 4 章 岩体水力学模型及解法	112
4.1 连续介质岩体水力学模型及解法	112
4.2 拟连续介质岩体水力学模型及解法	119
4.3 块裂介质岩体水力学模型及解法	120
第 5 章 岩体控制压裂	125
5.1 经典水力压裂法及其地应力测量	125
5.2 水力压裂模拟理论	136

5.3	岩体控制压裂的方法与理论	143
5.4	地面钻孔控制压裂抽放煤层瓦斯	158
5.5	水力压裂法地下处置核废料	170
5.6	干热岩石的地热开发	178
第6章	煤体瓦斯力学模型及解法	182
6.1	煤体—瓦斯力学模型	187
6.2	耦合模型的数值解法	195
6.3	煤矿钻孔抽放瓦斯的数值分析	210
6.4	巷道抽放瓦斯的数值模拟	222
第7章	冲击地压与突出的统一失稳理论	229
7.1	冲击地压与突出的特征	229
7.2	统一失稳机制	234
7.3	失稳理论的数学模型	238
7.4	失稳数学模型的数值解法	241
7.5	统一失稳理论的数值实验	245
第8章	煤体渗透特性分类	253
8.1	煤体渗透特性分类方案	253
8.2	分类方案实施	263
8.3	分类方案的工程应用	270
第9章	煤层注水的理论与实践	279
9.1	煤层注水的理论	279
9.2	煤层注水防治冲击地压	293
9.3	煤层注水防治煤尘	303
9.4	煤层注水与中硬煤软化和放顶煤开采	307
9.5	煤层注水防治瓦斯突出	312
第10章	注水控制坚硬顶板	316
10.1	坚硬顶板岩体水力学特性	317
10.2	压力注水法控制坚硬顶板	327
10.3	顶板岩体注水的岩体水力学模型及分析	333
第11章	承压水上的开采问题	339
11.1	底板突水条件与机理	340

11.2 矿区地下水动态监控·····	342
11.3 承压水上开采的岩体水力学模型·····	343
参考文献·····	346

contents

Preface

Chapter 1 The features of fluid and Skelton of rock mass

- 1.1 Fundamental features of fluid
- 1.2 Fundamental features of pore-rock mass
- 1.3 Cracks of rock mass

Chapter 2 The features of rock fluid mechanics

- 2.1 The fundanemtal mechanic features of rock
- 2.2 The classification of medium-behaviour of rock mass
- 2.3 The constitute equation of rock mass seepage
- 2.4 Law of effective stresses
- 2.5 Rock mass features effected by fluid

Chapter 3 The foundation of rock fluid mechanics

- 3.1 Mass conservation of undeformable pore-medium
- 3.2 Mass conservation of deformable medium
- 3.3 Fluid flow in confined aquifer and leaky aquifer
- 3.4 Stream function and potential function
- 3.5 Initial conditions and boundary conditions
- 3.6 The seepage models in cracked rock mass
- 3.7 The fundamental equations of deformable rock mass

Chapter 4 Model of rock hydraulics and its solved method

- 4.1 Model of continuum medium of rock hydraulics and its solved method
- 4.2 Model of equalent continuum medium of rock hydraulics and its solved method
- 4.3 Model of blocked medium of rock hydraulics and its solved method

Chapter 5 Control fracturing of rock mass

- 5.1 Classical hydraulic fracturing and measurement of earth stresses
- 5.2 The modelling theory of hydraulic fracturing
- 5.3 The method and theory of rock mass control fracturing
- 5.4 Methane drainage from surface by control fracturing
- 5.5 Disposal of radioactive waste by hydraulic fracturing
- 5.6 Developing underground heat of dry-heat rock

Chapter 6 The model of coal mass-methane mechanics and its solved method

- 6.1 Model of coal mass-methane mechanics
- 6.2 Numerical methods of coupled model
- 6.3 Numerical analysis of methane drainage by hole in mine
- 6.4 Numerical modelling of methane drainage by tunnel

Chapter 7 The united destable theory of rock burst and outburst

- 7.1 The features of rock burst and outburst
- 7.2 United destable mechanism
- 7.3 Mathematical model of destable theory
- 7.4 Numerical method of destable mathematical model
- 7.5 Numerical test of united destable theory

Chapter 8 The permeability classification of coal mass

- 8.1 The plan of permeability classification of coal mass
- 8.2 Implement of classification
- 8.3 Engineering application of classification

Chapter 9 The theory and practice of water infusion in coal seam

- 9.1 Theory of water infusion in coal seam
- 9.2 Prevention of rock burst with water infusion in coal seam
- 9.3 Prevention of coal dust by water infusion
- 9.4 Hard-coal softening by water infusion in coal seam and

roof-coal drawing

- 9.5 Prevention of methane outburst by water infusion in coal seam

Chapter 10 Control hard-roof stratum with water infusion

- 10.1 The features of rock-hydranlics of hard-rock
10.2 Control hard-roof stratum by water infusion at pressure
10.3 The rock-hydraulic model of water infusion in roof stratum and its analysis

Chapter 11 Mining problem in confined aquifer

- 11.1 Conditions and mechanism of water outburst of flour stratum
11.2 Monitor of underground water in mine area
11.3 The rock hydraulic model of mining in confined aquifer

References

绪 论

岩石流体力学是岩石力学、渗流力学与众多工程科学相互交叉而建立的一门专门研究岩体与孔隙、裂隙流体相互作用的新兴分支学科。它是一门伴随着油气田开采、煤成气开采、水文地质、地下水动力学、环境科学、水利水电工程、水库诱发地震、海水入侵、岩体加固、地下水迁移引起的地基沉降变形、煤矿矿井突水与瓦斯突出、水上水下煤层开采、水力压裂等重要研究领域的发展而形成的一门综合性的、跨学科的边缘学科。如果说它已经是一门独立的、完整的新兴边缘学科还为时过早,那么至少可以说它正处在发展的鼎盛时期。但必须承认,作为一门独立的学科,它已完全具备了构成一个分支学科的三个条件,即:独特的研究对象——岩体与流体的相互作用;独特的研究方法——建立在固体变形与孔隙裂隙双重介质中流体渗流相互作用之上的理论、实验与工程措施;固定的服务领域——环境工程、油气田开采、煤矿开采、地震、水电水利等工程,这正是本书写作的基础。

在研究这一大类工程问题方面,岩石流体力学的学科特点远较单纯的岩体力学或渗流力学广泛而深入,主要表现在研究方法上,它通过考虑岩体与流体的相互作用(含物理作用与化学作用),给出工程实际性态的描述。而单纯的岩体力学则是在假设与估计流体对固体作用的基础上给出的描述;单纯的渗流力学则是在估计岩体变形对渗流影响的基础上给出的描述。显然,后两者存在较大的误差,甚至会引起错误。

阜新矿业学院章梦涛教授在他的一篇文章中(1990)详细论述了变形与渗流相互影响的岩石力学发展战略问题,指出:研究内容应包括岩体渗流规律的研究,流体流动对岩体物理力学性质和本构关系影响的研究。在研究方法上,应该沿着现场观测、模型试验和理论分

析相结合的思路,进行综合研究,相互验证和相互补充,同时开展数值模拟试验工作。

实践推动了岩石流体力学的发展,世界众多领域的工程技术人员与科学工作者,在解决各自独特的固流相互作用问题时,发现的新规律,创造的新方法,所做的大量研究工作构成了本书的基本内容。

石油与天然气开采,以及近 20 几年来国际上正在兴起的煤成气开发热,都提出了许多复杂的岩石流体力学的工程问题。例如在研究油井的自喷时,就需要考虑岩体与石油相互作用而形成的贮油层的超高孔隙压;为了提高油气田回采率而广泛进行水力压裂与油气层注水(含注热水),就需要研究合理的压裂工艺,固体变形与水、气、石油的相互作用。国内外为这项研究已投入了几亿以至几十亿元的试验研究经费。

在环境科学中,特别需要研究的是核废料的处置,高污染化学废料的处置,以及化学流体通过传质过程与地下水相溶,反馈危害到人类的生存环境问题。这一类问题的特点是:核废料及化学废料对其周围的岩体有较强的热破裂作用与化学腐蚀作用,它一方面弱化了岩体的抗变形能力,另一方面增大了岩体的渗透能力。近年来,这些问题一直是各国研究的重点。

在地震科学中,由于区域地质体在地应力场的作用下发生变形及破坏(发生地震),在其变形过程中(特别是岩体的剪胀变形阶段)显著地影响到区域地质体中地下水的迁移与动态变化。因此,地下水动态监测一直作为地震预报的主要手段之一。另一方面,国内外已有大量水库诱发地震的实例,这是由于水库蓄水后,改变了区域应力场的局部平衡态而导致的一种结果。

在水利、水电工程中,广泛进行了坝基、坝体、边坡与渗流相互作用的研究。众所周知,1959 年法国马尔帕塞(Malpasset)拱坝在初次蓄水后即发生全坝溃决;1963 年意大利瓦扬(Vajiont)拱坝上游左岸大滑坡;1963 年我国梅山连拱坝右岸基岩出现大量漏水险情,都是在设计时缺乏这些考虑所致。

近几十年来,国内外许多城市与矿区,由于对地下水的超采而导致地基沉降,特别是沿海城市导致海水入侵,迫使众多国家都进行了深入的研究工作。

我国煤田中,目前已发现大量的煤层位于富含水的奥陶纪灰岩之上,或位于河流与湖泊之下。为了开采这些煤层,我国以及世界上众多学者已进行了大量的研究工作,主要通过研究煤、岩体系统对水的隔离性能,以及水对煤、岩体的破坏作用,从而采取相应的封堵措施与突水的预测预报措施,以保证煤炭的安全开采。

煤矿瓦斯突出与爆炸,一直是煤炭开采中严重的隐患。在世界采矿史上,发生瓦斯突出与爆炸的事件已达几十万次,仅我国从1950年到1980年就发生上万次,而瓦斯突出正是瓦斯气体与煤体系统失稳破坏发生的重大事件。因此,近年来,许多学者都从二者相互作用来研究这一问题。而煤层瓦斯的抽放理论也是建立在岩石流体力学研究之上的。

综上所述可见,岩石流体力学的各个方面的确是目前科学研究的热门课题。

从研究方法角度分析,大致可以归结为以下几个方面:(1)研究描述各类问题的耦合数学模型,例如岩体与水,岩体与粘性流体,岩体与气体,固、气、流的耦合模型,并寻求其合适的求解方法(大多采用数值方法)。(2)研制新型试验设备,以揭示流体(水、天然气、化学流体)与岩体相互作用的内在规律,例如有效应力规律,岩体在化学流体、核废料作用下的热破裂特性及在流体作用下岩体变形特性的改变,岩体渗流特性的改变等等。(3)研究岩体流体力学问题的新工艺或指导工程设计,例如岩体注浆,水力压裂,从而达到预想的目的。

本书试图从矿山岩石流体力学的各个方面,较系统地介绍这一分支学科,这一方面是由于作者水平有限,很难全面讨论广义的岩石流体力学;而另一方面,作者认为,除去物理方程方面的差异外,矿山岩石流体力学所采取的研究方法和理论与其它类似的工程问题是一致的。