



当代
杰出青年
科学文库

采动岩体蠕变 与渗流耦合动力学

陈占清 李顺才 著
浦 海 黄先伍



科学出版社

www.sciencep.com

当代杰出青年科学文库

采动岩体蠕变与渗流 耦合动力学

陈占清 李顺才 著
浦海 黄先伍

科学出版社

北 京

TD3/
C655

《当代杰出青年科学文库》编委会

主 编: 白春礼

副主编: (按汉语拼音排序)

程津培 李家洋 谢和平 赵沁平
朱道本

编 委: (按汉语拼音排序)

柴玉成	崔一平	傅伯杰	高 抒
龚健雅	郭 雷	郝吉明	何鸣鸿
洪友士	胡海岩	康 乐	李晋闽
罗 毅	南策文	彭练矛	沈 岩
万立骏	王 牧	魏于全	邬江兴
袁亚湘	张 杰	张 荣	张伟平
张先恩	张亚平	张玉奎	郑兰荪

序

在采矿工程中,采动岩体的变形常常伴随着流体的运动,如水的渗流、瓦斯的解吸/吸附、扩散、对流和渗流。因此,采动岩体力学的研究对象是固体与流体的耦合运动。这类耦合运动具有如下特点:

(1) 煤层的开采和巷道的掘进造成岩体的变形、破坏和垮落。因此,岩体的边界,包括弹性区、塑性区、破裂区和破碎区之间的界面随着时间而变化。

(2) 煤层的开采造成顶板直至地表的下沉,对地面建筑和农田造成不利影响。实践表明,采空区沉陷是一个漫长的过程,需要考虑岩体的流变,特别是蠕变。

(3) 煤层顶、底板的变形使得水渗流通路的粗糙度、宽度、迂直度等参量发生变化,从而导致渗透特性的变化。这些变化经历一定时间后,可能满足渗流失稳条件而引发突水灾害。

(4) 煤层及其围岩的破裂使得瓦斯在煤层中运移的状态发生变化,甚至引起稳定性的变化,这样,可能诱发瓦斯突出、煤与瓦斯突出等灾害。

针对以上特点开展采动岩体力学问题研究,需要开拓学术思路、提出新的概念和方法、建立新的学科体系。《采动岩体蠕变与渗流耦合动力学》正是围绕以上特点开展的探索性研究成果。

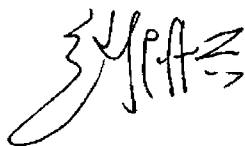
采矿工程中大多岩体力学问题属于时变边界问题。时变边界是采动岩体最本质的特征,也是采动岩体力学复杂性所在。采动岩体的边界变化主要是由破坏引起的,因此,需要研究岩体在各种变形状态(弹性状态、剪切屈服、拉伸破坏等)下的流动法则及变形状态之间的转化机制。在岩土力学成熟理论中,流动法则通常采用应力分量/增量表示应变分量/增量的形式。为了实现动力学计算,需要建立以应变分量/增量表示应力分量/增量形式的流动法则,并考虑动态加载、卸载及变形状态的转换。该书将岩层(煤层)的流动法则作为计算岩体动力学响应的前提,对岩层的破坏形式、破坏条件(函数)、流动法则,特别是变形状态的变化进行了详细的讨论,其研究成果可望在采矿工程中得到广泛的应用。

伴随着岩体的破坏,水和瓦斯在岩体中的渗流发生运动失稳或结构失稳,常引发突水、瓦斯突出等灾害。该书运用非线性动力学的分岔理论研究了破碎岩体非等温渗流、破碎岩体中气体渗流及破碎岩体流固耦合渗流的动力学行为,为解释突水、瓦斯突出等灾害的发生机制及预防灾害提供了重要的理论基础。

蠕变对巷道围岩的稳定性具有重要影响,在巷道稳定性分析和支护设计中,人们对巷道围岩的黏弹性、黏弹塑性变形日益关注。该书对巷道围岩与支护系统进行

了黏弹性分析,研究了渗流作用下巷道围岩的稳定性,对于巷道支护设计具有指导意义.

该书是围绕 973 项目“煤矿突水机理与防治基础理论研究”、“深部煤炭资源赋存规律、开采地质条件与精细探测基础研究”、国家自然科学基金项目“采动岩体蠕变-渗流耦合动力学行为的试验和理论基础研究”、“煤矿瓦斯灾害演化及防治基础研究”、“煤炭与煤层气双能源开采基础理论与方法研究”、“承压破碎岩体蠕变-渗流系统非线性动力学特性研究”开展的基础性研究成果,可供从事工程力学、煤矿安全、采矿、煤层气开采等专业的教师、研究生参考,也可供煤矿科技机构的专业技术人员参考.



2009 年 7 月

前 言

工程力学是力学的一个分支,它是力学基础理论在工程中的应用. 矿山工程力学则是应用力学基础理论研究煤矿工程中各种力学问题的学科分支. 长期工作在采矿工程领域的专家、学者不难发现, 矿山工程中力学的研究对象通常具有多种运动形式, 包括固体的变形、流体的运移 (水的渗流、瓦斯的解析/吸附、扩散、对流和渗流). 矿山工程力学的任务就是研究这些运动之间的耦合作用. 例如, 矿井突水问题就需要研究围岩的变形与水渗流之间的耦合作用; 煤与瓦斯突出问题需要研究煤层及其围岩的变形与瓦斯吸附/解吸、扩散、渗流之间的耦合作用. 研究流-固耦合作的一般程序是建立耦合系统的动力学模型、计算系统的响应、分析系统的稳定性.

矿山工程力学并非直接应用一般力学、固体力学和流体力学的成熟理论研究采矿工程中的力学问题, 而是在应用的同时发展一般力学、固体力学和流体力学, 并为一般力学、固体力学和流体力学提供动力. 岩体变形运动的复杂性主要表现为破坏引起边界随时间变化. 可以毫不夸张地说, 时变边界是矿山工程力学复杂性的根源所在.

流-固耦合系统动力学还需要解决一些基础性问题, 如运动学描述. 众所周知, 连续介质力学中有两套描述方法, 即物质描述法 (Lagrange 描述法) 和空间描述法 (Euler 描述法). 固体力学通常采用 Lagrange 描述法, 流体力学则通常采用 Euler 描述法. 那么, 对于流-固耦合系统的运动应采用何种描述法? 这也是一般力学、固体力学和流体力学的成熟理论无法回答的基础性问题.

传统的固体力学通常研究静力学问题, 而矿山工程力学的研究对象大多是动力学问题, 特别是破裂、破碎后岩体的动力学行为. 因此, 矿山工程力学问题的研究需要本领域的学者发展固体力学理论、扩大固体力学的研究范围、完善固体力学体系.

耦合、时变边界、动力学以及非连续性、非均质性和离散性共同构成工程力学研究对象的复杂性特征. 回避这些复杂性特征, 矿山工程力学将陷入闭门造车和纸上谈兵的尴尬局面. 本书以岩体变形-流体运移的耦合为切入点对矿山工程力学的复杂行为作粗浅的探索, 其中, 涉及时变边界、非线性、动力学等复杂性现象. 特别是对于岩体破坏后的动力学行为, 从流动法则的构建、动力学响应计算方法、结构稳定性 (分岔) 分析等方面进行了较为深入的探讨.

本书分为 18 章. 第 1~5 章为基础理论, 包括流-固耦合系统的运动学描述、岩

石流变和渗流理论、岩石的破坏形式与流动法则、含瓦斯煤体的基本运动。第 6、7 章为试验研究,包括破碎岩石的渗透试验和蠕变试验。第 8~10 章为动力学模型,包括岩体变形-渗流耦合动力学模型、含瓦斯煤层动力学模型、煤层变形与瓦斯运移耦合系统响应计算方法。第 11~14 章为耦合系统的动力学分析,包括破碎岩体非 Darcy 水渗流的动力学分析、温度场与渗流场耦合作用及其响应、破碎岩体中气体渗流动力学分析、破碎岩体流固耦合非线性动力学分析。第 15~18 章为应用研究,包括巷道整体及局部支护下的围岩应力场、采动巷道围岩变形的黏弹性分析、渗流作用下巷道围岩黏弹性分析及瓦斯突出机理分析。附录为时变系统动力学简介。

本书第 1, 4, 5, 8~10, 18 章和附录由陈占清执笔,第 6, 11~14 章由李顺才执笔,第 2, 3, 7 章由浦海执笔,第 15~17 章由黄先伍执笔。全书由李顺才博士统一校对。

本书的写作和出版得到了国家重点基础研究发展计划 (2007CB209400, 2006CB202210)、国家自然科学基金项目 (50674087, 50534090, 50834005, 50974107)、中国高校博士点学科专项科学研究基金项目 (20060290504) 江苏省自然科学基金 (BK2007029) 等项目的资助。

本书得到了中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室、工程力学国家重点学科、地质资源与地质工程博士后科研流动站、徐州师范大学机电工程学院、贵州大学职业技术学院等单位的大力支持和协作,在此表示感谢。

由于作者水平所限及写作时间仓促,书中难免存在疏漏和不足之处,恳切希望同行专家和广大读者批评指正。

作 者

2009 年 7 月

目 录

序

前言

绪论	1
0.1 研究背景与意义	1
0.2 研究内容与方法	1
0.2.1 流-固耦合问题的运动学描述	2
0.2.2 适用于动力学计算的流动法则	2
0.2.3 流-固耦合作用	2
0.2.4 流-固耦合系统动力学响应计算方法	2
0.2.5 岩石(煤)的机械性质(强度、渗透性、吸附性等)试验	3
0.2.6 几个特殊问题的分析	3
0.3 研究现状与展望	3
参考文献	4
第 1 章 流-固耦合问题的运动描述	7
1.1 符号规则	7
1.2 Lagrange 坐标和 Euler 坐标	8
1.3 运动学分析	9
1.4 坐标变换关系	12
1.5 关于旋度张量与旋度矢量的注解	14
1.5.1 旋度张量的定义	15
1.5.2 位移的积分	17
1.6 本章小结	17
第 2 章 岩石流变的基本理论	18
2.1 岩石流变的基本概念	18
2.2 岩石流变模型	22
2.2.1 元件流变模型	22
2.2.2 Kelvin 模型	23
2.2.3 Maxwell 模型	24
2.2.4 鲍埃丁-汤姆逊模型	25
2.2.5 伯格模型	26

2.2.6 黏塑性模型	27
2.2.7 黏弹塑性模型	27
参考文献	28
第 3 章 岩石渗流的基本理论	30
3.1 渗流的基本概念	30
3.2 Darcy 定律	32
3.3 渗透系数及渗透率	33
3.4 非 Darcy 渗流	33
3.5 状态方程	36
3.5.1 液体的状态方程	36
3.5.2 气体的状态方程	37
3.5.3 岩石的状态方程	37
3.6 质量守恒方程	38
3.7 渗透特性与孔隙度的关系	38
参考文献	39
第 4 章 岩层本构关系	40
4.1 应力和应变的正负号规定及表示方法	41
4.2 变形状态	42
4.3 有效应力与等效孔隙压力系数	44
4.4 孔隙压力对岩石破坏的影响	45
4.5 简单应力状态下塑性流动法则简短回顾	46
4.5.1 单向压缩	46
4.5.2 单向拉伸	47
4.6 剪切屈服后的流动	48
4.7 拉伸破坏后的流动	51
4.7.1 一个小疑问	51
4.7.2 塑性势	52
4.8 复合流动	55
4.9 变形状态的切换	55
4.10 本构关系	59
4.11 本章小结	60
参考文献	61
第 5 章 含瓦斯煤层运动规律	62
5.1 瓦斯吸附与解吸	62
5.2 瓦斯扩散	64

5.3 瓦斯渗流	65
5.3.1 瓦斯渗流过程中的质量守恒关系	65
5.3.2 瓦斯渗流过程中的动量守恒关系	66
5.4 瓦斯运移过程中的质量守恒和动量守恒	67
5.5 本章小结	68
参考文献	69
第 6 章 破碎岩石渗透特性测试	70
6.1 概述	70
6.2 测试原理与方法	71
6.2.1 岩石渗透试验方法简介	71
6.2.2 破碎岩石非 Darcy 渗流的稳态渗透法	72
6.3 试验过程与流程编程	75
6.4 试验结果与数据分析	76
6.4.1 破碎砂岩试验结果及分析	76
6.4.2 破碎煤矸石试验结果及分析	88
6.4.3 破碎灰岩试验结果及分析	99
6.5 关于 Darcy 流偏离因子 b 的符号讨论	105
6.6 本章小结	108
参考文献	109
第 7 章 破碎岩石蠕变试验研究	111
7.1 概述	111
7.2 试验原理与方法	113
7.2.1 试验设备	113
7.2.2 试样及试验方案	114
7.3 试验结果及分析	115
7.3.1 各级应力水平下的孔隙度时间历程曲线	115
7.3.2 相同应力水平下不同含水状态的岩样孔隙率时间曲线	120
7.3.3 各级应力水平下终点孔隙度与轴向应力关系曲线	123
7.3.4 孔隙度随时间变化的拟合关系	124
7.3.5 孔隙度的变化率随时间变化的关系曲线	125
7.4 渗流时间历程曲线	128
7.5 侧限条件下碎石的蠕变模型及其参数确定	130
7.5.1 基本模型	130
7.5.2 传统组合模型	131
7.5.3 模型参数确定	131

7.6	试验误差及分析	136
7.7	试验结果对理论分析和计算的支持	137
7.8	本章小结	137
	参考文献	138
第 8 章	岩石变形与渗流耦合动力学模型	140
8.1	岩石骨架的质量平衡方程	140
8.2	岩石骨架的动量平衡方程	142
8.3	流体的质量平衡方程	143
8.4	流体的动量平衡方程	144
8.5	材料力学性质	144
8.5.1	岩石骨架的渗透特性	144
8.5.2	液体的力学性质	145
8.6	变形-渗流耦合动力学模型	146
8.6.1	基本变量、相关变量、控制参量	146
8.6.2	基本方程与辅助方程	147
8.6.3	定解条件	147
8.7	本章小结	148
	参考文献	149
第 9 章	煤层变形与瓦斯运移的耦合动力学模型	150
9.1	几点假设	150
9.2	耦合作用	151
9.3	动力学模型	152
9.3.1	研究对象	152
9.3.2	基本变量、辅助变量和控制参量	152
9.3.3	基本方程和辅助方程	153
9.4	本章小结	154
	参考文献	155
第 10 章	煤层变形与瓦斯运移耦合系统的响应计算方法	156
10.1	快速 Lagrange 算法	156
10.2	单元上物理量的计算	159
10.3	节点上物理量的计算	162
10.4	节点上和单元内辅助物理量的计算	169
10.5	边界上节点加速度等物理量的计算	169
10.6	阻尼	174
10.7	几点说明	174

10.8	计算耦合系统响应的 Fortran 程序说明	177
10.9	本章小结	206
	参考文献	206
第 11 章	破碎岩体非 Darcy 水渗流的动力学分析	208
11.1	一维非 Darcy 渗流的动力学方程	208
11.2	初始和边界条件	209
11.3	系统的平衡态	210
11.4	模型的数值计算	211
11.5	平衡态的稳定性分析	212
11.5.1	当 $b > 0$ 时平衡态的稳定性分析	212
11.5.2	当 $b < 0$ 时平衡态的稳定性分析	215
11.6	破碎岩体渗流动力系统的分岔研究	220
11.6.1	分岔及其分类	220
11.6.2	破碎岩体渗流的鞍-结分岔	222
11.7	破碎岩体渗流失稳的突变模型	222
11.7.1	突变及其分类	222
11.7.2	破碎岩体渗流失稳的折叠突变	223
11.8	本章小结	225
	参考文献	225
第 12 章	破碎岩体非等温渗流的动力学分析	226
12.1	破碎岩体非等温渗流的非线性动力学方程组	227
12.1.1	流体的能量方程	227
12.1.2	固体的能量方程	227
12.2	系统的平衡态	229
12.2.1	当 $b > 0$ 时的平衡态	232
12.2.2	当 $b < 0$ 时的平衡态	232
12.3	模型的数值计算	235
12.4	平衡态的稳定性分析	235
12.4.1	$b > 0$ 时平衡态的稳定性分析	235
12.4.2	$b < 0$ 时平衡态的稳定性分析	237
12.5	本章小结	246
	参考文献	247
第 13 章	破碎岩体中气体渗流的动力学分析	249
13.1	气体渗流的非线性动力学方程组	250
13.2	系统的平衡态	251

13.3 平衡态的稳定性分析	253
13.3.1 当 $b > 0$ 时平衡态的稳定性分析	254
13.3.2 当 $b < 0$ 时平衡态的稳定性分析	255
13.4 气体非 Darcy 渗流的鞍结分岔及折叠突变	260
13.5 本章小结	261
参考文献	261
第 14 章 破碎岩体流固耦合渗流动力学分析	263
14.1 应力场方程	263
14.1.1 有效应力方程	263
14.1.2 本构关系	264
14.1.3 应力平衡方程	265
14.2 渗流场方程	265
14.2.1 非 Darcy 渗流的运动方程	265
14.2.2 连续性方程	266
14.3 状态方程	267
14.4 解耦方法及条件	267
14.5 一维非 Darcy 渗流的非线性动力学简化模型及数值计算	269
14.5.1 一维非 Darcy 渗流的动力学方程组	269
14.5.2 初始条件和边界条件	269
14.5.3 系统的平衡态	270
14.5.4 系统的动力学响应及稳定性分析	271
14.6 一维弹性流固耦合渗流的非线性动力学分析	275
14.6.1 应力随时间变化时的动力学方程组	275
14.6.2 耦合系统的平衡态	276
14.6.3 耦合系统平衡态的稳定性分析	277
14.7 本章小结	281
参考文献	282
第 15 章 巷道整体及局部支护下的围岩应力场	284
15.1 圆形巷道围岩的弹性应力场分析	284
15.1.1 巷道整体平衡支护时围岩的弹性应力场	285
15.1.2 巷道局部支护时围岩的弹性应力场	289
15.1.3 巷道局部弱支护下围岩的应力场	304
15.2 圆形巷道围岩弹塑性应力场分析	311
15.2.1 径向应力为第一主应力的弹塑性应力场	312
15.2.2 环向应力为第一主应力的弹塑性应力场	315

15.3 本章小结	316
参考文献	318
第 16 章 巷道围岩变形的黏弹性分析	319
16.1 无支护时巷道围岩变形的黏弹性分析	320
16.2 整体平衡支护下围岩与支护系统的黏弹性分析	324
16.2.1 衬砌变形的黏弹性分析	325
16.2.2 围岩变形的黏弹性分析	326
16.2.3 围岩与衬砌交界面上的相互作用力	329
16.2.4 围岩与衬砌交界面上位移时效性研究	331
16.3 局部弱支护下巷道围岩的应变分析	333
16.3.1 围岩正应变随角度的变化规律	333
16.3.2 围岩正应变随半径的变化规律	337
16.3.3 围岩剪应变随半径及角度的变化规律	339
16.3.4 围岩内点的径向位移随半径的变化规律	339
16.4 本章小结	342
参考文献	343
第 17 章 渗流作用下巷道围岩变形黏弹性分析	345
17.1 渗流作用下巷道围岩稳定性的弹塑性分析	346
17.1.1 渗流场基本方程	346
17.1.2 弹塑性应力场基本方程	346
17.1.3 孔压作用下围岩应力及位移的分布特点	349
17.2 渗流作用下巷道围岩变形的黏弹性分析	351
17.2.1 渗流作用下巷道围岩的弹性应力场	351
17.2.2 渗流作用下巷道围岩的黏弹性位移	352
17.3 非稳态渗流作用下巷道围岩变形的时效性研究	355
17.4 渗流作用下弱支护巷道围岩应力场及蠕变数值模拟	357
17.4.1 数值计算模型	357
17.4.2 数值模拟方案	358
17.4.3 数值模拟结果及分析	359
17.5 巷道围岩支护及控制对策研究	367
17.5.1 考虑围岩的地质条件和岩性	367
17.5.2 考虑巷道局部稳定性的差异	368
17.5.3 考虑水渗流的作用	369
17.6 本章小结	370
参考文献	370

第 18 章 时变边界系统动力学与瓦斯突出机理	372
18.1 煤与瓦斯突出的几种假说及简评	372
18.2 含瓦斯煤体的边界时变特征	373
18.2.1 煤体破坏区域的时变	373
18.2.2 煤壁附近的边界时变	374
18.2.3 瓦斯压力对煤体时变边界的影响	374
18.2.4 地应力对煤体时变边界的影响	374
18.3 时变边界系统动力学用来解释瓦斯突出机理	374
18.4 本章小结	377
参考文献	377
附录 时变系统动力学简介	379
A.1 时变系统及其分类	379
A.1.1 从参量变化快慢分类	379
A.1.2 从系统时变的部位和方式分类	381
A.1.3 从反冲力的贡献分类	382
A.1.4 从材料是否破坏的视角分类	382
A.1.5 从时变机理分类	383
A.2 时变系统动力学的热点问题	384
A.2.1 材料生长	385
A.2.2 施工力学	390
A.2.3 车-桥耦合振动	391
A.2.4 轴-车床耦合振动	395
A.2.5 约束时变系统	395
A.2.6 充液航天器	405
A.2.7 变质量系统热力学	406
A.3 时变系统动力学的研究进展	406
A.3.1 研究进展	406
A.3.2 发展前景展望	407
参考文献	408

绪 论

0.1 研究背景与意义

通常认为,蠕变是极其缓慢的.但是,对于采动岩体或开采煤层来讲,蠕变效应有时是不可忽视的.这是因为,岩体、煤层的破坏到一定阶段会产生破裂区域和破碎区域.在破碎区,由于孔隙度远远大于完整岩块的孔隙度,蠕变的速度(本书用孔隙度变化率来刻画)很大,可能引起渗透特性的急剧变化.这样,岩体/煤层中流体的运动(吸附/解吸、扩散、对流、渗流)发生急剧变化,有时会发生运动性质或状态的变化.流体运动状态的变化在数学上来讲就是拓扑结构的变化,即结构失稳.结构失稳(分岔)的一种形式就是 Lyapunov 意义下的失稳.对于采动岩体中的水渗流, Lyapunov 意义下的失稳表现为突水;对于开采煤层来讲, Lyapunov 意义下的失稳表现为瓦斯突出.如果瓦斯运动的失稳与煤层变形运动的失稳同时发生,则表现为煤与瓦斯突出.

蠕变引起采动岩体孔隙度的变化,从而引起其渗透特性(渗透率、非 Darcy 流 β 因子和加速度系数)的变化;反过来,孔隙和渗透特性的变化引起渗流场(压力场、速度场)的变化,从而引起岩体蠕变特性参量的变化.因此,蠕变和渗流之间存在耦合作用.这种耦合作用演化到一定程度,便使岩体的渗透特性与压力梯度满足渗流失稳条件,从而引发突水和瓦斯突出灾害.

采动岩体蠕变和渗流行为的研究是煤矿围岩稳定性控制、突水灾害防治及地下水资源保护等一系列工程技术问题的基础性研究课题,对于促进煤矿生产安全、保护地下水资源、实现煤炭资源的绿色开采和煤炭工业的可持续发展有着重要的理论意义和工程实际意义.

0.2 研究内容与方法

本书以采动岩体变形-渗流耦合、煤层变形-瓦斯运移耦合关系为切入点,综合利用试验、理论分析、数值模拟等方法对采动岩体的复杂动力学行为进行基础性研究.主要内容包括流-固耦合问题的运动学描述、适用于动力学计算的流动法则、采动岩体变形-渗流耦合作用、煤层变形-瓦斯运移耦合作用、耦合系统动力学响应计算方法、岩石(包括煤)的机械性质(强度、渗透性、吸附性等)试验及几个特殊问题的分析.

0.2.1 流—固耦合问题的运动学描述

固体力学通常采用 Lagrange 描述法, 流体力学通常采用 Euler 描述法, 对于流—固耦合问题, 该如何描述其运动? 在流—固耦合问题中, 流体在变形固体的空隙(孔隙和裂隙)中运移, 在不同时刻, 固体微元中包含的流体质点集合是不同的, 无论采用连续介质力学中传统意义的 Lagrange 坐标还是 Euler 坐标, 都不便于描述两种介质的运动. 本书定义了 5 种坐标, 分别为固体介质在初始时刻的 Lagrange 坐标 X_i^s , 固体介质在当前时刻的 Lagrange 坐标 x_i^s , 流体介质在初始时刻的 Lagrange 坐标 X_i^f , 流体介质在当前时刻的 Lagrange 坐标 x_i^f , Euler 坐标 x_i . 利用各种坐标之间的关系, 将基本方程、辅助方程都用固体介质在初始时刻的 Lagrange 坐标来表达.

0.2.2 适用于动力学计算的流动法则

现有的流动法则都是采用应力分量(增量)表示应变分量(增量), 这不利于动力学计算. 本书将变形状态分为三种, 即完全弹性状态、剪切屈服和拉伸破坏, 采用应变分量(增量)表示应力分量的形式构建流动法则. 具体的循环如下: 采用根据动量守恒方程 $m\ddot{\mathbf{u}}^s = \nabla \cdot [(1 - \phi)\Sigma - p\phi\mathbf{E}] + \mathbf{b}$ 积分出位移 $\rightarrow$ 根据几何方程 $\mathbf{S} = \frac{1}{2}[(\nabla_{\mathbf{x}}^s \mathbf{u}) + (\nabla_{\mathbf{x}}^s \mathbf{u})^T]$ 计算应变 $\rightarrow$ 利用本构关系计算应力变化 $\rightarrow$ 根据动量守恒方程积分出位移, 开始下一轮循环, 其中, 剪切流动又分为 4 种情形(在屈服面上流动、从屈服面向里流动、从屈服面内向屈服面流动但未达到屈服面、从屈服面内向屈服面流动并达到屈服面), 拉伸破坏的流动分为三种情形(卸载、卸载并反向加载、反向加载并流动到剪切屈服面), 并考虑了变形状态之间的转换.

0.2.3 流—固耦合作用

采动岩体变形—渗流耦合作用是通过孔隙度、孔隙压力来传递的. 煤层变形—瓦斯运移耦合作用也是通过孔隙度、孔隙压力来传递的, 但是由于涉及的运动形式和变量更多, 流—固耦合关系更为复杂. 由于流—固耦合作用极其复杂, 本书采用框图的形式描述之.

0.2.4 流—固耦合系统动力学响应计算方法

由于煤层/岩体各点的变形状态不同, 而且随时间变化, 有限单元的形状函数难以规定, 难以采用有限单元法求解耦合系统的动力学响应. 而直接用差分代替微分, 将微分方程转化为代数方程来求解流—固耦合运动的响应, 存在两方面的障碍. 一方面, 边界节点的位移或应力与其临近节点的位移或应力相差很大, 造成边界节点的加速度远大于其他节点的加速度, 从而引起数值发散. 另一方面, 有些条件下, 虚拟节点处的位移或应力难以构造, 只能在边界节点处采用向前或向后的差分代替