

# 含瓦斯煤岩固气耦合 失稳理论与实验研究

尹光志 鲜学福 著  
王登科 张东明



科学出版社

# 含瓦斯煤岩固气耦合失稳 理论与实验研究

尹光志 鲜学福 王登科 张东明 著

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB201203)

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB221502)

国家自然科学基金资助项目(50874124)

重庆市自然科学基金计划重点项目(CSTC, 2008BA6028)

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统介绍了含瓦斯煤岩固气耦合失稳理论及实验研究成果。全书共7章:第1章介绍了含瓦斯煤岩相关领域的研究历史与现状;第2章研究了含瓦斯煤岩的力学性质、蠕变特性和渗透特性;第3章研究了含瓦斯煤岩的流变本构模型;第4章研究了含瓦斯煤岩的弹塑性耦合损伤本构模型;第5章研究了含瓦斯煤岩的固气耦合动态模型;第6章研究了含瓦斯煤岩的失稳机制,提出了含瓦斯煤岩的失稳准则和判据;第7章介绍了自行研制的煤与瓦斯突出模拟实验系统,并对煤与瓦斯突出进行了实验研究。

本书可供采矿工程、安全技术及工程、岩土工程等相关领域的科研人员使用,也可作为高等院校相关专业研究生和本科生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

含瓦斯煤岩固气耦合失稳理论与实验研究/尹光志等著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-031737-7

I. ①含… II. ①尹… III. ①瓦斯煤层采煤法—研究 IV. ①TD823.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 121224 号

责任编辑: 沈 建 / 责任校对: 陈玉凤  
责任印制: 赵 博 / 封面设计: 陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011年6月第 一 版 开本: B5 (720×1000)  
2011年6月第一次印刷 印张: 15 1/4  
印数: 1—1 500 字数: 294 000

定价: 65.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

我国是世界上煤与瓦斯突出最严重的国家之一。近年来,随着开采深度的增加、瓦斯压力的增大和开采条件的日趋复杂,煤与瓦斯突出发生的强度及造成的伤亡不断增长,煤与瓦斯突出的预测和防治工作十分严峻。煤与瓦斯突出机理的综合作用假说表明,煤与瓦斯突出是地应力、瓦斯压力和煤岩的物理力学性质等因素的综合作用的结果。因此研究与这些内容相关的含瓦斯煤岩的力学性质、本构模型及失稳破坏准则,对进一步揭示煤与瓦斯突出机理和防治煤与瓦斯突出有着十分重要的作用。

全书共 7 章:第 1 章回顾了与含瓦斯煤岩研究相关的岩石流变理论、岩石损伤本构、瓦斯渗流及固气耦合等方面的研究历史与现状。第 2 章利用自主研发的含瓦斯煤岩三轴蠕变瓦斯渗透实验系统,对含瓦斯煤岩的力学性质、蠕变特性和渗透特性进行了系统深入的实验研究。在含瓦斯煤岩力学性质的实验研究中,分析了围压和瓦斯压力对含瓦斯煤岩变形和强度特性的影响,得出了相关规律;分析总结出了含瓦斯煤岩三轴压缩下的破坏形式。在含瓦斯煤岩蠕变特性的实验研究中,根据实验结果得出了含瓦斯煤岩蠕变规律;详细分析了含瓦斯煤岩衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段的蠕变变形和蠕变速率,得到了偏斜应力、围压和瓦斯压力三者对蠕变速率的影响规律;分析总结出了含瓦斯煤岩加速蠕变阶段的启动条件及该阶段的蠕变速率特征。在含瓦斯煤岩渗透特性的实验研究中,根据实验结果总结出了围压和瓦斯压力对含瓦斯煤岩渗透率的影响规律,分析了 Klinkenberg 效应和应力-应变全过程对含瓦斯煤岩渗透率影响。第 3 章基于实验结果,利用模型辨识方法提出了一种能反映含瓦斯煤岩加速蠕变的改进的黏弹塑性模型,将之与伯格斯特一起组成了一维含瓦斯煤岩的非线性黏弹塑性流变模型,进而推导出了含瓦斯煤岩三维非线性黏弹塑性流变模型,并利用实验结果进行了验证;利用常微分解的稳定性理论,对含瓦斯煤岩非线性黏弹塑性流变模型进行了稳定性分析,得到了含瓦斯煤岩的流变失稳条件。第 4 章在不可逆热力学框架内,利用连续介质损伤力学方法建立了用以描述含瓦斯煤岩的弹塑性变形、瓦斯吸附效应、体积膨胀、围压敏感、弹性模量的退化、各向异性损伤、应变强化及软化、非关联塑性流动等物理现象及力学行为的弹塑性耦合损伤本构模型,并对之进行了实验验证。第 5 章通过在多孔介质有效应力原理中引入煤岩吸附瓦斯的膨胀应力,建立了含瓦斯煤岩的固气耦合动态模型,该模型不但考虑了含瓦斯煤岩在变形过程中孔隙度和渗透率的动态变化特征,而且还反映了瓦斯气体可压缩性和煤岩骨架可变形的特点,从

而更真实全面地反映了含瓦斯煤岩的固气耦合效应;利用 COMSOL-Multiphysics 有限元软件根据所提出的含瓦斯煤岩的固气耦合本构模型建立了有限元模型,得到了含瓦斯煤岩固气耦合动态模型的数值解,同时还分析了 Klinkenberg 效应对含瓦斯煤岩渗透率的影响。第 6 章通过利用初等突变理论建立了基于试验机-试样分析系统的含瓦斯煤岩蠕变破坏的尖点突变失稳模型,得出三轴压缩条件下含瓦斯煤岩蠕变失稳破坏条件;在总结国内外关于岩石类材料的强度准则及实验结果基础上,提出了一种符合含瓦斯煤岩三轴应力条件下变形的强度判据,该判据不但能描述三轴压缩下中间主应力的影响及含瓦斯煤岩非线性应变强化特征,而且还可以描述含瓦斯煤岩的拉伸破坏。第 7 章介绍了自行研制的煤与瓦斯突出模拟实验系统,并对煤与瓦斯突出进行了实验研究;分析了煤体在不同含水率和不同荷载条件下对煤与瓦斯突出强度等的影响。

应该指出,含瓦斯煤岩固气耦合失稳理论与实验研究是一个长期过程,今后还需要做更多更深入的研究来充实和完善含瓦斯煤岩固气耦合的相关理论,以更好地服务于生产实践。由于作者的水平有限,书中难免存在不足之处,敬请批评指正。

最后,作者对重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室、复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室、西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室所提供的大力支持和帮助表示感谢!

作 者

2011 年 4 月

于重庆大学

# 目 录

## 前言

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                        | 1  |
| 1.1 引言 .....                                 | 1  |
| 1.2 国内外研究现状 .....                            | 2  |
| 1.2.1 岩石流变理论研究进展 .....                       | 2  |
| 1.2.2 岩石损伤本构模型研究现状 .....                     | 7  |
| 1.2.3 稳定性问题研究现状概述 .....                      | 10 |
| 1.2.4 瓦斯渗流及固气耦合研究现状 .....                    | 12 |
| <b>第 2 章 含瓦斯煤岩力学性质、蠕变特性以及渗透特性的实验研究</b> ..... | 15 |
| 2.1 实验系统描述 .....                             | 15 |
| 2.2 试样制备 .....                               | 17 |
| 2.3 实验准备 .....                               | 18 |
| 2.4 含瓦斯煤岩力学性质的实验研究 .....                     | 19 |
| 2.4.1 含瓦斯煤岩变形特性研究 .....                      | 19 |
| 2.4.2 含瓦斯煤岩三轴抗压强度研究 .....                    | 23 |
| 2.4.3 含瓦斯煤岩破坏形式研究 .....                      | 25 |
| 2.5 含瓦斯煤岩蠕变特性实验研究 .....                      | 27 |
| 2.5.1 煤岩蠕变的一般规律 .....                        | 27 |
| 2.5.2 含瓦斯煤岩蠕变试验结果与分析 .....                   | 28 |
| 2.5.3 衰减蠕变阶段 .....                           | 30 |
| 2.5.4 稳态蠕变阶段 .....                           | 34 |
| 2.5.5 加速蠕变阶段 .....                           | 38 |
| 2.6 含瓦斯煤岩渗透特性实验研究 .....                      | 39 |
| 2.6.1 实验结果 .....                             | 40 |
| 2.6.2 围压对含瓦斯煤岩渗透率的影响 .....                   | 40 |
| 2.6.3 瓦斯压力对含瓦斯煤岩渗透率的影响 .....                 | 42 |
| 2.6.4 应力-应变全过程对含瓦斯煤岩渗透率的影响 .....             | 43 |
| <b>第 3 章 含瓦斯煤岩非线性黏弹塑性流变模型研究</b> .....        | 52 |
| 3.1 岩石类材料流变模型 .....                          | 52 |
| 3.1.1 三种基本元件 .....                           | 52 |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 3.1.2 组合模型                    | 55        |
| 3.2 流变模型的三维本构关系               | 63        |
| 3.2.1 黏弹性问题的对应原理              | 63        |
| 3.2.2 黏弹性三维本构关系               | 65        |
| 3.2.3 黏弹塑性模型三维本构关系            | 66        |
| 3.3 流变模型辨识                    | 67        |
| 3.3.1 系统辨识概述                  | 67        |
| 3.3.2 岩石类材料流变模型类属             | 68        |
| 3.3.3 流变模型参数确定                | 69        |
| 3.3.4 流变模型结构参数的确定             | 71        |
| 3.3.5 流变模型验证                  | 72        |
| 3.4 含瓦斯煤岩非线性黏弹塑性流变模型          | 72        |
| 3.4.1 线性黏弹性流变模型               | 72        |
| 3.4.2 非线性黏弹塑性流变模型             | 74        |
| 3.5 含瓦斯煤岩三维非线性流变模型            | 77        |
| 3.5.1 含瓦斯煤岩一维流变模型             | 77        |
| 3.5.2 含瓦斯煤岩三维流变模型             | 78        |
| 3.5.3 含瓦斯煤岩三维流变模型参数确定及实验验证    | 79        |
| <b>第4章 含瓦斯煤岩弹塑性耦合损伤本构模型研究</b> | <b>81</b> |
| 4.1 连续介质力学基本方程及内变量理论          | 81        |
| 4.1.1 连续介质力学基本方程              | 81        |
| 4.1.2 内变量理论                   | 83        |
| 4.2 连续介质损伤力学基本概念及理论           | 85        |
| 4.2.1 损伤变量                    | 85        |
| 4.2.2 损伤有效应力                  | 86        |
| 4.2.3 损伤热力学基础                 | 88        |
| 4.2.4 损伤的度量                   | 92        |
| 4.2.5 损伤动力学演化规律               | 94        |
| 4.2.6 弹(黏)塑性变形损伤耦合            | 98        |
| 4.3 弹塑性本构模型基本理论               | 101       |
| 4.3.1 屈服面与后继屈服面               | 102       |
| 4.3.2 岩石类材料的强化规律              | 102       |
| 4.3.3 塑性流动法则                  | 104       |
| 4.3.4 加载准则                    | 108       |
| 4.4 含瓦斯煤岩有效应力原理               | 109       |

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| 4.4.1 不考虑损伤的含瓦斯煤岩有效应力 .....                | 109        |
| 4.4.2 考虑损伤的含瓦斯煤岩有效应力 .....                 | 112        |
| 4.5 含瓦斯煤岩弹塑性耦合损伤本构模型的建立 .....              | 113        |
| 4.5.1 热力学框架 .....                          | 113        |
| 4.5.2 弹塑性描述 .....                          | 115        |
| 4.5.3 各向异性损伤描述 .....                       | 116        |
| 4.5.4 模型参数的确定与实验验证 .....                   | 117        |
| 4.6 本章小结 .....                             | 120        |
| <b>第5章 含瓦斯煤岩固气耦合动态模型与数值模拟研究</b> .....      | <b>122</b> |
| 5.1 基本假设 .....                             | 122        |
| 5.2 孔隙度与渗透率的动态模型 .....                     | 122        |
| 5.3 有限单元法基本方程 .....                        | 124        |
| 5.4 平衡方程 .....                             | 127        |
| 5.4.1 平衡方程基本格式 .....                       | 127        |
| 5.4.2 <del>平衡方程</del> 平衡方程空间离散化 .....      | 128        |
| 5.4.3 平衡方程时间离散化 .....                      | 130        |
| 5.5 连续性方程 .....                            | 131        |
| 5.5.1 连续性方程基本格式 .....                      | 131        |
| 5.5.2 连续性方程空间离散化 .....                     | 134        |
| 5.5.3 连续性方程时间离散化 .....                     | 136        |
| 5.6 总体控制方程 .....                           | 137        |
| 5.7 多物理场耦合软件 COMSOL-Multiphysics 简介 .....  | 137        |
| 5.7.1 软件的组成及功能模块 .....                     | 138        |
| 5.7.2 COMSOL-Multiphysics 建模过程 .....       | 140        |
| 5.7.3 COMSOL-Multiphysics 软件特征 .....       | 141        |
| 5.8 含瓦斯煤岩固气耦合 COMSOL 有限元数值模拟 .....         | 141        |
| 5.8.1 模型简化与假设 .....                        | 141        |
| 5.8.2 含瓦斯煤岩本构模型及参数 .....                   | 143        |
| 5.8.3 模型计算尺寸及边界条件 .....                    | 144        |
| 5.8.4 有限元模型计算结果与分析 .....                   | 145        |
| 5.8.5 考虑 Klinkenberg 效应的有限元模型计算结果与分析 ..... | 152        |
| 5.9 本章小结 .....                             | 153        |
| <b>第6章 含瓦斯煤岩失稳准则及判据研究</b> .....            | <b>154</b> |
| 6.1 含瓦斯煤岩失稳分析 .....                        | 154        |
| 6.2 初等突变理论概述 .....                         | 156        |



|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 6.2.1       | 重要概念                      | 156        |
| 6.2.2       | 初等突变理论的应用                 | 159        |
| 6.2.3       | 突变图形分析                    | 161        |
| 6.2.4       | 利用尖点突变模型解决问题的一般步骤         | 162        |
| 6.3         | 含瓦斯煤岩尖点突变失稳模型             | 162        |
| 6.3.1       | Cook 刚度判据与岩体系统动力失稳现象的基本特征 | 162        |
| 6.3.2       | 试验机-试样系统的分析模型             | 163        |
| 6.3.3       | 含瓦斯煤岩蠕变失稳尖点突变模型           | 164        |
| 6.4         | 岩石类材料强度准则                 | 167        |
| 6.4.1       | Coulomb 强度准则              | 167        |
| 6.4.2       | Hoek-Brown 强度准则           | 169        |
| 6.4.3       | Mohr 强度准则                 | 171        |
| 6.4.4       | Griffith 强度准则             | 173        |
| 6.4.5       | Drucker-Prage 强度准则        | 175        |
| 6.4.6       | Murrell 强度准则              | 177        |
| 6.4.7       | 幂函数强度准则                   | 178        |
| 6.4.8       | 双剪统一强度准则                  | 179        |
| 6.5         | 中间主应力的影响                  | 180        |
| 6.5.1       | 中间主应力对岩石强度的影响             | 180        |
| 6.5.2       | 中间主应力对岩石变形的影响             | 182        |
| 6.6         | 含瓦斯煤岩强度准则                 | 182        |
| 6.6.1       | 含瓦斯煤岩强度准则的提出              | 182        |
| 6.6.2       | 含瓦斯煤岩强度准则的实验验证            | 185        |
| 6.7         | 本章小结                      | 186        |
| <b>第7章</b>  | <b>煤与瓦斯突出模拟实验研究</b>       | <b>187</b> |
| 7.1         | 煤与瓦斯突出模拟实验系统的研制           | 187        |
| 7.1.1       | 煤与瓦斯突出模拟实验系统研制进展          | 187        |
| 7.1.2       | 煤与瓦斯突出模拟实验系统研制思路          | 187        |
| 7.1.3       | 煤与瓦斯突出模拟实验系统              | 189        |
| 7.2         | 煤与瓦斯突出模拟实验研究              | 193        |
| 7.2.1       | 煤与瓦斯突出模拟实验准备过程            | 193        |
| 7.2.2       | 煤与瓦斯突出模拟实验研究              | 196        |
| 7.3         | 含水率对煤与瓦斯突出强度影响的实验研究       | 200        |
| 7.4         | 不同荷载条件下煤与瓦斯突出强度的实验研究      | 204        |
| 7.5         | 本章小结                      | 208        |
| <b>参考文献</b> |                           | <b>209</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

煤与瓦斯突出是指煤矿井下采掘过程中在很短时间内从煤(岩)壁内部向采掘空间突然喷出大量的煤和瓦斯混合物的现象<sup>[1~3]</sup>。自 1834 年法国鲁阿雷矿发生世界上第一次煤与瓦斯突出以来,至今约有 19 个国家发生了煤与瓦斯突出<sup>[4]</sup>。我国是世界上煤与瓦斯突出最严重的国家之一。新中国成立以来,我国煤矿发生煤与瓦斯突出次数占全世界突出次数的 1/3 以上<sup>[5]</sup>。我国有记载的第一次煤与瓦斯突出是 1950 年 5 月 2 日在辽源富国西二井距地表 350m 处煤巷掘进时发生的;规模最大的一次是 1975 年 8 月 8 日在四川三汇坝一井+280m 水平主平洞揭煤时发生的,突出煤岩 12780t,喷出瓦斯量达 1400000m<sup>3</sup>。煤与瓦斯突出是一种极其复杂的矿山动力现象,它能摧毁井巷设施、破坏矿井的通风系统,严重时能导致人员伤亡、瓦斯爆炸等灾难性后果。因此煤与瓦斯突出是威胁煤矿安全最严重的灾害之一<sup>[2~4, 6~8]</sup>。近年来,随着开采深度的增加、瓦斯压力的增大和开采条件的日趋复杂,煤与瓦斯突出发生的强度及造成的伤亡不断增长<sup>[9]</sup>。因此,煤与瓦斯突出的预测和防治工作十分严峻。

自 20 世纪以来,国内外学者提出了几十种关于煤与瓦斯突出机理的假说,归纳起来主要有以下几种类型<sup>[2, 3, 10~17]</sup>:

(1) 瓦斯作用假说。这类假说认为煤体内储存的高压瓦斯是突出中起主要作用的因素。其主要代表有“瓦斯包说”、“粉煤带说”、“煤孔隙结构不均匀说”等。

(2) 地应力作用说。这类假说认为在煤与瓦斯突出过程中起主导作用的是高地应力。主要代表有“岩石变形潜能说”、“应力集中说”、“应力叠加说”等。当巷道接近具有高应变能的岩层时,这时岩层将像弹簧一样张开,导致煤体破裂,引起煤与瓦斯突出。

(3) 综合作用假说。这类假说认为煤与瓦斯突出是由地应力、瓦斯压力及煤的物理力学性质等因素综合作用的结果。这类假说较全面地考虑了突出发生的作用力和介质两个方面的主要因素,因而得到了国内外大多数学者的认可。主要代表有“振动说”、“游离瓦斯说”、“分层分离说”等。

煤与瓦斯突出是煤岩变形与瓦斯流动相互影响下,煤岩体发生突然破裂所引发的矿山灾害动力现象。在综合作用假说基础上,前人已经做出了很多卓有成效

的研究<sup>[18~21]</sup>,这些研究成果为进一步认识和掌握煤与瓦斯突出机理打下了良好的理论基础。但是煤与瓦斯突出机理的研究是一个长期的过程,需要更多更深入的后继研究工作来不断完善突出机理理论,以更好地服务于生产实践。本书将从流变理论、岩石损伤本构和固气耦合等方面开展实验和理论研究,并辅以数值分析手段,对含瓦斯煤岩的力学性质及失稳规律进行研究,以期充实和完善煤与瓦斯突出机理的基础理论。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 岩石流变理论研究进展

在采矿工程中,采掘空间形成后,围岩的变形可以持续很长时间,并会带来巷道变形失稳、工作面垮塌、煤与瓦斯延迟突出等后果,长期影响煤矿井下工人的安全性作业。因此与煤岩相关的岩石流变性能研究一直都受到重视。岩石流变学的重要研究内容之一就是准确描述岩石的流变变形特性及其力学行为,并建立起相关的流变本构模型。国内外学者进行了长期的研究,采用多种途径和方法来获取不同类型的岩石流变本构模型,取得了很多有益的成果。归纳起来,大致分为以下几个方面。

#### 1. 经验模型

经验流变模型通常是在岩石流变试验的基础上,根据试验数据建立岩石的应力、应变(或应变速率)与时间的函数关系式。对不同的岩石以及不同的条件,采用不同的经验模型。几种常见的蠕变经验公式有对数函数型、幂函数型、指数函数型以及多项式等类型,描述岩石变形-时间曲线全过程的蠕变方程一般可表示为<sup>[22]</sup>

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon(t) + At + \epsilon_T(t) \quad (1.2.1)$$

式中, $\epsilon$  是总应变; $\epsilon_e$  是弹性应变; $\epsilon(t)$  是描述初始蠕变的函数; $A$  为常数; $At$  和  $\epsilon_T(t)$  分别为描述等速蠕变和加速蠕变的函数。

一般而言,大多数的经验模型只对岩石的瞬态蠕变和稳态蠕变阶段进行描述。如吴立新等通过对煤岩进行流变试验研究发现煤岩流变符合对数型经验公式,求出了各级应力水平下煤岩对应的流变经验公式参数集<sup>[23]</sup>;张学忠等基于辉长岩单轴压缩蠕变试验结果,拟合出蠕变曲线的经验公式<sup>[24]</sup>;Okubo 等利用伺服控制的刚性试验机测得不同岩石的压缩蠕变全过程曲线,在试验基础上提出了一个反映岩石蠕变破坏全过程的非线性本构模型<sup>[25]</sup>;芮勇勤等根据对露天矿蠕动边坡中软弱夹层流变特性的研究,建立了软弱夹层的流变本构方程<sup>[26]</sup>;Cruden 将岩石蠕变过程分为减速和加速两个阶段,提出了一个幂函数型的经验方程用以描述减速蠕

变和加速蠕变变形<sup>[27]</sup>; Saito<sup>[28]</sup>、Zavodni 等<sup>[29]</sup>、Varnes<sup>[30]</sup>、Yang 等<sup>[31]</sup>分别提出了对数及指数型经验方程来描述岩石的加速蠕变阶段; Fernandez 等<sup>[32]</sup>、Wawersik 等<sup>[33]</sup>、Haupt 等<sup>[34]</sup>等提出了指数型经验方程用以描述岩盐的蠕变和松弛现象; Shin 等<sup>[35]</sup>利用幂函数经验型方程描述了六种岩石的蠕变变形及强度特征; Dubey 等<sup>[36]</sup>根据实验结果提出了一种指数型经验函数,成功地描述了结构各向异性对岩石蠕变的影响; Bérest 等<sup>[37]</sup>提出了一个指数与幂函数相结合的经验型方程用于描述岩石的极缓慢蠕变过程。

尽管岩石流变经验模型与具体的试验吻合得较好,但它通常只能反映特定应力路径及状态下岩石的流变特性,难以反映岩石内在机理及特征,若推广到其他条件时往往会带来较大的误差,甚至得出完全错误的结论。此外岩石流变经验模型无法描述加速流变阶段,这也是岩石流变经验模型建立中的一个重要缺陷。然而岩石流变经验模型直观明显,可直接使用,亦为工程设计人员乐意采用,但由于无法给出用于工程实践的流变力学参数,因而不便于工程应用。

## 2. 元件组合模型

根据流变实验曲线,元件模型一般都是采用模型基本原件[包括胡克体(H)、牛顿体(N)和圣维南体(S)三种元件]之间的不同组合来模拟岩石的流变行为。岩石流变元件模型中典型的模型有麦克斯韦模型、开尔文模型、宾汉模型、伯格斯模型、理想黏塑性体、西原模型、刘宝琛模型等。元件组合模型所构建的是一种微分形式的流变本构模型,它具有概念直观、简单形象、物理意义明确等优点,因而在工程实践中得到了广泛的应用。

在建立元件组合模型的过程中,首先通过室内蠕变、松弛等试验获得岩石的应力-应变-时间曲线,分析时间对应力-应变曲线的弹性阶段、弹塑性阶段的影响,建立由上述三种元件串联或并联组成的模型用以模拟实际岩石的应力-应变关系,并据此来调整模型的参数和组合元件的个数,使得模型的应力-应变曲线和试验结果相一致。然而,由于岩石流变力学性质的复杂性,采用单一的元件模型通常不能对其进行准确的描述,于是人们便将若干个相同模型串联或并联构成更复杂的广义模型,如广义麦克斯韦模型、广义开尔文模型、广义伯格斯模型等即属于这类模型。此外,还有一类模型叫层叠模型<sup>[38~40]</sup>,是由若干个并联的组合模型层叠而成,每层元件体的应变相同,总应力为各分层应力之和。层叠模型所用的基本元件与广义模型一样,也属于广义模型的范畴。由以上三种基本元件组合而成的一维流变模型的本构方程的通式可以表示如下<sup>[41]</sup>:

$$A\sigma_s + p_0\sigma + p_1\dot{\sigma} + p_2\ddot{\sigma} + \cdots = q_0\epsilon + q_1\dot{\epsilon} + q_2\ddot{\epsilon} + \cdots \quad (1.2.2)$$

式中, $\sigma_s$ 、 $\sigma$ 和 $\epsilon$ 分别表示屈服强度、应力和应变; $B$ 、 $p_i$ 和 $q_i$ 为岩石的材料参数( $i=1,2,\cdots$ )。

根据叠加原理,根据式(1.2.2)可以推导出三维情况下的流变本构模型<sup>[42]</sup>。但流变元件模型均是由模型元件线性组合而成,因此无论模型中元件有多少、模型怎样复杂,最终却不能描述加速流变阶段,所以线性流变元件模型力学性质单一,通过调整参数有时仍无法定量模拟实测的应力-应变-时间曲线。所以用岩石线性流变元件模型难以反映岩石的复杂特性,只能适用于有限的范围。

由于岩石材料力学行为的非线性特征,发展了一些非线性流变元件模型理论,即通过将线性元件用非线性元件代替,从而采用与其他黏性和塑性元件的串并联组合得到的新的非线性流变元件模型。具有代表性的有:孙均就岩石非线性流变理论作了探讨<sup>[41]</sup>;曹树刚等将西原模型与塑性体并联的牛顿黏滞体用非牛顿体黏性元件代替,建立了一种改进的西原模型<sup>[43,44]</sup>;邓荣贵等根据岩石加速蠕变阶段的力学特性,提出了一种新的综合流变力学模型<sup>[45]</sup>;韦立德等根据岩石黏聚力在流变中的作用建立了新的一维黏弹塑性本构模型<sup>[46]</sup>;陈沅江等提出了蠕变体和裂隙塑性体两种非线性元件,建立了一种可描述软岩的新的复合流变力学模型<sup>[47,48]</sup>;张向东等基于泥岩的三轴蠕变试验结果,建立了泥岩的非线性蠕变方程,并以此分析了围岩的应力场和位移场<sup>[49]</sup>;王来贵等以文献[43]、[44]改进的西原正夫模型为基础,建立了参数非线性蠕变模型<sup>[50]</sup>;杨彩红等采用负弹性模量和非理想黏滞体模型,提出了一种改进的蠕变模型<sup>[51]</sup>;尹光志等根据实验结果提出了含瓦斯煤岩的蠕变模型,并进行了实验验证<sup>[52~54]</sup>;Boukharov等<sup>[55]</sup>提出了一种具有一定质量的能反映岩石变形膨胀的黏壶元件,建立了能反映不同蠕变阶段变形的非线性蠕变模型,并据此预测了岩石的长期强度和蠕变破坏时间;Cristescu等<sup>[56]</sup>、Pellet等<sup>[57]</sup>分别建立了能反映岩石流变行为的黏塑性本构模型;Sterpi等<sup>[58]</sup>利用非关联流动法则建立了能反映岩石体积膨胀的弹黏塑性流变模型;Nomura等<sup>[59]</sup>建立了能反映煤岩流变特性的黏弹性模型;Chopra<sup>[60]</sup>提出了能反映岩石高温条件下瞬态蠕变变形的黏弹性模型;Xu等<sup>[61]</sup>利用黏弹性模型分析了高边坡岩体的长期稳定性,并结合工程实践证实了模型的合理性;Tomanovic<sup>[62]</sup>建立了适用于软岩的流变本构模型。

由于岩石非线性流变元件模型有助于从概念上认识变形的弹性部分和塑性部分,且数学表达式通常能直接描述蠕变、应力松弛及稳定变形,所以许多岩石力学工作者用非线性流变元件模型来解释岩石的各种特性,因而岩石非线性流变元件模型可以将复杂的性质用直观的方法表现出来,所以岩石流变的非线性元件模型仍是目前岩石流变力学理论研究中的一个重要方向。

### 3. 损伤流变模型

大多数地质材料内部包含了从微观到细观到宏观的各种尺度的缺陷,地质材料的变形特性与破坏强度在很大程度上受到了这些内在缺陷的影响和制约,其失

稳过程总是伴随着原生裂隙的演化、发展和贯通而产生的。损伤力学是固体力学的一个分支学科,是应工程技术的发展对基础学科的需求而产生的。随着岩石力学的不断发展,损伤力学作为一个重要的理论手段逐渐应用到建立岩石流变本构模型用以反映不同岩石不同情况下的流变力学特性当中来。近十几年来,在岩石损伤流变模型的研究与应用方面取得了不少进展。缪协兴等<sup>[63]</sup>根据岩石蠕变试验结果,总结出了用以描述损伤历史的蠕变模量为参数的岩石蠕变损伤方程;郑永来等<sup>[64]</sup>将黏弹性模型与损伤模型相结合,提出了一种可以反映岩石变形与强度应变率效应的黏弹性连续损伤本构模型;浦奎英等<sup>[65]</sup>在试验的基础上建立了一种非线性流变损伤模型,该模型能够反映岩石变形的全过程特征,并能模拟岩石损伤破坏及裂缝扩展过程。秦跃平等<sup>[66]</sup>提出了两个损伤产生的基本假设,推导了适合于任何应变连续加载和卸载过程的损伤演化统一微分方程。杨春和等<sup>[67]</sup>通过对盐岩蠕变试验过程中的损伤特性进行分析,建立了一个反映盐岩蠕变全过程的非线性蠕变本构方程。肖洪天等<sup>[68]</sup>建立了裂隙岩体的损伤流变本构模型,并采用该模型对长江三峡永久船闸高边坡的稳定性进行了分析;任建喜<sup>[69]</sup>对单轴压缩岩石蠕变损伤扩展特性进行了实时分析实验,得到了岩石蠕变损伤演化全过程的细观机理,研究了蠕变损伤演化过程中裂纹宽度、长度的演化规律;曹树刚等<sup>[70]</sup>提出了煤岩蠕变损伤的偏应力检测法;韦立德等<sup>[71]</sup>基于细观力学建立了岩盐蠕变损伤本构模型;徐卫亚等<sup>[72]</sup>通过在衰减和稳态蠕变阶段引入非线性函数,建立了绿片岩的蠕变损伤本构关系;朱昌星等<sup>[73]</sup>在非线性和黏弹塑性流变模型基础上建立了非线性蠕变损伤模型;Chan等<sup>[74,75]</sup>和 Fossum等<sup>[76]</sup>将连续介质损伤力学应用于盐岩的流变分析中,研究了损伤引起的非弹性流动;Lux等<sup>[77]</sup>采用连续介质损伤力学,提出了考虑盐岩的延展性变形、变位、变形硬化和变形恢复、损伤及损伤复原机制的模型;Aubertin等<sup>[78,79]</sup>建立了盐岩以内部状态变量表述的蠕变方程,并引入损伤变量建立了新的流变模型,可描述软岩在硬化和软化过程中的半脆性特性,还能用于延性和脆性范围;Yahya等<sup>[80]</sup>建立了用内变量表述能够描述盐岩塑性、蠕变和松弛特性的统一表达式,并给出了材料参数的确定方法;Betten等<sup>[81]</sup>在各向同性材料假说基础上建立了能反映拉伸和压缩条件下宏观裂纹扩展的连续损伤蠕变力学模型;Qi等<sup>[82]</sup>在连续损伤力学基础上,利用各向异性拉伸损伤变量建立了反映高温条件下的单晶材料各向异性损伤模型;Bellenger等<sup>[83]</sup>利用不可逆热力学理论建立岩石的唯象蠕变损伤演化模型,并给出了数值计算结果;Shao等<sup>[84,85]</sup>根据蠕变和松弛实验曲线,建立了能反映岩石塑性变形、损伤演化、体积膨胀、围压影响及率相关的蠕变损伤本构模型;Challamel等<sup>[86,87]</sup>根据实验结果,建立适用于准脆性岩石的三维蠕变损伤本构模型,并对模型进行了稳定性分析;Fabre等<sup>[88]</sup>建立了岩石的各向异性黏塑性损伤流变模型;Fu等<sup>[89]</sup>以软岩为研究对象,建立了适用于扰动载荷条件下的蠕变损伤模型。

利用损伤力学方法建立起来的流变本构模型能很好地分析岩石在各种载荷条件下微裂纹的扩展和传播所引起的力学效应,但是却无法有效处理宏观裂纹的扩展过程。岩石在一定的载荷作用下,其变形过程中除了会出现微裂纹的发生、扩展和传播,随着变形的不断增大最终会出现宏观裂纹的产生和扩展,而且由此还会产生变形的各向异性以及裂纹扩展的各向异性等。尽管损伤流变模型经过一定简化后所建立起来的一系列各向同性和各向异性损伤流变模型在描述岩石的流变特性中取得了成功,但是将岩石整个流变变形过程完全视为一个损伤过程而忽视宏观裂纹的影响来处理,还是具有一定的局限性。

#### 4. 断裂流变模型

由于注意到损伤力学在岩石流变处理方面具有一定的局限性,于是有学者就开始采用断裂力学为主的方法来构建岩石的流变模型,由此便产生了断裂流变模型。断裂力学是研究含裂纹材料的强度和裂纹扩展的学科,它是固体力学的一个分支,它是以研究材料内部裂纹的扩展为基本出发点和归属,对各种裂纹尖端的应力进行计算,建立起表述裂纹扩展的断裂判据,以此衡量岩石材料的破坏。于20世纪50年代开始形成的断裂力学自建立以来,经过不断发展先后出现了线弹性断裂力学、黏弹性断裂力学、概率断裂力学以及模糊概率断裂力学等分支<sup>[90~92]</sup>。同时断裂力学在岩石力学工程领域也得到了长足发展,并取得了很多有成效的成果。Kranz<sup>[93,94]</sup>用SEM方法研究了花岗岩在荷载作用下裂纹的蠕变扩展,发现在外荷载作用下裂纹长度和裂纹数随时间增加,且随着时间的延长,裂纹之间、裂纹与空洞之间的相互作用加剧,而在加速蠕变阶段,裂纹之间的连接、归并比单一裂纹的扩展更为重要;Korzeniowski<sup>[95]</sup>对因环境条件恶化致使岩体中裂隙随时间不断演化,进而产生宏观断裂扩展,最终导致岩体由局部破坏发展到整体失稳过程进行了探讨;Chan等<sup>[96~98]</sup>提出了一种盐岩蠕变、损伤断裂多机制耦合模型,该模型可以较为满意地描述盐岩的蠕变损伤特性;Miura等<sup>[99]</sup>提出了一个微观断裂流变模型用以预测硬岩在压缩应力条件下的蠕变破坏时间,并分析了高应力条件下由应力腐蚀导致的微裂纹扩展以及微裂纹之间的影响过程;Barpi等<sup>[100,101]</sup>分析了混凝土的应变软化和蠕变行为之间的相互影响,利用耗散原理建立了微观断裂力学流变模型;Denarié等<sup>[102]</sup>在实验和数值结果基础上对混凝土的蠕变变形特征进行了分析,同时分析了混凝土变形过程中的黏弹性响应和断裂不同阶段中的蠕变变形与裂纹扩展的相互作用;Chen等<sup>[103]</sup>在三点弯曲蠕变断裂实验基础上,利用灰色预测理论建立了应力强度因子与受载持续时间的数学关系,提出了砂岩在蠕变变形中微裂纹启动准则和传播机制。陈有亮等<sup>[104~106]</sup>在传统断裂力学基础上,研究了三点弯曲和直接拉伸下的蠕变断裂特性,提出了岩石起裂的蠕变断裂准则以及裂纹时效扩展机理;邓广哲等<sup>[107]</sup>对裂隙岩体的蠕变过程中裂隙起裂、扩展以及贯通导

致岩体局部破坏向整体失稳全过程性态进行了研究,揭示了岩体裂隙蠕变过程与裂隙岩体蠕变过程对应关系的本质与机制;杨松林等<sup>[108,109]</sup>和徐卫亚等<sup>[110,111]</sup>采用黏弹性断裂力学理论系统地研究了断续结构岩体的黏弹性力学特性。

同损伤流变模型一样,断裂流变模型也有其本身的不足,由于研究的尺度不同,断裂流变模型只能描述宏观裂纹的演化情况。所以在描述岩石的流变特性方面,断裂流变模型还有待进一步完善。

### 5. 其他流变模型

除上面叙及的四种主要的岩石流变模型之外,还有一些其他的流变模型。一种是将损伤力学与断裂力学结合起来提出的一种损伤断裂耦合流变模型,以克服单独采用损伤力学或断裂力学理论来建立流变模型的不足。Costin<sup>[112]</sup>采用损伤力学和断裂力学相结合的方法,研究了脆性岩石的时效变形和破坏特征,并从实验结果分析提出“蠕变损伤”具有应力阈值的重要结论;Murakami等<sup>[113]</sup>在连续损伤力学基础上利用有限元方法讨论了裂纹尖端应力场的奇异性,分析了基于网格划分的裂纹尖端应力场的敏感性,建立了新的适用于蠕变断裂计算的蠕变损伤模型;Pedersen等<sup>[114]</sup>利用损伤力学与断裂力学相结合的方法分析了混凝土材料在不同饱和状态下的动静态力学响应,建立了混凝土黏弹性、黏塑性连续动态模型;陈卫忠等<sup>[115]</sup>基于损伤力学中等效应变概念,采用黏弹性理论和有限元法,对三峡船闸高边坡在施工开挖过程中的节理裂隙损伤耦合效应及其时效特征进行了分析研究。另一种是积分形式的流变模型,积分型流变模型是一种数学模型,其本构方程、蠕变方程和松弛方程都是积分方程形式<sup>[116]</sup>。积分型本构模型是根据遗传流变理论,在蠕变方程(或松弛方程)和 Boltzmann 叠加原理基础上导出的,它考虑了既往荷载和变形的历史过程。如果蠕变核或松弛核取不同形式,则可得到不同的本构方程。张学忠等<sup>[117]</sup>和宋飞等<sup>[118]</sup>建立的就是这类流变模型。还有一种是基于经典弹塑或弹黏塑性理论建立起来的流变模型。如 Chen 等<sup>[119]</sup>、Jin 等<sup>[120]</sup>、Nicolae<sup>[121]</sup>、Munteanu 等<sup>[122]</sup>、Grgic 等<sup>[123]</sup>建立的就是这类模型,而且这类模型在工程数值分析中应用较多。

### 1.2.2 岩石损伤本构模型研究现状

在外载和环境的作用下,由于细观结构的缺陷(如微裂纹、微孔洞等)引起的材料或结构的恶化过程,称为损伤。Kachanov<sup>[124,125]</sup>在研究蠕变断裂时最初提出了“连续性因子”的概念。Rabotnov<sup>[126,127]</sup>在 Kachanov 的研究基础上做了进一步推广,提出了“损伤因子”的概念,为损伤力学奠定了基础。后经 Lemaitre 等<sup>[128,129]</sup>、Chaboche<sup>[130,131]</sup>、Krajcinovic 等<sup>[132~134]</sup>学者的努力,逐渐形成了损伤力学这门新的学科。损伤力学的研究方法根据其研究尺度可以分为微观方法、细观方法与宏观方法。



微观损伤力学是在分子、原子层次上研究材料的物理过程,用量子力学、统计力学方法确定损伤对微观结构的影响,并推测其宏观力学效应<sup>[135]</sup>。但是微观损伤理论还不够完善,而且统计量过大,所以只能定性处理材料某些损伤现象。细观损伤力学既没有连续介质损伤力学中的唯象学假设,同时也略去物体损伤的微观物理过程,而是从颗粒、晶体、微裂纹、孔洞等细观结构层次研究各类损伤的形态、分布及演化特征,从而预测材料的宏观力学特性。1975年,Gurson<sup>[136,137]</sup>发展了一套比较完整的细观本构模型,用以描述微孔洞损伤对材料变形行为的影响,这是细观损伤力学的一个重大进展。Grady等<sup>[138]</sup>将细观裂纹密度定义为裂纹影响区的岩石总体积与岩石体积之比,激活的裂纹数服从双参数Weibull分布,由此建立岩石细观裂纹损伤演化方程。Costin<sup>[139]</sup>从脆性材料微裂纹发育的角度建立了一个微裂纹损伤模型,用于分析脆性岩石的变形和破坏。Hult<sup>[140]</sup>依据孔洞的形态、尺寸和密度定义了细观损伤变量,并根据孔洞的自相似扩展原理,直接建立了损伤率与应变率之间的关系。Gilormini等<sup>[141]</sup>、Tvergaard<sup>[142]</sup>、Nemat-Nasser等<sup>[143]</sup>分析了岩石、混凝土这类脆性材料在受载变形过程中微裂纹的形成和扩展过程,并建立了相关模型。Schlangen等<sup>[144,145]</sup>利用格构模型结合试验分析了脆性材料的细观断裂机制。在国内,谢和平最早从事岩石损伤力学方面的研究,他基于岩石微观断裂机理和蠕变损伤理论的研究,把岩石蠕变大变形有限元分析和损伤分析结合起来,形成了岩石损伤力学的思想体系<sup>[146]</sup>。近十几年来,基于岩石的细观结构,人们提出了许多研究岩石损伤过程的细观力学模型,典型的有岩石细观裂纹损伤模型<sup>[147,148]</sup>、唐春安等<sup>[149]</sup>提出的随机力学特性模型、周维垣等<sup>[150]</sup>提出的一种描述岩石、混凝土类材料断裂损伤过程区的细观力学模型和刘齐建等<sup>[151]</sup>提出的岩石细观统计损伤模型。杨小林等<sup>[152]</sup>基于现有岩石爆破机理和岩石细观损伤力学建立了损伤模型和断裂准则,阐述了岩石爆破损伤断裂的细观理论。肖洪天等<sup>[153]</sup>通过分析双向应力状态下裂纹的闭合、滑移现象,将变形分为岩石介质的变形,张开裂纹的闭合、滑移引起的变形和由于分支裂纹扩展引起的变形等3部分来研究,最后将3种机制引起的变形进行叠加,得到细观岩石力学模型。杨强等<sup>[154]</sup>采用二维格构模型在细观尺度上模拟岩石类材料的破坏过程。凌建明<sup>[155]</sup>利用电子显微镜对不同类型的岩石材料进行即时加载观测,建立了脆性岩石细观损伤模型。李广平等<sup>[156]</sup>提出真三轴条件下的岩石细观损伤力学模型,建立了岩石的损伤演化方程,给出了损伤柔度的求解公式。杨更社等<sup>[157]</sup>分别对岩石的初始细观损伤特性和细观损伤扩展力学特性进行即时CT识别研究,提出了用CT定义的损伤变量,并在研究用有效模量法确定的损伤变量和新定义的损伤变量的关系基础上建立了岩石损伤本构关系模型。葛修润和任建喜等<sup>[158,159]</sup>也对岩石进行了CT识别研究,在把应力-应变关系分段的基础上用拟合法进行了岩石损伤本构关系建模。岩石细观损伤模型研究是一个充满挑战性的领域,虽然有些细观分析取