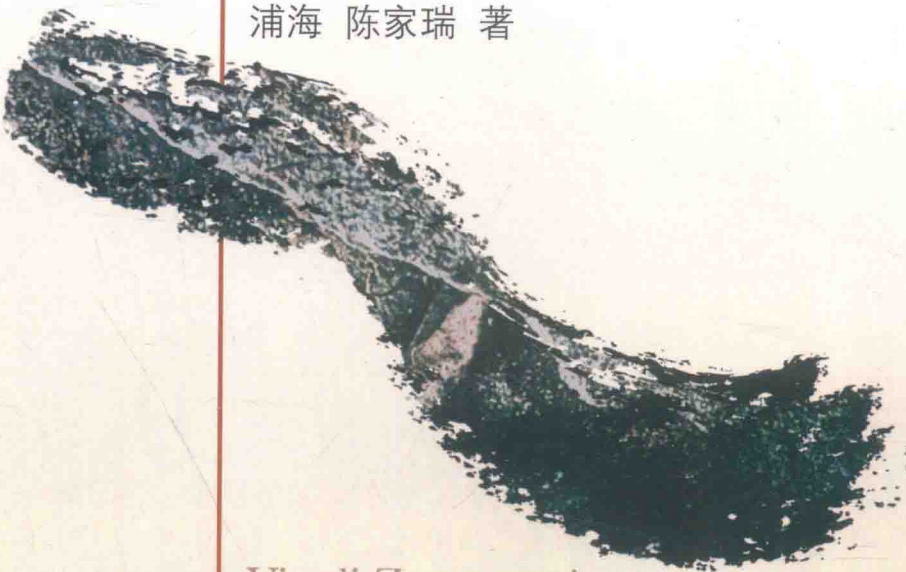


国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB251601, 2013CB227900)
国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51322401)
博士科研启动基金项目(Z301B16559)

应力作用下 破碎岩体形变与水沙渗流 特性研究

浦海 陈家瑞 著



Yingli Zuoyongxia
Posui Yanti Xingbian Yu Shuishu Shenliu
Texing Yanjiu

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB251601,
2013CB227900)

国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51322401)

博士科研启动基金项目(Z301B16559)

应力作用下破碎岩体形变与 水沙渗流特性研究

浦 海 陈家瑞 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以西部矿区覆岩采动破碎引发突水溃沙灾害问题为研究对象,系统分析了破碎岩体在围压作用下的变形特征,基于分数阶微积分理论构建破碎岩体流变模型,研究破碎岩体在位移荷载与应力荷载作用下的水沙渗流特性,并根据隆德矿区发生的突水溃沙灾害案例进行了数值仿真。

本书内容属于力学、采矿、煤矿安全、岩土工程等学科的交叉领域,可供力学、采矿、煤矿安全、岩土工程等领域的广大科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

应力作用下破碎岩体形变与水沙渗流特性研究/浦海,陈家瑞著. —徐州:中国矿业大学出版社,2017.6

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3599 - 2

I. ①应… II. ①浦… ②陈… III. ①岩石变形—渗流—研究 IV. ①TU454

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 159326 号

书 名 应力作用下破碎岩体形变与水沙渗流特性研究

著 者 浦 海 陈家瑞

责任编辑 何 戈

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 850×1168 1/32 印张 5.625 字数 144 千字

版次印次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价 22.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

目前我国仍是世界上最大的煤炭消费国和生产国,煤炭资源作为我国的主要能源和战略物资,在经济建设和社会发展中作出了巨大的贡献。随着东部矿区煤炭资源的逐渐枯竭,我国煤炭资源开发重心已逐渐向西部转移,西部煤炭资源的大规模合理开发是保障我国长期能源供应的迫切需要。2011年,全国原煤产量已经超过35亿t,在今后相当长的时期内煤炭仍将是保证国民经济与社会持续发展的主导能源。“十二五”期间,重点建设的14个大型煤炭基地,主要集中在生态环境脆弱、水土流失严重的晋、陕、蒙、宁、甘地区。根据我国能源长期发展战略规划,到2020年煤炭需求将达45亿t,其中西部占72.6%,西部煤炭资源高强度安全开采在现在乃至未来的能源发展中仍将处于十分重要的地位。

尽管西部地区煤炭资源丰富,开采条件良好,但其生态环境十分脆弱、水土流失严重,浅埋煤层上覆松散含水层和地表水,采掘过程中煤矿顶板水沙灾害日渐多发,这给矿井的安全生产带来很大威胁,严重制约着我国煤炭工业的发展。

突水溃沙是西部地区煤炭开采过程中易发的灾害之一,其本质是近松散层采掘时含沙量较高的水沙混合流体溃入井下工作面。据相关资料,神东矿区 2011 年就发生 4 次严重的工作面顶板突水溃沙灾害,造成直接经济损失近 1 亿元;2012 年 4 月 6 日,吉林省吉林市蛟河市丰兴煤矿发生重大透水事故,12 人被困井下;2012 年 5 月 2 日 7 时左右,黑龙江省鹤岗市峻源二矿井下采煤工作面发生透水事故,造成 13 人死亡;2013 年 3 月 11 日下午两点左右,黑龙江鹤岗振兴煤矿一采煤工作面在停产支护过程中发生透水,随后又发生了泥石流,当时有采面采煤工 18 人、附近掘进工 7 人,经抢险 7 人升井,18 人被困;2014 年 6 月 15 日,湖南怀化市辰溪县寺前镇双木湾煤矿因为井下发生突水事故,造成 9 人死亡,直接经济损失达 2 050 万元。

煤矿开采中产生的破碎岩体,由于具有较大的孔隙度,导水能力较强,并且具有较大的变形能力。与裂隙岩体相比,破碎岩体更容易发生突水溃沙事故,具有更大的危害性。针对我国西部特殊的脆弱生态环境和大规模高强度开采特点,开展西部煤矿突水溃沙灾害机理的研究,最大限度降低煤炭开采对生态环境的扰动和破坏,具有重要的科学意义。

本书在破碎岩体渗流研究现状的基础上,以实验室试验、理论分析以及数值模拟作为研究手段,研究破碎岩体在应力作用下的流变以及其中发生的水沙渗流问题。本书主要从以下几个方面进行研究:第一,自行研制了一

套与加载设备相匹配的加压渗流试验设备,研究应力作用下破碎岩体变形与水沙渗流特性。第二,利用自行研制的应力作用下破碎岩体水沙渗流试验系统,研究了不同应力水平、不同粒径级配对破碎岩体流变特性与水沙渗流特性的影响。第三,基于分数阶微积分理论与基于广义 Kelvin 流变模型,获得了一个新的分数阶流变模型,并推导了岩石在恒应力条件下的三维蠕变本构方程。第四,系统分析了破碎岩体变形历史对水沙渗流特性的影响。第五,基于颗粒离散元软件进行了破碎岩体水沙渗流数值模拟,为破碎岩体突水溃沙灾害的预测提供参考。

本书的写作和出版得到了国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB251601,2013CB227900)、国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51322401)、博士科研启动基金项目(Z301B16559)等项目的资助。

由于作者水平有限且时间仓促,书中难免存在疏漏和不足之处,恳切希望同行专家与广大读者给予批评指正。

著 者

2016 年 11 月

目 录

1	岩石流变与破碎岩体渗流基本理论	1
1.1	岩石流变基本理论	1
1.2	岩石渗流基本理论	9
1.3	水沙渗流基本理论	15
1.4	本章小结	21
2	应力作用下破碎岩体水沙渗流试验系统研制	22
2.1	试验系统研制目的与意义	22
2.2	试验系统的设计功能与系统性能指标	24
2.3	试验系统的整体设计	25
2.4	试验系统的检测与调试	33
2.5	本章小结	34
3	应力作用下破碎岩体水沙渗流特性试验研究	36
3.1	应力作用下破碎岩体水沙渗流特性的影响因素	37
3.2	应力作用下破碎岩体水沙渗流特性测试原理	42
3.3	应力作用下破碎岩体水沙渗流特性试验方案	45
3.4	应力作用下破碎岩体流变特性试验结果及分析	57
3.5	破碎岩体水沙渗透特性试验结果	63
3.6	本章小结	70

4 基于分数阶微积分理论的破碎岩体流变模型与	
渗流耦合	72
4.1 基于分数阶微积分的岩石流变模型的建立.....	73
4.2 基于新分数阶流变模型的破碎岩体 流变参数确定.....	89
4.3 基于 Comsol-Matlab 的分数阶流变模型与 渗流耦合验证.....	92
4.5 本章小结.....	96
5 破碎岩体形变与水沙渗流模型研究及算例分析	98
5.1 破碎岩体粒径与孔隙特性对水沙渗流特性的 影响.....	98
5.2 应力作用下破碎岩体蠕变效应对水沙渗流特性的 影响	106
5.3 破碎岩体水沙渗流的尺度效应模型	112
5.4 破碎岩体水沙渗流算例分析	124
5.5 本章小结	132
6 裂隙水沙渗流特性扩展研究	135
6.1 试验系统研制目的及影响因素	135
6.2 裂隙水沙渗流特性试验系统设计	138
6.3 裂隙水沙渗流特性试验	141
6.4 裂隙渗流的理论研究	144
6.5 裂隙渗流的试验结果	150
6.7 本章小结	154
参考文献	155

1 岩石流变与破碎岩体渗流基本理论

煤矿开采中产生的破碎岩体,由于具有较大的孔隙度,导水能力较强,并且具有较大的变形能力。由于破碎岩体具有较大的孔隙率,较容易发生突水溃沙事故,具有很高的危害性。破碎岩体的变形特性对其水沙渗透特性具有重要的影响。本章主要介绍岩石流变与破碎岩体水沙渗流基本理论,为后续试验的设计与实施奠定理论基础。

1.1 岩石流变基本理论

1.1.1 岩石流变的基本概念

岩石的流变特性是岩石力学性质的一个十分重要的特性^[1],受到外界的温度、时间、应力等因素的影响。岩石在应力环境中表现出很强的时间流变效应^[2],并且这种效应会使岩石受到更多不利因素的影响。

深部岩体通常处于高地应力环境中,受高地应力的影响,深部岩体与低地应力环境中的浅部岩体在力学特性上存在很大差异。低围压下的浅部岩体表现出脆性的破坏特征,而深部岩体在高围压的环境中则为延性破坏,主要表现为岩体的大变形和强流变特性。对岩石流变力学特性的研究是岩石力学中的一项重要内容,对于预测和评价岩石工程长期稳定性具有十分重要的意义。本书

通过对不同岩石的试验结果进行了对比分析,尤其针对不同岩石的蠕变、松弛随时间变化的具体规律进行了着重研究,得出以下结论:当作用于岩石的载荷处于不变状态时,岩石自身蠕变速率的变化会分为三个阶段,即减小、稳定、增大^[3]。不同岩石的力学性质以及作用于岩石的不同载荷强度决定了各个阶段的持续时间以及是否出现,这对于工程稳定性有着至关重要的影响。另外,根据试验结果绘制出的松弛曲线受到不同岩石性质的影响,呈现出阶梯性以及连续性的变化规律。

岩石流变模型作为岩石流变学理论的重要组成部分,经过长期的发展已经得到了广泛应用。人们通过建立流变模型理论,把复杂的岩石流变现象用较为简单直观的流变模型来描述,通过对岩石流变基本物理变量的分析,将不易描述的岩石流变控制因素用简单的本构方程来表示,对于岩石类工程结构稳定性的预测和工程安全评估具有重要的理论价值与实际工程意义。

对于岩石流变模型的研究常用的方法有三种:

第一种方法是经验模型,通过对岩石的流变特性进行试验获得在某一级应力水平下的岩石流变与时间曲线,使用幂次函数、多项式、指数函数、对数函数等各种数学公式对试验获得的曲线使用数学方式(工具)进行参数拟合运算,从而获得岩石在特定应力水平下的应变量与时间等参数的关系曲线。这种研究方法获得的岩石流变模型能够很准确地进行特定岩石材料的流变特性确定,具有很强的针对性;缺点是获得的流变模型的参数的物理意义较为模糊,在工程实践中使用较为不便。

第二种方法是基于断裂损伤机制的岩石断裂流变模型,将断裂损伤理论引入岩石类工程(材料)力学问题的研究中。这样的优点是可以处理带有节理的岩石问题,同时也可以用来描述岩石流变过程中的流变加速阶段,从而使岩石流变问题的完整过程有了一种研究方法。然而,由于断裂损伤理论有其自身的缺陷,且岩石

流变的加速过程在实验室中很难模拟,其参数难以确定,因此不能广泛使用。

第三种方法是利用各种单一力学元件以组合理论进行不同形式的串联、并联处理来模拟岩石的流变特性,常用的力学元件有弹性、黏性、塑性元件等,这些力学元件具有明确的物理意义,在组合流变模型时简单、直观、灵活多样,可以简便而全面地描述岩石流变过程中的各种性质,尤其适用于数值方法的模拟计算。

在岩石外部条件保持稳定的情况下,随着时间的流逝,岩石材料内部应力大小、物理形态大小等属性缓慢变化的物理现象被称为岩石流变现象。在各种涉及岩石类材料的实践工程中,不管是地表岩石类建筑(边坡、路基、道桥、房屋等),还是地下岩石工程(地下隧道、矿柱等)都存在随时间的流变现象。蠕变、松弛、弹性后效等现象是岩石流变问题的主要表现形式。岩石蠕变是指在岩石材料受到外界恒定应力水平的情况下,岩石的等效弹性模量变小,岩石的应变随着时间流逝而缓慢变大的物理现象;岩石松弛的情况与蠕变现象相反,岩石松弛是指在岩石的体积形状保持恒定的情况下,岩石中的应力随着时间的流逝而渐渐减小;岩体弹性后效是指岩石材料在弹性范围内受到恒定应力水平的作用,其弹性变形随着时间的流逝而缓慢增加,在去除应力水平后,岩体不能立即恢复成初始状态,需经一定的时间后才能逐渐恢复原状。

1.1.2 常用岩石流变模型

为了能够较为准确地描述岩石材料流变试验中出现的现象^[4,5],需要使用不同的基本力学元件来共同完成。通过使用表征不同物质基本力学特性的元件,如图 1-1 所示,按照组合理论进行组合,选择合适的组合方式,可以较为吻合地描述岩石流变的力学性质^[6]。每种基本力学元件可以表示一种单一的力学性质,在使用这些基本的力学元件时,需要注意以下两点:

(1) 当元件进行并联组合时,新组合模型的总载荷是对各个元件(簇)两端所承载的荷载相加;对于各个元件(簇)的位移(速率)或应变(速率)来说,它们之间是相等的。

(2) 当元件进行串联组合时,新组合模型的各个元件(簇)所受到的载荷大小是相等的,但模型的位移(速率)或应变(速率)是各个元件(簇)的位移(速率)或应变(速率)之和。

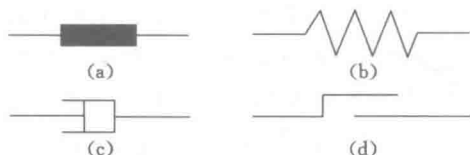


图 1-1 基本力学元件示意图

(a) 刚性元件;(b) 弹性元件

(c) 黏性元件;(d) 塑性元件

几种常用的流变组合模型如图 1-2 所示,本构关系见表 1-1,流变特性曲线如图 1-3 所示。其中,开尔文模型和黏塑性模型只能描述物体的蠕变特性而无法表示物体的应力松弛特性。

岩石在流变过程中,其属性非常复杂,采用某些流变模型对岩石流变问题进行简化时,不可能完全与岩石的真实流变特性一致,不可能毫无偏差地展现出岩体的流变特性,不同的流变模型只能描述岩体流变过程中占主要影响因素的性质特征。为了能够更为准确地分析工程问题中岩体的真实流变特性,我们就要进行多次室内试验来确定岩体流变过程中起主要作用的影响参数的值。通过对大量现场以及试验获得的数据进行分析处理、归纳总结,通过对起主要作用的影响参数的分析与数据反演,选择或建立符合工程实际的流变模型来对工程问题进行分析,这样可较为准确地描述工程岩石流变现象。

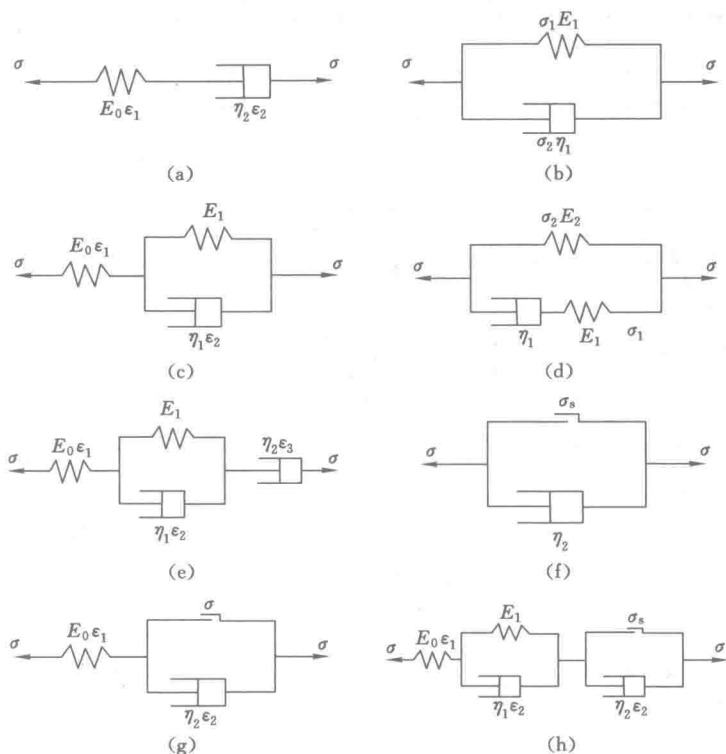


图 1-2 常用流变组合模型

- (a) 麦克斯韦模型(H-N 体);(b) 开尔文模型(K 体);
 (c) 广义开尔文模型(H-K 体);(d) 鲍埃丁-汤姆逊模型(H-M 体);
 (e) 伯格斯模型(M-K 体);(f) 黏塑性模型;
 (g) 宾汉姆模型;(h) 西原正夫模型

表 1-1 常用集中流变模型的本构方程

流变模型名称	流变模型本构方程
麦克斯韦尔模型(H-N 体)	$\sigma + \frac{\eta_2}{E_0} \dot{\sigma} = \eta_2 \dot{\epsilon}$
开尔文模型(K 体)	$\sigma = E_1 \epsilon + \eta_1 \dot{\epsilon}$
广义开尔文模型(H-K 体)	$\sigma + \frac{\eta_1}{E_0 + E_1} \dot{\sigma} = \frac{E_0 E_1}{E_0 + E_1} \epsilon + \frac{E_0 \eta_1}{E_0 + E_1} \dot{\epsilon}$
鲍埃丁-汤姆逊模型(H-M 体)	$\sigma + \frac{\eta_1}{E_1} \dot{\sigma} = E_2 \epsilon + \frac{E_1 + E_2}{E_1} \eta_1 \dot{\epsilon}$
伯格斯模型(M-K 体)	$\sigma + \left(\frac{\eta_2}{E_0} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_1} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_0 E_1} \ddot{\sigma} = \eta_2 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1} \ddot{\epsilon}$
黏塑性模型	当 $\sigma < \sigma_s$ 时, $\epsilon = 0$; 当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时, $\dot{\epsilon} = (\sigma - \sigma_s) / \eta_2$
宾汉姆模型	当 $\sigma < \sigma_s$ 时, $\epsilon = \sigma / E_0$, $\dot{\epsilon} = \dot{\sigma} / E_0$; 当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时, $\dot{\epsilon} = \dot{\sigma} / E_0 + (\sigma - \sigma_s) / \eta_2$
西原正夫模型	当 $\sigma < \sigma_s$ 时, $\sigma + \frac{\eta_1}{E_0 + E_1} \dot{\sigma} = \frac{E_0 E_1}{E_0 + E_1} \epsilon + \frac{E_0 \eta_1}{E_0 + E_1} \dot{\epsilon}$ 当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时, $(\sigma - \sigma_s) + \left(\frac{\eta_2}{E_0} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_1} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_0 E_1} \ddot{\sigma} = \eta_2 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1} \ddot{\epsilon}$

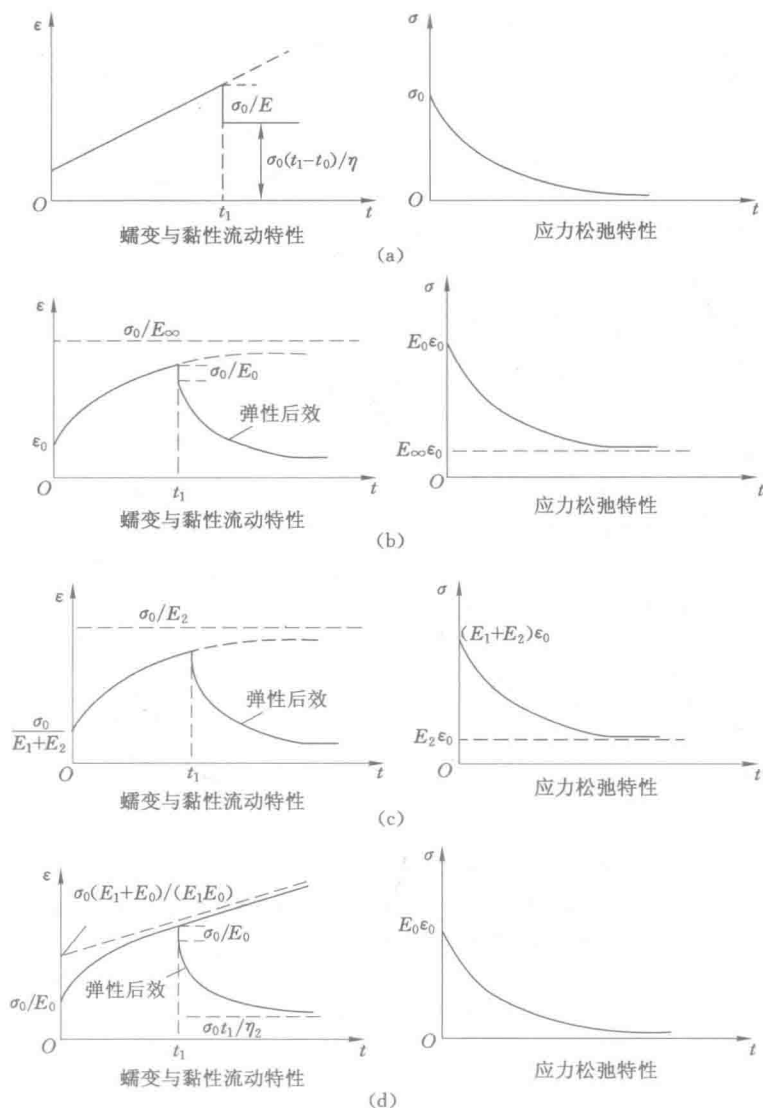
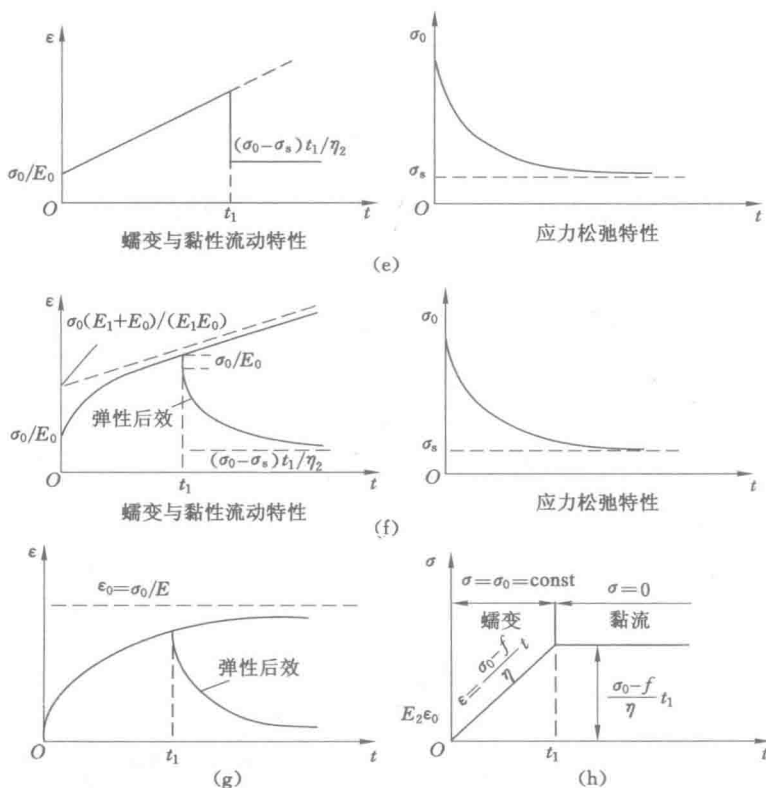


图 1-3 几种常用流变模型流变特性曲线



续图 1-3 几种常用流变模型流变特性曲线

- (a) 麦克斯韦模型(H-N体);(b) 广义开尔文模型(H-K体);
 (c) 鲍埃丁-汤姆逊模型(H-M体);(d) 伯格模型(M-K体);
 (e) 宾汉姆模型 $\sigma \geq \sigma_s$;(f) 西原正夫模型 $\sigma \geq \sigma_s$;
 (g) 开尔文模型(K体);(h) 黏塑性模型

1.2 岩石渗流基本理论

1.2.1 岩石渗流基本概念

采矿工程中具有残余承载能力的破碎岩体^[7],其变形、渗流行为对岩体内部液体、气体运移将带来很大影响^[8]。1956年,法国马尔巴塞拱坝事故的根本原因是左岸坝肩支座岩体正好是上、下游断层构成的断层破碎带岩体。在铁路隧道工程中,围岩风化严重的区域也常形成破碎带,发生突水、涌泥现象。破碎岩体的渗流特性是岩石力学和渗流力学中的重要课题^[9-11],具有重要的现实意义和工程实用价值。

渗流力学是运用连续介质力学方法研究渗流现象的学科^[12-14],它着眼于渗流的宏观过程^[15-17],而不考虑渗透质的复杂空间结构及界面效应。在渗流力学创立的初期,人们忽略了渗透质的“挠性”,研究刚性多孔介质中液体的流动行为^[18,19]。20世纪以来,人们开始关注变形对多孔介质渗透性的影响;近年来,少数学者和工程技术人员开始认识到质量迁移和流失对多孔介质孔隙度、渗透性参量及渗流场的影响^[20,21]。裂隙渗流^[22,23]的主要研究内容包括两个方面:一是渗透性及其影响因素分析;二是渗流模型的建立与渗流场的分析、计算。

渗流可分为线性渗流和非线性渗流^[24]。对于线性渗流,1856年,法国水力学家 Darcy 通过试验得出了水在均质沙柱中的渗流规律,发现通过试样的水的流量与渗流路径长度成反比,与过水截面面积成正比,与总水头损失成正比。其中:

$$Q = vA \quad (1-1)$$

式中, v 为渗流速度(m/s); A 为渗流截面面积(m²); Q 为流量(m³/s)。