

岩石流变学概论

刘 雄 著



地质出版社

中国科学院地质研究所工程地质
开放试验研究室资助

岩石流变学概论

刘 雄 著

地质出版社

· 北 京 ·

(京)新登字085号

内 容 提 要

本书为岩石流变性质与工程应用研究的专著,将岩石流变学作为工程地质、岩体力学、固体物理、数学力学的边缘学科,从微观与亚微观出发,将岩石流变学的宏观成果与研究方法推入新的研究层次。

全书共分七章:流变学导论;岩石流变学的数学力学基础;现象流变学;物理流变学;实验岩石流变学;岩石时效强度;岩土环境流变学。

本书期望能对岩石流变学与工程应用感兴趣的专家有所裨益;也可作为以地介质作为工程结构的工程地质、岩土工程、地震、铁路交通、采矿等专业的大学生和研究生的入门参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩石流变学概论/刘雄著.-北京:地质出版社,1994.6

ISBN 7-116-01649-X

I.岩… II.刘… III.岩体流变学-概论 IV.①P634.1 ②TU45

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第03892号

地质出版社 出版发行

(100013,北京和平里七区十楼)

责任编辑:屠涌泉 李奇

*

北京昌平百善印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所发行

开本:850×1168 $1/32$ 印张:7.5 字数:204千字

1994年6月北京第一版·1994年6月北京第一次印刷

印数:1000册 定价:6.25元

ISBN 7-116-01649-X

P·1333

前 言

岩石流变性质研究广泛的涉及工程地质分析、地震机制、大型岩体工程长期稳定评价、核废料及其它有害物质在地层深部的长期贮存，因而引起了岩石力学与岩土工程界的广泛兴趣，使理论发展得到实际应用的巨大推动。目前积累的大量工作与经验，特别是在我国著名岩土力学家、中国科学院学部委员陈宗基教授为代表的岩石流变学派几十年工作的基础上，已有可能将岩石流变学作为一门新的学科发展，陈宗基教授生前曾支持作者进行这一工作，尽管陈宗基教授未及阅读本书稿并撰写序文即已离我们而去，作者还是作为一种尝试出版本书，期望能为年轻一代的岩石力学、工程地质、水利水电工程、铁道交通、土木工程、采矿工程等广泛领域的研究人员和工程师，特别是年轻一代学者提供一本了解本领域的参考书；并期望他们能共同努力来推动这一领域继续发展。

本书将岩石流变学作为岩体力学、工程地质、固体物理、数学力学的边缘学科，从微观与亚微观（细观）出发，将目前的岩石流变性质研究的宏观经验、理论成果与研究方法推入新的发展层次；同时又着眼于工程实用性，对如像辐射流变、岩石疲劳、岩土环境流变等，也进行了初步的研究和讨论。

作者曾将本书内容，多次向成都理工大学水文工程地质系、武汉工业大学非金属资源工程系研究生讲课；曾给中国地质大学水文工程地质系、重庆大学矿山物理系高年级学生作过专题讲座，听取师生们的反映，对书稿不断进行修改。

在出版本书之际，作者感谢中国科学院地质研究所工程地质开放试验研究室为完成本书提供专题资助；感谢成都理工大学聘作者为客座，提供讲课的机会；感谢北京科技大学于学馥教授、

中国科学院地质研究所王思敬教授对本书的细心审评并提出许多宝贵意见；感谢研究生张雅丽、吴定洪在完成本书插图中进行的工作。

谨以此书缅怀几十年来一直指导与帮助我的老师 陈宗基教授，他的具有巨大创造力的学术思想和研究方法，还会使我受益匪浅。

刘 雄

于武汉工业大学荷花新村

目 录

第一章 流变学导论	(1)
1.1 流变学发展史	(1)
1.2 固体力学性质的流变学分类	(3)
1.3 流变学研究的范畴	(5)
第二章 岩石流变学的数学力学基础	(7)
2.1 张量的基本概念	(7)
2.1.1 应力张量	(7)
2.1.2 主轴坐标系、坐标转换不变量	(9)
2.1.3 应力张量分解与不变量	(11)
2.1.4 应变张量	(14)
2.2 本构方程应遵循的原则	(17)
第三章 现象流变学	(19)
3.1 蠕变全过程曲线及力学特性分析	(19)
3.2 流变现象的力学模型抽象	(21)
3.2.1 基本力学元件与典型体	(21)
3.2.2 马克斯威模型 (M), 粘弹性体	(24)
3.2.3 开尔芬模型 (K)、滞弹性体	(28)
3.2.4 圣维南体、St、V模型	(30)
3.2.5 宾汉体、B模型	(31)
3.3 组合流变模型及其特征分析	(32)
3.3.1 三元件模型	(32)
3.3.2 四元件模型	(36)
3.4 流变模型的结构式表示法	(43)
3.5 线性流变微分本构方程的数学特征—— 对应原理	(44)
3.6 波尔兹曼叠加原理——积分型流变本构方程	(47)

3.7 岩石流变模型	(52)
第四章 物理流变学	(57)
4.1 物理流变学研究的层次	(57)
4.2 晶体变形性能的一般分析	(59)
4.3 晶体内部缺陷	(61)
4.3.1 晶体内的点缺陷	(61)
4.3.2 晶体内的线缺陷——位错	(63)
4.3.3 位错运动与相互作用	(67)
4.3.4 晶体的面缺陷——晶界	(80)
4.4 物理流变机制分类	(84)
4.5 扩散蠕变	(87)
4.5.1 单晶体	(88)
4.5.2 多晶体	(89)
4.6 位错蠕变	(96)
4.7 蠕变断裂	(100)
4.7.1 断裂的若干基本概念	(100)
4.7.2 位错断裂模型	(101)
4.7.3 多晶体滑移的楔形裂纹	(105)
4.7.4 扩散断裂	(107)
第五章 实验岩石流变学	(112)
5.1 岩石流变试验特征	(112)
5.2 流变理论与方程	(115)
5.2.1 固态方程法	(116)
5.2.2 积分方程法	(118)
5.2.3 辅助变量法	(119)
5.2.4 不同蠕变理论的试验检验	(120)
5.3 岩石积分流变本构方程研究	(121)
5.3.1 Boltzman叠加原理	(121)
5.3.2 核函数 $K(t, \tau)$ 或 $R(t, \tau)$ 的实验确定方法	(123)
5.3.3 核函数 K 和 R 的关系	(126)
5.3.4 积分方程核的数学形式研究	(127)

5.4	蠕变与松弛等价性研究	(133)
5.5	时温等效原理	(137)
5.6	陈氏加载法	(139)
5.6.1	线性流变体	(141)
5.6.2	非线性流变体	(143)
5.7	岩石流变性质影响因素研究	(144)
5.7.1	应力性质	(145)
5.7.2	应力量级	(145)
5.7.3	围压	(148)
5.7.4	温度	(151)
5.7.5	循环加载	(152)
5.7.6	水分和湿度	(152)
5.7.7	构造因素	(156)
5.7.8	其它因素	(157)
5.8	蠕变曲线表达式概览	(157)
5.8.1	一般表达式	(157)
5.8.2	蠕变的时间函数	(157)
5.8.3	蠕变的温度函数	(158)
5.8.4	蠕变的应力函数	(158)
5.9	岩石流变仪	(158)
5.9.1	岩石蠕变仪	(159)
5.9.2	岩石松弛仪	(165)
5.10	现场岩石蠕变试验	(167)
5.11	裂隙岩石的蠕变	(171)
第六章	岩石时效强度	(178)
6.1	概论	(178)
6.2	岩石蠕变过程伴随的物理现象	(178)
6.2.1	横向蠕变与岩石膨胀效应	(178)
6.2.2	岩石微破裂与微声活性性	(180)
6.3	岩石的疲劳特性	(185)
6.3.1	疲劳的一般概念与定义	(185)

6.3.2	岩石疲劳试验的若干成果	(186)
6.4	岩石长期强度确定方法的研究	(194)
6.4.1	过渡蠕变法	(195)
6.4.2	体积膨胀法	(195)
6.4.3	应变率法	(198)
6.4.4	声发射法	(200)
6.4.5	蠕变率法	(201)
6.4.6	松弛法	(203)
6.4.7	灰色预测法 f_0 理论	(205)
6.4.8	灰色预测法	(207)
第七章	岩石环境流变效应	(211)
7.1	概论	(211)
7.2	高能辐射对岩石流变性态的影响	(213)
7.2.1	离子晶体辐照缺陷产生的物理过程	(214)
7.2.2	高能粒子辐射缺陷	(216)
7.2.3	辐射流变力学效应	(218)
7.3	渗流与化学污染物扩散对岩土体力学 性质的影响	(221)
7.3.1	岩土体中的基本传导现象	(222)
7.3.2	渗流力学效应	(223)
7.3.3	化学扩散渗透	(225)
7.4	应力环境与岩体长期稳定	(228)
	参考文献	(230)

第一章 流变学导论

1.1 流变学发展史

“流变”一词，来源于希腊语 “ $\rho\epsilon\omega$ ”，意为流动 (to flow)。流变学是研究物质在外力场或其它的物理场作用下，物质的变形和流动的科学。

流变学以研究真实物体的力学性质为基本目的，充分反映力学介质的多样性及个性，它更多地重视探讨力学性态与物质结构之间的关系，即建立所研究的力学介质的本构方程 (Constitutive equation)，故在方法论上，以实验作为其发展的基础，以推动它在不同工程领域或不同学科的应用，并促使其自身理论得以发展。

更具体的说，流变学是研究材料力学性态的新的力学分枝，主要是探讨材料在应力、应变、温度、湿度、辐射等条件下，材料与时间因素有关的变形、流动和破坏的规律性，即时间效应。

作为较为完整的学科体系，流变学形成于19世纪30年代，但其发展的过程，历时却十分长远。据古文物考据，大约可追溯到公元前1500年，当时人们对液态介质的流变性质已有肤浅的认识。最先有历史记载的是埃及的Amenemhet，他利用陶器制品作仪器测定水层高度与时间关系及温度对流体粘度的影响。但直到16世纪以前，这一认识的发展都十分缓慢。

16世纪后，Galileo提出液体具有内聚粘性概念；1835年，Weber研究抽丝发现弹性后效；1865年，Kelvin发现锌具有粘性性质。Maxwell于1869年发现，材料可以是弹性的，又可以是粘性的，因而，使人们认识到，物质的固态和液态之间并无明确的

界限。在恒定应变作用下的粘性材料，其应力不能保持恒定，而是以某一速度减小到零或某一恒定值，其衰减的速率取决于对材料所施加的初始应力值和受力材料的性质，这种现象称为“应力松弛”。许多学者还发现，假若作用于材料的应力保持恒定，则材料变形可随时间持续发展，这种特性就是“蠕变”或“流动”。1874年，Boltzmann发展了线性粘弹性理论，认为给定时间的应力，不仅取决于材料在该时间的变形，而且也取决于以前的变形，从而建立起适用于线性范畴的叠加原理。

1929年，美国的宾汉（E.C.Bingham）教授创建美国流变学会，并创办《流变学杂志》；当时，在美国，把流变学作为物理学的分枝，研究材料的变形与流动。1939年，荷兰皇家科学院成立以伯格斯（J.M.Burgers）教授为首的流变学小组。1940年，英国创建流变学协会。1950年以后成立流变学会的有德、法、日、瑞典、澳、奥地利、捷、意、比、印度和以色列。1961年，国际流变学杂志创刊。自1948年以来，流变学国际会议在斯赫维宁根（荷兰）、牛津（英）、奥尔逊（德）、东京（日）以及里昂（法）先后举行过五次。Truesdell在第四届国际流变学会议上介绍了流动和变形的理性力学，为流变学奠定了更严格的理论基础。

流变学的发展同世界经济发展和工业化进程密切相关。作为一门边缘科学，同物理学中的物性学和力学有着密切的联系，也同胶体化学、高分子化学关系密切，故亦关系到化学工业。将血液、粘液作为流变液体，流变学已深深地渗透到生命科学与医学。现代工业需要耐蠕变、耐高温的高质量的金属、合金、陶瓷材料和高强度聚合物，因此而促进了固体蠕变、粘弹性和蠕变断裂有关的流变学分枝迅速发展。核工业中的核反应堆和粒子加速器的发展、核废料在地层内的中、长期贮存，开创了辐射流变学这一新的领域。

在地球科学中，人们很早就知道时间效应这一重要因素。地壳的许多极有趣的地质现象和地球物理现象，如冰川期以后的上升，层状岩石的褶皱、冰川的流动、造山作用、地震成因以及成

矿作用的研究，无不与流变学密切相关。对于地球内部介质的物理力学过程，如岩浆活动、地幔对流、板块飘移，则和岩石高温高压流变学有关，从而发展了地球动力学。

岩土工程稳定的时间效应已日益引人注目。土基变形可延续数十年；地下隧道数十年后仍可出现蠕变断裂^[1]，如加拿大和欧洲有些隧洞，开始很完好，可是运营20多年以后发生开裂。某些岩类由于环境变化而产生的时效膨胀现象已对地下建筑产生严重的影响，瑞典有许多隧洞建在膨胀岩中，几年之内隧洞收敛达几十厘米，隧洞不能正常使用。我国的铁道隧洞亦有类似现象。

目前，固体流变学的理论发展已超出均匀连续介质的概念开始探索离散介质、非均匀介质以及非相容介质的流变特性，显然，其成果将大大地推动具有这类本构特征的岩体流变学的发展。

1.2 固体力学性质的流变学分类

人们对固态材料力学性能的认识，是随着材料在工程实际中的应用而逐步深入。最早认识到材料变形与强度的重要性，并进行试验研究的是伽利略（Galileo, 1564—1642），他在《两种新的科学》一书中论述了他的悬臂梁的试验与梁的强度。1678年，虎克（1635—1703）发表了有名的虎克定律，这一理论建立了受力材料的应力与应变之间的线性本构关系，即在固体力学中的第一个本构关系；但严格的说，当时他所建立的应是作用力与位移关系，应力与应变作为固体力学中的重要解析概念是在牛顿与莱布尼兹发明微积分之后，由柯西（Cauchy, 1789—1857）引入的，从而建立了数学力学的分析基础。

塑性变形现象发现较早，然而对它进行力学研究，是从1773年库伦提出土的屈服条件开始的。1773年他发表了著名论文《建筑静力学各种问题极大极小法则的应用》，在该文中提出：材料抗剪极限强度不但与材料的粘结力有关，而且还要考虑其摩擦力。由于当材料内部有摩擦效应时存在机械能的散耗，即具有嫡

增加，材料的塑性效应使材料受力后的变形为不可逆的物理过程。与理想弹性体相反，材料卸载后将保留残余变形。

所有真实的固体材料均有粘性，某些聚合物和岩土体均表现出明显的粘性。若考虑到材料的粘性，则必然要考虑其力学性态的应变率效应，由此而导入了时间因素，这将在后面现象流变学（第三章）的讨论中得到充分的体现。由此可以看出，若仅考虑材料的弹性和塑性，其本构关系不含时间变量，认为力学过程的发生和完成都是瞬时的。

注意到弹性、塑性和粘性的是材料在特定的力学条件下描述其力学性态的图象处理的基本概念，它们赋存于物质结构的统一模式之中，真实固体材料的这几种力学特性之间只存在模糊界限；同时，若把瞬时过程也作为物理力学过程的极限情况，则按这三种抽象特性或其组合对材料进行力学分类，可以有一个统一的模式。在这种意义下，M. Reiner提出表1—1的流变学分类。^[2]

表 1—1 固体的流变学分类

物体		固 体		狭 义 流 变 体	液 体	
		欧 拉	虎 克		牛 顿	泊斯卡
流变状 态方程	静水	$e_v \equiv 0$	$P_m = K e_v$		$P = -K e_v$	$e_v = 0$
	偏量	$e_0 \equiv 0$	$P_0 = 2\mu e_0$		$P_0 = 2\eta e_0$	$P_0 = 0$
基本力学 常 数		$\infty \leftarrow K$ $\infty \leftarrow \mu$			$K \rightarrow \infty$ $\eta \rightarrow 0$	
导出力学 常 数		对 $K = \infty$ 情况 $E^* = 3\mu$ $\gamma^* = 1/2$	$E = \frac{9K\mu}{3K + \mu}$ $\gamma = \frac{3K - 2\mu}{6K + 2\mu}$		$\lambda = 3\eta$	

表中： K ——体积模量； μ ——剪切模量； η ——粘性系数； λ ——粘性牵引系数； γ ——泊松比。

从表1—1可以看出，流变概念的引入，使材料的力学性态变化得以连贯，也使固体与液体之间没有明确的界线，同时也易于

使人理解，对于流变体来说，兼有固体与液体的双重性，正是这种双重性，使材料力学性态复杂化，但也易于对分析建立起正确的数学力学模型，以便对自然现象和工程问题进行研究。

1.3 流变学研究的范畴

流变学既然是研究材料力学性态的时效特征，因此，与时间和空间有关的过程的概念就显得十分重要，因而在广义的意义上分析，以下几方面均可列为本学科研究的主要领域：

- (1) 静态过程中的蠕变与应力松弛；
- (2) 蠕变断裂或蠕变破坏；
- (3) 变形与破坏强度的加载率或应变率效应；
- (4) 应力波在固体中的传递特性；
- (5) 疲劳；
- (6) 环境因素对固体长期变形与破坏的影响。

岩石流变学目前主要研究材料的蠕变与松弛以及岩体的蠕变断裂现象，即研究在不同环境中的岩石的变形与强度的时间效应；方法是通过实验或基本理论分析建立流变模型，并从数学上建立其本构方程。

流变本构方程是指在不同物理场（如温度、压力、湿度、辐射、电磁场）作用下，以应力、应变和时间的物理变量来定量描述所研究的材料状态的方程，这种方程将由具体材料的本质与结构决定，有时也称它为流变状态方程。

在以下各章节的研究中，我们将会看到，所谓的流变模型分为两类：力学模型和物理模型。力学模型的研究主要是现象学研究，它主要用三种基本元件（弹性元件、粘性元件及塑性元件）的串联、并联、串并联及它们组合成为某种更复杂的网络来近似地建立所研究材料的本构关系，用以预测在任意应力作用史和变化的物理环境条件下的材料的变形与破坏性质。这种现象学的方法已用了几十年，它比较简单，但一般只适用于材料为线性连续

变形的情况，物理模型主要从事机制学方面的研究，它考虑材料内部的物理化学特性，如分子运动、空位扩散、位错运动、裂纹扩展等特殊机理，并考虑固体内部晶体和晶粒边界存在的缺陷，如空位、位错、晶界、裂纹、杂质等在应力和温度或辐射作用下，对于材料流变性能的影响，故它主要是从固体物理的角度，建立材料的流变本构关系。

第二章 岩石流变学的数学力学基础

本章将讨论岩石流变学研究中的数学基础，从流变本构关系的客观性原理考虑，将限于讨论张量分析方法；并对应力空间和应变空间的特性进行分析；最后将讨论建立本构关系所应遵守的若干原则。

2.1 张量的基本概念

一个物理量或几何量，如果它在正交坐标系 $OXYZ$ 中有9个分量，则这一物理量或几何量为一张量，且为一2阶张量，如式(2—1)所示，为一2阶笛卡尔张量。

$$T = \begin{Bmatrix} t_{xx} & t_{xy} & t_{xz} \\ t_{yx} & t_{yy} & t_{yz} \\ t_{zx} & t_{zy} & t_{zz} \end{Bmatrix} \quad (2-1)$$

如果张量有几个指标，则该张量的分量个数为 3^n ， n 称为张量的阶，如(2—1)表示的一2阶张量，即有9个分量。因此，在广义意义上，矢量为1阶张量，有3个分量；而标量为零阶张量，分量即为其自身。

2.1.1 应力张量

图2—1所示，A点的应力状态可以用9个应力分量来表示，它可以写成式(2—2)的张量形式，即应力张量为一2阶张量。

$$T_\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{Bmatrix} \quad (2-2)$$

由于坐标选择的任意性，如果将在 $OXYZ$ 坐标系中的张量 T_σ

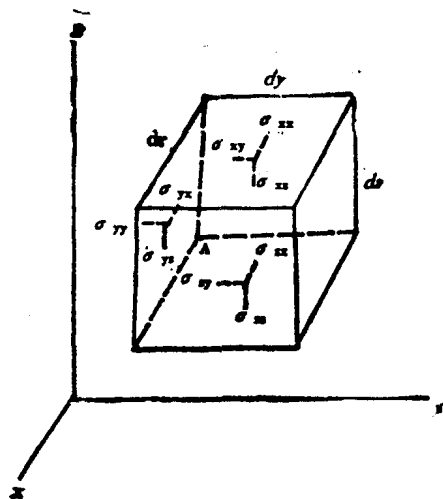


图 2—1 A点应力状态

转换到新坐标系 $OX'Y'Z'$ ，即新坐标系为老坐标系以共同的原点 O 作某一旋转所形式，它们坐标轴之间的方向余弦如表2—1所

表 2—1 新老坐标系坐标之间方向余弦

	X	Y	Z
X'	α_{11}	α_{12}	α_{13}
Y'	α_{21}	α_{22}	α_{23}
Z'	α_{31}	α_{32}	α_{33}

示。若以 σ_{ij} 表示 $OXYZ$ 坐标系的应力分量，以 $\sigma_{k'l'}$ 表示 $OX'Y'Z'$ 坐标系的应力分量， α_{ik} 、 $\alpha_{jl'}$ 表示各相应分量在 $OXYZ$ 和 $OX'Y'Z'$ 的方向余弦，则可写出各分量变换的表示式为

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 \alpha_{ik} \alpha_{jl'} \sigma_{k'l'} \quad (i=1,2,3, j=1,2,3) \quad (2-3)$$

式中： i 、 j 称为自由指标，分别取1、2、3，即得9个式子。由于