

蠕变力学

穆霞英 编著

CREEP MECHANICS

西安交通大学出版社

蠕 变 力 学

穆 霞 英 编 著

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书从金属材料的高温蠕变特性分析入手,系统介绍了一维及多维蠕变理论,并着重阐述了结构零件在稳态与瞬态蠕变时的强度计算方法及蠕变有限元分析(附有程序)。此外,还介绍了蠕变计算、蠕变破坏及蠕变疲劳等方面的最新研究成果。

本书可供力学、动力、航空、化工、机械等专业高年级本科生和研究生教学使用,亦可供有关专业的工程技术人员及科研工作者参考。

蠕 变 力 学

穆 霞 英 编著

责任编辑 蒋 路

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/32 印张 10 字数: 207 千字

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数: 1—1500

ISBN7-5606-0310-1/O·59 定价: 2.00 元

序 言

蠕变力学是固体力学的一个重要分支，具有明确的工程应用背景。金属、岩石和高分子材料等，随着时间的推移，在外力不变的条件下，变形将不断增加，而在恒定变形的条件下，应力将不断减小。但是不同材料在不同的外界条件下，这种效应是不同的。

本书由宏观试验出发，介绍了蠕变的基本概念，建立了一维应力蠕变理论和多维应力蠕变理论，在此基础上介绍了稳态蠕变分析和非稳态蠕变分析。为了能分析工程实际中各种复杂形状构件的蠕变问题，作者还用足够的篇幅介绍了蠕变数值解的有限元法，不仅说明了求解技术与所采取的措施而且还给出了源程序和应用算例。书中还系统地介绍了蠕变强度、损伤破坏分析以及工程中十分关心的蠕变疲劳问题。

穆霞英教授长期从事蠕变力学方面的教学和科研工作，为生产实际解决了许多技术难题，在这一科学领域有很深的造诣，作者以丰富的教学和科研经验，深入浅出撰写了这本专著性的教材。书中注意介绍蠕变的物理基础和实验依据，应用典型的例题说明蠕变的物理本质。公式推导细致、清晰，特别是所介绍的数值分析方法不仅便于理解和掌握而且也便于实际工程应用。书中包括了许多新的内容和作者自己的工作成果，是一本难得的很有特色的专著和教材。

我国目前尚没有一本系统地讲授蠕变力学的教材和专

著。本书的出版填补了这一空白。我衷心地祝贺这本书的出版，相信它在普及蠕变力学基本知识并将它应用于工程实际方面一定会起到重要作用，为提高我国科技水平作出贡献。

徐 秉 业

1989.7 于北京清华园

前 言

随着国防事业及现代工业的发展,研究金属材料的高温蠕变问题日益重要。目前虽有一些英、俄、日等外文书籍、文献,但没有适用的教材,更没有一本国内出版的教材。作者自 1962 年开始讲授这门课程,多年来深感需要编写一本专门教材,既供教学使用,又为工程界和有关科研工作者提供一本基础性参考书。

根据作者多次讲授这门课程和从事这方面科研的经验,在本书编写中,尽量精选内容,充实理论基础,反映 80 年代的新水平。例如书中编入的蠕变有限元分析、连续损伤破坏分析、蠕变疲劳等内容,都是比较新颖的,反映了最新的研究成果。在编写方法上注意概念清晰,深入浅出,便于自学;结合实际,便于应用;不但在理论部分给出具体算例,并且在有限元一章还给出蠕变计算源程序及有关使用说明,便于读者理解和应用。

全书共八章,第一—五章及第七章为基本部分,第六、八两章为专题部分。教学约需 30~50 学时。带*号的内容为较深入的问题,初学者可先不选读。

本书可供作力学、动力、航空、化工、机械等专业高年级本科生及研究生使用的教材,也可供有关工程技术人员和科研工作者参考。

书中所附程序的编制、考核工作由穆霞英、殷家驹等完

成。

本书主审庄懋年教授认真仔细地审阅了全部书稿，对重要公式进行了推导校核，并挚诚地对本书提出许多宝贵意见。清华大学徐秉业教授对本书予以热情支持，在百忙之中为本书作“序”。作者对上述同志的热情支持与负责精神，一并在此表示深切的谢意。

由于水平所限，难免有错误和不妥之处，恳望批评指正。

穆 霞 英

一九八九年二月于西安交通大学

主要字符表

σ_{ij}, σ	应力张量	$\varepsilon_{ij}, \varepsilon$	应变张量
$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$	柱坐标应力分量	$\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$	柱坐标应变分量
$\tau_{r\theta}, \tau_{\theta z}, \tau_{zr}$		$\gamma_{r\theta}, \gamma_{\theta z}, \gamma_{zr}$	
$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_\varphi$	球坐标主应力分量	$\varepsilon_{ij}^c, \varepsilon_c$	蠕变张量
S_{ij}, S	应力偏张量	$\varepsilon_{ij}^p, \varepsilon_p$	塑性应变张量
σ_{ii}^*	等效弹性应力	$\varepsilon_{ij}^e, \varepsilon_e$	弹性应变张量
σ_{ii}^R	残余弹性应力	ε_{ij}^T	热应变张量
σ_m	平均应力	$\dot{\varepsilon}_{ij}$	应变率张量
$\bar{\sigma}$	等效应力	$\dot{\varepsilon}_{ij}^c$	蠕变率张量
σ_s	屈服极限	$\dot{\varepsilon}_{ij}^p$	塑性应变率张量
σ_c	蠕变极限	ε_m	平均应变
σ_r	松弛极限	$\bar{\varepsilon}$	等效应变
σ_f	持久极限	$\bar{\varepsilon}_c$	等效蠕变应变
σ_0	持久强度	$\bar{\varepsilon}_p$	等效塑性应变
σ_e	相当应力	$\bar{\dot{\varepsilon}}$	等效应变率
σ_R	参考应力	$\bar{\dot{\varepsilon}}_c$	等效蠕变应变率
$\sigma(0)$	初始应力	$\bar{\dot{\varepsilon}}_p$	等效塑性应变率
σ^{ss}	稳态应力	$\varepsilon(0)$	初始应变
E_{ijkl}	弹性刚度张量	ε_{in}	非弹性应变
C_{klmn}	弹性柔度张量	u, v, w	位移分量
E	弹性模量	D	损伤因子
G	剪切模量	ψ	连续性因子

ν	泊松比、频率	t_R	破坏时间
α	线胀系数、内外 径之比	V	体积
ρ	材料密度	F	蠕变势函数, 截 面积
	无量纲径向坐标	$\bar{E}$	弹性应变能
T_m	材料熔点	W	蠕变耗散应变能
A, B, n	材料常数	U_c	蠕变耗散余能
m	材料常数		
	权系数		
ω	角速度	N_f	疲劳破坏循环次数
T	温度	N	形函数
t	时间	δ	单元结点位移向量
κ	曲率	ξ, η	局部坐标
P	外力	$[B]$	B 矩阵
$\bar{T}$	表面力	$[D]$	弹性矩阵
q	均布载荷集度	$[D]_p$	塑性矩阵
M_k	扭矩	$[D]_{ep}$	弹塑性矩阵
M_x	弯矩	$[K]$	刚度矩阵
M_r, M_θ	径向、切向单位 弯矩	$[K]_{ep}$	弹塑性刚度矩阵
J_{nx}	广义二次矩	J_n	广义极惯矩
W_{nx}	广义抗弯模量	W_n	广义抗扭模量

目 录

序 前 言

第一章 概 论

§ 1.1	蠕变	(1)
§ 1.2	蠕变力学的发展与研究	(2)
§ 1.3	蠕变试验、蠕变曲线	(3)
§ 1.4	蠕变断裂试验	(5)
§ 1.5	应力松弛、松弛试验、松弛曲线	(6)
§ 1.6	变载荷蠕变试验	(8)
§ 1.6.1	阶梯加载试验	(8)
§ 1.6.2	卸载试验、蠕变恢复	(8)
§ 1.7	蠕变的物理基础	(10)
	思考题	(10)

第二章 一维应力蠕变理论

§ 2.1	概述	(11)
§ 2.2	陈化理论	(12)
§ 2.3	时间硬化理论	(14)
§ 2.4	应变硬化理论	(16)
§ 2.5	恒速理论	(18)
§ 2.6	塑性滞后理论	(19)
§ 2.7	蠕变理论的实验验证与比较	(23)

§ 2.8	变温下的蠕变规律·····	(27)
§ 2.9	算例·····	(31)
	习 题·····	(34)

第三章 多维应力蠕变理论

§ 3.1	弹性变形本构关系·····	(36)
§ 3.2	塑性变形本构关系·····	(38)
§ 3.2.1	全量理论·····	(40)
§ 3.2.2	增量理论·····	(42)
§ 3.3	多维应力蠕变本构理论·····	(45)
§ 3.3.1	基本假设与处理原则·····	(45)
§ 3.3.2	全量型蠕变理论·····	(46)
§ 3.3.3	Mises 型增量蠕变理论 ·····	(47)
§ 3.3.4	蠕变势理论·····	(48)
* § 3.4	一般情况下的蠕变本构关系·····	(49)
§ 3.4.1	具有瞬时塑性变形情况·····	(49)
§ 3.4.2	不均匀加热情况·····	(50)
§ 3.5	实验验证·····	(52)
§ 3.5.1	全量型理论的验证·····	(52)
§ 3.5.2	增量型理论的验证·····	(57)
	习 题·····	(58)

第四章 稳态蠕变分析

§ 4.1	基本概念·····	(60)
§ 4.2	直梁纯弯曲·····	(63)
§ 4.3	柱体扭转·····	(67)
§ 4.4	厚壁筒·····	(78)

§ 4.5	均匀拉伸的带孔薄平板	(83)
§ 4.6	轴对称加载的圆板弯曲	(88)
§ 4.7	叶片的蠕变量	(99)
§ 4.8	叶轮的蠕变应力分析	(103)
§ 4.9	用“参考应力法”求近似解	(107)
	习 题	(114)

第五章 非稳态蠕变分析

§ 5.1	常载荷下的薄管弯曲	(116)
§ 5.2	常位移下的松弛问题	(120)
§ 5.2.1	纯弯曲梁	(120)
§ 5.2.2	空心球壳	(122)
§ 5.3	应力重新分布的一般方程	(126)
§ 5.4	用一般方程求厚壁筒的瞬态解	(128)
* § 5.5	瞬态蠕变的近似解法	(132)
§ 5.5.1	能量原理	(132)
§ 5.5.2	不同加载情况的近似分析	(137)
§ 5.5.3	算例	(147)
§ 5.6	旋转盘的差分解	(151)
§ 5.7	应力分析的实验验证	(161)
	习 题	(163)

第六章 弹塑性蠕变有限元分析

§ 6.1	非线性有限元法基础	(164)
§ 6.1.1	非线性方程求解方法	(165)
§ 6.1.2	弹塑性有限元分析方法	(167)
§ 6.2	瞬态蠕变数值解的有限元法	(171)
§ 6.2.1	欧拉(Euler)方法	(172)

§ 6.2.2	蠕变分析显式及隐式算法.....	(174)
§ 6.2.3	有限元显式算法.....	(175)
§ 6.3	热弹性-蠕变问题.....	(176)
§ 6.3.1	有限元基本公式.....	(177)
§ 6.3.2	求解技术与措施.....	(183)
§ 6.3.3	计算步骤.....	(185)
§ 6.4	空间轴对称热弹性-蠕变 程序(ABCA).....	(186)
§ 6.4.1	程序功能及特点.....	(187)
§ 6.4.2	标识符及子程序标识符说明.....	(188)
§ 6.4.3	主程序框图简示.....	(191)
§ 6.4.4	源程序(见附录).....	(193)
§ 6.4.5	数据准备举例.....	(193)
• § 6.5	等向强化模型热弹塑性-蠕变问题.....	(196)
§ 6.5.1	本构方程.....	(196)
§ 6.5.2	有限元计算格式.....	(198)
• § 6.6	其它强化模型热弹塑性-蠕变问题.....	(200)
§ 6.6.1	运动强化模型基本公式.....	(201)
§ 6.6.2	组合模型基本公式.....	(204)
• § 6.7	热弹塑性-蠕变分析中的有关问题.....	(207)
§ 6.8	算例.....	(210)

第七章 蠕变强度与蠕变破坏

§ 7.1	蠕变强度.....	(217)
§ 7.2	一维应力蠕变破坏.....	(218)
§ 7.2.1	常载荷情况.....	(219)
§ 7.2.2	变载荷情况.....	(224)

§ 7.3	多维应力蠕变破坏·····	(225)
* § 7.4	连续损伤破坏分析·····	(228)
* § 7.5	算例·····	(233)
* § 7.6	寿命估算的上、下限法·····	(240)
	习 题·····	(245)

***第八章 蠕变疲劳**

§ 8.1	蠕变疲劳·····	(246)
§ 8.2	交变应力下的蠕变破坏强度与疲劳 强度·····	(247)
§ 8.3	一维蠕变疲劳寿命预估理论·····	(252)
§ 8.3.1	寿命-时间分数法(寿命分 数法)·····	(252)
§ 8.3.2	频率修正法 ^[62] (FM 法)与频率 分离法(FS 法)·····	(255)
§ 8.3.3	应变范围区分法 (SRP 法)·····	(256)
§ 8.3.4	应变能区分法(SEP法)·····	(259)
§ 8.4	多维蠕变疲劳寿命预估理论·····	(262)
§ 8.4.1	局部应变法(或局部应力法) 的应用·····	(262)
§ 8.4.2	多轴SRP 法·····	(264)
§ 8.5	按损伤力学方法估算寿命·····	(269)
	思考题·····	(274)
	附录: ABCA 源程序·····	(275)
	参考文献·····	(300)

第一章 概 论

§ 1.1 蠕 变

蠕变(Creep)，其英文原意是爬行，意译为蠕变（或徐变、徐滑等），顾名思义为缓慢地变形，即有时间效应的含义。观察许多材料在拉伸载荷下的变形规律可以发现，在温度不变、载荷不变的条件下，试件的变形也会随着时间的增长而缓慢增大，这一现象称为蠕变现象。上面的定义是狭义的。实际上，当零部件的变形随时间增长时，应力也可能变化，因此蠕变广义的定义为：当固体受恒定的外力作用时，其应力与变形随时间变化的现象。这种现象的特征是：变形、应力与外力不再保持一一对应关系，而且这种变形即使在应力小于屈服极限时仍具有不可逆的变形性质。

对于大多数金属材料而言，蠕变变形在室温环境下通常很小，可以忽略不计，但对某些金属材料，如铅、铝等就不能忽视（同样对高分子聚合物如有机玻璃、橡胶等也是如此）。然而，在高温情况下则都必须考虑。同时，材料的机械性能伴随着温度的升高有显著的变化，例如钢和铁当温度超过 300°C 时，其弹性模量 E 、屈服极限 σ_s 、强度极限 σ_a 等明显地随着温度升高而降低，并且在同一温度下还受加载速度（或应变速度）的影响。于是，材料在高温下受载将会发生

显著的塑性流动，以致一定时间后导致金属部件的破坏。

蠕变现象同样对建筑材料与塑料有实际意义，蠕变规律对于不同材料是各异的，本书着重研究金属材料的蠕变，但这种研究方法与某些基本概念仍适用于其它一些材料。

§ 1.2 蠕变力学的发展与研究

在弹性力学、塑性力学等课程中，进行构件的强度分析时，均未涉及加载时间对构件强度的影响，但实际上有许多零部件长期在高温下进行工作，材料性质随着温度而改变，构件的应力也因温度与时间的双重影响而重新分配，因此在分析长期处于高温状态下工作的部件强度时，必须考虑蠕变问题。这一问题在现代工业中显得十分重要，如蒸汽透平、喷气发动机、蒸汽锅炉、石油工业设备及核反应堆的热端部件、化工容器和热工仪表等都存在着蠕变问题。

在工程实际中，往往由于材料的蠕变，破坏了机组的正常运行。例如蒸汽透平叶片与涡轮机叶轮的径向位移超出了叶片与机壳的间隙而顶住；蒸汽管道接头部分联结螺栓的松脱；叶片根部因长期蠕变而断裂等等，以致引起严重事故。1974年6月19日在美国 Tennessee 州，有一台蒸汽涡轮机的一个低压转子在 565°C 下运转，当转速达 3400r/m 时发生爆炸，断成 30 多片。该转子是由 Cr-Mo-V 合金钢锻造的，自 1957 年 5 月开始运转直到事故发生，共运行了 106000 小时。经力学分析并考察了破坏机理，最后断定转子的破坏是由于蠕变与低周疲劳交互作用的效应所引起的。这些事例说明蠕变问题的研究随着动力机械、化工机械与宇航事业的发展

展,显示出日益重要的地位,同时也促进了蠕变力学这门学科的形成与发展。

从历史上看,蠕变现象早在18世纪就已经引起人们的注意。1883年法国的维卡特(Vicat)^[1]曾对钢索进行了试验,并作了定量分析。1910年,英国物理学家 Andrade^[2]发表了他的基本理论研究成果,并首次提出了蠕变这个名词,于是蠕变这个专门术语一直沿用至今。习惯上讲,金属蠕变理论的建立由此时算起已有70余年的历史。随着工业的发展,蠕变的研究大致从两方面着手进行:一是从微观角度出发,研究蠕变机理及冶金因素对蠕变特性的影响来提高金属的蠕变抗力,致力于高温耐热合金的制造;另一是从唯象研究的途径出发,以宏观实验为基础,由观察宏观的蠕变现象着手,在实验的基础上分析研究所得到的实验数据,建立描述蠕变规律的理论,研究构件在蠕变情况下的应力与应变计算方法及其寿命的估算方法。前一途径属于金属物理学方面学者的研究工作,而后一途径属于连续介质力学的范畴,也是本书主要研究的内容。近年来,由于工程应用的需要,蠕变力学已明确作为固体力学的一个分支,因此连续介质力学中与物性无关的基本方程在蠕变力学中仍然适用。

由于唯象研究需要从宏观试验着手,因此下面首先介绍单向应力状态下的基本试验,以了解材料的蠕变特性,作为建立蠕变理论的基础。

§ 1.3 蠕变试验、蠕变曲线

零件的蠕变计算是以单向应力状态的蠕变试验结果为基础