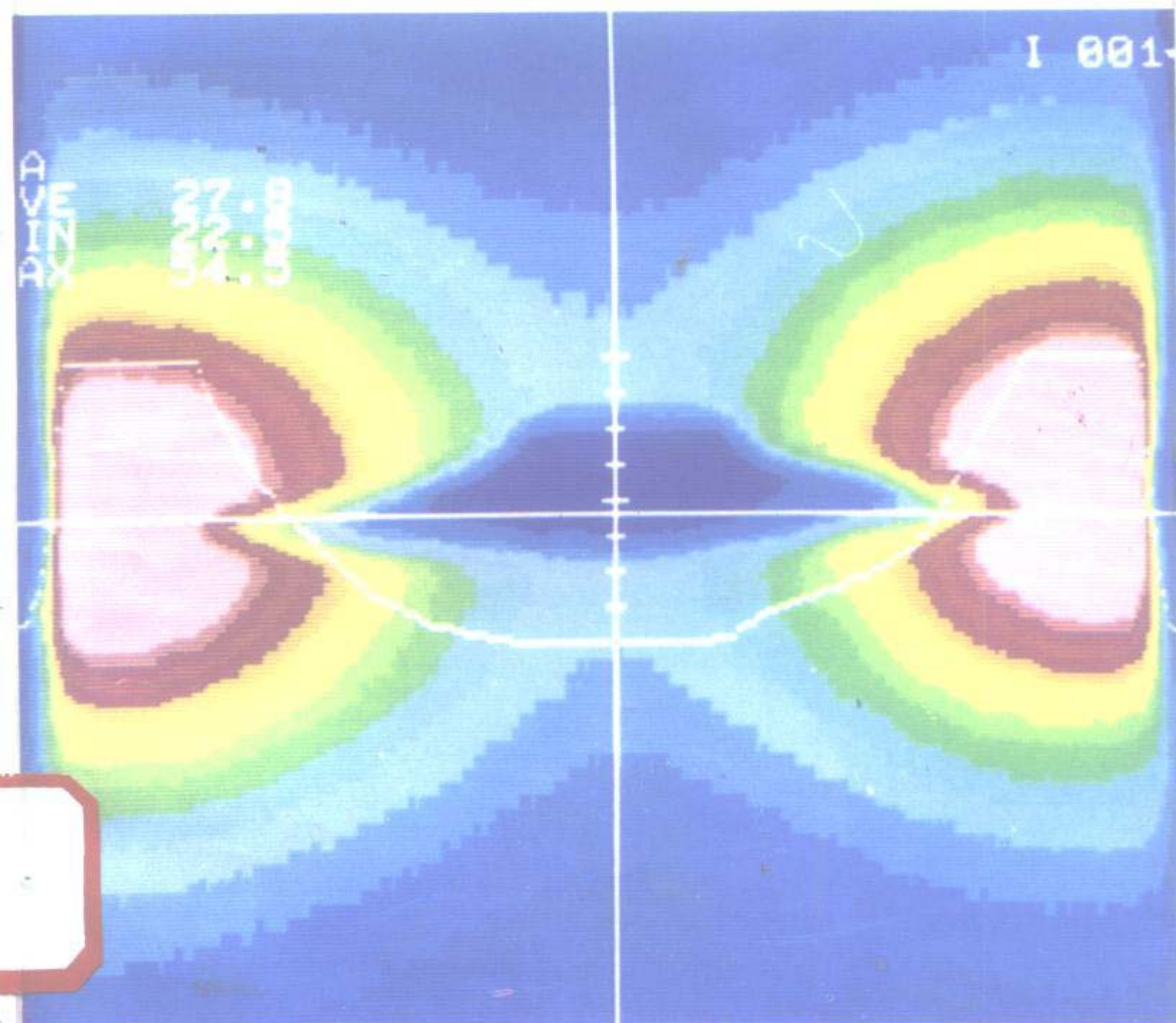


缺陷体流变学

袁龙蔚 著



国防工业出版社

缺陷体流变学

袁龙蔚 著

中国国家自然科学基金会(NNSF, 1880360)

美国国家科学基金委员会(INT 8812995) 共同资助

中国科学院力学研究所 LNM 开放研究实验室



国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

缺陷体流变学/袁龙蔚著, -北京:国防工业出版社, 1993

ISBN 7-118-01184-3

I. 缺...

I. 袁...

Ⅱ. ①断裂力学-流变学 ②疲劳力学-流变学

IV. 0346.5

缺陷体流变学

袁龙蔚 著

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 1/8 212 千字

1994 年 4 月第 1 版 1994 年 4 月第 1 次印刷 印数: 1—1000 册

ISBN 7-118-01184-3/TH·81

定价: 10.00 元

内 容 简 介

本书在扬弃经典断裂力学与经典损伤力学的基础上,提出流变性缺陷体破坏的新理论,宏观与微观结合地研究了裂纹扩展过程及损伤演化过程共同具有的流变与耗散现象,介绍了它的基本机制与原理,并着重于新现象与新理论的实验验证。全书共分九部分,主要包括:裂纹扩展过程的基本方程,热流变性,本构关系,扩展与止裂判据,裂尖区温度场与质量场,热磁效应,裂纹萌生区的平衡与演化,缺陷的势能释放率与位移场,以及大量实验成果与彩色图片。

本书可供国防工程、材料科学、冶金工业、塑料工业、建筑工程、水电工程等方面从事有关构筑物或机械部件强度及使用寿命估算的科研或设计人员使用,也可作为高等院校有关专业研究生的教学参考书。

序

当我们迈入经济建设这一主战场时,“科学技术是第一生产力”的作用必将日益重要。一个严肃的事实是,科学本身也正经历着一个理论变革时期,在此,马克思主义唯物辩证法的世界观和方法论起着指导作用。

当代科学技术发展的重大特点是整体化趋势,是各学科领域的相互渗透、协同发展和辩证综合,新的分支学科不断涌现。毫无疑问,一切理论都有它自身适用的层次和范围,但又可相互借鉴。随着实践的发展,会对经典理论作出评价与修正,并使它不断深化。有些时候,实验期待上升到理论的高度;有些时候,一个决定性的实验却又引导新理论的诞生。

裂纹扩展过程中,裂尖塑性流变区质量流、温度场、热磁效应的存在性实验验证启示我们,物体中损伤的演化过程和裂纹的扩展过程都绝非一个纯粹的力学过程,热-力耦合现象不容忽视,从而引起我们对线弹性、弹塑性、粘弹性等经典断裂力学的反思及对连续损伤力学和微观损伤力学的质疑。缺陷体流变学的研究对象是损伤演化和裂纹扩展的过程。它是带有缺陷物体的一种宏观与微观结合的新破坏理论。

前几年的理论与实验研究表明,裂纹体的裂纹扩展全过程是:
①既非绝热又非等温过程;②能量耗散的主要形式为热传导与熵增或熵减;③体积能密度和表面能密度可以相互转换;④热能与机械能的变化及其间的转化共存于同一过程;⑤裂尖塑性流变区是变质量系统;⑥裂尖温度场的变化与能量耗散速度相关,而与屈服无关;⑦温度变化可直接从位移梯度和体积相对于表面积的变化率求得;⑧裂尖塑性流变区内存在 Ertinghausen-Nernst 效应和 Righi-Leduc 效应。从而,我们建立起流变断裂学理论^[1,2,3]。在此基

基础上,我们进一步观测了损伤演化过程,发现损伤演化过程与裂纹扩展过程具有共同特性如下:①非平衡态热力学相容的过程;②动量不守恒而能量亦耗散并遵循最小耗能原理的过程;③热能与机械能共存的能量转化过程;④伴有热源汇和热磁效应的非纯粹力学过程;⑤缺陷体体积随损伤或裂纹面积的变化过程;⑥产生时空对称性破缺并具规范不变性的规范场产生过程;⑦具有 Lyapounov 函数型流变记忆泛函的历史延拓过程;⑧微观动力学可逆与宏观热力学不可逆间的互补过程。

由此可见,损伤演化过程和裂纹扩展过程共同具有的非线性与不可逆性的本质,尤其是流变响应的非线性、广义力与广义流间的非线性,以及表现为对称性破缺、热力耦合形式耗散的不可逆性,是缺陷体流变学的固有特征。它的核心是以过程中的流变与耗散现象贯通宏观与微观两个层次,它的目的是正确估算含缺陷物体的强度和使用寿命。

本书是作者在美国堪萨斯州大学的讲学稿的基础上整理而成,其中部分成果曾于近 5 年先后在捷克布拉格、美国休斯敦、澳大利亚悉尼、法国格伦诺贝、波兰克拉科夫、罗马尼亚布加勒斯特、瑞士苏黎世、中国北京召开的国际理论与应用力学会议、国际流变学会议、国际断裂力学会议及有关专业国际会议上宣读与交流。

显然,缺陷体流变学的理论还不完善,实验与计算手段也需加强,应用范围的广度与深度更待开发。我们相信,为寻求真理而付出的代价,比不担风险地占有它要昂贵得多。在此衷心期望广大读者的帮助。

最后,本人以愉快的心情对美国利哈伊大学的 G. C. Sih 教授、堪萨斯州大学的 S. E. Swartz 与 K. K. Hu 两位教授、法国格伦诺贝力学研究所的 D. Caillerie 教授、日本京都大学小谷寿教授、法国巴黎大学 J. Lemaitre 教授及波兰科学院的 S. Zahorski 教授的有益讨论或提供资料表示深切谢意,并对中、美两国的国家科学基金会及中国科学院力学研究所 LNM 开放研究实验室也表示感谢。兰州石油机械研究所智荣斌工程师及我的研究生李之达、高蕴晰、许忠

勇、何荣春、颜家财、冠智勇也不同程度地参加了有关实验工作。

中国化学会
中国力学学会 流变专业委员会主任委员
湘潭大学流变力学研究所教授

袁龙蔚

1992 年 11 月

目 录

符号表	1
第一章 整体平衡律	22
第一节 整体平衡律总则	22
第二节 整体基本平衡方程	24
第三节 小结	32
第二章 局部平衡律	35
第一节 局部平衡律总则	35
第二节 局部基本平衡方程	36
第三节 平衡律汇总	47
第三章 裂尖区质量流	51
第一节 热力学方程	51
第二节 平衡方程	53
第三节 动能定理和熵增原理	57
第四章 缺陷体热力学	59
第一节 非平衡态温度	59
第二节 能量平衡方程	61
第三节 广义熵不等式及其解	64
第五章 裂纹扩展判据	67
第一节 非局部本构关系	67
第二节 热力学稳定性判据	73
第三节 裂纹扩展判据	75
第六章 裂尖区温度场	80
第一节 裂尖区热平衡方程	80
第二节 裂尖区温度场方程	84
第三节 广义内耗不等式	87
第七章 热磁效应	93
第一节 考虑热磁的能量平衡	93

第二节	内在对称性及其破缺	97
第三节	动裂纹的止裂条件	101
第八章	损伤演化	106
第一节	数学准备	106
第二节	势能释放率	110
第三节	位移场方程	117
第九章	实验结果与讨论	137
第一节	裂尖区密度变化量测	136
第二节	裂尖区温度场量测	173
第三节	裂尖区热磁效应量测	210
结 论		223
参考文献		234
实验彩色照片		235

符 号 表

$\mathcal{A}$	有效能密度函数
$\mathcal{A}_s$	非耗散能密度函数
$\mathcal{B}$	物体;缺陷体;裂纹体
$\mathcal{C}$	二阶张量函数类
$\mathcal{C}_f$	可积零均函数类
$\mathcal{C}_s$	外部耦合应力张量函数等价类
$\mathcal{C}_v$	矢量函数类
$\mathcal{D}$	耗散能密度函数
$\widetilde{\mathcal{D}}$	耗散势函数
$\mathcal{D}_i$	内耗;内部耗散
$\mathcal{D}_v$	单位时间单位体积耗散能
$\dot{\mathcal{D}}_H$	热耗散率
$\dot{\mathcal{D}}_M$	除热能外的能量耗散率
$\dot{\mathcal{D}}_s$	质点的内能耗散率;内蕴耗散
$\dot{\mathcal{D}}_{sH}$	裂尖塑性流变区外部热耗散率
$\dot{\mathcal{D}}_{iH}$	裂尖塑性流变区内部热耗散率
$\mathcal{E}$	物理空间;体积电磁能
$\mathcal{E}_x$	物理切空间

$\mathcal{F}$	本构泛函
$\mathcal{G}$	应变能函数
$\mathcal{H}$	温度 θ 的 $\mathcal{H}$ -函数
$\widetilde{\mathcal{H}}$	Hilbert 空间
$\mathcal{I}$	本构泛函
$\mathcal{J}$	能流合量
$\mathcal{K}$	开集 $\mathcal{S}$ 的补集
$\mathcal{L}$	有界线性算子
$\bigcup_{i=0}^{\infty} \mathcal{L}$	泛函
$\mathcal{M}$	流形
$\mathcal{N}$	熵通量
$\mathcal{N}_s$	单位面积熵通量
$\mathcal{D}$	熵产生; 熵增; $\mathcal{D}$ 的部分
$\widetilde{\mathcal{D}}$	超熵产生; 超熵增
$\mathcal{D}_v$	单位体积熵产生
$\mathcal{D}_{\infty}$	恒定体积内的总熵
$\mathcal{D}_{\infty}$	外界环境的总熵
$\mathcal{Q}$	连续可微函数; 集
$\mathcal{Q}_\kappa$	κ 的同格群
$\mathcal{R}$	实数域
$\mathcal{S}$	开集

$\tilde{\mathcal{S}}$	$\mathcal{S}$ 在 $\mathcal{H}(\mathcal{M})$ 中的余集
$\mathcal{F}$	本构泛函
$\mathcal{F}'$	表面源
$\hat{\mathcal{U}}$	裂纹体与外界相感应的附加能量通量
$\mathcal{U}_{t=0}^{\infty}$	泛函
$\mathcal{V}$	体积 V 相对于表面积 A 的变化率
$\mathcal{V}_s$	势能函数
$\mathcal{W}$	单位体积能量
A	通量张量; 从 Euclid 空间到 non-Euclid 空间的映射
A	面积
$A_{i,jk}$	通量张量分量
$\tilde{A}_{i,jk}$	材料函数
B	从 non-Euclid 空间到 Euclid 空间的映射
B	体力场
B_e	单位质量外部体力场
B_i	单位质量内部体力场
B_k	材料函数
B_{ij}	阻抗矩阵
$\dot{B}$	磁感应场
$b_{\max}$	最大磁感应强度

C	流变应力张量
C	常数
CT	计算机层析 X-射线量测值
D	变形后的流形; non-Euclid 联络
D'	损伤场
$\dot{D}$	电感应场
$(^*)D$	非零挠率
E	Edington 张量
E	弹性模量
E_0	瞬态模量
$\dot{E}$	电场
$\bar{E}_3$	三维 Euclid 空间流形
F	变形梯度张量; 位移梯度张量
F'	变形梯度历史
F	自由能函数
F_B	Lorentz 力
F_E	电场力
F_i	作用于质点上的合力
F_m	物质部分上的合力
G	切变模量(用于本构方程)
G'	物体源
$G_i (i = \text{I}, \text{II}, \text{III})$	能量释放率

G_L	线性化自由能
G_*	通过 Legendre 变换引入的自由能
$G_{ic}(i=I, II, III)$	临界裂纹扩展力
H	从构形 κ_1 到构形 κ_2 的变形梯度
$\hat{H}$	磁场
$\dot{\hat{H}}_f$	有效磁场
$\hat{H}_i$	局部磁场
$\hat{H}_m$	机械磁效应
$\dot{\hat{H}}_t$	热-电磁效应
I	单位张量; 作用量
$I(\Psi^A)$	作用量泛函
I	单位矩阵
I_0	不变量
I_i	X 射线入射强度
I_e	X 射线出射强度
$I^{L_1 \cdots L_n}$	惯性张量
J	Jacobi; J-积分
J_H	热流
K	动能; $\mathcal{B}$ 的局部参考构形
K'	体变模量(用于本构方程)
$K_i(i=I, II, III)$	应力强度因子
K_p	质点的动能

$K_{ic}(i=I, II, III)$	断裂韧度
L	Lagrange 应变张量
L	Lagrange 密度; 动量矩; 角动量
L_c	裂尖变色区的线性尺寸
L_r	质点的动量矩
L_t	裂尖变温区的线性尺寸
L_{ij}	单位动量矩张量分量
$\dot{L}$	动量矩变化率; 角动量变化率
M	面力场张量
M	线动量
$\dot{M}$	线动量变化率
$\dot{\bar{M}}$	磁化强度
$\tilde{M}$	单位磁化强度
$\bar{M}_4$	四维物质流形
N	自然流形; 任一正实数
P	Piola-Kirchhoff 应力张量
$P(u, t)$	势函数
P	载荷; 流形 M_4 上的物质点
P_a	物体 $\mathcal{B}$ 的任一部分
P_c	极限载荷
$\dot{P}$	极化强度
$\tilde{P}$	单位极化强度

P_A^*	等效节点载荷
P_M^*	节点记忆载荷
P_θ^*	节点热载荷
Q	热传导的对称张量
Q	热量
Q_j	广义力
Q_m	三阶正交矩阵
Q_p	质点的热量
Q_v	单位体积热产生
$\dot{Q}_p$	质点的热功率
$\dot{Q}_{cv}$	恒定体积热功变化率
R	转动张量; 旋转张量
R	一维时间流形
R_i	反推力
R_m	物质部分上的合力矩
R_p	作用于质点上的外力矩
R_R	作用于质点上的反推力力矩
R_{abd}^c	曲率张量
S	表面面积
$d_i S$	演化系统的总熵增
S_0	裂纹萌生区的原熵值
S_A	裂尖变色区面积

S_B	裂纹体外表面面积
S_0	原始裂纹表面面积
S_E	裂纹体内部等能面面积
S_F	裂纹扩展引起的新表面面积
S_K	缺陷表面面积, S' 的子流形
S_T	裂尖变温区面积
S_{CA}	控制面面积
S'	未变形表面
S'_v	缺陷的体积熵源
S'^K	缺陷的表面熵矢量
T	Cauchy 应力张量
T	平衡态温度
T_0	初始温度
$T_i (i=0, 1, \dots; a, b, \dots)$	裂尖附近测点温度值
T_{ω}^c	表示空间扭曲程度的挠率
U	变形的右伸长张量
U	内能函数
U_i	缺陷体单位面积内无缺陷部分的位移场
U_s	应变能
U_H	Hall 电势
U_s	裂尖塑性流变区的内能