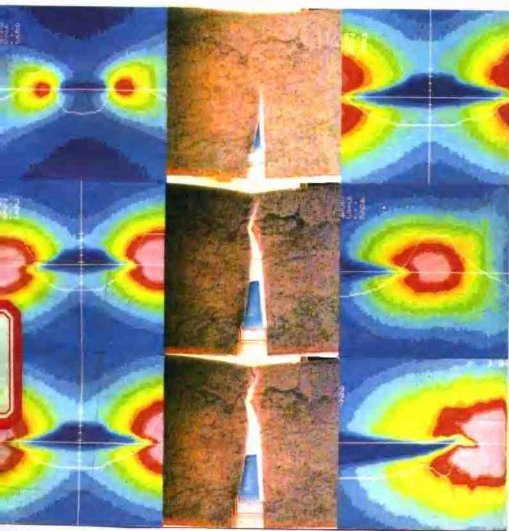


流变断裂学基础

袁龙蔚 智荣斌 李之达 著



流变断裂学基础

袁龙蔚 智荣斌 李之达 著

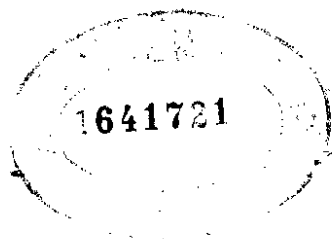
中国国家自然科学基金会 (NNSF-1880360)

美国国家科学基金委员会 (INT-8812995)

联合资助

中国科学院力学研究所LNM开放研究实验室

J91/59/22



国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

本书在对经典断裂力学理论分析与讨论的基础上,提出流变断裂学新理论,介绍了它的基本概念与原理,并着重于新理论的实验验证。全书共分四章,主要内容包括:对经典断裂力学理论的分析与讨论,流变断裂学的基本理论与基本方程以及大量实验成果。

本书可供国防工程、水电工程、建筑工程、桥梁工程、冶金工业、塑料工业、材料科学、地质力学、生物力学等方面,从事有关构筑物或产品强度与使用寿命的科研或设计人员学习使用,也可以作为高等院校有关专业的研究生与本科生的教学参考书。

流变断裂学基础

袁龙菊 智荣斌 李之达 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刷

850×1168毫米 32开本 印张6 $\frac{1}{8}$ 插页12 158千字

1992年9月第一版 1992年9月北京第一次印刷

印数: 0001—1500册

ISBN 7-118-00892-3/0·71 定价: 8.30元

序 言

现代科学技术发展的重大特点是整体化趋势，是各种学科领域的相互渗透、协同发展和辩证综合。流变断裂学即是在扬弃经典断裂力学的基础上，结合非平衡态热力学及缺陷规范场理论建立起来的一门新的分支学科，它以研究裂纹扩展过程为对象，以正确估算含裂纹工程构件剩余使用寿命为目的，以起裂控制与止裂设计为应用目标。

流变断裂学理论的固有特征在于裂纹扩展过程的非线性和不可逆性的本质，尤其是流变响应的非线性、广义力与广义流间的非线性，以及表现为应力张量对称性破缺、热—力耦合形式耗散的不可逆性。本书首先应用基于光电发射原理的先进设备量测了裂纹扩展过程中裂尖附近的变质量区、温度场、热磁效应的变化规律，从而验证了理论的正确性。同时，流变断裂学应用于湖南省柘溪水电站单支墩大头坝迎水面垂直裂纹发展规律的研究及其加固处理获得成功。

流变断裂学这一新的分支学科在我国创建后，很快引起国际有关学术界的注目。本书的出版旨在有利于这一新创分支学科的普及与推广，使流变断裂学在理论、实验、应用方面日臻完善。

饶继松

1991年10月

前 言

自本世纪 70 年代初线弹性断裂力学与弹塑性断裂理论先后被介绍到我国以后,得到广泛的应用,与此同时也对它进行了深入的研究。我国的断裂力学理论与应用成果在国际学术界是令人瞩目的。尽管如此,一切自然科学理论,若得以长期存在,必须经受住实践的不断检验。有些时候,实验期待着上升到理论的高度;有些时候,一个决定性的实验却又引导新理论的诞生。湖南省柘溪水电站混凝土单支墩大头坝迎水面垂直裂纹的扩展过程,引起我们对经典断裂力学基本理论的重新思考。

柘溪坝由八个支墩组成,各墩 96~126m 高程的混凝土系 1960 年 3~8 月份浇注。不久,这一部位的迎水面出现许多条表面裂纹,其中最长的一条,是对称于中心线附近的垂直裂纹,它的长度为 20~30m,深度约 15cm,开度仅 0.1~0.2mm。1960 年底,水库蓄水,大坝一直正常工作到 1969 年初。到 1969 年 6 月份,一号支墩的垂直主裂纹突然发生失稳扩展,裂纹深度约 49m,开度为 2.5mm 左右,断裂面积达该支墩纵截面面积的 45%,约 2000m²,随后自动止裂。1977 年以后,其他各支墩迎水面中心线附近的垂直主裂纹,均先后向坝的纵深失稳扩展,从面危及大坝的整体安全。这一客观事实,使我们对经典断裂力学的理论基础加以重新思考,并提出如下质疑:

1. 如果混凝土可以在裂纹扩展应力作用下仍视为一种线弹性体,为什么这时它会出现应力软化效应和蠕变变形现象?
2. 怎样定量地解释变温应力和缝水持续荷载联合作用下,混凝土裂纹体表现出的明显裂纹扩展的时间相依赖性?
3. 如果假设裂纹扩展过程是一个等温或绝热过程并在热力学上可逆,为什么引入耗能项,而能量又主要以什么形式耗散的?
4. 当我们考虑裂纹扩展新断裂面上的表面能时,为什么不考虑质量、动量、动量矩、熵等对新表面的贡献呢?
5. 热力学第二定律指出熵增量必须大于零,整个裂纹扩展系

统即使遵循熵增最小原理,而有无可能出现局部熵为负值的现象?

6. 如果说局部平衡方程是作为整体平衡方程直接推论的结果,那么局部化剩余应如何理解与处理?

随后,我们对含裂纹金属和塑料试件进行了裂纹扩展过程中裂尖温度场的实验研究,它进一步启示我们,裂纹扩展过程绝不是单纯的力学过程,热与力的耦合现象不容忽视。正是在这一前提下,通过几年的研究实践,我们创建了一门研究裂纹体中裂纹扩展全过程的新的分支学科——流变断裂学。

流变断裂学以研究物体断裂的全过程为对象,以正确估算裂纹体的剩余使用寿命为手段,以最大发挥含裂纹构件的使用效果、把防止开裂与止裂条件溶于构筑物设计中达到增产节约为目的。它不同于经典断裂理论的主要论点有:

1. 裂纹扩展过程既非等温也非绝热过程,热与力耦合现象不容忽视;

2. 裂纹体的体积随新裂纹面的面积而变化,且裂尖塑性流变区是变质量系统;

3. 能量耗散的主要形式是热传导与熵产生,因此必须同时考虑力和热的能量平衡;

4. 作用于裂尖塑性流变区的是非平衡力系,依非局部理论,该区不存在应力奇性;

5. 仅当对称性发生破缺时,才会产生失稳扩展现象,这与规范场理论有一定的内在联系,从而为宏、微观的结合架起桥梁。

根据以上基本点,流变断裂学认为裂纹体的裂纹扩展过程实质上是:

1. 非平衡态不可逆热力学的相容过程,既非等温也非绝热;

2. 动量不守恒而能量亦耗散的过程,在此过程中,裂尖区为变质量系统;

3. 伴有热源汇的非单纯力学过程,在此过程中,裂纹体体积随新裂纹面面积而变化;

4. 具有李雅普诺夫 (Lyapounov) 函数型流变记忆泛函可

描述的历史延拓过程，

5. 微观动力学可逆与宏观热力学不可逆间的互补过程。

可见，不同于线弹性断裂力学中的“起裂点”，也不同于弹塑性断裂理论中裂纹扩展后的“失稳点”，流变断裂学的研究重点是裂纹过程的全过程及其起止裂条件，这对含裂纹构件的继续使用及防护与补救措施的制定有着重要意义。

本书主要是根据作者及祖文红、寇智勇、高蕴昕、许忠勇等几年来完成的科研成果编写的，不包括国内已介绍过的经典断裂理论的基础知识。书中的部分成果曾于近几年先后在捷克布拉格、美国休斯敦及堪萨斯、澳大利亚悉尼、法国格伦诺贝、波兰格拉科夫、新加坡及我国上海、成都、天津、长沙等地召开的有关国际会议上宣读与交流或作为讲学内容予以介绍。

显然，流变断裂学的理论还不完善，实验与计算手段也需加强，工程应用更待进一步简化。尽管在理论应用于柘溪水电站单支墩大头坝裂纹成因分析及补救措施方案上获得湖南省1988年十大科技成果奖、1990年水利部科技进步二等奖及1991年国家科技进步三等奖，但应用范围的广度与深度均有待进一步开发。我们相信，为寻求真理所付出的代价，比不担风险地占有它要高昂得多。同时，衷心期待着广大读者的指正与帮助。

值得提醒读者注意的是，书中符号较多，虽在书中列有主要符号说明表，但仍请读者依书中文字所述，仔细识别。

最后，作者以愉快的心情对中、美两国的国家科学基金会、中科院力学研究所 LNM 开放研究实验室提供的经济资助，对美国堪萨斯州大学的 S.E. Swartz 教授与 K.K. Hu 教授、利哈伊大学的 G.C. Sih 教授、日本东海大学的 T. Yokobori 教授、波兰科学院的 S. Zahorski 教授、法国格伦诺贝力学研究所的 D. Caillerie 教授的有益讨论或提供资料，以及对兰州石油机械研究所广州分所所长饶继松、湘潭华盛工程有限公司、青岛化工学院、湘潭大学等给予的帮助，一并表示谢意。

袁龙蔚教授 1991年9月于湘潭大学

目 录

主要符号表	1
第一章 对经典断裂理论的思考	10
第一节 格里菲思(A.A.Griffith)的成功与失误	10
第二节 格里菲思能量平衡概念的再认识	15
第三节 弹性应力场与塑性裂纹场的缺陷	21
第四节 关于应力与应变的奇异性问题	27
第五节 经典断裂理论的热力学不相容性	34
第二章 裂纹扩展连续统理论的继承	40
第一节 G 和 K 的非等价性	40
第二节 COD 理论的局限性	47
第三节 J 积分及其能量释放率	52
第四节 裂尖线性场的局限性	57
第五节 裂尖非线性场的局限性	64
第三章 流变断裂学的基本理论	75
第一节 裂纹场的基本热力学平衡方程	75
一、裂纹扩展过程的热力学基础	75
二、基本的平衡律与守恒律	81
三、裂纹场的基本平衡方程	86
第二节 局部化剩余的困难	95
第三节 裂纹体的热流变响应	108
一、再论裂纹体的热力学平衡	108
二、裂纹体的热流变性质	114
第四节 本构关系与断裂判据	120
一、流变性材料的非局部本构关系	121
二、热力学断裂判据的建立	128
第五节 裂尖塑性流变区的特性	133
一、交质量模型	133
二、温度场	141
三、热膨胀效应	148

第四章 实验与讨论	153
第一节 裂尖变质量模型的定性验证	153
一、边裂纹扩展试验	154
二、中心裂纹扩展试验	155
第二节 裂尖温度场的定量量测	156
一、塑料薄板裂尖温度场热图	158
二、试件对比与定量数据	159
第三节 热分析表明的裂尖区流变性	171
一、裂尖区内质点的热力学量	171
二、裂尖区的流变性质	175
三、模拟-数值转换系统	180
结论	182
参考文献	185
附录	187

主 要 符 号 表

$\mathcal{A}$	有效能量密度
$\mathcal{B}$	物体; 裂纹体
$\mathcal{E}$	函数类; 张量等价类
$\mathcal{D}$	耗散能量密度; 耗散势函数
$\mathcal{D}_T$	质点内部热耗散能量; 内蕴耗散
$\mathcal{D}_V$	自由能耗散势函数
$\mathcal{D}_I$	内部耗散; 内耗
$\mathcal{D}_S$	除热以外的其他形式能量耗散率
$\dot{\mathcal{D}}_H$	热能耗散率
$\mathcal{E}$	物体的欧几里德空间构形; 周围介质
$\mathcal{F}$	泛函
$\mathcal{F}(t_p)$	任一历史过程
$\mathcal{H}$	向量函数类; $\mathcal{H}$ -函数
$\mathcal{I}$	线动量; 泛函
$\mathcal{J}$	动量矩
$\mathcal{K}$	外部偶应力张量函数等价类
$\mathcal{P}$	物体 $\mathcal{B}$ 的任一部分; 熵产生; 泛函
$\mathcal{P}$	泛函
$\mathcal{P}_0$	等能面的单值能量密度
$\mathcal{P}_i$	表面能密度分量
$\mathcal{F}$	泛函
$\mathcal{V}$	欧几里德空间内距离度量函数
$\mathcal{V}$	体积 V 随表面面积 A 的变化率
$\mathcal{V}$	单位体积能量密度
$\mathcal{V}_0$	等能密度函数
A	表面面积

A_p	裂尖塑性流变区面积
A	积分围线内面积
B	磁感应
B	体力偶
C	张量函数类
C	柔量; 边界围线
$C(t_b)$	变形
C	蠕变柔量
C	平面应变蠕变柔量
C^0, C^1	复空间
D	电位移; 变形率张量; 张量场
D_L	拉格朗日密度
D_c	特征区域长度
D_g	玻璃态蠕变柔量
E	拉格朗日应变张量; 埃丁顿张量; 张量场
E	弹性模量; 电场; 内能
E_0	瞬态模量
F	变形梯度张量; 规范场
F	合力
$F(\omega, y)$	热力学通量
$\bar{F}$	局部区域上的不平衡力
F_{vs}	位错应力场强度; 规范场强度
G	能量释放率; 释放能函数
G_L	线性化的自由能函数
H	挠率张量
H	磁场; 通过表面到物体部分 P 的热传导
$H(t)$	赫维赛德单位阶跃函数
H_0, H_1	希尔伯特空间
I	质点的能量产生变化率
I_n	单位时间内单位体积的熵产生率

J	J 积分
j_i	熵流
J_η	单位时间内单位面积的熵通量
K	动能; 应力强度因子
K_1	时间 t 时系统的动量
K_2	时间 $t + \Delta t$ 时系统的动量
K_p	质点的动能
K_T	等温可压缩率
K_{Ic}	临界应力强度因子; 断裂韧度
$\tilde{\kappa}(X)$	未畸变构形
L	速度梯度张量
L	合力矩; 内部体力偶; 试件尺寸
$\tilde{L}$	有界线性算子; 物质连通
M	磁化强度
M	面力偶
N	外法线矢量
P	皮奥拉-柯克霍夫应力张量; 极化强度
P	载荷; 作用力
Q	热能
Q_v	单位时间内单位体积的热生成量; 热源强度
$\dot{Q}_p$	质点的热功率
R	实数域; 转动张量; 曲率张量
R^*	黎曼度量曲率张量
S	应力-熵张量
S	物体内部任一封闭的等能曲面; 面积
$S(t)$	现时构形中的物体边界
$S_\#$	物体的外表面; 稳定表面
S_0	裂纹体的原有裂纹面
S_δ	等能面
S_γ	裂纹扩展生成的新表面

S_s	裂纹体表面面积
T_s	柯西对称应力张量
T_p	应力张量
T_{int}	内蕴应力张量
T^*	平衡态温度
U	右伸长张量
U	内能; 变形功; 单位厚度应变能
$U(\epsilon)$	应变能
U_0	单位体积变形能
U_v	应变势能
$\dot{U}$	弹性变形能变化率
U_{sc}	自由表面能
V	左伸长张量; 对称张量
V	体积
V'	内部体积
V_t	裂尖塑性流变区的体积
V_e	单位厚度体积
$\bar{V}$	物体在参考构形中占据的空间域
∂V	空间域 V 的内部的边界
U	应变能密度; 变形功密度
W	旋率张量; 反对称张量
$\bar{W}$	应变能
$\dot{W}$	功率
$\dot{W}_H$	外部热功率
$\dot{W}_F$	质点的机械功率
H'_{sb}	外力功
X	质点
a	裂纹长度
$\dot{a}$	裂纹扩展速度

b	单位质量的外部体力场；外部体力场
$\hat{b}$	单位质量的内部体力场；内部体力场
b_i	体力密度
c	比热容；质点的自然比热容；波的横向声速
d	距离
$d\eta$	系统的总熵增量
$d\eta_s$	总熵流增量
$d\eta_p$	总熵产生增量
e	比内能；单位质量内能
e_c	体积 V 内的电磁能量
e_m	单位迁移质量具有的能量
$f(W, Y)$	耗散势函数
g	温度梯度；黎曼度量
g_i	内蕴温度梯度
g	重力加速度
h	热通量
i	与外部作用有关的表面能局部化剩余
i_e	电荷
j	传导电流矢量
j	体积比；内部热汇
j_R	局部体积
k	玻耳兹曼常数；COD 减小因子的系数
l	新裂纹面上的力偶；裂纹的半长
m	总质量；偶应力
m_s	时间 dt 内流出的质量
m_g	引力质量
m_i	时间 dt 内流进的质量；惯性质量
m_s	裂尖塑性流变区的总质量
n	单位外法向矢量
p	局部熵增量

$p(t)$	现时构形
$p(\mathcal{P}, t)$	物体任一部分 $\mathcal{P}$ 在 t 时的熵含量
q	热通量矢量
q_i	内蕴热通量矢量
q_*	热通量
q_*	应用热通量
r	热供给矢量; 热散逸函数
s	应力偏量
s_K	局部熵产生
$\dot{s}$	新裂纹面上的动量
$\hat{s}$	局部化剩余
t	应力矢量
t_n	单位面积的面力
t	时间
t_i	起裂时间
t_p	过去时间
t_{rc}	应力松弛时间谱
t_{ext}	外力
u	位移矢量; 位移梯度
u	位移; 位移梯度分量
u_c	临界破裂位移的半值
u_i	等能位移
v	速度
v_*	裂尖扩展速度
v_i	通过面积 A 的质量流速的垂直分量
v_c^i	质心速度
w	应力功; 热力学过程
w_c	热力学过程 w 的延拓
π_c^i	质心位置
$\dot{x}$	质点速度

Γ	断裂阻力; 断裂功
$\Gamma(t)$	内耗
Γ_i	裂纹面上表面能密度
$\dot{\Gamma}$	表面能变化率; 裂纹扩展能量耗散率
Δ	内部耗散
$\dot{\Delta}_m$	内部热耗散率
E	系统内能
Z	系统焓
H	系统熵
$\dot{H}$	系统熵产生率
Θ	裂尖区温度函数; 非平衡态温度
$K(X)$	局部参考构形
$A^{(i)}(t_p)$	至时间 t 的总历史
$\dot{\lambda}$	体积能量密度变化率; 耗能率
Π	裂纹单位新增面积的势能, 单位厚度位能
Σ	表面
Ω	物质全域
α	裂尖衰坏区长度; 自然热胀系数
β	运动参考过程
β	自然热胀系数
γ	格里菲思表面能; 表面能密度; 单位面积表面能
γ_c	断裂内聚比能
δ	裂纹张开位移
δJ_a	热力学超流
δX_a	热力学超力
δu	单位张量
ε	应变, 应变场; 单位质量内能
ε_s	表面内能
ε_m	能量密度

ϵ_x	内能密度
$\dot{\epsilon}$	单位质量内能变化率
$\dot{\epsilon}_d$	应变率的耗散部分
$\dot{\epsilon}_r$	应变率的可逆部分
$\tilde{\epsilon}$	相对于坐标 ϵ 的 θ -变分
ξ	比焓; 自由焓
ξ_b	热源的体密度
η	比熵;
η_R	熵密度
η_s	表面熵
η_v	粘性系数
η_{ei}	裂尖塑性流变区内部的熵变化
η_{su}	裂尖塑性流变区周围的熵变化
η_l	局部熵密度
$\dot{\eta}_l$	局部熵产生率
θ	绝对温度; 角度
$\tilde{\theta}_0(t)$	裂纹扩展方向角
$\theta^{(r)}(t_p)$	温度历史
κ	参考构形; 热耗散因子
λ	导热系数; 热耗参数; 柔度
λ_i	导热率
λ_r	相对折算时间
μ	裂纹扩展力; 裂纹体的内部质量; 切变模量
μ_0	真空磁导率
$\bar{\mu}$	质量的局部化剩余
ν	泊松比; 新裂纹面上的局部质量
$\bar{\nu}$	质量的局部化剩余
ξ_b	自然膨胀张量
ρ	密度
ρ_0	参考构形的密度