

Thermal Stress

热 应 力

中国力学学会

152

东南大学出版社

# Thermal Stress Vol.2.

ISBN 7-81023-820-5

---

0.73 定价: 30.00元

Thermal Stress Vol. 2

# 热 应 力

(第二卷)

徐 铸 主编

东南大学出版社

(苏)新登字第012号

责任编辑：刘柱升

责任校对：张抱和

## 热 应 力

徐 铸 主编

\*

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼2号 邮编 210018)

南京航空航天大学印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张：17 字数：424 千

1993 年 10 月第 1 版 1993 年 10 月第 1 次印刷

印数：1—400 册

ISBN 7—81023—820—5/O·73

定价：30.00 元

(凡因印装质量问题，可直接向承印厂调换)

## 前 言

本期论文是向国内从事热应力、热强度工作的单位约稿，共撰写论文篇，作者大都是长期从事本领域研究，并在学术上有较深造诣的专家、教授，论文反映了各自的研究内容和最新成果。

鉴于热应力的专著较少，而变温力学及其强度问题则遍及大多数工业设计与制造，因此学科发展和研究动向亦为广大科技人员所期望，为此，本期编纂组稿侧重于热应力学科中各分支领域及应用于某些行业的综合评述。故本期文集对从事或将从事热应力工作的科技人员或是一册很好的专著，对高校有关专业的师生也是很好的参考资料。

第二期专集筹备历二年，但征集范围多有疏漏，有些学者因忙也未及赐稿，当待来期，编者谨致歉意。

东南大学力学研究所和南京华力科技开发公司为本书出版、印刷和销售做了大量工作，特表感谢。

徐 铸

1993年8月于东南大学

# 目 录

## 综 述

- 热应力学科的最新发展 ..... 范绪箕 夏良道 杭国平 (1)  
蠕变损伤局部性研究 ..... 孙训方 刘彦 张南 (9)

## 解析方法

- 关于热弹塑性的几个问题 ..... 王洪纲 陈永进 (18)  
一个非等温循环粘塑性本构模型 ..... 杨显杰 孙训方 高庆 (28)  
蠕变塑性交互作用的本构描述 ..... 范镜泓 曾祥国 高芝晖 黄骏 (33)  
热冲击研究概况 ..... 范绪箕 杭国平 夏良道 (40)  
振动疲劳的热弹性耦合方法 ..... 孔祥安 Saanouni K Bathias C (46)  
不可逆条件下的熵生成率表述 ..... 杭国平 范绪箕 (61)  
瞬态温度场及热弹塑性问题中固态相变演化规律  
..... 陈明伟 林栋梁 (64)  
合金和金属在固态相变下的热应力问题 ..... 王洪纲 (69)  
热断裂本质问题初探 ..... 范绪箕 杭国平 (75)  
在非正常温度场中圆形薄板的耦合热弹性分析 ..... 严宗达 李鹏堂 (80)  
无热源情况下各向同性弹性球体非定常热应力的解析解法  
..... 徐鹰 严宗达 (87)  
复合材料热应力分析 ..... 伍章健 (94)  
三维结构在高温常载荷作用下应力重分布分析的简化方法  
..... 王勳成 王小宁 (99)  
复合材料层板热稳定分析 ..... 孙良新 周红煜 (107)  
受扭圆柱壳在轴向温度场下的热屈曲 ..... 王德禹 (117)  
考虑温度效应时粘塑性圆柱壳扭转冲击屈曲 ..... 王德禹 (121)

## 数值方法

- 热应力问题有限元分析的研究进展 ..... 余颖禾 (125)  
近十年来边界元法在热传导和热应力方面的研究与运用  
..... 王元淳 李军 张剑 (131)  
二维热传导反问题的有限元解 ..... 余颖禾 谢永亮 郭小明 (136)  
热弹性物性值反问题的边界元分析 ..... 孙浩 王元淳 (142)  
用非线性规划方法求解待定性物的导热反问题 ..... 张辉 陈善年 (147)  
边界元—比例法求热应力强度因子 ..... 吴才清 高桦 王元淳 张剑 (152)

复杂热工况下受热部件的温度场、热变形分析

..... 郭小明 余颖禾 王顺玉 (157)

实验方法

两种研究热弹性的现代光力学方法及其在柴油机上的应用

..... 张 燕 蒲启南 吴君毅 李耀文 (163)

二维热疲劳试验以及热疲劳性能试验法 ..... 冯钧一 (175)

热过程中金属表面人工散斑可测性探讨 ... 徐宁光 张抱和 陈朝晖 王卫锋 (184)

异性双材料界面热应力实验研究 ..... 贾有权 亢一澜 (190)

热钢化玻璃残余应力分析 ..... 何小元 徐 铸 孔祥安 (196)

重构方法

位移重构方法 ..... 徐 铸 (201)

热应变场重建算法研究 ..... 陈克龙 闻震初 衡 伟 徐 铸 (210)

重构问题中的递推算法 ..... 闻震初 陈克龙 衡 伟 徐 铸 (215)

凸单连域卷积分重建算法研究 ..... 徐宁光 (220)

用 Radon 变换重建二维矢量场的一种数学模型

..... 王卫锋 杨汉国 董萼良 (225)

应用及其它

传热研究的进展与热强度 ..... 陈善年 (229)

建筑结构温度应力研究现状 ..... 王汝鹏 (231)

电子设备冷却用空芯冷板壁温度分布研究

..... 陈文虎 俞勤芳 (234)

温度载荷作用下某高温高压蒸汽管线的强度校核及

异径管的三维有限元应力分析 ..... 黄振仁 宋建华 成建国 顾正荣 (242)

内隔热层局部损坏时反应器温度应力计算

..... 陈 跃 金 辉 金梦香 (251)

锅炉汽包热应力 ..... 徐礼华 (256)

# 热应力学科的最新发展

范绪箕 夏良道 杭国平

(上海交通大学动力机械工程系热应力研究室, 上海 200030)

## RECENT ADVANCES IN THERMAL STRESSES

Fan Hsutsi Xia Liangdao Huang Guopin

*(Thermo-Mechanics Research Institute Department of Power Machinery Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)*

**提 要** 本文回顾了热应力学科在最近几年的发展情况。在热应力学科中,归根到底是解决两个方面的问题,一是温度场的确定,二是变形场、应力场的求解。本文首先对温度问题作了阐述,关于第二方面的内容,就主要关注的问题,包括热断裂、复合材料、耦合问题、焊接问题、热处理、大变形等作了综述。最后,讨论了热应力学科的发展趋势。

**关键词** 热应力; 热弹性; 热断裂; 因力强度因子; 应变能密度

## 0 引 言

工程构件或受力元件,诸如在核反应堆工程、化学工程、航空航天工程中使用的零部件、压力容器及管道等,由于高温、高的温度梯度以及温度的循环变化,都会引起热应力的作用,甚至导致失效破坏。同时,新型材料如纤维增强复合材料和功能递增材料愈来愈得到广泛应用,因而对这些结构、元件和材料进行更加精确的热应力行为分析是很重要的研究课题。

早在上个世纪, Duhamel 就提出了著名的 Duhamel 公式,由此奠定了热应力理论的基础。目前,热应力学科仍在蓬勃发展,每年都可见大量的论文报道。本文主要从学科发展的角度进行讨论,作出热应力学科重点发展方面的大致概括,以如下的次序展开。

- a. 温度场
- b. 热弹性力学
- c. 热非弹性力学,包括与变形速率无关和与变形速率相关热非弹性力学;热弹性-非弹性力学
- d. 热应力学科的发展趋势



# 1 温度场

与热应力有关材料热参数有比热  $C$ 、密度  $\rho$ 、导热系数  $k$ 、导温系数  $a$  ( $k/C\rho$ ) 以及放热系数  $h$ 。材料性质随温度变化而变化,而且随着温度的升高变得更为突出。一般地,随着温度升高,比热系数增大,而密度、导热系数、导温系数降低。考虑了热应力耦合的热传导方程为:

$$(k_{ij}T_{,j})_{,i} + Q = C\rho\dot{T} + (3\lambda + 2\mu)\alpha T_0 u_{i,i}$$

式中  $T$  为温度;  $Q$  为内热源单位时间释放的单位体积能量;  $\lambda$ 、 $\mu$  为拉梅系数;  $\alpha$  为热膨胀系数;  $T_0$  为基准温度;  $u$  为位移。

如不考虑耦合情形,则上式右边最后一项省略,成为:

$$(k_{ij}T_{,j})_{,i} + Q = C\rho\dot{T}$$

这就是傅里叶热传导公式。在通常的热应力问题中,由此式求解得到温度场。对于有相变发生或局部有固液并存的情形,内热源还包括相变潜热。H. T. Fan & H. P. Wang (1991) 在 G. W. Krutz & L. J. Segerlind (1978) 的基础上分析了焊接固液并存区的热场,对平板对接情形提出了由相变潜热导致的热源项为:

$$Q' = \rho L \frac{df_s}{dt}$$

式中  $f_s$  为过渡区的固态百分比;  $L$  为单位质量的相变潜热。假设  $f_s$  与温度成线性关系,则有:

$$f_s = f_m \left( 1 - \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \right)$$

式中  $f_m$  为两相区在固液面上的固态百分比;  $T_2$ 、 $T_1$  分别为相变区固相面和液相面的温度。

由上两式,傅里叶热传导公式可写为(二维情形):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial h_s}{\partial \delta} (T - T_f) + Q' = \rho C_s^* \frac{\partial T}{\partial t}$$

其中  $Q'$  为焊接热源项,  $Q' + Q'' = Q$ ;  $h_s$  为上下表面的平均放热系数,计及了辐射和对流效应;  $\delta$  为板厚;  $T_f$  为周围介质温度;  $C_s^*$  为:

$$C_s^* = C_s + \frac{L f_m}{T_2 - T_1} \quad T_1 < T < T_2$$

这样就把相变潜热作为材料比热的上升来处理;从而使问题的处理简单多了。关于相变凝固问题,还可见 Wang et al (1987)、Vujanovic (1989),前者考虑材料的流动计算了连续浇铸过程的温度场,后者用高斯变分原理和线性优化方法研究了半无限体的凝固问题。

由于急剧加热使物体的温度发生剧烈变化的现象谓之热冲击。在热冲击的情况下,由于热惯性的存在,温度梯度和热流密度不再相互对应,热量在物体内的传播在时间上滞后于边界条件的改变。令滞后时间为  $\tau$ ,则热传导公式为:

$$(k_{ij}T_{,j})_{,i} + Q = c\rho(T + \tau, \dot{T})$$

在稳态的情况下,  $\tau = 0$ ,即假定热量传播速度为  $\infty$ 。在弱瞬态过程中  $\tau$  也是很小的,同样可以忽略热传播滞后的影响。但在快速的瞬态热过程中即强烈热冲击的情形下,如热爆炸、热核聚变、快速化学反应等,则不能忽略热传播滞后的影响,从而使热传导方程由抛物线型

方程变为双曲线型方程，热过程发生了本质的变化。自从 1948 年 Cattaneo 对傅里叶热传导公式进行了修正后，这一问题逐渐受到了关注，前苏联学者韦尔诺特和雷柯夫（见〔苏〕B. Л. 伊萨琴科等著，传热学）也分别对这个问题进行了研究，我国的刘顺隆和姜任秋（1992）报道了冲击加热半无限体的温度场求解。毫无疑问，这方面的研究将会逐步展开和深入。

## 2 热弹性力学

与弹性力学有关的力学参数有杨氏模量  $E$ 、剪切模量  $G$ 、泊桑比  $\nu$  和热膨胀系数  $\alpha$ 。一般地， $E$ 、 $G$  随温度升高而降低， $\nu$ 、 $\alpha$  随温度升高而增大，其中  $\nu$  比其它参数较小受温度的影响。日本机械工程师学会（Japan Society of Mechanical Engineers）在 1980 年出版的书中列出了金属和合金的力学参数随温度的变化关系，可资查阅。

考虑材料性质与温度相关，热弹性力学的运动方程为：

$$\begin{aligned} & \mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,j} + F_i + \mu_{,j}(u_{i,j} + u_{j,i}) + \lambda_{,i} u_{j,j} \\ & = (3\lambda + 2\mu) \left\{ \int_{T_0}^T \alpha dT \right\}_{,i} + (3\lambda + 2\mu)_{,i} \int_{T_0}^T \alpha dT + \rho \ddot{u}_i \end{aligned}$$

式中  $F_i$  为体积力分量。弹性体中的热应力问题归结为对上述方程的求解。对于简单的典型问题，可用分析法求解（详见竹内洋一郎著，热应力 1982；Naotake Noda, 1986），对于具有复杂的边界条件问题，则主要求助于数值法求解，如有限元法、边界元法、有限差分法等。这些方法求解虽然精确，但需很细的网格剖分，计算工作量很大。最近发展的由 Bellman, R. E. et al (1972) 提出的微分求积法，有效地减少了数值求解的工作量。其基本原理是，在任一离散点上，一函数对某空间函数的导数，近似地等于函数在区域中的所有离散点上的加权线性叠加，即设函数  $W(x)$ ， $x$  为空间变数，则：

$$W'_i = A_{ij} W_j \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$N$  为离散点数， $A_{ij}$  为加权系数，上式表示对  $j$  求和， $j=1, 2, \dots, N$ 。此方法已成功应用于解决具有四阶偏微分方程的结构问题（Bert, C. W. et al, 1988），此后被广泛地应用于线性和非线性问题，应用于解决热应力问题尚有待开展。

### (1) 含裂纹体情形

工程结构在热环境中运行，裂纹缺陷的存在会引起尖端附近局部的热应力增大，往往导致裂纹的扩展，引起结构的失效破坏，因此对热断裂问题的研究具有重要的意义。在热应力问题中，裂纹尖端的应力与经受机械应力的等温问题同样地保留了， $1/\sqrt{r}$  的应力奇异性，因而同样可以定义热应力强度因子、 $J$  积分等。如图 1，对于二维情形，应力强度因子算式为：

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} [\sqrt{2\pi r} (\sigma_2) 400]$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} [\sqrt{2\pi r} (\sigma_{12}) 400]$$

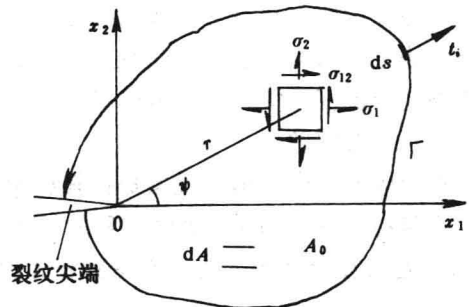


图 1

$K_I$ 、 $K_{II}$ 分别为 I、II 型应力强度因子。 $J$  积分算式为:

$$J = \int_{\Gamma} \left( W dx_2 - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} ds \right) + \int_{A_0} \alpha \sigma_{kk} \frac{\partial T}{\partial x} dA$$

式中  $W$  为应变能密度;  $\sigma_{kk}$  为主应力分量和; 其它符号意义见图示。

对于热载是准静态情况, 夏良道和范绪箕 (1991) 用边界元法计算了应力强度因子, T. R. Hsu et al (1986) 用有限元法计算了薄壁管道贯穿裂纹的  $J$  积分值, H. T. Fan & C. H. Shan (1987) 用全息干涉法测量了平板中的裂纹的  $J$  积分值。当热载是瞬态的情形往往称为热冲击断裂问题。Naotake Noda et al (1989) 考虑材料为线弹性, 从无裂纹体的瞬态应力场出发, 应用应力叠加原理求解了圆柱体边裂纹和平板裂纹的应力强度因子。用数值法求解可见 K. Kokini (1986)、Hans Grebner (1987); 实验测量可见 Pinches (1989)。Geiss et al (1986) 还从统计断裂力学 (Probabilistic fracture Mechanics) 的角度研究了压力容器的热冲击断裂问题。

### (2) 复合材料问题

近二三十年来, 航空、航天工业的飞速发展, 复合材料由于具有强度高、重量轻等特点, 获得了广泛应用。目前复合材料在其它许多工业部门也得到了应用。复合材料的热弹性问题早在 70 年代即有研究, 由于本构方程的复杂, 往往只能求助于数值法求解, 这方面的文章很多, 如李书和孙良新 (1991) 用杂交元法分析了层合板壳情况, Gulate et al (1987, 1988) 用有限差分法和有限元法分析了受局部热载作用层合复合材料的失效等。

### (3) 其它问题

对于热致平板弯曲、翘曲和振动问题, 可参见 Theodore R Tauchert (1991) 的综述, Jozef Ignaczak (1991) 报道了热弹性力学波动问题的进展。

## 3 热非弹性力学

在热非弹性力学中, 对材料本构关系作了更加深刻的描述, 与变形速率无关方面, 包括热塑性、热弹塑性, 需计及材料的屈服应力  $\sigma_y$ 、应变强化因子  $H$ , 它们通常随着需计的升高而降低; 与变形速率相关方面, 包括热粘弹性, 温度及材料的蠕变柔量、松弛模量以及其他特征函数, 还有热粘塑性问题。在热塑性、热弹塑性方面, 大多采用数值法尤其是有限元法进行研究。在热粘弹性方面, 由于问题更加复杂, 在当今的研究阶段大多假定材料热物性与温度无关, 而只考虑材料热粘弹性性质随温度的变化。

### (1) 耦合问题

在固体介质中, 耦合现象是指其热能不仅引起温度上升, 还转变为变形功。耦合作用大小与材料在热力学、力学过程的行为特性和时间历程等有关。对于弹性固体, Baley & Weiner 定义耦合系数  $\delta$  为 (范绪箕和陈国光, 1982):

$$\delta = \frac{(3\lambda + 2\mu)^2 \alpha^2 T_0}{\rho^2 C V_e^2}$$

式中  $V_e = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$  为膨胀波在弹性介质中的波速。耦合影响由材料的耦合系数  $\delta$  和变形率两方面因素决定, 分析表明, 对于大多数弹性材料, 若变形速率比较缓慢, 耦合影响可以忽略不计, 因此只是在动态问题处理时考虑耦合影响才具有较大的意义。然而, 对

于非弹性固体介质,即使在准静态条件下,耦合影响也很大。50年代,根据不可逆热力学建立了非弹性固体耦合理论。David H Allen (1991) 综述了非弹性固体的耦合问题,回顾了发展历史和最新的进展。N. S. Sun et al (1991) 分析了考虑热弹塑性耦合的动态断裂问题。从含裂纹体准静态断裂扩展的格律匪斯 (Griffith) 断裂熵生成率和海尔姆赫兹 (Helmholtz) 自由能出发,推导出裂纹尖端区域动态热传导公式为:

$$(k\theta_{,i})_{,i} + Q = C\rho\theta + (3\lambda + 2\mu)\alpha T_0 \dot{u}_{i,i} - (G - 2\nu)\delta(\vec{r} - \vec{r}_0)\dot{C}$$

式中  $\theta = T - T_0$ ;  $G$  为能量释放效率;  $2\nu$  为单位面积断裂表面分离功;  $\delta(\vec{r} - \vec{r}_0)$  为笛拉克-德耳他 (Dirac-delta) 函数;  $\dot{C}$  表示断裂扩展速度。

对上式用有限元离散,求解了裂纹动态扩展的尖端区温度,表明对于某些问题,如固体火箭的火药柱,由于裂纹动态扩展引起尖端区的温度上升可能使火药失去化学平衡,因此耦合影响是不能忽略的。对于非弹性固体的耦合问题,总的来看已取得了很大进展,但目前尚有不明确的地方:①对非平衡的热力学过程的认识还不够;②非弹性固体的滞后损失除了转化为热能外,还用于位错重排、相变或微断裂过程,对它们之间的相关影响仍不清楚;③虽然提出了数值计算式,仍缺乏广泛深入的研究;④最重要的是,对热非弹性力学问题,尚不明确耦合影响可忽略的条件。

## (2) 焊接问题

Karlsson (1986) 对焊接热应力作了综述,分为7个部分的内容,焊接方法、焊接冶金学、实验分析、理论分析、热断裂、退火过程和再热裂纹问题。焊接实质上是大热流非均匀局部加热问题,会导致大变形残余应力和残余应变。其特点是,非均匀的局部加热、大范围温度变化(从室温到金属熔点以上)、非定常的温度的分布、存在局部塑性变形区和相变区等。对大多数钢来说,在相变区存在着两个交界面,固相面和液相变,它们的位置都随时间变化,构成所谓的移动边界问题或相变问题。交界面之间的区域称为过渡区,将产生相变潜热,其中固液相变潜热对热场的影响较大,固态相变潜热对力场的影响较大,并通过膨胀系数  $\alpha$  来实现。王海平 (1984) 用有限元法分析了焊接问题,在过渡区的处理中,综合考虑了弹性和弹塑性行为,对权系数提出了一种独特算法,减少了求解过程的迭代次数,提高了计算精度。对于考虑相变的焊接问题分析,大范围的温度变化将导致晶体结构改变,伴随着体积、屈服应力的变化,必须要考虑热膨胀系数的变化。这方面的工作可见 Jonsson et al (1983、1985)、Itoh et al (1984),前者考虑相变引起的热膨胀取决于峰值温度,讨论了大型平板对缝焊接的热变形和热应力,后者研究了马氏体不锈钢的焊接残余应力。

## (3) 热处理问题

Fletcher (1989) 出版了《热处理过程热应力和热应变的形式》一书,详细讨论了弹塑性模型、数值求解、结构与热应力之间的关系、材料性质、温度场、热应力、实验测量、粘性流动的影响等问题。热处理过程中应力应变场、温度场之间,以及它们与金属结构之间存在着复杂的相互作用。淬火是热处理的最主要工序,目的是要在材料中产生金属晶体结构的变化,因而在淬火体的热应力分析中必须要考虑由于相变引起的体积变化,这由热膨胀系数的变化表达,可参见 Jeanmart & Bouvaist (1985)、Fletcher & Lewis (1985)、Schroder (1985)。

大变形和与变形速率相关的热非弹性力学、热弹塑性问题,诸如颈缩、金属成形加工

和材料经历大范围温度变化都必须用有限变形理论求解。在大变形的分析中, 还需计及耦合影响 [Argyris et al (1982a, b), Lehmann & Blix (1985a, b), Lehmann (1988), Tomita et al (1988) 报道了颈缩过程的耦合热应力研究, Lught & Huetink (1986) 用有限元法分析了金属加工过程中的热应力耦合。Ignaccolo et al (1988) 研究了空心圆柱壳在力载热载循环作用下的失稳问题。关于与变形速率相关的热非弹性力学, 不仅考虑了材料的塑性性质, 还计及了材料的粘性性质, 在线性热粘弹性、非线性热粘弹性及热粘塑性方面都有研究, 已建立了粘弹性简单模型、热流变简单材料模型、热流变复杂材料模型 (Naotake Noda, 1991)。

在热弹性-非弹性力学方面, 由于同时考虑材料的热弹性和热非弹性变化, 问题的求解变得相当复杂, 但在工程实践中尤其是金属加工方面也有相当广泛的应用, 目前在热弹性-粘塑性的本构方程、有限元法求解、大变形、焊接、凝固、热处理等问题已有研究报道, 如 Mu & Hu (1988) 讨论了热弹塑性蠕变问题, Nicholson & Kiddy (1984) 讨论了大变形塑性模型, Argyris et al (1981) 研究了考虑耦合影响的厚壁圆筒的退火过程, 更多的内容可参见 Naotake Noda (1991) 的描述。

## 4 热应力学科的发展趋势

热应力学科与热学、力学、材料学等学科密切相关, 在不少方面已有较为成熟的理论和极为广泛的应用。它的发展, 一方面将更加着重于学科的健全, 另一方面也更加重视复杂实际问题的探讨和解决。对于热弹性力学问题, 主要的工作是用分析方法求解控制微分方程; 对于热非弹性力学、热弹性-非弹性力学问题, 由于考虑材料的热塑性、热粘性行为, 使得控制微分方程复杂化, 大多只能用数值法求解。在焊接、热处理、金属成形加工等复杂的实际问题中, 存在着各种物理现象及其相互作用, 如瞬态、温度对材料性能的影响、相变、耦合等, 其热应力行为仍有待借助于数值方法作出更加深入的分析, 其中, 热冲击、热疲劳断裂研究, 由于宇航工程、核动力工程及化学工程的发展, 显得更加迫切, 更为热固体力学工作者所重视 (范绪箕和杭国平, 1992)。

## 参 考 文 献

- 1 范绪箕. 热应力学科的现状与发展. 上海交通大学科技交流室, 1983
- 2 范绪箕, 陈国光. 热弹性力学问题的耦合理论. 力学进展, 1982; 12 (4): 339~345
- 3 范绪箕, 杭国平, 夏良道. 热冲击概况. 1992
- 4 李书, 孙良新. 用杂交元分析层含板热应力. 热应力专集 I, 1991. 174~187
- 5 刘顺隆, 姜任秋. 冲击加热半无限物体温度波效应. 全国高等学校工程热物理第四届学术会议论文集. 杭州, 1992
- 6 王海平. 焊接温度场和应力场的有限元分析. 上海交通大学研究生论文, 1984
- 7 夏良道, 范绪箕. 边界元法在热弹性断裂力学中的应用. 热应力专集 I, 1991. 188~198
- 8 B. JL 伊萨琴科等 [苏] 著. 王丰, 冀守礼, 周筠清, 喻锡臣译. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1987
- 9 竹内洋一郎著, 郭延玮, 李安定译. 热应力, 北京: 科学出版社, 1992
- 10 Argyris J H, Vaz Le, and William K J. Integrated finite element analysis of coupled thermoviscoplastic problems. J Thermal Stresses, 1981; 4 (2): 121~153
- 11 Argyris J H, Doltsimi J St, Pimenta P M, and Wüstenborg H. Thermomechanical response of solids at

- high strains—natural approach. *Comput Mech Appl Mech Eng*, 1982a; 32; 3~57
- 12 Argyris J H, Szimmat J, and Willium K J. Computational aspects of welding stress analysis. *Comput Meth Appl Mech Eng*, 1982b; 33; 635~666
  - 13 Bellman R E, Kashef B G, Casti J. Differential Quadrature: A technique for the rapid solution of non-linear partial differential equations. *J Comput Phys*, 1972; 10; 40~52
  - 14 Bert C W, Jang S K, Striz A G. Two new approximate methods for analyzing free vibration of structural components. *AIAA Journal*, 1988; 26; 612~618
  - 15 David H Allen. Thermomechanical coupling in inelastic solids. *Appl Mech Rev*, 1991; 44 (8); 361~373
  - 16 Fletcher A J and Lewis C. Effect of free edge on thermal stresses in quenched steel plates. *Mat Sci Tech*, 1985; (1); 780~785
  - 17 Fletcher A J. Thermal stress and strain generation in heat treatment. Elsevier Applied Science, London and New York, 1989
  - 18 Geiss M, Wolf L, Fischer K, and Blume H. Results of probabilistic fracture mechanics analyses for pressurized thermal shock transient in the reactor pressure vessel of BIBLIS—B. *Nucl Eng Des*, 1986; 96; 395~402
  - 19 Gularte R C, Nemes J A, Stonesifer F R, and Chang C I. Failure of mechanically loaded laminated composites subjected to intense localized heating. *Numer Methods Thermal Problems 5, Part 2*, 1987. 983~993
  - 20 Gulart R C, Nemes J A, Stonesifer F R, and Cahng C I. Failure of mechanically loaded laminated composites subjected to intense localized heating. *Int J Numer Methods Eng*, 1988; 25; 561~570
  - 21 Krutz G W, and Segerlind L J. Finite element analysis of welded structure. *Welding Journal*, 1978; 57 (7)
  - 22 Hans Grebner. Thermal shock of a pipe with a partly circumferential surface crack. *Engineering Fracture Mechanics*, 1987; 28 (3); 309~317
  - 23 Fan H T, and Shen C H. Experimental evaluation of J—integral for a center—cracked plate subject to quasistatic thermal load. *Proceedings of SPIE—The international society for optical Engineering*, 1987; 814; 390~397
  - 24 Fan H T and Wang H P. On treatment of transition zones in thermal and stress analysis of welding. *热应力专集 I*, 1991. 243~257
  - 25 Ignaccolo S, Consin M, Jullien J F, and Waeckel N. Interaction of mechanical and thermal stresses on the instability of cylindrical shells. *Res Mech*, 1988; 24; 25~33
  - 26 Itoh Y, Nagata K, Yanaki T, and Mori T. Transient thermal stresses and residual stresses of 13 Cr cast steels during welding. *J Japan Welding Soc*, 1984; 2 (2); 348~354
  - 27 Japan Society Mechanical Engineers (ed). The modulus of elasticity of metals and alloys. *Japan Society of Mechanical Engineers*, 1980
  - 28 Jeanmart P and Bouvaist J. Finite element calculation and measurement of thermal stresses in quenched plates of high—strength 7075 aluminium alloy. *Mat Sci Tech*, 1985; (1); 705~769
  - 29 Jonsson M, Karlsson L, and Lindgreen L. Thermal stresses and plate motion in butt—welding, 3rd Int Conf Numer Meth Thermal Problems (seattle, W A), Pineridge Press, 1983. 270~279
  - 30 Jonsson M, Karlsson L, and Lindgreen L. Deformations and stresses in butt—weldings of large plates with special reference to the mechanical material properties. *J Eng Mater Tech (ASME)*, 1985; 107 (4); 265~270
  - 31 Jozef Ignaczak. Domain of influence results in generalized thermoelasticity—a survey. *Appl Mech Rev*, 1991; 44 (9); 375~382

- 32 Karlsson. Thermal stresses in welding (survey), Thermal stresses I, Chapter 5, 1986. 299~389
- 33 Kohini K. Thermal shock of a cracked strip effect of temperature—dependent material properties. Eng Fract Mech, 1986; 25 (2); 167~176
- 34 Lehmann Th and Blix V. On the coupled thermo—mechanical process in the necking problem. Int J Plast, 1985a; (1); 175~188
- 35 Lehmann Th and Blix V. On the influence of the coupling of thermal and mechanical processes in the necking problem in uniaxial tension. J Thermal Stresses, 1985b; 8 (1); 153~165
- 36 Lehmann Th. On the influence of the coupling between mechanical and thermal processes in inelastic bifurcation. Arch Mech, 1988; 40 (1); 81~96
- 37 Lught J and Muetink J. Thermal mechanically coupled finite element analysis in metal—forming processes. Comput Meth Appl Mech Eng, 1986; 54; 145~160
- 38 Mu X and Hu H. A finite element elastic—plastic—creep analysis of materials with temperature dependent properties. Comput Struct, 1988; 30 (4); 953~956
- 39 Naotake Noda. Thermal stresses in materials with temperature dependent properties. thermal stresses I, R B Hetnarski (ed), North—holland, Amsterdam, 1986. 391~483
- 40 Naotake Noda, Yasuhiro Matsunaga, Tomoaki Tsuji, and Hiroshi Nyuko. Thermal shock Problems of Elastic Bodies with a crack. Journal of Thermal Stresses, 1989; 12; 369~383
- 41 Naotake Noda. Thermal stresses in materials with temperature—dependent properties. Appl Mech Rev, 1991; 44 (9); 383~397
- 42 Nicholson D W and Kiddy K C. A large deformation plasticity model with rate sensitivity and thermal softening. J Eng Mater Tech (ASME), 1984; 106 (4); 388~392
- 43 Sun N S and Fan H T. Thermo mechanical coupling effect on fracture of solids. 热应力专集 I, 1991. 507~520
- 44 Pinchas Katz and Arkady S Voloshin. Measurement of the stress intensity factors for transient thermal loading by caustics. Journal of Thermal Stresses, 1989; 12; 99~106
- 45 Schroder R. Influences on development of thermal and residual stresses in quenched steel cylinders of different dimensions. Mat Sci Tech, 1985; (1); 754~764
- 46 Theodore R Tanchert. Thermally induced flexure, buckling and vibration of plates. Appl Mech Rev, 1991; 44 (8); 347~360
- 47 Tomita Y, Shindo A, and Chu M. Localization of the plastic deformation in the plane strain tension block with strain rate and temperature sensitivity. J Japan Soc Tech Plast, 1988; 29 (331); 835~839
- 48 Hsu T R, Chen G G, Gong Z L, and Sun N S. On the thermo—fracture behavior of leaking thin—wall pipes. Int J Pres Ves & Piping, 1986; 24; 269~281
- 49 Vujanovic B D. A variational approach to the problem of solidification of a metal semi—infinite thermally nonlinear body. Acta Mech, 1989; 77; 231~240
- 50 Wang Z G, Tanaka T, and Inoue T. Simulation of continuous casting process considering material flow (1st report, analysis of temperature). Trans Japan Soc Mech Eng Ser, 1987; A53 (492); 1735~1738

# 蠕变损伤局部性研究

孙训方 刘彦 张南

(西南交通大学应用力学研究所, 成都 610031)

## A RESEARCH ON LOCAL CREEP DAMAGE

Sun Xunfang Liu Yan Zhang Nan

(*Institute of Applied Mechanics, Southwest Jiaotong University*)

**提 要** 本文以损伤局部性观点,从细观分析入手,探索蠕变损伤的细观特征并进行量测,提出蠕变局部损伤定义,发展了含局部化效应的蠕变损伤理论和模型,并将结果应用到实际蠕变裂纹启裂的蠕变结构分析中。

**关键词** 蠕变; 损伤; 局部性

## 0 引 言

工程结构材料的损伤具有明显的局部性特征。实际工程结构的破坏往往在材料最薄弱的部位发生,这是损伤发展最快的部分。连续损伤力学没有考虑到这种损伤局部性和非均匀性,用材料的整体平均损伤预测实际材料的破坏,理论是得出的结果和实际情况间存在着明显的差异。整个的损伤只是材料内各部分损伤的平均描述,而真正控制材料破坏的,并不是连续损伤力学所描述的整体损伤,而是材料局部薄弱部位的局部损伤。正是这种局部薄弱部位的损伤达到了材料的损伤临界值,才导致了材料的破坏。

Murakami 和 Ohno<sup>[1]</sup>首先注意到蠕变损伤的局部性问题。之后孙训方<sup>[2]</sup>从更一般的意义上提出了在连续介质力学框架中如何处理损伤局部性的问题。Lemaitre<sup>[3]</sup>也从一种极端情况下提出损伤的局部性。蠕变损伤的局部性是与材料微观结构和微观机理密切联系。因此,损伤局部性问题的研究应从细观分析入手,建立准确的材料行为模型。本文目的旨在从细观分析入手,探索蠕变损伤的细观特征并进行量测,提出蠕变局部损伤定义,发展了含局部化效应的蠕变损伤理论和模型,并将结果应用到实际蠕变裂纹启裂的蠕变结构分析中。

## 1 蠕变局部操作分析及量测

蠕变实验按标准<sup>[4,5]</sup>,在 RD2-3 型高温蠕变及持久强度试验机上进行。选用材料为高温合金 GH169。其热处理制度为:960℃保温 1 小时,空冷;720℃保温 8 小时,以 50℃/



小时炉冷到 620℃保温 8 小时，空冷。

蠕变断裂试样，按文献<sup>(5,6)</sup>所述的原理和方法，在线切割机上沿试样拉伸方向的对称轴切开，制成金相样品，经腐蚀后，在金相显微镜下观察试样纵剖面上蠕变损伤特征及其分布情况。



图 1 晶界微孔形成  
光学显微照片 400×  
距断口距离 30mm,  $\sigma=800\text{MPa}$

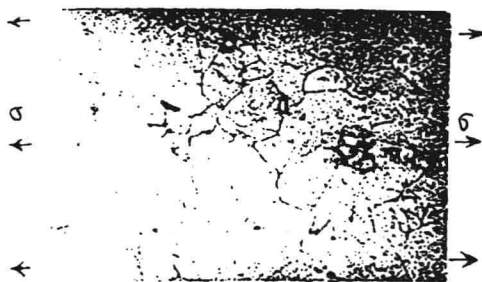


图 2 碳化物与基体界面形成空洞  
光学显微照片 400×  
距断口距离 20mm,  $\sigma=800\text{MPa}$



图 3 晶界空洞扩展  
光学显微照片 400×  
距断口距离 3mm,  $\sigma=800\text{MPa}$

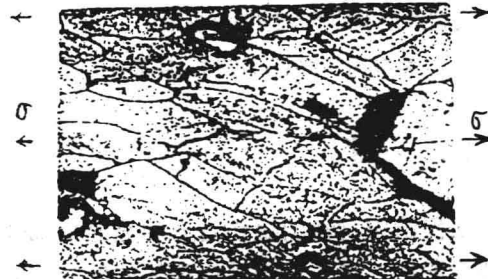


图 4 晶界空洞连接  
光学显微照片 400×  
距断口距离 1mm,  $\sigma=800\text{MPa}$

图 1~4 的照片反映的是蠕变断裂试样沿拉伸方向的蠕变损伤分布情况。可以看到，沿拉伸方向的蠕变损伤分布，根据其不同的蠕变损伤微观特征体现出试样不同部位处于蠕变变形的不同阶段。这就给出以下很有意义的实验观察与分析结果：

- (1) 蠕变试样的断裂寿命由局部蠕变损伤断裂所控制。
- (2) 试样各局部所处的蠕变损伤阶段可由试样的蠕变损伤分布和损伤值而得到。
- (3) 蠕变变形由处于不同蠕变损伤阶段的不均匀的局部蠕变变形所构成。

根据以上分析，进行如下蠕变局部损伤变量的测量，按照连续损伤力学对损伤变量的基本定义：

$$D = D_w = \frac{A_w}{A} \quad (1)$$

式中  $A$ ——受载表现面积；

$A_w$ ——受载表现面积内的空洞面积。