

第二屆  
全國高溫強度會議  
論文集

PROCEEDINGS  
SECOND NATIONAL CONFERENCE  
ON  
HIGH TEMPERATURE STRENGTH

中国机械工程学会材料学会

1988. 10.

封面题字：舒嘉猷

封面设计：丁大锐

## 第二届全国高温强度会议论文集

•  
编 辑：中国机械工程学会材料学会

主 编：杨宜科 李一平

印 刷：南京化工学院印刷厂

---

787×1092毫米 16开本 23印张 584,000字

印数：1—1100 1988年9月印刷

---

责任技编：丁大锐 审定：华 银 王林生

# TECHNICAL AND ORGANIZING COMMITTEE OF THE SECOND NATIONAL CONFERENCE ON HIGH TEMPERATURE STRENGTH CSME

## Chairman:

Zhou Shunshen, Shanghai Power Equipment Research  
Institute, Shanghai.

## Vice-chairmen:

Zhou Guanghua, Luoyang Ship Material Research Institute,  
Luoyang.

Xie Xishan, Beijing University of Iron and Steel Technology,  
Beijing.

Zhang Xingan, Institute of Aeronautical Materials, Beijing.

## Members:

Kong Qingping, Institute of Solid State Physics, Academia  
sinica, Hefei.

Wang Jinrui, Xian Thermal Power Engineering Research  
Institute, Xian.

Wu Dongdi, East China Institute of Chemical Technology,  
Shanghai.

Shen Fuzhong, Nanjing Institute of Chemical Technology,  
Nanjing.

Li Yiping, Nanjing Gas Turbine Research Institute, Nanjing.

Hu Gengxiang, Jiao Tong University, Shanghai.

Yang Yike, Wuxi Boiler Works, Wuxi.

Lin Maosen, Hongyuan Aviation Forging Plant, Sanyuan,  
Shanxi.

Zhao Yinglin, Mudanjiang Thermal Power Plant, Mudanjiang.

Xu Linyao, Northwestern Polytechnical University, Xian.

Cao Zhiben, Dalian Institute of Technology, Dalian.

Chief editor of the proceedings: Yang Yike

Vice-Chief editor of the proceedings: Li Yiping

# 目 录

|     |         |
|-----|---------|
| 前 言 | 陶正耀 (1) |
|-----|---------|

## ◀ 专题报告 ▶

|                     |              |
|---------------------|--------------|
| 连续损伤力学中存在的问题及解决的途径  | 孙训方 (3)      |
| 蠕变内应力理论及其工程应用       | 吴东棣 忻云彪 (6)  |
| 耐热合金高温强韧化           | 谢锡善 (14)     |
| 晶界在金属蠕变和蠕变断裂中的作用    | 孔庆平 戴 勇 (25) |
| 高温持久强韧性研究           | 周顺深 (34)     |
| 显微组织对蠕变裂纹扩展行为的影响    | 曹智本 朱世杰 (42) |
| 燃气轮机涡轮盘寿命分析和预测      | 周光华 (48)     |
| 高温炉管的蠕变损伤估算与其剩余寿命预测 | 沈复中 (56)     |
| 蠕变—疲劳交互作用下工程构件的寿命预测 | 徐林耀 (66)     |

## ◀ 论 文 ▶

### 蠕 变 · 断 裂

|                           |               |
|---------------------------|---------------|
| 蠕变断裂韧性研究                  | 周顺深 (74)      |
| 高温 COD 的研究                | 方岱宁 沈复中 (80)  |
| 蠕变损伤对热强钢力学和断裂力学性能的影响      | 李自力 (89)      |
| 高温外压下圆柱壳蠕变屈曲研究            | 严爱民 沈复中 (97)  |
| HK-40 合金圆柱试样轴压蠕变屈曲的研究     | 徐春杰 王新生 (105) |
| 含裂纹汽缸安全性分析                | 宣正法 奚智良 (113) |
| 高温高压锅炉管道弯头破裂原因研究          | 周顺深 (121)     |
| GH33A 合金蠕变损伤的初步研究         | 林茂森 刘 彦 (127) |
| GH33A 合金蠕变断裂的显微分析         | 赵建民 林茂森 (131) |
| Ni—20Cr 合金高温蠕变行为与位错亚结构的关系 | 张俊善 曹智本 (136) |
| GH36 合金蠕变过程和蠕变裂纹扩展过程的直接观察 | 乔生儒等 (144)    |
| GH33A 镍基高温合金蠕变裂纹扩展行为      | 姜 波 张行安       |
| HK-40 钢高温蠕变裂纹扩展行为         | 李 垚           |
| 二次碳化物对 HK-40 钢蠕变裂纹扩展的影响   | 赵 杰 朱 1       |
| GH34 合金钢的循环蠕变断裂           | 王 翔           |
| 加镁 GH33A 合金缺口蠕变的研究        | 朱金            |

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| 碳、铌对 GH169 合金组织和性能的影响 ..... | 黄汉香 杨锦炎等 (181) |
| 钼、铌对镍基高温合金蠕变性能的影响 .....     | 孟昭钰 谢锡善等 (187) |

## 疲劳·蠕变—疲劳交互作用

|                                      |                    |
|--------------------------------------|--------------------|
| 涡轮盘及叶片合金的高温 LCF 和 $da/dN$ 研究 .....   | 谢济洲 (192)          |
| GH132 合金在高温缺口平面应变循环加载条件下的脆断问题 .....  | 周光华 底锁柱 (200)      |
| 耐热合金材料在蠕变—疲劳交互作用下的力学特性的解析及寿命预测 ..... | 郭成璧等 (207)         |
| 两种奥氏体耐热钢蠕变—疲劳交互作用的研究 .....           | 谭毅等 (218)          |
| 应变保持时间对蠕变—疲劳寿命估算的影响 .....            | 李一平 王世栋 (223)      |
| GH132 合金 550℃ 低周疲劳特性 .....           | 底锁柱 周光华等 (233)     |
| 在蠕变—疲劳复合作用下 12Cr1MoV 钢强度特性的研究 .....  | 杨宜科 董富 俞忠华等 (238)  |
| 12Cr1MoV 钢的蠕变—疲劳复合性能 .....           | 王翔 江光美等 (246)      |
| 高应力间歇加载时的疲劳—蠕变破坏 .....               | 陈广异 (251)          |
| 涡轮盘材料 GH33 合金热机械疲劳行为的研究 .....        | 谢锡善 浦惠康等 (257)     |
| 1Cr13 钢的热—机械疲劳性能 .....               | 魏立勇 赵元森 (264)      |
| 多向应力下耐热钢热疲劳强度的试验研究 .....             | 郭成璧 翟洪祥 (271)      |
| 铸铁热疲劳特性试验及断裂力学计算分析 .....             | 郭成璧 周玮生 (278)      |
| Mg 对铁基和镍基高温合金高温疲劳及疲劳蠕变交互作用的影响 .....  | 谢锡善 浦惠康 刘锡奎等 (286) |
| 热作模具钢 3Cr2W8V 和 H—13 热疲劳性能的研究 .....  | 李德元等 (292)         |
| 细结构理论在疲劳裂纹扩展模型中的应用 .....             | 李旭东 杨雨烟 (298)      |
| 30Cr2MoV 转子钢门槛值附近的疲劳裂纹扩展 .....       | 杨雨烟 孙忠孝 (308)      |
| 蠕变—疲劳交互作用下裂纹扩展特征的研究 .....            | 王荣 田长生 (313)       |

## ◀ 测试方法 ▶

|                                  |               |
|----------------------------------|---------------|
| 用于电位法裂纹测试技术优化的边界元方法 .....        | 王正东 吴东棣 (320) |
| 蠕变断裂全寿命曲线试验中的两个问题 .....          | 张行安 (328)     |
| 计算机控制热机械疲劳的试验研究 .....            | 王建国等 (335)    |
| BHW35 合金疲劳裂纹扩展速率的测定 .....        | 陈景华等 (340)    |
| 微处理机在 RD2—3 蠕变机温度、载荷程控中的应用 ..... | 吴志华 金伟顺 (345) |
| 机在高温裂纹扩展上的应用 .....               | 余静等 (348)     |

## ◀ 交流论文(摘要) ▶

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| 变下应力腐蚀性能研究 .....      | 顾凌鸿 (355)  |
| 在高温蠕变裂纹扩展试验中的应用 ..... | 赵从宝等 (356) |

# CONTENTS

|                                                                                                                          |                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Foreword .....                                                                                                           | <i>Tao Zhengyao</i> (1)               |
| Outlook on Continuum Damage Mechanics and Its Improvement<br>.....                                                       | <i>Sun Xunfang</i> (3)                |
| Theroy of Creep Internal Stress and Its Application to Engineering<br>.....                                              | <i>Wu Dongdi Xin Yunbiao</i> (6)      |
| High Temperature Strengthening and Ductility Improvement in<br>Superalloys .....                                         | <i>Xie Xishan</i> (14)                |
| The Role of Grain Boundaries in Creep and Creep Rupture of Metals<br>.....                                               | <i>Kong Qingping Dai Yong</i> (25)    |
| Studies on High Temperature Creep Strength and Toughness<br>.....                                                        | <i>Zhou Shunshen</i> (34)             |
| Effects of Microstructures on Creep Crack Propagation Behavior<br>.....                                                  | <i>Cao Zhiben Zhu Shijie</i> (42)     |
| The Life Analysis and Life Prediction of Gas Turbine Disk<br>.....                                                       | <i>Zhou Guanghua</i> (48)             |
| Creep Damage Assessment and The Correponding Residual Life Prediction<br>for Furnace Tubes at Elevated Temperature ..... | <i>Shen Fuzhong</i> (56)              |
| Life Prediction of the Engineering Structures at Creep—Fatigue<br>Interaction .....                                      | <i>Xu Linyao</i> (66)                 |
| A Study on Creep Fracture Toughness .....                                                                                | <i>Zhou Shushen</i> (74)              |
| Ivestigation on High Temperature COD.....                                                                                | <i>Fang Daining Shen Fuzhong</i> (80) |
| Influence of Creep Damage on the Mechanical and Fracture Mechanical<br>Performances of High Temperature Steels.....      | <i>Li Zili</i> (89)                   |
| Creep Buckling Study on Cylindrical Shells with External Pressure at<br>High Temperature.....                            | <i>Yan Aimin Shen Fuzhong</i> (97)    |
| Creep Buckling Study on Cylindrical Specimen of HK-40 Alloy under<br>Axial Compression .....                             | <i>Xu Chunjie Wang Xinsheng</i> (105) |
| Reliablity Analysis on a cracked Steam Turbine Casing<br>.....                                                           | <i>Xuan Zhengfa Xi Zhiliang</i> (113) |
| A Study on Failure Cause for Bend Region of Boiler Pipe Operated at<br>High Temperature and High Pressure .....          | <i>Zhou Shunshen</i> (121)            |
| A preliminary Study on Creep Damage of Alloy GH33A<br>.....                                                              | <i>Lin Maosen Liu Yan</i> (127)       |

|                                                                                                                                                        |                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Microscopic Analysis of Creep Fracture of Alloy GH33A<br>.....                                                                                         | <i>Zhao Jianmin Lin Maosen</i> (131)          |
| The Relationship Between High Temperature Creep Behavior and<br>Dislocation Substructure in a Ni—20Cr Alloy<br>.....                                   | <i>Zhang Junshan Cao Ziben</i> (136)          |
| Experimental Observation on Creep Process and Creep Crack Propagation<br>of Alloy GH36 .....                                                           | <i>Qiao Shengru et.al</i> (144)               |
| Creep Crack Growth Behaviour in Ni—Base Superalloy GH33A<br>.....                                                                                      | <i>Jiang Bo Zhang Xinan et. al</i> (148)      |
| Creep Crack Growth Behavior at Elevated Temperature in the HK—40<br>Steel.....                                                                         | <i>Li Peien et. al</i> (156)                  |
| The Effect of the Second Carbides on the CCG of steel HK—40<br>.....                                                                                   | <i>Zhao Jie Zhu Shijie et. al</i> (164)       |
| Cyclic Creep Rupture of GH34 Alloy Steel<br>.....                                                                                                      | <i>Wang Xiang Zhou Naibiao et.al</i> (170)    |
| A Study on Notched Creep of Mg Added Alloy GH33A<br>.....                                                                                              | <i>Zhu Jingyuan Zhu Huifen</i> (175)          |
| Influences of C and Nb on the Structures and Properties for GH169<br>Super-Alloy.....                                                                  | <i>Huang Hanxiang Yang Jinyan et.al</i> (181) |
| The Effects of Ta and Nb in the Ni-Base Superalloys on Creep Property<br>.....                                                                         | <i>Meng Zhaoyu Xie Xishan et. al</i> (187)    |
| An Invesigation of High Temperature LCF and da/dN For Turbine<br>Disk and Blade Alloys .....                                                           | <i>Xie Jizhou</i> (192)                       |
| Brittle Fracture of GH132 Superalloy at High Temperature Notch Plane<br>Strain Cycle Loading .....                                                     | <i>Zhou Guanghua Di suozhu</i> (200)          |
| Cyclic Behavior Analysis and Life Predication Methods of High<br>Temperature Structural Materials under Fatigue-Creep Interaction Con-<br>dition ..... | <i>Guo Chengbi et.al</i> (207)                |
| On The Interaction of Creep-Fatigue in Two Austenitic<br>Heat-Resistant steels .....                                                                   | <i>Tan Yi et.al</i> (218)                     |
| The Effect of Hold Time on Creep Fatigue Life Predictions<br>.....                                                                                     | <i>Li Yiping Wang Shidong</i> (223)           |
| Low Cycle Fatigue Properties of Superalloy GH132 at 550℃<br>.....                                                                                      | <i>Di Suozhu Zhou Guanghua et.al</i> (233)    |
| A Study on Strength Properties of Steel 12Cr1MoV under the Action<br>Combined Creep With Fatigue .....                                                 | <i>Yang Yike Yu Zhonghua et.al</i> (238)      |
| Combined Creep Fatigue Behaviour of a 12Cr1MoV Steel Used in Power<br>Plants .....                                                                     | <i>Wang Xiang Jiang Xianmei et.al</i> (246)   |
| The Fatigue-Creep Failure under High Stress Level and Intermittent                                                                                     |                                               |

|                                                                                                                                          |                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Loading Conditions .....                                                                                                                 | <i>Chen Guangyi</i> (251)                          |
| Thermal-Mechanical Fatigue Behavior Study on Disc Material GH33A<br>Superalloy .....                                                     | <i>Xie Xishan Pu Huikang et. al</i> (257)          |
| Thermal-Mechanical Fatigue Behaviour of 1Cr13 Steel<br>.....                                                                             | <i>Wei Liyong Zhao Yuansen</i> (264)               |
| Thermal Fatigue Strength and Life Assessment of Superalloy GH36<br>under Multiaxial Thermal Stress Condition<br>.....                    | <i>Guo Chengbi Zhai Hongxiang</i> (271)            |
| Experiments and Fracture Mechanics Analysis on Thermal Fatigue<br>Characters of Cast Iron.....                                           | <i>Guo Chengbi Zhou Weisheng</i> (278)             |
| The Effects of Magnesium on High Temperature Fatigue and Fatigue/<br>Creep Interaction of Iron-Base and Nickel-Base Superalloys<br>..... | <i>Xie Xishan Pu Huikang Liu Xikui et.al</i> (286) |
| Studies on Thermal Fatigue Properties of Die Steels 3Cr2W8V and H 13<br>.....                                                            | <i>Li Deyuan et.al</i> (292)                       |
| Application of Microstructure Theory to Fatigue Crack Growth Model<br>.....                                                              | <i>Li Xudong Yang Yuyan</i> (298)                  |
| Fatigue Crack Growth Neared the Threshold Value in Rotor Steel<br>30Cr2MoV .....                                                         | <i>Yang Yuyan Sun Zhongxiao</i> (308)              |
| The Crack Propagation Characteristics under Creep Fatigue Interaction<br>.....                                                           | <i>Wang Rong Tian Changsheng</i> (313)             |
| A Boundary Element Approach Used to Optimize the Electrical Potential<br>Technique for Crack Measurement .....                           | <i>Wang Zhengdong Wu Dongdi</i> (320)              |
| Two Questions in Whole Creep Life-Curve Testing.....                                                                                     | <i>Zhang Xingan</i> (328)                          |
| Research on Computer Controlled Thermo Mechanical Fatigue Test<br>.....                                                                  | <i>Wang Jianguo et.al</i> (335)                    |
| Fatigue Crack Propagation Rate Determination of BHW35 Alloy<br>.....                                                                     | <i>Chen Jinghua et.al</i> (340)                    |
| An Application of Microcomputer to Temperature and Load Program<br>Controller For Creep tester RD2-3.....                                | <i>Wu Zihua Jin Waishen</i> (345)                  |
| An Application of Microcomputer to Creep Crack Propagation at<br>Elevated Temperature.....                                               | <i>Yu Jing et.al</i> (348)                         |



# 前 言

金属材料的蠕变现象，现在已是尽人皆知。然而，在本世纪初却是一个相当深奥的问题。Andrade于1910年发表了他对高温试验的一些研究结果，指出蠕变过程具有三个阶段。这个看法其后一直被沿用，并成为寻找新的耐热材料的基本比较方法。

本世纪初期，蒸汽轮机的蒸汽初温约为400℃，在此温度下碳钢尚不能产生明显的蠕变。随着科学技术的发展，金属材料的使用温度逐步升高，对其蠕变抗力也要求越高，从而开展了一系列蠕变理论及性能的研究。高温强度研究成果促进了热机的发展由蒸汽机，蒸汽轮机和内燃机，进入燃气轮机和喷气发动机。

蠕变现象的发现，蠕变理论的发展及在工程中的应用，对发展社会生产力具有十分重大的作用。

从历史演变来看，Andrade的发现只表明高温强度研究进程中新的一页的开始。

随着航空、化工、火电、舰船等工业不断发展，要求高温零件在更高温度下工作，并能承受频繁的温度、应力交变作用及环境腐蚀。因之，对高温材料的使用性能提出了种种新的要求。过去沿用的高温强度设计准则已不能完全适应复杂工况下的设计需要。旧的设计方法只根据材料的高温拉伸强度、持久强度和蠕变极限来评价零件的安全性。它只能保证光滑零件不发生塑性断裂，而不能对含缺陷零件的断裂寿命作定量计算，也不能防止上述零件在高温长期应力作用下发生蠕变脆性断裂。由此，人们开始重视研究材料在接近使用条件下的性能。高温低周疲劳、蠕变——疲劳交互作用、热机械疲劳性能等研究工作广泛开展。把材料的使用性能数据应用于设计，建立新的高温强度设计准则，这只是近十多年来的事。值得注意的是，防止蠕变脆性断裂的研究已引起国内外重视，高温持久强韧性研究在高温强度研究领域已占有相当重要地位。

七十年代末，随着高温断裂力学研究的进一步开展，研究工作者企图用对蠕变裂纹扩展速率的控制，作为高温零件设计的基础。这方面的研究在近十多年内发展较快，已开始建立了蠕变裂纹扩展速率 $da/dt$ 与力学参量 $K_I$ 、 $\sigma_{m,t}$ 、 $C^*$ 等的关系。这将为含缺陷高温零件断裂寿命定量计算和寿命设计开拓新的途径。

近几年来,我国在蠕变持久、高温低周疲劳、蠕变——疲劳交互作用、热机械疲劳、蠕变裂纹开裂和扩展、高温蠕变断裂韧性、耐热合金高温强韧化等方面都进行了广泛研究并取得显著成绩;高温强度与微观结构关系的研究有了新的开端;测试新技术研究与应用有了新的进展。不少研究内容具有较高的学术水平,一些研究成果已在工业生产中得到应用。为了进一步交流和促进成果的推广应用,本论文集收编了有关专题报告和研究论文53篇。论文集内容基本反映了近年来我国高温强度研究的动态和取得的新成果。

在广大高温强度研究者的热情支持下,第二届全国高温强度会议论文集终于出版了。在此,对论文作者和编辑工作者致以深切谢意。

中国机械工程学会 材料学会副理事长

陶 正 耀

1988年3月

# 连续损伤力学中存在的问题 及解决的途径 (摘要)

孙训方

(西南交通大学)

## OUTLOOK ON CONTINUUM DAMAGE MECHANICS AND ITS IMPROVEMNET

Sun Xunfang

(Southwestern Jiao Tong University)

### ABSTRACT

For metallic materials, due to their polycrystalline nature, damage is always created at local weak spots, and life prediction of metallic components considering creep and fatigue crack growth by classical continuum damage mechanics, treating materials as homogeneous media, is not reasonable basically. In this paper a Local Damage model and its analytical approach is proposed to modify the Continuum Damage Mechanics Approach.

连续损伤力学是在断裂力学以后发展起来的连续介质力学的另一个分支。最早是由Kachanov于1958年在研究蠕变的脆性开裂问题(即在发生蠕变开裂时没有明显的塑性变形)时所提出的一种计算方法。后来,经Rabotnov、Leckie与Hayhurst、Lemaitre与Chaboche等人的发展,逐渐形成一个纳入热力学框架、以损伤为内变量的连续损伤力学学科分支。它主要是用来解决主裂纹(宏观裂纹)形成以前,微观裂纹的引发和扩展(统称为裂纹萌生阶段)这一阶段,蠕变、疲劳及它们的交互作用下寿命估算的方法,以及塑性加工成型的极限加载量的计算方法等。

损伤力学既是在连续介质力学框架内的,因而,它必然要假定“损伤”这个内变量在均匀应力场中也是个均匀分布的变量。这和实际的物理现象间显然是有差异的。以均匀应力状态下的轴向拉伸试棒为例,按损伤力学观点,既然试棒的应力状态是均匀的,则“损伤”内变量的演变规律也应是各点处相同的,即每个构元的损伤演变规律完全相同。因而,认为拉棒的蠕变试验所得到的损伤本构关系就能代表拉棒中任一构元的蠕变损伤本构关系。据此,

即可得到如下假设,即:任意应力状态下对构元进行蠕变损伤分析时,就应该可以采用上述试验结果所代表的蠕变损伤本构关系以及蠕变损伤演变律。但若将此假设应用于受内压的管道估算其蠕变寿命时,所得到的结论应该是在管道内壁表面上有均匀分布的蠕变损伤。然而,实际情况却远非如此,在整个管道处于蠕变第Ⅲ阶段(设计时要求如此)时,管道内壁或外壁表面上个别薄弱部位已出现蠕变开裂现象。由此可见,“均匀损伤”这个概念是不符合实际情况的。这个问题实际上在高周疲劳(应力疲劳)中也同样存在着。高周疲劳是整体处于线弹性状态而在局部薄弱处却出现了由于塑性循环变形而引起的强化及随后发生的损伤,损伤的长期积累就会引发微观裂纹并扩展为宏观裂纹,这正是高周疲劳在高于持久极限应力条件下疲劳裂纹发展的实际过程。这一过程也不可能用“均匀损伤”模型来描述。

以上损伤的局部性是有其明确物理背景的。以金属材料为例,实际材料是多晶体,在处于最不利位置处的最弱晶粒显然是最先发生损伤的。对损伤的这种局部现象采用连续介质力学模型显然不可能得出符合实际物理现象的结论。例如,在蠕变寿命估算中,由于前提假设是:蠕变损伤只在蠕变第Ⅲ阶段才发生,因而,在按损伤力学的方法,从  $D=0$  到  $D=1$  这一阶段所经历的时间就算是蠕变寿命,这种处理方法实际上已隐喻着整体处于蠕变第Ⅲ阶段,而薄弱的局部业已处于蠕变第Ⅲ阶段,否则,就很难理解为什么只以第Ⅲ阶段所经历的时间作为蠕变寿命,而不计算蠕变第Ⅱ阶段的寿命;更难理解的是按规范设计,只允许构件在蠕变第Ⅲ阶段内工作,为什么以规范为依据所设计的构件却在经历一段服役期限后出现了蠕变脆性开裂的现象。类似情况在应变控制的低周疲劳寿命估算问题中也同样存在着。有些材料,例如 316 不锈钢,在低周疲劳条件下是循环硬化直至开裂的材料,若按损伤力学方法来计算,则认为在应变控制条件下,只有当应力开始降低(即出现软化现象)后才出现疲劳损伤。那么,按此假设的概念,怎么能计算出上述材料的低周疲劳寿命呢?我们认为这些矛盾之所以无法从连续损伤力学的方法中得到解决,完全是因为连续损伤力学模型把损伤当作一个均匀分布的参量,而没有,也不可能把实际存在着的薄弱部位不同于整体材料的损伤行为,在连续介质力学框架内正确地予以描述。用拉伸试棒按连续介质力学的参量得到的试验结果,只能代表材料的平均力学行为,而不可能反映薄弱部位的局部力学行为。

综上所述,我们提出,损伤局部性只能在(1)建立了整体无损伤而局部(薄弱部位)出现损伤这样的模型;(2)根据整体损伤行为的实验现象,作出合理的假设,而且把局部损伤特征行为根据整体损伤行为的实验现象提出一定的假设来建立起描述局部损伤特征行为的表达式;这两个条件下,才能较合理地解决前面所提到的矛盾。而这是目前的连续损伤力学的薄弱环节,也正是我们准备着手解决的课题。

改进的方向:要建立一种模型,它既能反映出在均匀应力场中不同位置处的构元其损伤程度不同,也能反映出各构元的损伤演变规律间明显的差异。只有这种模型才能比较更符合实际一些地反映整体与局部在力学行为上的差异与关系。整体的本构关系及损伤演变方程只不过是唯象学的平均力学行为,它们是利用连续介质力学的公式,将实验结果转变为应力、应变、损伤内变量等关系,所以,它们不可能反映出局部(薄弱部位)力学行为的特点。将这种本构关系和损伤演变方程应用到某一个具体构元时就带有假设性了(连续介质力学的基本假设、平均化的假设、不考虑尺度问题的假设等等)。实验结果(荷载与位移间的关系)是真实的,但由此而计算出的适用于构元的力学关系(应力—应变—损伤间的关系)则并非真实的,而带有某些假设的性质了。局部薄弱部位构元的力学行为(指该局部真实的力学行为而

言)与上述带假设性质的关系间显然是存在着差异的,问题在于如何找到这两者间的关系,以及从局部到整体又是如何过渡的关系。这两者正是我们目前要探索的关键问题。

要将损伤力学方法推广到断裂力学模型中裂纹尖端断裂过程区内,对于该区域的损伤演变过程进行研究,以便通过数值分析,例如有限元方法,来确定损伤积累并导致局部构元开裂的定量过程,同样需要对断裂过程区中的损伤本构关系和损伤演变规律有定量的了解。显然,这也不可能用拉伸试棒的实验结果按连续介质力学方法推算而得。这种局部的力学行为也只能按照前述思路,从整体的力学行为按一定的假设推导而得,其可信性只能通过最终的寿命估算值与实验值间相符的程度加以检验。在相符程度不理想时,还需对所作假设加以修正。由于目前还不可能对局部薄弱部位的力学行为通过实验方法加以测定,因而,只能按上述思路来处理。我们认为只有这样来处理才算得上是求解断裂力学模型的裂纹扩展真正的局部方法,而目前国际上流行的断裂分析的局部方法,由于它并不能准确地反映我们前面所提及的薄弱部位力学行为,因而,所得到的结论是难以与实际结果有良好符合的。

# 蠕变内应力理论及其工程应用

吴东楝 忻云彪

(华东化工学院)

## THEORY OF CREEP INTERNAL STRESS AND ITS APPLICATION TO ENGINEERING

Wu Dongdi Xin Yunbiao

(East China University of Chemical Technology)

### ABSTRACT

This paper summarizes the recent researches on creep internal stress. The theory of creep internal stress and the methods for its measurement have been further clarified, and the application of creep internal stress to engineering problems has also been investigated. The results show that creep internal stress can be applied not only to evaluating creep behavior of high temperature materials, but also predicting residual life of high temperature components with an advantage of shorter testing time.

### 一、前言

在高温蠕变情况下,金属材料在一般外力作用下的稳态蠕变速率可用指数方程(1)来描述<sup>(1)</sup>。

$$\dot{\epsilon}_s = A \{ \sigma / E(T) \}^n \exp(-Q_c / RT) \quad (1)$$

式中: A ——材料常数(与温度无关)

$\sigma$  ——外应力

$E(T)$  ——与温度有关的杨氏模量

$n$  ——应力指数

$Q_c$  ——蠕变激活能

$R$  ——通用气体常数

$\dot{\epsilon}_s$  ——稳态蠕变速率

T——温度

在稳定的温度情况下, 方程 (1) 可化为

$$\dot{\varepsilon}_s = A' \sigma^n \quad (2)$$

式中:  $A'$ ——与温度有关的材料常数

对于大多数的纯金属和简单合金, 其应力指数  $n$  一般为  $4 \sim 6$ , 蠕变激活能  $Q_c$  为自扩散激活能<sup>[2]</sup>。但是, 工程上大多数高温耐热合金的应力指数  $n$  却大大高于 4, 且蠕变激活能又为基体自扩散激活能的  $2 \sim 3$  倍<sup>[3]</sup>。对于这么高的  $n$  和  $Q_c$  值, 现有的蠕变理论就很难对其进行合理的解释。这一问题直到七十年代初, Wilshire 等<sup>[4,5,6]</sup> 提出了蠕变有效应力概念后才得到解决。他们认为金属材料在高温下的蠕变并不是在全部外应力  $\sigma$  作用下发生的, 而是在有效应力  $\sigma_e = \sigma - \sigma_0$  作用下发生的。这样金属材料在高温外力作用下的稳态蠕变速率方程 (1) 和 (2) 式可改写为:

$$\dot{\varepsilon}_s = B \{ (\sigma - \sigma_0) / E(T) \}^n \exp(-Q_c^* / RT) \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = B' (\sigma - \sigma_0)^n \quad (4)$$

研究表明<sup>[3,4,5]</sup>, 对于纯金属、固溶强化合金和第二相强化合金, 其应力指数  $n$  为常数 4, 且强化合金在恒定的有效应力  $\sigma_e$  作用下材料的蠕变激活能  $Q_c^*$  接近于基体扩散能。这就使双相合金和单相合金的应力指数和激活能值统一了起来, 就可用现有的蠕变理论来解释高温耐热合金的蠕变机理。

方程 (3) 和 (4) 式中的  $\sigma_0$ , 若采用蠕变回复模型来描述, 常称为摩擦应力 (Friction Stress) 或网络反力 (Network Backstress)<sup>[3,7,8]</sup>; 若用滑移—回复组合模型来描述时, 常称为内应力 (Internal Stress) 或位错反应力 (Dislocation Backstress)<sup>[9]</sup>。在本文中统称为蠕变内应力。

## 二、蠕变内应力 $\sigma_0$ 的理论

目前描述蠕变内应力  $\sigma_0$  的理论模型主要有三个, 它们是蠕变回复模型、滑移—回复模型和硬化—软化模型。由于描述的理论模型不同, 因而建立在这三个理论模型基础上的蠕变内应力  $\sigma_0$  测试方法也就有三种, 应力降落法、应变 (应力) 瞬时下降法和恒应变速率法。

### 1. 蠕变回复理论

Wilshire<sup>[5]</sup> 用于描述蠕变内应力  $\sigma_0$  的蠕变回复理论是建立在 Bailey 和 Orowan 及 Weertman 位错攀移模型基础上的。他认为金属材料的高温蠕变是受三向位错网络的回复 (生长) 控制的。当材料在外应力  $\sigma$  作用下发生蠕变时, 位错网的网络尺寸并不是取决于外应力  $\sigma$ , 而是取决于有效应力  $\sigma_e$  ( $\sigma_e = \sigma - \sigma_0$ ); 速率控制过程并不是位错运动, 而是亚晶内三维位错网络的生长, 以提供象位错源那样作用的足够长的位错链节。

Wilshire 的这一理论在应力降落法实验中得到了证实<sup>[3,7,10,11]</sup>。当材料在外应力  $\sigma$  作用下处于稳态蠕变时, 下降一个小的试验应力值  $\Delta\sigma_1$  ( $\Delta\sigma_1 \approx 5\% \sigma$ ), 材料在新的应力水平

$\sigma_1 (\sigma_1 = \sigma - \Delta\sigma_1)$  下, 并不是马上就发生蠕变, 而是出现一个应变速率为零的孕育期  $\Delta t_1$  (图 1), 这一孕育期的出现说明材料在新的应力水平  $\sigma_1$  下, 位错网尺寸发生小的变化所需要的时间而引起的, 这一变化又是借助于回复过程来实现的<sup>[28]</sup>。

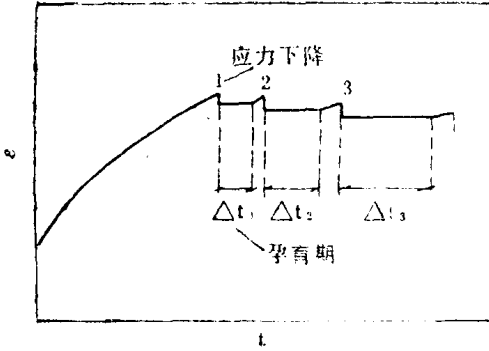


图 1 连续下降一小应力 ( $\Delta\sigma$ ) 后应变随时间变化情况

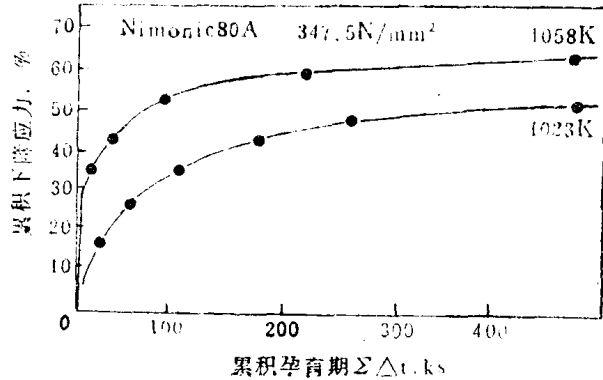


图 2 累积下降应力与累积孕育期曲线<sup>[33]</sup>

根据这一理论, 蠕变内应力  $\sigma_0$  的求取就可以通过不断地下降应力值的实验来获得。当材料在应力  $\sigma_1$  作用下处于稳态蠕变时, 再降落一个  $\Delta\sigma_2$  值, 可得孕育期  $\Delta t_2$ , 如此下去, 就可获得一系列的  $\Delta\sigma_1, \Delta t_1; \Delta\sigma_2, \Delta t_2; \Delta\sigma_3, \Delta t_3; \dots$ 。随着应力水平的不断下降, 所呈现的孕育期会不断增加。通过分析应力降落法中的  $\Delta\sigma$  和  $\Delta t$  值便可求取  $\sigma_0$ , 而这一实验方法称为应力降落法。

目前对  $\Delta\sigma$  和  $\Delta t$  分析方法主要采用的是渐近线法<sup>[3, 7, 10, 11]</sup>。将下降应力值  $\Delta\sigma$  和孕育期  $\Delta t$  作图, 当累积孕育期趋于无穷大时所对应的累积降落应力值就是  $\sigma_0$  (图 2), 因而  $\sigma_0$  可写为

$$\sigma_0 = \sigma - \Sigma \Delta\sigma \quad (5)$$

另外, 还有一种 Meehan<sup>[13]</sup> 分析法。由于这一方法对实验数据精度的敏感性大, 应用受到了限制。

## 2. 滑移 回复理论

蠕变回复理论虽然能满意地解释应力降落实验中所观察到的孕育期, 但它无法解释当下降一个较大的应力值时, 在孕育期出现之前会有一个蠕变速度为正、或为负、或为零的现象<sup>[6, 14]</sup>。Nix<sup>[9]</sup> 却用 Nowich 和 Machlin 提出的滑移—回复模型成功地解释了这一现象, 认为金属材料的位错滑移是一个受速率控制的过程, 材料的回复是通过位错攀移引起的位错重新排列和位错消灭而发生的。材料的外应力  $\sigma$  可分为回复—应变强化相平衡的内应力  $\sigma_r$  和有效应力  $\sigma_e$  ( $\sigma_e = \sigma - \sigma_r$ ) 两部分, 而位错的滑移是在有效应力  $\sigma_e$  下发生的。

当下降一个应力值  $\Delta\sigma$  [ $\Delta\sigma < (\sigma - \sigma_r)$ ] 时, 作用在位错滑移方向上的有效应力  $\sigma_e > 0$ , 因而材料瞬态蠕变速率为正值, 但比原来的蠕变速率为低 (图 3 a); 当下降一个较大的应力值  $\Delta\sigma$  [ $\Delta\sigma > (\sigma - \sigma_r)$ ] 时, 作用在位错滑移方向上的瞬态应力值为负值, 材料在瞬态就呈现反向变形; 如果下降的应力值正好满足  $\Delta\sigma = \sigma_e = \sigma - \sigma_r$  时, 作用在位错滑移方向上的瞬



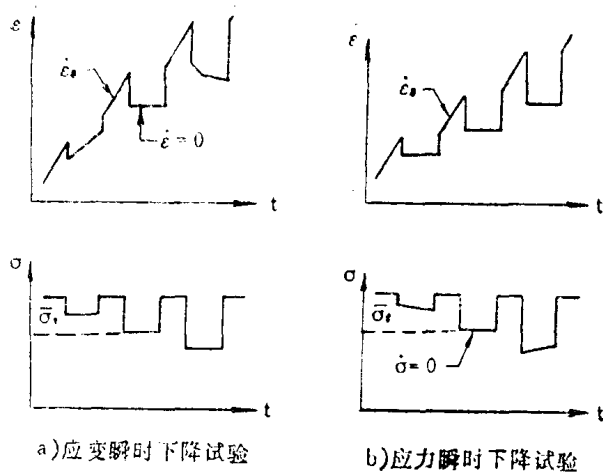


图3 应变(应力)瞬时下降试验

时合力为零,其瞬时的蠕变速率也就为零。根据这一情况,就可以容易地通过实验求取蠕变内应力 $\sigma_s$ ,这一方法称为应变瞬时下降法(图3a)。同样,如果考察应变减小一个值后,所引起的瞬态应力响应(图3b),也可以求得蠕变内应力 $\sigma_s$ ,这种方法称为应力瞬时下降法。

应力降落法和应变(应力)瞬时下降法是测定蠕变内应力 $\sigma_s$ 的两种不同方法。当对同一材料,在相同试验条件下,分别采用应力降落法和应变瞬时下降法测定其蠕变内应力 $\sigma_s$ 。发现:对于多晶铜<sup>[11]</sup>,用应力降落法所测得的 $\sigma_s$ 值较应变瞬时下

降法测得的 $\sigma_s$ 值为小。其原因是由于用应力降落法测定 $\sigma_s$ 值时,材料所获得的回复时间长而引起的。而对两相合金,如 $\gamma'$ 相强化奥氏体钢<sup>[11]</sup>,Ni 20%Cr<sup>[15]</sup>合金,由于两相合金在回复过程中受到强化粒子明显的阻滞作用,削弱了回复效应。因而对于这些强化合金,用这两种方法所测得的蠕变内应力 $\sigma_s$ 值是基本一致的。

### 3. 硬化-软化理论

上面介绍了两种测定蠕变内应力 $\sigma_s$ 的方法,但这两种测试方法对试验的要求都相当高,要求试验的环境和温控要稳定,应变传感器的灵敏度要相当高,使这两种试验无法在常规的蠕变试验机上完成。后来Wilshire<sup>[7]</sup>和Gibbons<sup>[15]</sup>研究发现,可以用恒应变速率试验,简称CSR试验,来代替应力降落试验和应变(应力)瞬时下降试验测定材料的蠕变内应力 $\sigma_s$ 。如果CSR法中的应变速率 $\dot{\epsilon}$ 等于应力降落试验中材料的稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$ ,用CSR法所求得的稳态流动应力与用应力降落试验测得的 $\sigma_s$ 值是相同的。这一结果的发现就大大简化了蠕变内应力 $\sigma_s$ 的测定方法,因为高温条件下的恒应变速率实验可在Instron或MTS等试验机上实现。而这一测试方法可用硬化-软化理论来加以解释<sup>[17]</sup>。

金属材料在高温和低应变速率作用下,开始时应变量相当小(时间短),晶格畸变能小,所以回复软化过程不太明显。而位错的移动随着变形量的增加而不断受阻,运动变得困难,为了始终保持一恒定的应变速率(CSR),就需要克服更大的内阻力,以便获得更多的位错运动,弥补因位错运动受阻而减小的变形量。这一过程在CSR曲线上就表现为OB这一段(图4)。此时,应变硬化效应超过回复软化效应。

随着应变量的增加,晶格畸变越来越严重,金属材料的位错攀移驱动力不断增大,回复软化作用也逐渐提高。由于材料在高温和低应变速率情况下,材料的回复软化作用能够使新生的位错和滑移的位错与材料的强化作用而引起消耗的位错和停止的位错相平衡。当达到这

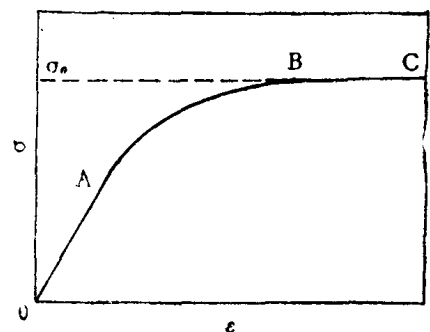


图4 高温恒低应变速率拉伸曲线