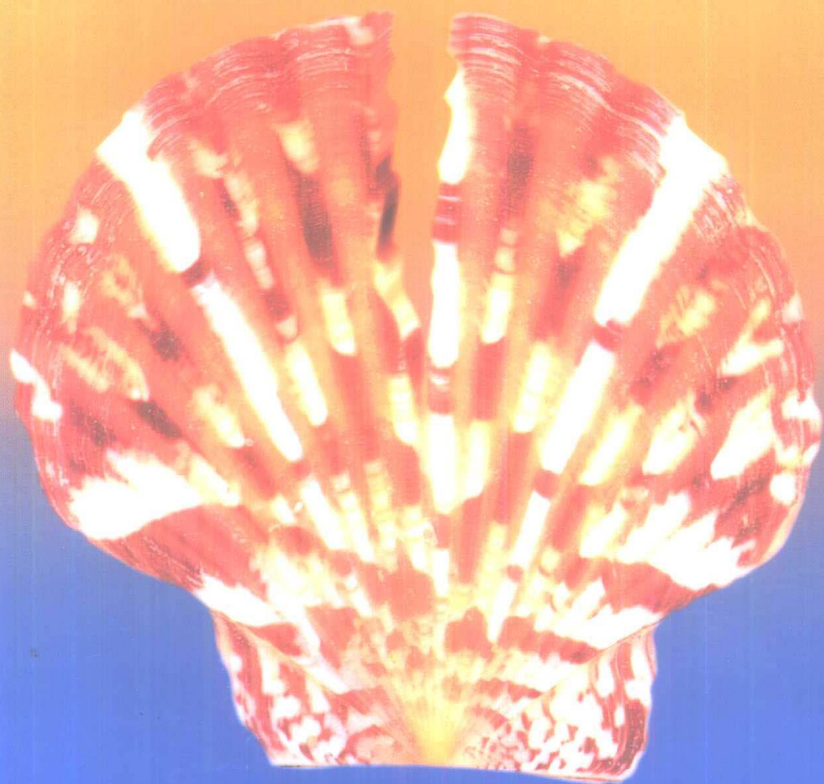


# 疲劳与断裂

# 2000

主 编 柳春图



气象出版社

# 疲劳与断裂 2000

柳春图 主编

气象出版社

## 内容简介

本书收录了第十届全国疲劳与断裂学术会议的论文 130 篇,90 余万字,反映了目前全国疲劳、断裂科学的最新研究进展。内容涉及非金属材料疲劳研究;动态、界面、弹塑性断裂研究;材料与结构的剩余寿命与延寿及老龄问题研究;材料物理性能、力学行为与断裂、疲劳机理研究;工程应用研究;材料与结构的疲劳断裂与环境效应研究;概率断裂、疲劳力学及其可靠性研究;软件设计及数据库研究;试验与测试方法研究;抗疲劳及防断裂设计技术研究;含裂纹或损伤结构的力学分析研究等诸多研究领域。

本书可供力学、机械、航空航天、交通、建筑、水利、能源、材料等领域的工程技术人员、研究人员及大专院校、研究所的教师、研究生阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

疲劳与断裂 2000/柳春图主编. - 北京:气象出版社,2000.11

ISBN 7-5029-3045-0

I.疲… II.柳… III.疲劳断裂-学术会议-文集 IV.0346.1-53  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 57889 号

## 疲劳与断裂 2000

柳春图 主编

责任编辑:杨亚政 林雨晨 终审:周诗健

封面设计:汤亚南 责任技编:林雨晨 责任校对:李幼合

\*

气象出版社出版

(北京市海淀区白石桥路 46 号 邮政编码:100081)

北京地大彩印厂

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

\*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:36 字数:921 千字

2000 年 11 月第一版 2000 年 11 月第一次印刷

印数:1-400 定价:100.00 元

## 编辑委员会

主 编 柳春图

副主编 余寿文 王中光 黄培彦

委 员（按拼音字母顺序排次）

艾素华 韩恩厚 李焕喜 刘文珽 刘元杰

罗 毅 孙 秦 王燕斌 谢里阳 杨亚政

## 编辑小组

杨亚政 金 和 李幼合 闻 玲

# 第十届全国疲劳与断裂学术会议

2000年12月12日~15日

(广州)

## 主办单位

中国力学学会

中国机械工程学会

中国金属学会

中国材料研究学会

中国腐蚀与防护学会

中国航空学会

## 承办单位

华南理工大学

# 第十届全国疲劳与断裂学术会议

## 组织委员会

会议主席 柳春图

副主席 余寿文 王中光 黄培彦

委员 (按拼音字母顺序排次)

程建华 葛 森 桂寿平 韩恩厚 韩国明 胡振威

黄培彦 刘文珽 柳春图 吕国志 倪伟明 乔利杰

孙 薇 王晨钟 王中光 谢里阳 杨亚政 余寿文

秘书长 桂寿平

副秘书长 汤立群 罗 毅

## 前 言

自 1974 年第一届全国断裂会议以来，到本届第十届疲劳、断裂会议已经 26 年了。全国疲劳、断裂学术研究开展也由启蒙阶段到成熟时期了。这主要是由于国内工业建设蓬勃的发展，推动我们疲劳断裂界科技工作者不断地去研究解决新问题；国际疲劳断裂学科的发展给我们创造了一定条件；再加上学会和科技工作者们的努力才形成当前的一个大好形势，与 20 年前的状况已经不能同日而语了。

当前发展形势有以下几个特点：1) 由于国家有关工业部门重大技术设备的引进和自行设计的要求，需建立标准，为此而有组织的设立疲劳断裂攻关项目，疲劳断裂的研究与应用紧密结合，国家工农业和国防工业的快速增长促进了疲劳断裂学科的发展；2) 国家重视人才，国内外学术交流频繁，青年人才迅速倍增成长，本文集收集的论文中大多数第一作者为青年人；3) 各行业学术领域的相互渗透，以疲劳、断裂会议为例，80 年代以来，断裂、疲劳分别有四个全国性学会组织，1998 年由全国性五个学会共同组织第九届疲劳断裂会议，本届则扩展到六个全国性学会联合组织，这将更加速、深化我国疲劳断裂学术事业的发展。

本文集经审稿共收录论文 130 篇，包括以下方面：非金属材料的疲劳断裂；动态、界面、弹塑性断裂；材料与结构的剩余寿命与延寿及老龄问题；工程应用；材料与结构的疲劳断裂与环境效应；材料物理性能、力学行为与断裂、疲劳机理；概率断裂、疲劳力学及其可靠性；软件设计及数据库；试验与测试方法；抗疲劳及防断裂设计技术；含裂纹或损伤结构的力学分析。这些论文，充分体现了从事疲劳断裂的科技工作者，为我国国民经济和国防建设多年来作出的努力和贡献。

最后祝愿疲劳断裂科学为我国建设事业作出更大贡献，并在学科自身建设方面取得更大的成绩，祝会议成功。

柳春图

2000.11

# 目 次

## 大会邀请报告

疲劳短裂纹向长裂纹转变的条件及影响因素 .....	洪友士 乔宇 (1)
飞机日历寿命确定的新方法研究 .....	张福泽 (7)
含裂纹压电介质的冲击和波的散射响应 .....	余寿文 王旭跃 (13)
氢对阳极溶解型应力腐蚀的影响 .....	乔利杰 高克玮 褚武扬 骆静莉 (19)
金属机件在复杂环境下的三维疲劳断裂 .....	郭万林 (25)
缺口根部疲劳形成寿命分析方法探讨 .....	吕国志 马君峰 孙秦 (31)
断裂力学中的局部-整体法 .....	柳春图 (36)

## 1 非金属材料的疲劳断裂

有机玻璃断裂韧性的尖切口强度估算法 .....	王泓 鄢君辉 郑修麟 (42)
高聚物银纹损伤与断裂的研究进展 .....	罗文波 杨挺青 张平 (45)
MDYB-3 玻璃撞击损伤剩余强度与疲劳裂纹扩展规律 .....	李亚智 刘雪惠 张成荫 王新波 (49)
MDYB-3 玻璃撞击损伤与表面裂纹当量化研究 .....	李亚智 刘一兵 张成荫 王新波 (53)
纤维薄板增强混凝土缺口梁破坏过程数值分析 .....	黄彦虎 黄培彦 黄小清 (57)
连续纤维增强混凝土缺口梁承载力试验研究 .....	王泉清 黄培彦 罗立峰 黄小清 曹述昭 张桂森 胡胜敏 陈文强 (61)
橡胶薄板材料中的裂纹尖端场 .....	陈少华 (66)

## 2 动态、界面、弹塑性断裂

玻璃样品表面对失效波萌生的影响 .....	赵剑衡 孙承纬 段祝平 赵峰 文尚刚 (71)
电子束焊接对材料的热冲击损伤分析 .....	张海泉 李刘合 张彦华 马翔生 (76)
亚微秒应力波载荷作用下裂纹扩展机理研究 .....	马维 段祝平 (80)
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>p</sub> /6061Al 的变形断裂特征和塑性 .....	李焕喜 崔梅 陈立强 (84)



### 3 材料与结构的剩余寿命与延寿及老龄问题

倾斜裂纹失效评定图初探 .....	王晓春 吴立军 孙国有 杨铁成 郑津洋 (89)
基于疲劳短裂纹行为的疲劳寿命估算 .....	吕文阁 (95)
复杂载荷下的应力场强法疲劳寿命估算 .....	李玉春 姚卫星 (98)
含多处损伤结构的剩余强度分析 .....	徐晓飞 姚卫星 (102)
机械加工对 15MnVN 钢等幅和变幅载荷下疲劳寿命的影响 .....	郑修麟 (107)

### 4 工程应用

抽油杆的剩余寿命及其可靠性分析 .....	李 其 王守渝 陈国华 白 玉 王德金 (111)
某型飞机襟翼锻造肋疲劳寿命对比试验结果分析 .....	王逾涯 张 强 (115)
真空泵连杆螺栓和循环机活塞杆的疲劳断裂 .....	张九渊 曹华珍 毛信表 (119)
飞行器典型壁板结构声损伤分析模型 .....	薛红军 崔卫民 吕国志 (123)
歼击机座舱盖有机玻璃边缘螺栓孔孔边裂纹应力强度因子计算 .....	王生楠 邹艳梅 (127)
压力容器用 16MnR 钢焊接接头疲劳裂纹扩展规律的研究 .....	段 权 (131)
机翼开孔加强大梁疲劳寿命分析 .....	何宇廷 杨少华 何卫锋 (135)
飞机结构细节疲劳寿命的应力场强法分析 .....	叶 彬 姚卫星 (139)
预腐蚀后飞机结构疲劳 $S-N$ 曲线研究 .....	陈群志 刘文斑 齐贤德 叶 彬 (143)
砼重力坝坝体裂缝成因及其扩展稳定性分析 .....	徐道远 王向东 朱为玄 刘爱丽 汤 明 (148)
某机座舱盖加温加载疲劳载荷谱 .....	秦远珍 (152)
某涡轮轴断裂失效原因与改进措施 .....	习年生 钟培道 陶春虎 (156)
海洋石油平台结构系统的疲劳寿命预测 .....	方华灿 吴小薇 (160)
转子疲劳寿命分析技术与软件开发 .....	张晓慧 刘 澎 刘国宁 赵明峰 (164)
飞机结构的腐蚀疲劳研究特点分析 .....	穆志韬 段成美 (168)
安二六飞机机翼腐蚀强度分析 .....	张显余 (172)
氢反应器壁材料的低周疲劳特性 .....	徐 坚 钟曼英 郭世行 (176)
轰六系列飞机垂尾固定螺栓疲劳寿命分析 .....	张显余 韩丰波 迟宏伟 (180)
飞机结构材料日历疲劳特性及其在日历寿命评估中的应用 .....	杨庆雄 帅朝林 (184)
保持时间对涡轮盘材料 GH4133 合金热机械疲劳性能的影响 .....	王建国 王连庆 唐俊武 (189)

飞机整体油箱失效预估 .....	薛景川	杨玉恭	焦坤芳	(193)				
某炼钢车间三跨连续吊车梁疲劳寿命分析 .....	张朝新	李光霞	王启慨	(197)				
直升机抗噪声疲劳设计中的噪声测量 .....								
.....	王三平	熊峻江	尚大晶	曾本银	干伟民	夏千友	李先哲	(200)
吊钩的极限状态与断裂力学计算的对比分析 .....	桂寿平	罗毅	黄培彦	何秋	(205)			
坦克平衡肘故障模式及其可靠性 .....	黄殿伟	杜立	(210)					

## 5 材料与结构的疲劳断裂与环境效应

10CrNi4MoVA 钢的低周疲劳性能研究 .....	白杰	(214)				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 陶瓷在不同加载速率下的切口强度预测 .....						
.....	赵康	魏建锋	鄢君辉	王泓	郑修麟	(218)
基体对可锻铸铁的断裂韧性的影响 .....	朱龙	李莎	陈磊	李锡蓉	(222)	
稀土元素对 Fe <sub>3</sub> Al 合金拉伸性能和环境脆化的影响 .....	高树浚	苏建清	胡壮麒	(225)		
2024 铝合金按新时效制度处理后的疲劳裂纹扩展速率分析 .....	田秀云	杜洪增	(228)			
谱载下结构细节的 <i>DFR</i> 和 <i>EIFSR</i> 的确定方法 .....	王志智	陈莉	(233)			
任意可靠度下的 <i>DFR</i> 和 <i>EIFSR</i> 及其两者间的关系 .....	王志智	陈莉	王雪芳	(237)		
飞机铝合金型材的腐蚀防护与控制 .....	华然	穆志韬	(241)			
多轴程序载荷下 45# 钢疲劳特性的试验研究 .....						
.....	王德俊	施洪生	王雷	杨会林	袁锋	(245)
钢筋与混凝土界面的疲劳裂纹扩展研究 .....	王岩	石志飞	(248)			
疲劳可靠性二维统计 MINER 准则 .....	倪侃	张圣坤	(252)			
铝合金低温超声疲劳研究 .....	陶华	薛红前	(258)			
复合材料中、长寿命区 <i>S-N</i> 曲线方程 .....	邓扬晨	章怡宁	酆正能	(262)		
K417 铸造镍基高温合金热机械疲劳行为的研究 .....						
.....	艾素华	刘峰	王跃臣	张辉	王中光	(266)
低周循环加载下疲劳—损伤—断裂全过程中材料行为交叉关系的研究和分析 .....						
.....	虞岩贵	张淼	薛伟	(271)		
激光熔凝覆盖率对材料接触疲劳性能影响的模拟 .....	邓忠民	赵亦兵	洪友士	(275)		
服从不同分布的疲劳寿命分散系数分析 .....	贺小帆	刘文斑	(280)			
高温受弯构件三维表面裂纹扩展寿命预测 .....	黄培彦	罗毅	桂寿平	费斌军	(284)	

铝合金试件腐蚀深度分布特性及变化规律研究 .....	李玉海 姜 军 刘树元 (286)
飞机结构腐蚀关键部位涂层加速试验环境谱研究 .....	
..... 刘文斑 陈群志 贺小帆 蒋冬滨 李玉海 姜 军 刘树元 (288)	
腐蚀环境下多裂纹结构的概率损伤容限分析 .....	张建宇 费斌军 (291)
钛合金焊接件疲劳特性评估的当量 $K_t$ 法 .....	王向明 姜 军 刘树元 (294)
带三缺口铝合金板断裂行为的研究 .....	傅玉灿 赵建华 王贤锋 (296)
疲劳裂纹扩展力学理论研究 (II) —— 实验验证 .....	许忠勇 强 群 (300)
不同裂纹对全尺寸铝合金压力容器断裂性能的影响 .....	
..... 苏 彬 许 超 Gouri S. Bhuyan (305)	
频率对 LY12CZ 铝合金在 3.5% NaCl 溶液中腐蚀疲劳裂纹扩展的影响 .....	
..... 张 波 鲁自界 韩恩厚 王 成 江 峰 柯 伟 (310)	
循环应力作用下伪弹性 TiNi <sub>50.6</sub> 形状记忆合金的应力应变响应 .....	
..... 饶光斌 王俭秋 柯 伟 韩恩厚 (314)	
铜双晶体的应力腐蚀开裂行为 .....	贾维平 朱自勇 柯 伟 韩恩厚 郑宇礼 (319)
LY12CZ 铝合金腐蚀疲劳裂纹扩展研究 .....	
..... 鲁自界 关 辉 张 波 韩恩厚 柯 伟 (324)	

## 6 材料物理性能、力学行为与断裂、疲劳机理

分形与材料断裂性质 .....	龙期威 (329)
片层取向对层状 TiAl 微裂纹萌生的影响 .....	陆永浩 张永刚 乔利杰 褚武扬 (331)
后断裂过程区的研究 .....	庄 茁 曲绍兴 (335)
位移载荷下微裂纹期望扩展长度 .....	李 腾 杨 卫 (339)
包含微裂纹相互作用效应的准细观损伤力学模型 .....	冯西桥 余寿文 (344)
薄膜/基底界面断裂的内嵌弹性区与结合力模型 .....	余寿文 李 然 (348)
基于短裂纹演化行为的疲劳损伤参数研究 .....	吴志学 (353)
金属间化合物 IC10 合金热/机械疲劳裂纹扩展寿命预测模型及应用研究 .....	
..... 何玉怀 刘绍伦 (357)	
高强度铝合金腐蚀疲劳裂纹闭合解析模型的探索研究 .....	沈海军 吕国志 马君峰 (362)
计算机模拟疲劳早期铜单晶中自组织位错结构的演化 .....	
..... 杨继红 李 勇 李守新 马常祥 李广义 (367)	

导体内部裂尖处的相变与焊口的形成 .....	白象忠	乔桂英	付宇明	栾金雨	高殿奎	(371)
切口试样颈部微孔洞扩张及破坏分析 .....	余海东	张光	张克实			(375)
奥-贝球铁裂纹萌生与扩展的微观机理 .....	戴品强	何则荣	郑春明	毛志远		(380)
多处损伤结构破坏准则的研究 .....	陈勃	张建宇	费斌军			(384)
界面破坏对层内混杂复合材料应力集中的影响 .....	林雪慧	曾庆敦				(388)
正交异性板 I-II 复合型裂纹断裂准则 .....	赵琛	黄培彦				(393)
关于多裂纹情况下损伤容限准则的探讨 .....	谢里阳	林文强				(398)
氢对 TiAl 基金属拉伸行为的影响 .....	高克玮	中村森彦				(401)
用于单晶体滑移弹塑性有限变形分析的一种计算方法 .....	张克实	张光	冯露			(406)
非均匀介质的随机断裂——细观涨落的尺寸效应 .....	黄国君	苏爱嘉	柳春图			(413)

## 7 概率断裂、疲劳力学及其可靠性

随机载荷作用下元件断裂可靠性研究 .....	杨晓华	姚卫星				(419)
随机谱下裂纹扩展分析模型研究 .....	陈志伟	O.S. Lee				(423)
随机疲劳寿命预测的场强法研究 .....	尚德广	王大康	姚卫星			(430)
含 MSD 构件的随机疲劳裂纹扩展规律研究 .....	帅朝林	徐晓飞	孙秦			(434)
结构使用寿命评定的功能失效概率控制方法 .....	刘小冬	刘文斑				(437)

## 8 软件设计及数据库

集成编谱程序, 提高编谱效率 .....	梁勇	张爱民	何景武			(439)
疲劳寿命的计算机仿真研究 .....	王雷	王德俊	袁锋			(443)
多裂纹连接耳片全自动网格划分技术 .....	殷之平	黄其青				(447)
飞机结构疲劳分析、程序及数据库介绍 .....	焦坤芳	薛景川	邱瑾			(451)

## 9 试验与测试方法

含裂纹板振动理论与实验研究 .....	薛红军	崔卫民	吕国志			(455)
有机玻璃棒拉伸切口强度及切口敏感性 .....	鄢君辉	王泓	赵康	郑修麟		(460)
混凝土疲劳损伤积累和剩余寿命预测研究 .....	林燕清	欧进萍	黄文虎			(464)
共混聚合物疲劳裂纹扩展试验研究 .....	宗棕	王铁军				(469)
45 钢疲劳损伤及热处理恢复机理的实验研究 .....	郭廷良	王德俊	杨化仁			(473)

路面裂缝稳定性的热光弹性实验研究 .....	贺玲凤	罗毅	黄培彦	(477)
310 不锈钢应力腐蚀的 TEM 研究 .....	李金许	乔利杰	王燕斌	褚武扬 (479)
直升机声疲劳源小波诊断方法研究 .....	罗毅	桂寿平	熊峻江	尚大晶 (483)

## 10 抗疲劳及防断裂设计技术

分布力作用梁设计合理性的判别方法 .....	曹人靖	刘道兴	(487)
一种新的混凝土强度准则 .....	罗荣芳	周筑宝	(491)
飞机结构完整性设计思想的理解 .....	薛景川	杨玉恭	董登科 (496)
裂纹扩展寿命安全可靠性分析模型 .....	罗毅	黄培彦	刘文珽 (501)
生物及仿生层状材料的断裂和韧性分析 .....	宋凡	邓雅莉	白以龙 (504)

## 11 含裂纹或损伤结构的力学分析

含 I 型裂纹薄壁偏心柱的弹性变形 .....	周利	(509)		
有限厚板圆孔应力集中的三维效应 .....	张田忠	郭万林	杨政 (513)	
应力场强法及其应用 .....	姚卫星	(518)		
耐久性设计分析中孔边较短裂纹应力强度因子计算方法的研究 .....	任炳义	(525)		
离面约束 $T_z$ 与塑性应变的关系 .....	徐绯	郭万林	(528)	
黏弹塑性材料 I 型动态裂纹尖端场 .....	钱华山	(533)		
具有滑动界面各向异性双压电材料的格林函数 .....	王旭	沈亚鹏	杜建科 (538)	
含裂纹圆筒体抗扭刚度和第三型应力强度因子的计算 .....				
.....	王勇	王钟美	陈宜周	蒋家羚 (543)
连接耳片双裂纹应力强度因子影响分析 .....	黄其青	殷之平	(548)	
共线多裂纹应力强度因子数值精度分析 .....	孙秦	迟文海	(551)	
使用闭合模型法确定冷挤压孔孔边剩余应力分布的研究 .....				
.....	王智	张向	李京珊 (555)	

作者索引 .....	(560)
------------	-------

# 疲劳短裂纹向长裂纹转变的条件及影响因素

洪友士 乔宇

(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

**摘要** 采用裂纹数密度演化的分析方法, 探讨疲劳短裂纹群体损伤的演化过程。依据裂纹数密度随时间演化的饱和特征, 确定短裂纹群体损伤向长裂纹转变的临界条件。讨论了三种临界条件设置的情况, 得到了临界转变时间随材料晶粒尺度和晶界阻力影响的趋势。

**关键词** 疲劳短裂纹, 群体损伤, 裂纹数密度, 晶粒尺度

## 引言

研究表明, 合金材料中疲劳短裂纹萌生和发展表现出群体演化的特征, 即疲劳短裂纹的数量随载荷循环周次的增加而不断增多, 损伤累积的程度取决于众多的短裂纹<sup>[1-5]</sup>。在短裂纹损伤阶段, 裂纹长度与相关的晶粒尺度相当; 同时, 相邻晶粒的取向不同。因此, 晶粒大小和晶粒边界阻碍裂纹生长的程度明显影响短裂纹群体损伤累积的过程。在合金材料中, 短裂纹阶段可占据整个疲劳寿命的 80%。显然, 短裂纹向长裂纹转变的临界条件成为计及短裂纹损伤进行疲劳寿命预测的一个关键问题。

本文采用短裂纹数密度演化的方法来研究短裂纹群体损伤的过程, 探讨短裂纹向长裂纹损伤转变的条件及其受晶粒大小和晶界特性的影响。裂纹数密度演化分析方法的基本考虑是: 在一给定时刻, 裂纹总数由裂纹萌生和裂纹生长两方面的因素决定。通过设定裂纹生长速率和裂纹成核率, 可以得到裂纹演化方程的数值解, 并由此讨论了短裂纹向长裂纹转变的临界条件的三种情形。所得结果显示短裂纹向长裂纹转变的临界时间随晶粒尺寸减小和晶界阻碍作用增大而增加。

## 1 基本方程

在短裂纹损伤初期, 裂纹之间的相互作用不明显, 对此, 我们采用相空间裂纹数密度演化方程来描述短裂纹群体损伤, 其无量纲形式为<sup>[6]</sup>

$$\frac{\partial n(c,t)}{\partial t} + \frac{\partial [A(c)n(c,t)]}{\partial c} = N_g n_N(c) \quad (1)$$

式中  $c$  是裂纹长度,  $n$  是短裂纹数密度分布函数 (即  $ndc$  表示在  $t$  时刻长度为  $c$  至  $dc$  之间的裂纹数),  $A$  是裂纹扩展速率,  $n_N$  是裂纹成核率密度, 无量纲系数  $N_g = dn_N^*/(A^*n^*)$ , 这里  $d$  为材料晶粒平均直径,  $A^*$  为裂纹特征速率,  $n_N^*$  为裂纹特征成核率,  $n^*$  为裂纹特征数密度。式(1)表示裂纹数密度在相空间的守恒, 等号左边第二项表示与裂纹生长相关的裂纹数密度在相空间内的流动, 等号右项表示萌生的裂纹对裂纹数密度演化的贡献。

考虑初始裂纹数密度  $n(c,0)=0$  的情况, 并令裂纹起始扩展长度阈值为 0, 无量纲裂纹数密度演化方程[式(1)]具有理论解<sup>[7]</sup>

$$n(c,t) = \frac{1}{A(c)} \int_{\eta(c,t)}^c N_g n_N(\hat{c}) d\hat{c} \quad (2)$$

其中,  $\eta(c,t)$  的含义为: 设想  $t=0$  时刻存在一条尺度为  $\eta(c,t)$  的裂纹, 此裂纹按速率  $A(c)$  扩展, 则至  $t$  时刻裂纹尺度扩展到  $c$ 。在以下的分析中, 裂纹扩展速率和裂纹成核率被设定为

$$A(c) = \begin{cases} 1 - (1 - A_d)c & (c \leq 1) \\ dc & (c > 1) \end{cases} \quad (3)$$

$$n_N = \begin{cases} 1 - c/2 & (c \leq 2) \\ 0 & (c > 2) \end{cases} \quad (4)$$

其中  $A_d$  为  $c=1$  时的裂纹扩展速率, 即裂尖达到晶界时的速率;  $d$  表示材料晶粒的平均尺度。注意到  $A_d$  的大小即表示晶界对裂纹生长阻碍作用的强弱。依据式(3)和(4)的设定, 可以由式(1)计算得到  $n(c,t)$  随  $c$  的分布。图 1 即为不同时刻  $n$  与  $c$  的关系, 同时表明短裂纹群体演化过程存在一“饱和”分布 (图 1 中虚线)。这意味着, 随疲劳进程的发展, 裂纹数密度分布逐渐逼近“饱和”分布。为分析方便, 记

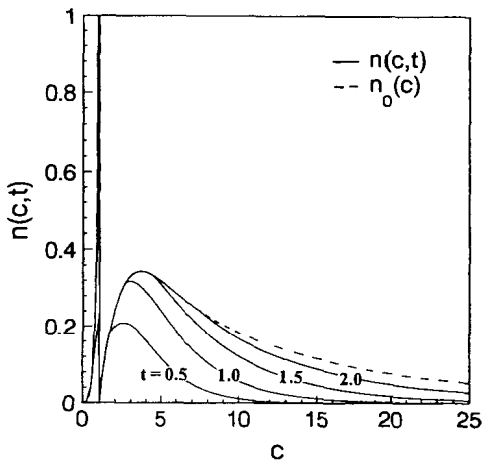


图 1 不同时刻  $n(c,t)$  随  $c$  的变化 ( $A_d = 0$ ), 虚线表示饱和态

$$\alpha = \int_0^{\infty} N_g n_N(c) dc \quad (5)$$

$$D_0 = \int_0^{\infty} n(c,t) dc = \alpha t \quad (6)$$

式中  $D_0$  为裂纹总数。记  $c^*$  为  $t$  时刻裂纹分布收敛于“饱和”分布的最大裂纹尺度, 即  $t$  时刻  $c < c^*$  区域裂纹数密度收敛于稳态曲线 (饱和); 并记相应的非饱和区裂纹总数为  $D_0^*$ 。

注意到  $c^*$  亦为  $t=0$  时长度为零的裂纹按  $A(c)$  规律扩展至  $t$  时刻的长度, 有

$$\frac{dc^*}{dt} = A(c^*) = \begin{cases} 1 - (1 - A_d)c^* & (c^* \leq 1) \\ dc^* & (c^* > 1) \end{cases} \quad (7)$$

由上式解得

$$c^* = \begin{cases} \frac{1}{1 - A_d} \{1 - \exp[-(1 - A_d)t]\} & (t \leq t_0) \\ \frac{1}{\beta} \exp(dt) & (t > t_0) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\beta = A_d^{d/(1-A_d)}, t_0 = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{\beta}\right)$ 。

## 2 短裂纹群体损伤向长裂纹阶段转变

尽管由式(1)及相应的给定条件,可以得到裂纹数密度演化特征。然而,这还不能确定短裂纹阶段如何向局部化即主裂纹损伤转变。一般地,短裂纹阶段的终止和长裂纹阶段的开始可以依据出现具有临界尺度( $c_{cr}$ )的裂纹来表征。因此,需要知道作为边界值的最大裂纹尺度 $c_{max}$ 。当 $c_{max} > c_{cr}$ ,系统进入长裂纹局部化损伤阶段。以下讨论三种情况。

**情况 I** 令饱和区上界值 $c^*$ 为短裂纹损伤系统的最大裂纹尺度 $c_{max}$ ,即 $c_{max} = c^*$ 。此情况意味着在 $c < c^*$ 区域,裂纹数密度分布达到稳定态。满足 $c^* = c_{max} = c_{cr}$ 的条件即指有一条初始长度为0的裂纹发展到临界尺度 $c_{cr}$ 。 $c_{max}$ 可表示为

$$c_{max} = c^* = \begin{cases} \frac{1}{1-A_d} \{1 - \exp[-(1-A_d)t]\} & (t \leq t_0) \\ \beta \exp(dt) & (t > t_0) \end{cases} \quad (9)$$

将式(6)代入式(9),得

$$c_{max} = \begin{cases} \frac{1}{1-A_d} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1-A_d}{\alpha} D_0\right) \right] & (t \leq t_0) \\ \beta \exp\left(\frac{dD_0}{\alpha}\right) & (t > t_0) \end{cases} \quad (10)$$

上式即 $c_{max}$ 与 $A_d$ 和 $d$ 的关系。显然存在 $c_{cr} > 1$ ,这样由式(9)可得短裂纹演化的时间上界

$$t_{cr} = t \Big|_{c_{max}=c_{cr}} = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{c_{cr}}{\beta}\right) \quad (11)$$

图2显示出 $c_{cr} = 10$ 的计算结果,表明临界转变时间 $t_{cr}$ 随 $A_d$ 和 $d$ 的减小而增加,即小晶粒和晶界阻力较强的材料具有较高的短裂纹群体损伤容限。

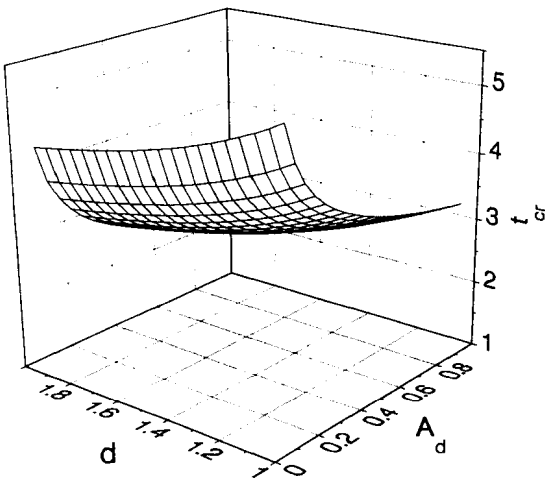


图2 情况I:  $t_{cr}$  随  $d$  和  $A_d$  的变化

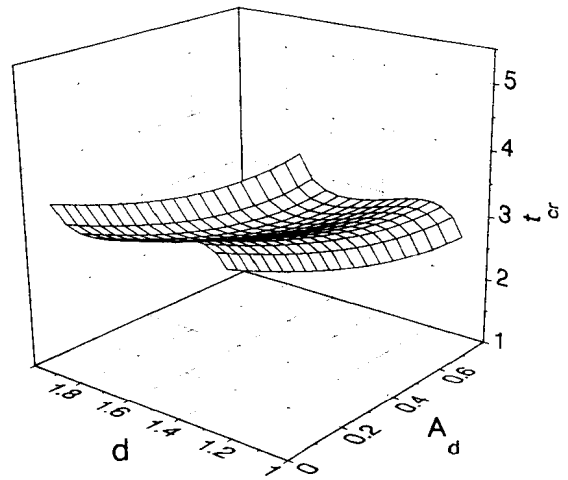


图3 情况II:  $t_{cr}$  随  $d$  和  $A_d$  的变化



情况 II  $c_{\max}$  的判据为  $\int_{c_{\max}}^{\infty} n(c)dc = 1$ 。这意味着在损伤区域里至少有一条裂纹其长度大于  $c_{\max}$ 。令  $t^*$  为满足  $c^* = c_{\max} \geq c_{cr}$  的时刻。当  $t = t^*$ ，且临界裂纹长度  $c_{cr}$  不小于 2，则非饱和区裂纹总数为

$$\begin{aligned} D_0^* &= \alpha t^* - \int_0^{c_{cr}} \left[ \frac{1}{A(c)} \int_0^c N_g n_N(\hat{c}) d\hat{c} \right] dc \\ &= \alpha t^* - N_g \left( \int_0^1 + \int_1^2 + \int_2^{c_{cr}} \right) \left[ \frac{1}{A(c)} \int_0^c n_N(\hat{c}) d\hat{c} \right] dc \\ &= \alpha t^* - N_g \left\{ \frac{24A_d - 15A_d^2 + 4(4A_d - 3) \ln A_d - 10}{16(1 - A_d)^3} + \frac{5}{8d} + \frac{1}{d} \ln \frac{c_{cr}}{2} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

以下分别讨论  $D_0^* < 1$  和  $D_0^* > 1$  两种情形。

(a) 当  $t^*$  时刻非饱和区裂纹总数  $D_0^*$  小于 1 时，由裂纹数密度守恒可得系统失效时间

$$t_{cr} = t^* + \frac{1}{\alpha} (1 - D_0^*) = \frac{N_g}{d\alpha} \ln \frac{c_{cr}}{2} + \zeta \quad (13)$$

式中

$$\zeta = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 + N_g \frac{24A_d - 15A_d^2 + 4(4A_d - 3) \ln A_d - 10}{16(1 - A_d)^3} + \frac{5N_g}{8d} \right]$$

图 3 表示此情况下  $t_{cr}$  随  $A_d$  与  $d$  的变化 ( $c_{cr}=10$ )。与图 2 相似，当  $A_d$  与  $d$  的值变小， $t_{cr}$  值变大。另外，由式(13)，可解得  $t$  时刻最大裂纹长度  $c_{\max}$  与裂纹总数  $D_0$  之间的关系

$$c_{\max} = 2 \exp \left[ \frac{d}{N_g} (D_0 - \zeta_1) \right] \quad (14)$$

式中  $\zeta_1 = \alpha \zeta$ 。

(b) 当  $t^*$  时刻非饱和区裂纹总数  $D_0^*$  大于 1 时，由裂纹数密度守恒可得系统失效时间

$$\tilde{t}_{cr} = t^* - \frac{1}{\alpha} (D_0^* - 1 + \tilde{D}_0) \quad (15)$$

式中

$$\tilde{D}_0 = \int_{c^*}^{c_{cr}} \left( \frac{1}{A(c)} \int_0^c N_g n_N(\hat{c}) d\hat{c} \right) dc - \left( D_0^* \Big|_{t=\tilde{t}_{cr}} - 1 \right) \quad (16)$$

以上二式联立可得关于系统时间的超越方程。在计算中注意到一般不出现  $D_0^* > 1$  的情况。

情况 III 假设  $c_{\max}$  的判据为： $n(c_{\max}, t) \Big|_{c=c_{\max}} \leq n_{cr}$ ，其中

$$n_{cr} = \left[ \frac{1}{A(c)} \int_0^c N_g n_N(\hat{c}) d\hat{c} \right]_{c=c_{cr}}$$