

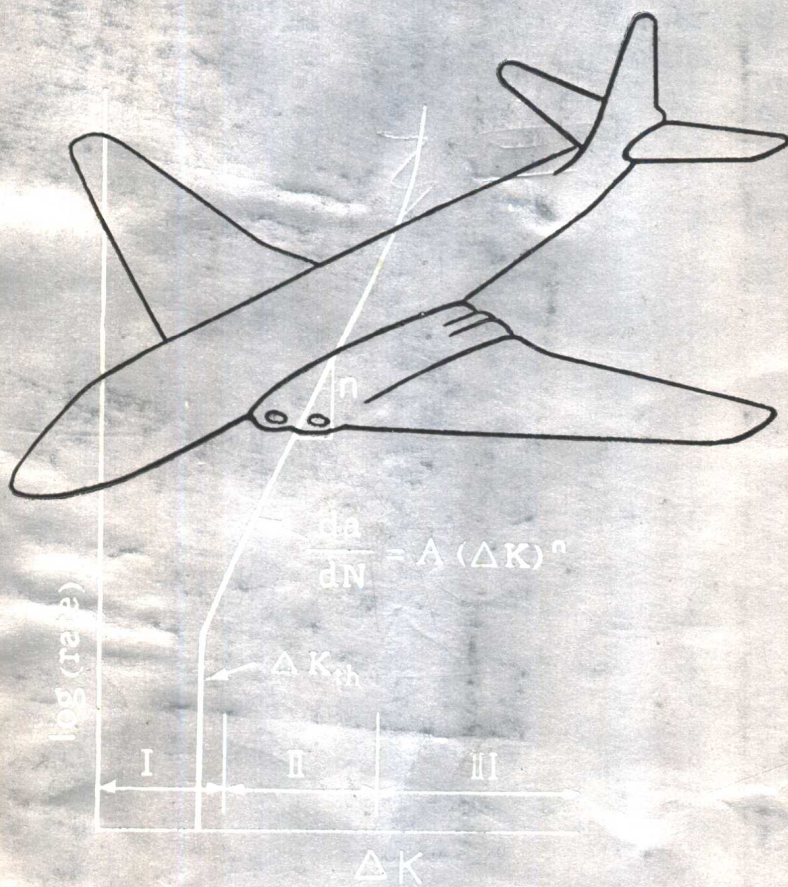
577

7/5034

- 878593

疲劳裂纹扩展

——30年来的进展



[英] R.A.Smith 主编
顾海澄 译

西安交通大学出版社

5034

疲 劳 裂 纹 扩 展

30 年 来 的 进 展

[英] 剑 桥 大 学
西 安 交 通 大 学

R.A.Smith 主 编
顾海澄 译
吴寿镗 校

西 安 交 通 大 学 出 版 社

内 容 简 介

英国剑桥大学R.A.Smith主编的这本书,总结了疲劳学科的最新成果和发展动向,许多内容目前国内所未知。引进这些技术成果,可带来巨大的社会效益,减少大量的事故,因为“在某种意义上可以说,事故是对无知的惩罚”,还可以促进疲劳学科中研究与应用的结合。

本书是博士生、硕士生的教学参考书,又是广大工程和科技人员知识更新和提高业务水平的技术资料。

Fatigue Crack Growth
30 Years of Progress
Edited by R.A.Smith
Pergamon Press 1986

疲 劳 裂 纹 扩 展

——30年来的进展

〔英〕 R.A.Smith 主编

顾海澄 译

吴寿镠 校

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

宝鸡市人民印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本787×1092 1/16 印张9.125 字数: 218千字

1988年7月第1版 1989年2月第1次印刷

印数: 1—2000册

ISBN 7-5605-0156-7/TG·12 定价: 1.90元

译者序

《疲劳裂纹扩展》原书由Pergamon出版社于1986年出版。

原书的副标题是“30年来的进展”。以1954年英国彗星号喷气客机失事为起点，开创了疲劳研究的新纪元。英国科学家P.J.E. Forsyth, N.E. Frost和G.C. Smith是这一领域中杰出的先驱者，作出了开拓性的工作。他们3人于1984年同时退休。为了表彰他们的光辉业绩，总结30年来的科研成果，并进一步促进疲劳学科的发展，剑桥大学于1984年9月20日举行了“疲劳裂纹扩展”科学报告会，很多国家的科学家参加了会议。译者也应邀与会。会上，三位大师的同事和学生从疲劳研究和应用的各个方面作了报告，这就构成了本书的基础。

本书的第一篇论文，R.A. Smith的“历史回顾”可看作是一篇总序。他指出30年来最主要的成就是应用应力强度因子幅值 ΔK 来定量表达疲劳裂纹扩展速率。J.F. Knott的“疲劳裂纹模型”一文着重论述了疲劳研究的经典方法和断裂力学方法的异同点，并用断裂力学理论和裂纹扩展微观机制解释了Wöhler S-N曲线、Palmgren-Miner损伤积累公式、以及Coffin-Manson低周疲劳公式等。T.C. Lindley的论文则从材料角度论述了冶金质量和显微组织对疲劳裂纹扩展的影响。N. A. Fleck的论文以裂纹闭合为线索，分析了环境、变幅加载、多轴加载和混合型加载对裂纹扩展的影响。C.J. Beevers等人的论文专门讨论了控制材料疲劳门槛的内因和外因。疲劳门槛是当前疲劳研究最活跃的一个分支。1981年在瑞典斯德哥尔摩、1984年在英国伯明翰、1987年在美国弗吉尼亚已分别召开过第一、二、三届国际疲劳门槛会议。R.J. Young的论文则讨论了高分子材料、生体材料、复合材料和陶瓷等的疲劳行为。J. D. Harrison的“损伤容限设计”一文着重讨论了断裂力学评定方法在焊接构件中的应用，并解释了一些法规和案例。最后B. Tomkins的“目前动态和将来趋向”一文，可看作是全书的总结。上述作者都在各自领域中作出过重大贡献。

本书是部论文集。但因为编写过程中经过集体讨论并进行了恰当分工，故在系统性、完整性来说，又可看作是一部专著。国外一些大学都以此书作为研究生的教材，有关出版社还规定了该书对学生的优惠价格。对于从事设计、制造、材料、检验、运行等的工程技术人员来说，本书不仅提供了当前疲劳研究的全貌，而且还列出了详尽的参考文献，指出了获取信息的来源。

疲劳学科是从生产实际中发展起来的。理论和实际的紧密结合是它的显著特点之一。这样说不仅没有低估、而是更强调了理论研究的重要性。N.E. Frost在国立工程研究所(NEL)对非扩展疲劳裂纹的早期工作奠定了疲劳门槛研究的基础，现在则为损伤容限设计提供了依据。又如关于裂纹闭合的研究，开始时似乎只有纯学科的意义；经过这些年的工作才认识到，一切接近实际服务条件的疲劳问题，包括变幅疲劳、随机疲劳、高温疲劳、腐蚀疲劳、多轴疲劳以及复合型加载下的疲劳等，都可以裂纹闭合来

3A W45/09

解释。为了促进研究与应用的结合，英国皇家学会在1980年召开了“设计和服役中的断裂力学”讨论会，在1984年又召开了“亚临界裂纹扩展”讨论会，组织大学、研究所和产业部门的代表作报告。从本书也可以看出国外在应用疲劳研究成果解决生产实际问题方面的努力。

以往的30年可以说是疲劳研究取得突飞猛进的30年。由于各方面的原因，这段时期我国恰好处于比较闭塞的状态，因而在社会的知识结构中出现一个断层。不仅各级领导和管理人员对疲劳感到陌生，就是广大的科技、工程人员对不断涌现的新概念、新方法、新技术也不很熟悉。建国以来，我们已经有了了一支相当可观的疲劳试验研究队伍，我国甚至可说是拥有电液伺服疲劳试验机最多的国家之一。和国外相比，差距最大的还是在疲劳研究的应用方面。英国原子能局（UKAEA）的 B. Tomkins 在总结中指出：“对未来的挑战取决于我们能否把关于疲劳的知识在实际中应用。”这个论断对我国也适用。在我国多次发生过疲劳断裂事故，有的甚至导致灾难性的后果，在能源和交通中这个问题尤为严重。在某种意义上可以说，事故是对无知的惩罚。

本书曾作为西安交通大学金属材料及热处理专业从事疲劳课题的博士生、硕士生的教学参考书。大家学了以后感到收获很大。对于广大的工程和科技人员来说，本书可作为知识更新和业务提高的技术资料。希望本书的出版不仅能促进与国外的科技交流，也能促进疲劳学科中研究和应用的结合。

前 言

断裂、腐蚀、磨损是机械零件和工程构件的三种主要失效形式。其中断裂是一种“暴发病”，常常招致生命财产的重大损失。据美国商业部国家标准局向美国国会提出的研究报告，美国每年因断裂及防止断裂要付出1190亿美元的代价，相当于国民经济总产值的4%；而依靠科学技术的力量，有一半经济损失是可以避免的。又据统计资料，绝大多数的断裂是因疲劳而引起的，在某些工业部门，疲劳可占断裂事件的80-90%。在我国，疲劳失效也相当普遍，在能源、交通等部门还很严重。如果我们的工程技术人员能掌握疲劳的基本规律，在设计、制造、材料、工艺、检验、运行等各个环节都能充分利用现有的科技成就，就一定大大减少机械疲劳断裂事故的发生。

对疲劳的研究可以上溯到第一次工业革命。从对火车车轴疲劳断裂的研究，使人们建立了S-N曲线和疲劳极限等概念，在这基础上提出了机械零件防止疲劳设计的经典方法。到本世纪50年代，以“彗星号”飞机失事为标志，开创了疲劳研究的新纪元。30多年来，疲劳学科发展很快，在理论研究和生产应用中都取得了重大成就。现在全世界每年发表的关于疲劳方面的论文达2000篇以上。由于各方面的原因，我们对这方面的信息不十分熟悉。幸运的是，本书对30年来疲劳裂纹扩展研究成果作了系统而简明的总结，为我们了解全貌提供了方便。读者可从本书中看到：防止疲劳设计的经典方法和断裂力学之间存在哪些矛盾，而根据现代的疲劳裂纹扩展模型，两者又怎样可以统一起来；关于疲劳门槛，有哪些属于内在因素，而哪些则属于外在因素；冶金质量和显微组织对材料的疲劳抗力有哪些影响；如何把在试验室中比较单一的条件下测得的数据应用于比较复杂的工况条件，等等。理论和实际的紧密结合是本书的一大特点。读者可以从对北海亚历山大·基兰德海上平台倾覆事件的分析，了解损伤容限设计的思路和方法；也可以从海洋工程焊接件的另外一些案例中得到启示，找到解决生产实际问题的途径。本书各篇论文都由英国疲劳研究的专家执笔，后面附有详细的文献目录，读者可根据自己的应用对象，很方便地找到所需要的资料。

建国40年来，机械工业有了很大的发展，产品的大型化对可靠性提出了更高的要求，文章中提到的事例亦已在我们所从事的领域中出现。我相信这本译文集的出版，会对我们以质量好、可靠性高的设备装备国民经济各部门提供有益的帮助。

机械电子工业部总工程师

陆燕

1989年元月9日

目 录

译者序

前言 (陆燕荪)

疲劳裂纹扩展研究30年的历史回顾 (R. A. Smith)	(1)
疲劳裂纹扩展模型 (J. F. Knott)	(19)
疲劳裂纹扩展的冶金学方面 (T. C. Lindley和K. J. Nix)	(45)
复杂条件下的疲劳裂纹扩展 (N. A. Fleck)	(64)
控制疲劳门槛重要因素的研究 (C. J. Beevers和R. L. Carlson)	(79)
非金属材料的疲劳 (R. J. Young)	(90)
损伤容限设计 (J. D. Harrison)	(104)
裂纹扩展研究的目前动态和今后趋向 (B. Tomkins)	(125)

疲劳裂纹扩展研究30年的历史回顾

R. A. Smith

英国，剑桥，剑桥大学工程系

摘 要

纵览近30年的疲劳研究，可以认为疲劳裂纹速率用应力强度因子幅值 ΔK 来定量表示，是最主要的成就。通过对在此期间所举行的一些主要的学术讨论会的总结，可看出对疲劳的机械学的理解也取得了进展。P. J. E. Forsyth、N. Frost和G. C. Smith三位大师所作出的杰出贡献，本文在适当的场合将着重予以说明。

关 键 词

疲劳，疲劳裂纹，疲劳裂纹扩展，应力强度因子，裂纹扩展门槛。

引 言

为了使读者想起在人的半辈子时期内世界上发生了多么大的变化，我们把1953年作为起点，顺便说一些30年前的情况。在1953年，艾森豪威尔继杜鲁门之后就任美国总统；斯大林逝世；邱吉尔当时是英国首相。伊丽莎白二世女王的加冕典礼在周围还残留空袭毁坏痕迹的圣保罗大教堂举行。电视广播正处在它的摇篮时期，黑白的画面每天播送4小时。通讯还停留在这样的水平：美国只能对加冕典礼进行声音的现场实播；静止的照片通过无线电飞越大西洋，在迟于现场7分钟之后始能为美国公众看到。在美国大约有15台计算机在运行，与之相比英国有10台。在英国食物供应仍采用配给制。人们攀登了珠穆朗玛峰。板球仍是国家的运动项目，Dennis Compton打败了Ashes。英国的工业当时正欣欣向荣，失业人数少于250万，尽管平均年工资只有380英镑；所制造的汽车有40%出口；造船工业的规模比美国、德国和日本加在一起还要巨大。对我们总结疲劳研究历史有重大意义的是：彗星号已投入使用，成为世界上首批的喷气式载客班机。

1953年以前对疲劳的认识状况

木制的机械零件逐步为铸铁零件、以后又为锻铁零件所代替，蒸汽机的发明和工业革命日益增长的势头，必然带来了当时未被认识到的疲劳失效。然而，正是由于铁路的

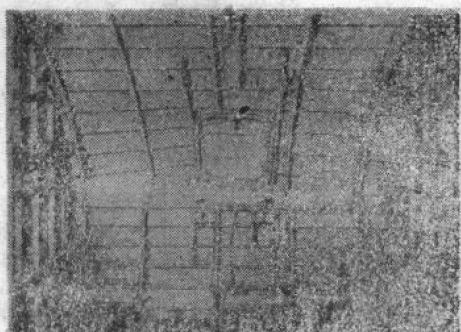
迅猛发展，特别是由于车轴的失效，促使“疲劳”这个名词被杜撰出来，也促进了最早的试验研究的开展。19世纪末叶，Wöhler 凭实验发现的关于应力幅值和寿命的关系，以及关于疲劳极限的概念等已得到确认。处理平均应力影响的准则已经提出，对于在设计中要尽量避免缺口造成应力集中也已有所告诫，尽管当时尚缺乏定量的评估。可是，疲劳机理仍然是个谜，疲劳失效也没有和裂纹的逐步扩展联系起来，尽管在破损零件的断口表面上必定会有明显的证据，这要到以后才认识到。值得注意的是，早在1903年，Ewing和Humfrey已经发表了一些照片，它们清楚地显示出，在周期受力的铁试样表面上有滑移带逐步发展，这些滑移带最终变宽而形成裂纹。实属奇怪的是，这项研究成果在经历了半个多世纪之久而未受到注意。到1948年，一位飞机工程师Nevil Shute在一本预言小说中写了以下一段话（即使在今天来看，这段话相当准确地概括了广大公众对疲劳的认识）：

“疲劳可说是金属的一种疾病。当金属在承受交变负荷时，经过很多周次后，金属的整个性能将会发生突然变化。一种铝合金在几千小时飞行中一直经得起考验，却可能突然变成结晶状，而在很小的力作用下就断裂，给飞机带来最严重的后果。”

彗星号的几次事故及随后的调研

1954年1月10日在爱尔巴，1954年4月8日再次在那不勒斯附近的地中海，两架彗星号飞机相继失事。在这两次灾难性事故之后，决定彗星号飞机停飞并开展研究。这项研究已成为失效分析同类工作的一个范例。人们选取一架正在服役的彗星号飞机，机身在液压槽中周期打压，以模拟一次又一次航行时的载荷。这架飞机在试验前已经历了1230次密封飞行，在加压槽中又经历了1830次模拟飞行，总的飞行次数达3060次。此时，压力舱构件失效，失效的起点是在一个窗框的角上，参见图1。飞机在爱尔巴的失事发生在1290次飞行之后，而在那不勒斯的事故发生在300次飞行以后。根据对爱尔巴失事飞机残骸的考察（其残骸的大部份从海底捞起复原），可以推断事故是由于压力舱构件中因疲劳引起的失效。





(c) 在打压试验槽中造成失效的内视图，
注意窗框形状

图1 彗星号喷气客机失事及事后调研

最可能萌生疲劳裂纹源的地方，经查明是方形窗框角附近高应力区的紧固钉孔处。某些紧固钉孔处在制造过程中都已经开裂！精确估计这些紧固钉孔周围的应力水平遇到了很大的困难，又考虑到打压试验在塑性区所产生的残余压缩应力等细节，所得到的试验结果可能偏高。

官方报告（Cohen 等人，1955年）中有很多有价值的详细记载，同时还有描述这种低周疲劳失效的一些经典性的说明。

“周次相对较少所发生的失效征兆是人们所不太熟悉的，但这些征兆也不是很特殊的。这种过程并不持续很久，而且看不到逐步蔓延的某种病症的那些症状。”

低周疲劳失效可能被认为是一种新的失效方式。但事实上 Braithwaite (1854) 在一个世纪以前已经描述过一个啤酒桶承重铁梁的失效。在彗星号失事几年以后， Manson-Coffin 关于塑性应变和疲劳寿命关系的研究才广泛地为人们所理解，但当时还没有公开提出计算裂纹扩展的打算。根据我们对30年的了解，对设计中致命失误的谴责是十分明确的。无论如何，所有的灾难都将促进研究。尽管彗星号失事可悲地是英国民用飞机工业的一颗大的棺材钉，这些事故却引起了人们对疲劳研究的极大兴趣。官方报告对疲劳确实看得很深远，指出：

“虽然这是一个很困难的题目，而且不能期望很快取得结果，已经充分认识到：应该把最好的智力和物力投到这个课题。”

“金属的加工硬化和疲劳”会议(1957)

1957年2月在N.F. Mott 领导下，于英国皇家学会召开了一次讨论会。这次讨论会的一些报告是对到1957年为止的疲劳研究的很好总结。会议名称“金属的加工硬化和疲劳”用来强调这个观点：疲劳仍然被认为是一种整体的现象。Mott 在他的会议开幕词中确实是这样说的：

“如果我们不首先了解加工硬化，则对疲劳断裂的了解几乎是不可能的。这次会议的前面几篇论文是关于加工硬化这个题目的。”

在这个时候，那些头脑里充满着位错新观念的金属物理学家似乎很想提供一条前进的途径。可是，Smith和Forsyth两人却讨论了持久滑移带形成的初期阶段，以及由持久滑移带发展到疲劳裂纹，尽管他们主要地应用定性的方法，见图2。他们还还为Ewing和Humfrey的早期观察增添了新的内容。Frost 在其与 Phillips 合写的一篇论文中总结了以往5年左右的工作，对疲劳过程中裂纹扩展阶段的见解已开始形成。Frost 指出，要检验 Head 在 1953 年提出的裂纹扩展理论模型——可能是这类模型中最早的一个，需要先有关于裂纹尖端塑性区尺度的更多的试验数据。Head 曾提出过一个力学模型，它

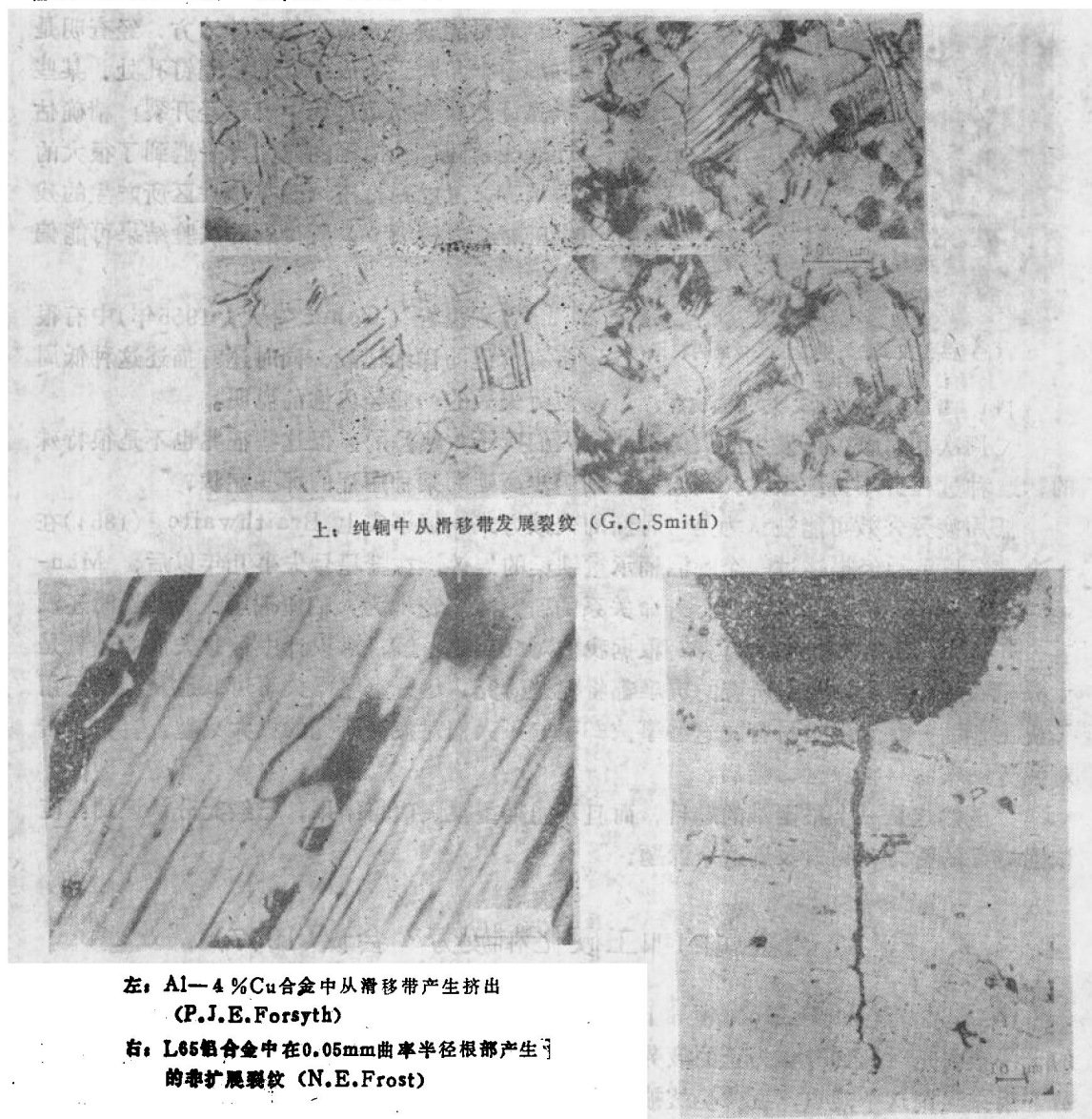


图2 1957年皇家学会讨论会上所提供的照片

包含裂纹尖端的刚塑性加工硬化单元，和遍及无限大平板的其余部分的弹性单元。这就得出下列类型的关系式：

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_1 \Delta \sigma_s a^{3/2}}{(C_2 - \sigma) \omega_0^{1/2}}$$

式中 a 是裂纹长度， $\Delta \sigma$ 是应力幅值， ω_0 是裂纹尖端塑性区的尺寸。在应力集中处萌生非扩展裂纹的问题由Frost进行了讨论，并给出了这些非扩展裂纹的裂纹长度与周次关系的数据。尽管还没有提出裂纹扩展的规律，这些研究以及有关的工作是疲劳宏观工程方法的重要里程碑。

在Cranfield举行的裂纹扩展讨论会(1961)

上述会议以后的四年中所发生的变化没有比1961年在Cranfield召开的裂纹扩展会议两卷论文集更为显著的了。可以公正地认为,这次会议是断裂研究的分水岭,通过它我们才进入了崭新的阶段。讨论的范围十分广泛,裂纹扩展不仅是指亚临界的疲劳裂纹的扩展,还包括了脆性失稳和塑性断裂。虽然宣读的论文严格集中于裂纹,工程界通过出席会议明显地惊觉了。正如空军元帅Owen Jones勋爵在会议开幕词中所说的:

“如果这次会议的名称叫做裂纹抑制讨论会,则我们对会议关心就表明得更为清楚了,因为我们全体对裂纹停止远比对裂纹扩展更感兴趣。然而,我确信你们将告诉我,只有当我们知道了什么使裂纹扩展,我们才能知道如何去消灭和控制裂纹。”

这次会议不同于上次皇家学会讨论会的另一点是,这是一次国际性的会议,一半以上的论文来自美国,所提出的关键性的新概念也来自美国。尽管如此,我们将首先讨论由Forsyth和Frost提出的两篇重要论文。

Forsyth的论文“疲劳裂纹扩展过程的两个阶段”可列为最被大量引用的经典文献之一。在这篇论文中,他把疲劳过程区分为两个阶段:第一阶段是晶体学的、由剪应力控制的滑移过程,表现在使滑移带槽沟变深,见图3;接着是第二阶段扩展,裂纹垂直于整



体的最大主应力方向,在随后的断裂表面上产生所谓的辉纹特征。这种辉纹在Cranfield会议以前两年左右已有所报导(Forsyth和Ryder, 1961),而最早对辉纹的观察或许应归属于Zappfe和Worden(1951),是他们两人应用光学显微镜、对疲劳断裂表面进行了发表最早的断口分析。但是,Zappfe未能领会关于辉纹形成模型的基本点,认

为辉纹是由于材料中亚结构的转变造成的。Forsyth 在 Cranfield 论文中肯定了一条辉纹相应于一次载荷反复。他用程序加载疲劳试样断口表面的显微照片来加以说明。但是他仍然坚持早期的观点,即在他所研究的析出强化的铝合金中,裂纹尖端前面将发生解理断裂,而辉纹的轮廓则是介于两裂纹之间的材料随后发生颈缩而形成的,见图4。这就意味着,辉纹的间距将主要地受质点之间距离的控制,而不取决于应力幅值和裂纹长度。一年以后, Laird 和 Smith (1962) 发表了他们对铝和镍所进行的高应变裂纹扩展的研究结果。他们描述了一个模型,包括交替进行的、在外加载荷拉伸阶段的钝化和压缩阶段的复锐,见图4。这就导致这样的结论:辉纹的峰颠是在压缩阶段形成的,与

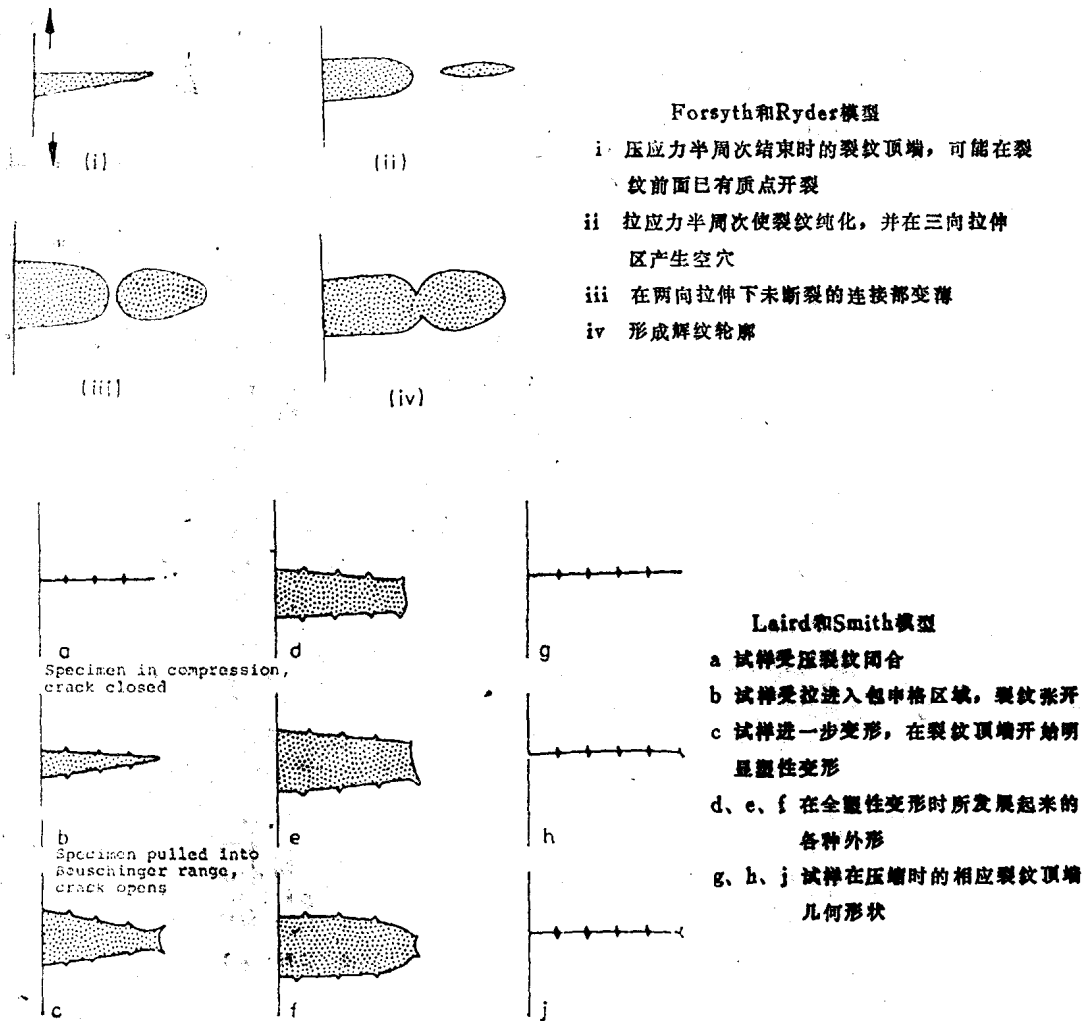


图4 辉纹形成的几种模型

Forsyth模型提出的辉纹的峰颠在拉伸阶段中形成恰好相反。在这两种模型中,表面所呈现的总的形状是相同的。以后几年中进行过一些争论。现在比较公认的是, Laird-

Smith模型对低强度材料较为合适；而Forsyth模型与对高强度材料的观察结果符合较好。在高强度材料中除了裂纹顶端的钝化和复锐以外，还可能发生某些解理。当讨论裂纹扩展规律的细节时，在数量方面的这场争论又重新展现。

在同一次会议上，Frost和Holden、Phillips合写的论文讨论了“对疲劳裂纹行为的某些试验研究”，其目的是想决定使一已知长度裂纹扩展所需要的临界交变应力，以及控制裂纹扩展速率的规律。这些试验是在厚度为7.6mm的板状试样中进行的，材料包括软钢、镍铬合金钢、铜和含4.5%铜的铝-铜合金等。最重要的发现是所谓“Frost规律”，它把长度为 a 、施加周次为 N 的裂纹扩展速率 da/dN 与交变应力 $\Delta\sigma$ 及裂纹长度 a 联系起来

$$da/dN = A\Delta\sigma^3 a$$

再者，为了使裂纹得以扩展，必须使 $\Delta\sigma^3 a \geq C$ ， C 是一个临界值，相当于现代习惯用语“门槛值”。上述这些发现是多年来大量、全面、艰苦研究的结果（如Frost 1959 (a), 1959 (b), 1960; Frost和Dugdale 1958）。这项成就起了很大作用，使我们对裂纹扩展力学的看法更为简炼易懂。特别是，Frost和Dugdale当时已注意到裂纹尖端塑性区的尺寸随裂纹长度成比例地增大。然而，在Cranfield会议上，来自波音公司的Donaldson和Anderson竭力倡导另一个更为通用的参数 ΔK ，即应力强度因子幅值。疲劳裂纹扩展的这种性质已是如此普遍和通用，因而对其历史起源值得进行比较细致的探究。

自由轮的脆性断裂

在第二次世界大战初期，同盟国船只的大量损失促使在美国提出一个卓越的技术革新计划，把已加工好的船体各部分采用全焊结构连接。这项计划的组织管理极为成功，以至后来船在造船厂船台上的停留时间短于一天！不幸的是，很多这种被称作“自由





图5 “自由轮”的脆性断裂

DIAGRAMMATIC ILLUSTRATION OF FRACTURES IN WELDED OR MAINLY WELDED SHIPS

DIAGRAM 'A'

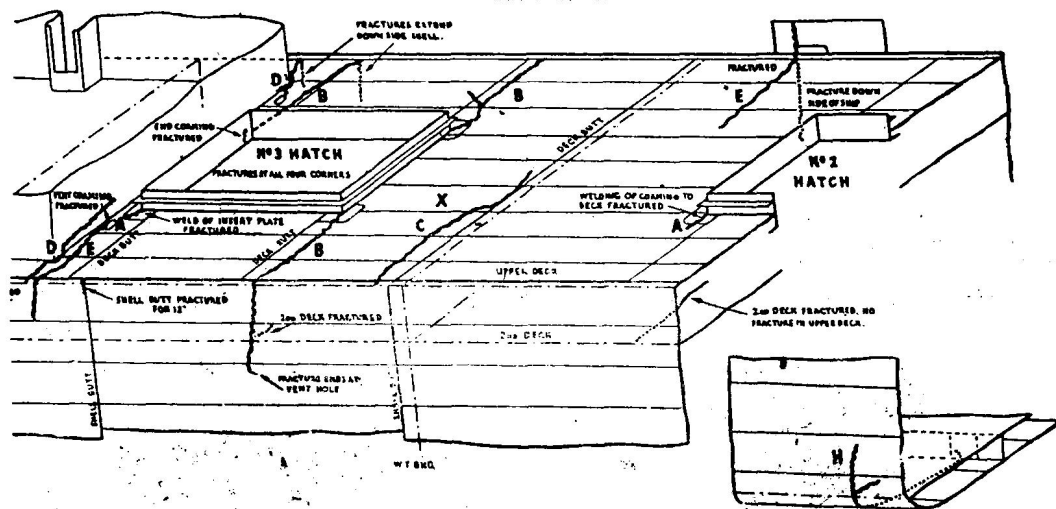


图6 船体结构中裂纹位置图

轮”的船只发生了严重的断裂问题，其中某些船只甚至停泊在静水中即断成两截，见图5和图6。以后证明这些问题是极为错综复杂的。详细的记录被保存下来，还进行了大量的冲击试验，召开过多次讨论会。其中一次典型的讨论会是在战争刚结束时在剑桥召开的（Anon, 1945），以讨论英国和美国的经验。这次会议过于强调冶金方面的问题，以至于关心力学方面问题的科学界巨星们（如Baker, Bragg, Orowan, Mott, Taylor等）感到沮丧。后来对船体断裂问题根源的认识可归纳为：设计中采用了不好的几何形状（如尖角等），在整个焊接结构中没有止裂装置，再加上低温的出现、低劣的材

质, 以及焊缝质量控制的疏忽等。至于说到断裂理论, 虽然发生了把几乎没有用处的冲击试验强加给工程界这类事, 但好多年来把最优秀人才集中于金属的裂纹问题, 其所带来的利益更为重大。

从 Inglis (1913) 提出围绕椭圆孔的应力集中理论, 可推导出求缺口根部最大应力的简单经典公式:

$$\sigma_{max} = \sigma \left(1 + 2\sqrt{\frac{D}{\rho}} \right)$$

这里 σ 是外加名义应力, D 是缺口深度, ρ 是根部曲率半径。对于预测较钝缺口处的应力水平, 已证明这个公式是非常有用的。然而, 当考虑裂纹时却遇到了困难, 因为当 $\rho \rightarrow 0$, 最大布局应力 $\sigma_{max} \rightarrow \infty$ 。对于塑性材料, 现在已很清楚, 这些高的应力值将受到材料屈服的限制。但不论是脆性材料, 还是塑性材料, 由实际观察得到的常识, 较大裂纹比较小裂纹总是更为危险的这件事, 却不能用应力集中理论来解释。

Griffith (1921, 1924) 迈出了重要的一步, 把注意力从裂纹顶端局部条件转移到推导一个总体的失稳准则。他的第一篇论文“固体中流动的破裂现象”从说明这项研究的起源和目标开始, 这使很多人都感到惊讶。

“发现表面处理——诸如锉平、磨削和抛光等——对承受交变和重复载荷的金属零件的强度有影响。”

结果, 这篇论文处理了承受单调载荷裂纹体的失稳断裂问题, 系统地阐述了断裂的热力学的必要条件, 即用来使裂纹扩展的弹性能一定要大于增加新的断裂表面所吸收的能量。第一篇论文虽然包含了对玻璃所进行试验的有趣记述, 但文章太长而且有点离题, 另外在应用 Inglis 早期应力分析中也有一个错误, 但无论如何, 这是一个重要的里程碑。第二篇论文 (Griffith, 1924) “破裂的理论”要简明得多, 推导了在一个均匀、双轴加载的板中, 使一个中心裂纹扩展所需的来自无穷远处均布应力的公式:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2ET}{\pi a}}$$

式中 E 是杨氏模量, a 是半裂纹的长度, T 是表面能。这个理论应用于拉伸和压缩两种应力场中的倾斜裂纹。在发展这个理论的过程中, Griffith 清楚地认识到, 在他的关于断裂的总体的必要条件上, 必须加上一个局部的充分条件——关于作用在垂直预期裂纹途径的拉应力的条件 (“应变能密度准则”的现代拥护者们请注意!)

以表面能作为裂纹顶端唯一的能量消耗, 使得 Griffith 的预测结果对塑性材料有相当大的误差。下面是他自己的结论:

“在塑性晶体的情况下, 我们进一步遇到下列事实的阻碍, 即晶体在破裂以前几乎不可避免地要进行塑性流变, 其本质仍然是热烈争论的课题。”

正是主要由于这个理由, 使Griffith奠定的理论被搁置近20年之久。直到脆性断裂的紧迫问题出现, 才促使对Griffith理论重新进行考察。

应力强度因子的由来

Sneddon (1946) 有权声称他第一次观察到下列事实：即使裂纹体的几何形状各不相同，靠近裂纹顶端的局部应力场在空间总是相似的。在裂纹顶端极坐标 (r, θ) 的基础上，他注意到，对于Griffith类型的裂纹，各组局部应力可写为：

$$\sigma_{xx} = \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \left(\frac{3}{4} \cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{5\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \left(\frac{5}{4} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} \cos \frac{5\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \sigma \left(\frac{a}{8r} \right)^{1/2} \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2}$$

对于均匀受载的硬币形式的裂纹也是如此。

“这种分析最显著的特点是，裂纹邻近区各应力成分的表达式与二维情况下的表达式只差一个数值因子。”（这个数值因子是 $2/\pi$ ）

他进一步认识到，塑性屈服范围相当小时，这些局部应力仍能适用：

“即使应力很小，在裂纹顶端也将发生塑性流变，从而使这个无限大的应力发生移动。事实上，这个问题没有纯粹的弹性解。然而，内压力（应力）不太大时，塑性流变的区域将比较小，对固体内离裂纹顶端一定距离处的应力分布没有什么影响。”

这篇论文继续计算了内部硬币状裂纹的Griffith准则。

事情就在这里搁置，直等到10来年以后，Irwin (1957, a, b) 和 Williams (1957) 又作出新的贡献。Irwin (1957, a) 将 Griffith 裂纹的局部裂纹顶端应力用下列典型形式来表示：

$$\sigma_{yy} = \left(\frac{EG}{\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{\sqrt{2Y}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

初等三角学可把这个角分布化为恰好是Sneddon关系式的形式，但是Irwin却能从中引出一一般性的结论：

“某些脆性拉伸开裂裂纹顶端附近的应力场，在广义的平面应力或平面应变的情况下，可以近似地用一组两参数的方程式来表示。在这些参数中，最重要的是强度因子。在平面应力下为 $(EG/\pi)^{1/2}$ ，这里G是使裂纹扩展的驱动力。”

在第二篇论文中 (Irwin, 1957, b)，把局部应力写成以下形式：

$$\sigma_i = K \frac{1}{\sqrt{2r}} f(\theta)$$

式中 $K = (2/\pi)(\sigma^2 a)^{1/2}$ 被认为是局部比例因子，对于一个硬币状裂纹则为应力强度因子。（注意：应力强度因子SIF的后一个定义相差 $\sqrt{\pi}$ 倍，即

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{Griffith裂纹})$$

$$K = \frac{2\sigma}{\pi} \sqrt{\pi a} \quad (\text{硬币状裂纹})$$