

本书获2010年美国“教材与学术作者协会最佳教材奖”

 Springer

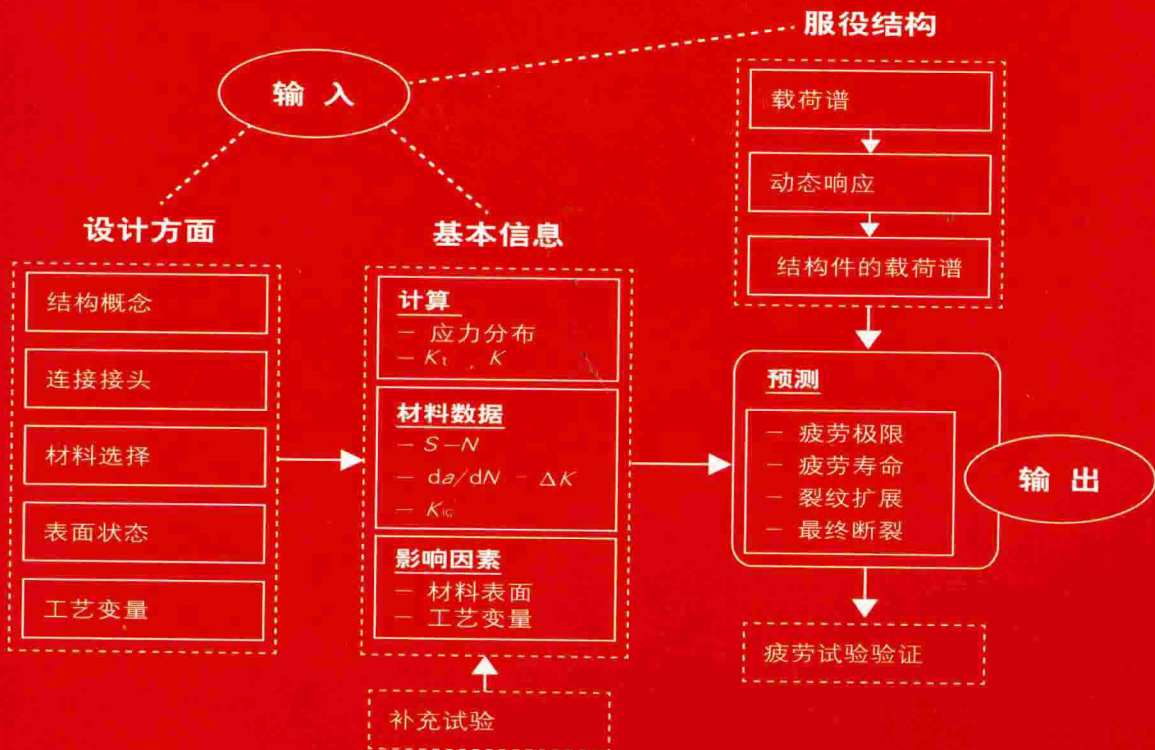
Fatigue of Structures and Materials

Second Edition

结构与材料的疲劳 (第2版)

(荷兰) 亚伯·斯海维 (Jaap Schijve) 著

吴学仁 等 译



航空工业出版社

结构与材料的疲劳

(第2版)

(荷兰) 亚伯·斯海维 (Jaap Schijve) 著
吴学仁 等 译

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书全面系统地论述了工程结构与材料的疲劳的基本概念、理论基础、分析方法、试验技术和工程应用。分6个部分介绍了恒幅载荷下的疲劳与裂纹扩展、载荷谱与变幅载荷下的疲劳与裂纹扩展、疲劳试验与分散性、特殊疲劳条件、连接接头与结构的疲劳,以及纤维—金属层板的疲劳抗力。并给出了习题和答案以及案例分析,对未来疲劳研究进行了展望。

本书可作为研究生教材,亦可作为本科生选修课教材,并可供航空航天、材料和机械等工程领域的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构与材料的疲劳:第2版/(荷)斯海维
(Schijve, J.)著;吴学仁等译. --北京:航空工业出版社,2014.1

书名原文:Fatigue of structures and materials

ISBN 978-7-5165-0403-1

I. ①结… II. ①斯… ②吴… III. ①工程结构—疲
劳—高等学校—教材②工程材料—疲劳—高等学校—教材
IV. ①TU3②TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第005768号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2010-4347

Translation from the English language edition: “Fatigue of Structures and Materials” by J. Schijve. Copyright© 2008 Springer, The Netherlands as a part of Springer Science + Business Media. All Rights Reserved.

结构与材料的疲劳(第2版)

Jiegou yu Cailiao de Pilao (Di 2 Ban)

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑路2号院 100012)

发行部电话:010-84936555 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2014年1月第1版

2014年1月第1次印刷

开本:710×1000 1/16

印张:37.5

字数:756千字

印数:1—3000

定价:180.00元

亚伯·斯海维的《结构与材料的疲劳》被授予 2010 年美国“教材与学术作者协会 最佳教材奖”消息

海德堡，2010 年 3 月 17 日

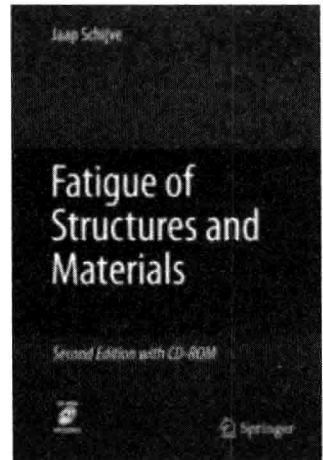
施普林格图书获“Texty”奖

由于其卓越的质量和展示，《结构与材料的疲劳》被授予该奖。

美国教材与学术作者协会（TAA）已经选中施普林格图书——亚伯·斯海维的《结构与材料的疲劳》为 2010 年 TAA 的“Texty”的“最佳教材奖”（Textbook Excellence Award）的获奖图书。该奖将于 2010 年 6 月 26 日在美国明尼苏达州的明尼阿波利斯召开的 TAA 大会上颁发。

目前为第 2 版的《结构与材料的疲劳》，主要是为从事与工程结构和材料的疲劳问题相关的设计、制造、载荷谱和试验验证人员编写的一本教科书。本书的第 1 版受到了读者的欢迎，并被广泛用于大学和工科院校，以及工业部门和研究机构的各种各样的课程。第 2 版附加了一张光盘，它是新一代学生们的宝贵工具。

教材与学术作者协会（TAA）是专门帮助教科书和学术作者的唯一非营利会员协会。TAA 的全部使命是，通过向它的作者会员提供教学和人际网络机会，提升教科书和其他学术材料的质量。



亚伯·斯海维简历

亚伯·斯海维 1927 年生于荷兰奥斯特堡。他和珍妮·利赛乌 (Janine Risseeuw) 结婚，他们有三个孩子。亚伯·斯海维获得了代尔夫特理工大学硕士和博士学位。1953—1973 年在位于阿姆斯特丹东北围圩的荷兰国家航空航天实验室 (NLR) 工作，他在 NLR 的最后职务是结构与材料部部长。

1973 年起，亚伯·斯海维担任代尔夫特理工大学飞机结构和材料专业的教授。在他的指导下，130 多名学生获得了硕士学位，17 名学生获得了博士学位。

他的主要研究方向是飞机材料和结构的疲劳与断裂、变幅载荷试验、模拟飞行试验、飞机结构和部件的全尺寸疲劳试验、疲劳裂纹扩展、事故调查、断口显微分析和无损检测。他与波德·伏格勒桑 (Boud Vogelesang) 和罗尔·马利森 (Roel Marissen) 一起，是一种新的纤维—金属层板 Arall 的发明人之一。这种新材料具有非常高的疲劳强度。后来由这种材料发展成为进一步优化的纤维—金属层板 Glare，现在被应用于飞机结构。

他在公开出版的期刊和国际组织的文集中发表了大约 150 篇研究论文，一些重要的文章在下面列出。他的《结构与材料的疲劳》一书被许多国家的各种课程所采用。2009 年，施普林格科学与商务媒体集团出版了这本书的第 2 版，第 2 版现在被译成了中文。

在斯海维教授的职业生涯中，他还为从业工程师和科学家开设了多个培训课程，并在多个国际课程中发挥了积极作用。他曾经担任国际航空疲劳委员会 (ICAF) 的秘书长。

由于在结构和材料的疲劳以及在服役结构疲劳的探索方面的基础性研究工作，斯海维教授曾多次获奖。

最近，代尔夫特理工大学和荷兰国家航空航天实验室设立了以他的名字命名的“亚伯·斯海维奖”，奖励航空疲劳领域的优秀青年研究人才。这个奖项已经在三届国际航空疲劳大会 (ICAF) 上颁发：2009 年在鹿特丹，2011 年在蒙特利尔，2013 年在耶路撒冷。

亚伯·斯海维教授的若干代表性出版物：

1. Fatigue predictions of welded joints and the effective notch stress concept. *Int. Journal of Fatigue*, Vol. 45 (2012), 31–38.

2. Fatigue of Structures and Materials. Textbook 2nd Edition with CD-Rom, Springer 2009 Dordrecht, The Netherlands. In 2010 this book received the “Textbook Excellence Award” of the American Text and Academic Authors Association. ①

3. Fatigue crack growth, physical understanding and practical application. Fatigue and Fracture of Engineering Structures and Materials, Vol. 32, 2009, pp. 867 – 871.

4. Fatigue of Structures and Materials in the 20th Century and the State of the Art. Int. Journal of Fatigue, Vol. 25 (2003), 679 – 702.

5. Mechanics and Theory of Fatigue Crack Growth under Variable-Amplitude Loading. Metals Handbook of the American Society of Metals, Vol. 19, Fatigue and Fracture, 1996, pp. 110 – 133.

① 《结构与材料的疲劳》一书第2版，带有光盘，2009年施普林格出版社，荷兰多德雷赫特。该书于2010年被美国教材与学术作者协会授予“最佳教材奖”。——原书注

原 版 序

结构和材料的疲劳涉及范围广泛的不同专题。本书的目的是解释这些专题，指出如何对它们进行分析，以及它们如何能够对抗疲劳结构的设计和服役中结构疲劳问题的防止做出贡献。

第1章是对疲劳问题的概述，对相关方面的重要性做了简单评论，对后续章节起着提纲挈领的作用。本书的核心问题是疲劳性能预测和抗疲劳设计，如果没有从物理和力学方面对所有相关条件的理解，这些目标是不可能实现的。第2章以讨论循环载荷作用下结构的材料中发生了什么这一基本概念为出发点，阐述了能够影响疲劳性能的许多因素，并为后续诸章提供了必要的背景知识。本书所描述的各专题主要分为以下几个部分分别讨论：

- ①疲劳性能和预测的基本知识（第2~第8章）；
- ②载荷谱与变幅载荷下的疲劳（第9~第11章）；
- ③疲劳试验和分散性（第12~第13章）；
- ④特殊疲劳条件（第14~第17章）；
- ⑤连接接头和结构的疲劳（第18~第20章）；
- ⑥纤维—金属层板（第21章）。

本书每章讨论一个专题，并在各章的最后一节简要重述本章要点。这个重述不是总结，只是指出了应该掌握的最重要的几点。尽管对于结构件的疲劳现象已经有了较好的定性理解，但是疲劳性能预测的定量准确度仍然有限。因此，很好地认识并理解所有的相关问题十分重要，这正是撰写本书的主要原因之一。有关材料中的疲劳机理，以及它如何受到多种实际条件影响的知识是极其重要的。动态载荷结构的设计者应该进行“抗疲劳设计”。这种设计不但包括与安全和经济有关的方面，还包括细节设计、材料表面质量和连接接头的相关问题。与此同时，设计者应该努力对结构的疲劳行为、疲劳极限、裂纹起始疲劳寿命，以及直到最终破坏的裂纹扩展剩余寿命做出预测。寿命预测需要掌握关于各种影响因素的渊博知识，同时疲劳性能的各种预测方法也存在着局限性和不足之处。

本书的第1版出版于2001年，被用于大学课程和面向工业界、大学、研究单位、政府机构，以及工业技术学校教师的多种培训课程。实践表明，本书无论是作为关于疲劳基本知识的教科书，还是在设计应用和研究计划方面，都受到了普遍欢迎。本版（第2版）的一个新的特色是提供了一个光盘。光盘的第I部分是

习题和各章小结，它对于学生和教师，以及自学者都会有所帮助；光盘的第Ⅱ部分是关于服役中的疲劳问题的若干有指导性的案例；第Ⅲ部分是抗疲劳设计和疲劳试验研究方面的内容；最后一部分是作者本人对未来可能研究的疲劳问题的思考。

在从事疲劳问题研究 40 年后，我终于有时间撰写本书的第 1 版，并于 2001 年出版。在 7 年后完成的现在这一版本中，所有的文字均已经过仔细审查和校正，但是基本信息仍然没有变化。然而“结构抗疲劳设计”这一章（第 1 版的第 19 章）已由全新撰写的文字所取代，在本版本中作为第 20 章。

与第 1 版的另一个不同之处是附加了一个光盘，它为读者提供了对光盘中材料的理解和练习的更多机会，并指导和激励在这个领域中新的研究工作。我相信，当前这一版本对于在结构和材料疲劳领域中的每个人，以及新一代学生都将有所帮助。

亚伯·斯海维
代尔夫特，2008 年 10 月

致 谢

我在位于阿姆斯特丹东北围圩的荷兰国家航空航天实验室（NLR）的结构与材料部工作了20年，其后又在代尔夫特理工大学航空航天工程系的结构和材料实验室工作了另一个20年，直到正式退休。在这两个实验室，许多人在富于激情的氛围中合作。与那些理解疲劳试验和微观观察精髓的同事们和技师们在一起进行研究，真是太好了。因为人数太多，我难以提到所有人的名字。但作为唯一的例外，我要感谢弗朗斯·奥斯特罗姆在显微镜和照相方面提供的不可缺少的帮助。与许多本科生和研究生在一起工作是非常令人兴奋的，他们是那么渴望对尚待解决的问题得到答案。我们共同应对各种挑战，同时保持着一种家庭成员般的关系。在我退休后这种工作气氛得到了继续，这要感谢我的继任者，首先是波德·伏格勒桑教授；后来是爱德·伏尔特教授，非常可惜的是他英年早逝；现在则是林兹·贝尼迪克兹教授。这三位都是我非常好的同事，我们总是乐于在一起讨论问题。许多人在一起的非正式头脑风暴常常是产生新想法和取得进展的妙方。

在本书第一版书稿的准备方面，我要感谢斯科特·法瓦兹博士的无私帮助，他在代尔夫特理工大学完成了博士论文。他阅读了书稿的每一章并且提出了许多改进和修正建议。英德霍温技术大学的汉斯·奥弗比克教授也给了我同样的帮助。我在代尔夫特理工大学的第一个学生哈里·冯·利普西格为我提供了非常重要的支持，他现在负责关于结构疲劳的各种职业培训课程。

对于本书的第2版，我要向雷内·奥尔德利斯顿博士（代尔夫特理工大学）和玛尔格泽塔·斯科罗帕教授（矿业和冶金大学，克拉科夫）表达我的感激之情，感谢他们对本书一些章节的有益建议。

本书的出版是作者和施普林格科学与商务媒体集团共同努力的结果。我非常感谢与纳塔莉·雅各布斯女士和安妮柯·珀特女士愉快而高效的 合作，她们对本书的及时付印予以关注；还有居朗达·卡兰达女士，她负责图文的排版工作并且对文字改进提出了建议。这真是帮了大忙。最后，如果不是珍妮——我多年的挚爱，这本书将不可能存在。除了她营造的环境使得我可以专心著书外，她对于我工作的评论和提出的问题是颇有意义的。

亚伯·斯海维
代尔夫特，2008年10月

中文版序

获悉我的教科书正在被译成中文，真是十分欣喜。这样就能为许多关心各种结构和材料的疲劳问题的中国科学家和工程师们提供帮助，特别是在航空航天领域。我的这本教科书的第1版和第2版已经在不同国家被许多课程所采用，尤其是用于疲劳和损伤容限分析。到目前为止，这本书的英文版已经销售了4000多本。我为第1版的准备投入了大量的工作。第2版也是如此，该版附加了一个光盘，包括习题、答案、各章要点、案例分析和若干专题讨论等内容。但当获知这本书到了那么多人的手中，我感到非常满足。随着中文版的发行，将有更多的人看到这本书。感谢中航出版传媒有限责任公司和施普林格科学与商务媒体集团为出版本书的中文版所做的努力。

同样令人高兴的是，这本书是由中国航空工业集团公司北京航空材料研究院的吴学仁教授和他的同事们翻译的。吴教授关于断裂力学权函数法的研究是国际公认的，吴-卡尔森的著作《权函数和应力强度因子解》已经被全世界许多学者大量应用于断裂力学和疲劳分析。我在1995年见到吴教授，当时他邀请我参观了他们的研究所，并且请我做了飞机结构和材料的疲劳的学术讲座，包括我的教科书第21章关于纤维—金属层板 Arall 和 Glare 的内容。后来他的博士生郭亚军在纤维—金属层板材料方面做了有意义的研究工作。另一个共同感兴趣的问题是关于航空航天高强度铝合金缺口试样疲劳小裂纹的起始和早期疲劳扩展，吴教授和美国国家航空航天局（NASA）的纽曼（Newman）博士合作，揭示了小裂纹现象的基本信息。近来，吴教授和他的助手们发表了数篇与多位置损伤问题有关的共线裂纹条带屈服模型的解。他的成就和知识使我相信，由吴教授和他的团队来翻译我的教科书令人放心。他启动了这本书的翻译，这本身就是一个很艰巨的任务，我对他非常感激。

另外一件发生在荷兰和中国之间的事属于完全不同的情况。1985年，在我们国家播出了一个关于中国文化和语言的电视课程。我的妻子珍妮和我们的儿子瓦特都密切关注了这个课程。瓦特还参加了到中国杭州市的为期三周的游览。在第一个星期天上午，他们来到一个漂亮的公园，以便和中国的年轻人一起练习汉语，

而中国的年轻人则到这个公园来练习英语。瓦特遇到了一个年轻姑娘，她的名字叫陈玲秋。他们现在是幸福的一对，生活在荷兰。但他们仍然经常利用假期访问中国，同时也去看看她的兄弟们，他们对中国的现代化发展十分惊叹。我们夫妇和他们一同去过一次中国。

向我所有的中国读者，特别是向吴教授，致以最美好的祝愿。

亚伯·斯海维

代尔夫特，2013年6月

Preface for the Chinese version

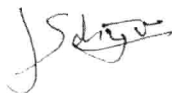
It is wonderful to realize that my textbook is being translated into the Chinese language. It then can assist a large community of scientists and engineers in China who are involved in various problems of fatigue of structures and materials, in particular the aerospace area. The first and the second edition of my textbook have been adopted in many courses, especially for fatigue and damage tolerance analysis, in different countries for educational purposes. By now over 4000 copies in the English language have been sold. For me it has been a lot of work to prepare the first edition, and again to prepare the second edition to which a CD is added with exercises, answers, summary of chapters, case histories and discussions on special topics. However, it is highly satisfying to know that the book comes in the hands of so many people. And with the Chinese translation it will reach many more people. I am grateful to both China Aviation Industry Press and Springer Science & Business Media for their effort to publish my book in Chinese.

It is also gratifying that the translation is performed by Professor Xueren Wu and his colleagues of AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials. Professor Wu's research on the weight function methods in fracture mechanics is internationally well recognized. The Wu-Carlsson book "Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions" has been used extensively for fracture mechanics and fatigue analyses by many researchers worldwide. I have met Professor Wu in 1995 when he invited me for a visit to his Institute and to present some lectures about aircraft structures and materials, including the fibre-metal-laminates Arall and Glare which are the subject of Chapter 21 of my textbook. Later his PhD student Yajun Guo has done interesting research on fibre-metal-laminates. Another topic of mutual interest was the initiation and early fatigue crack growth of small cracks in notched specimens of aerospace high-strength aluminium alloys. Professor Wu in co-operation with Dr. Newman at NASA, USA, has revealed basic information on these phenomena. More recently Professor Wu and his associates published a number of papers on the strip-yield model solutions of collinear cracks associated with multiple site damage conditions. His achievements and understanding support my perception that the translation by Professor Wu and his team is in good hands. I am most grateful to him that he started the translation of the book which in itself is a comprehensive task.

Another line of the Netherlands to China is associated with fully different circumstances. In 1985 a television course on the Chinese culture and language was presented in our country. My wife, Janine, and our son Warden followed the intensive course. Warden also participated in a 3-weeks excursion to the Chinese town Hangzhou. On the first Sunday morning the participants visited a nice park to meet young Chinese people to exercise the Chinese language. Young Chinese people came to the park to exercise the English language. Warden met a young lady, her name is Chen Lingqiu. They now are a happy couple, living in The Netherlands, but still visiting China in holiday times, also to see the families of her brothers and to be surprised by the modern developments in China. We made a trip together with them.

My best wishes go to all readers of my textbook, and specifically to Professor Wu.

Jaap Schijve,
Delft, June 2013



译者序

由荷兰代尔夫特理工大学航空航天工程系 (Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering) 亚伯·斯海维 (Jaap Schijve) 教授以英文撰写的教科书《结构与材料的疲劳》(*Fatigue of Structures and Materials*) 第1版于2001年出版, 第2版由施普林格 (Springer) 科学与商务媒体集团于2009年出版。该书从基本概念、理论与方法, 以及工程应用等各方面对结构和材料的疲劳做了系统深入的阐述, 总结了国际疲劳研究的主要成果, 被广泛用于各类教学和培训课程, 受到许多国家的大学、研究机构和工业界的欢迎, 被认为是本领域的经典之作。2010年该书 (第2版) 被美国教材与学术作者协会 (TAA) 授予“最佳教材奖” (Textbook Excellence Award)。

斯海维教授是一位在国际疲劳界享有盛誉的权威学者。他在荷兰国家航空航天实验室 (NLR) 和代尔夫特理工大学分别工作了20年, 曾任国际航空疲劳委员会 (ICAF) 秘书长。由于在结构和材料疲劳领域的基础性研究成果, 他曾多次获奖。2008年代尔夫特理工大学和荷兰国家航空航天实验室设立了以他的名字命名的“亚伯·斯海维奖” (Jaap Schijve Award), 奖励国际航空疲劳领域的优秀青年研究人才。该奖至今已在国际航空疲劳大会 ICAF 上颁发了三次。

1995年斯海维教授应邀访问北京航空材料研究院, 并做了关于飞机结构与材料疲劳的系列讲座。2009—2012年, 本书译者之一的吴学仁教授应上海交通大学的邀请, 为该校航空航天学院4届“大型民用飞机研究生专班”讲授“飞机材料与结构的疲劳与断裂”课程, 斯海维教授的这本英文教科书是该课程的基本教材。考虑到它在国际疲劳领域的权威性和业已产生的重要影响, 我们决定将该书第2版翻译出版, 介绍给国内读者。为此, 中航出版传媒有限责任公司 (航空工业出版社) 与施普林格科学与商务媒体集团签署了出版中文版的协议。

本书由中国航空工业集团公司北京航空材料研究院的科研人员翻译, 分别是: 黄新跃 (中文版序, 第6、第13章和部分光盘), 陈勃 (第9、第16、第18章), 李影 (第2、第17章和部分光盘), 于慧臣 (第3、第7章), 高玉魁 (第4、第14章)、钟斌 (第12、第15章), 吴学仁 (原版序, 引言, 第1、第2、第5、第8、第10、第11、第19、第20、第21章和部分光盘)。以上人员对各章译文相互进行了初校。全书译文由吴学仁校改定稿。

斯海维教授对中文版的翻译出版给予了热情支持和高度关注, 并特意为中文

版撰写了序言,译者在此谨向他致以衷心感谢。中航工业北京航空材料研究院的领导和同事们在各方面提供了大力支持,航空工业出版社和施普林格出版社在版权转让和出版方面给予了许多帮助,史晋蕾主任和安玉彦编辑为保证出版质量付出了辛勤劳动,特向他们深表感谢。

由于译者水平有限,译文错误在所难免,敬请读者批评指正。

译 者

中航工业北京航空材料研究院

2013年10月

译者说明:

①本书(第2版)附有一个光盘。为方便读者,中文版已包含光盘内容的译文,但没有包含光盘中的一篇综述性论文(Fatigue of Structures and Materials in the 20th Century and the State of the Art)。读者可以查阅国际期刊International Journal of Fatigue, 25 (2003), 679 - 702。

②对于该书英文版(第2版)中的一些印刷错误,中文版已经做了改正。

符号、缩略词和单位

符号

a	裂纹长度、半裂纹长度、非穿透裂纹深度
a_0	初始裂纹长度
a, b	椭圆的半轴
a_f	最终裂纹长度
c	表面裂纹的（半）裂纹长度
C	Paris 公式中的常数
D	直径 也用于：损伤参数
da/dN	裂纹扩展速率
dU/da	应变能释放率
E	弹性模量
G	剪切模量
k	Basquin 方程的斜率 或随机载荷的不规则参数
K	应力强度因子
$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$	
ΔK_{th}	ΔK 的门槛值（图 8-6）
K_{op}	S_{op} 对应的 K
$\Delta K_{eff} = K_{\max} - K_{op}$	
K_f	疲劳强度降低系数（疲劳缺口系数）
K_{IC}	断裂韧度
K_t	应力集中系数
l	从缺口边缘开始的裂纹长度
m	Paris 公式中的指数
M	弯矩
M_t	扭矩
n	循环次数

N	断裂前的疲劳寿命
P	载荷
$p(x)$	概率密度函数
$P(x)$	分布函数
r	缺口根部半径 也用于：极坐标
r_p	塑性区尺寸
R	应力比 = S_{\min}/S_{\max}
S	施加的名义应力 (毛应力)
S_1, S_2	双轴应力
S_a	应力幅 (值)
S_f	疲劳极限
S_{fl}	光滑试样的疲劳极限
S_{fk}	缺口试样的疲劳极限
S_m	平均应力
S_N	疲劳寿命 N 对应的疲劳强度
S_{op}	裂纹张开应力
S_{res}	残余应力
S_U	材料的拉伸强度
$S_{0.2}$	材料的屈服强度
$\Delta S = S_{\max} - S_{\min}$	
$\Delta S_{\text{eff}} = S_{\max} - S_{op}$	
t	厚度 也用于：时间
T	温度
u, v, w	x, y, z 方向的位移
W	宽度
β	$K = \beta S \sqrt{\pi a}$ 中的几何因子
γ	表面粗糙度缩减系数
ε	应变
θ	极坐标
λ	双轴应力比 (S_1/S_2)
ν	泊松比
ρ	缺口根 (端) 部半径

σ	材料中的局部应力
$\sigma_{\log N}$	$\log N$ 的标准差
σ_a	应力幅 (值)
σ_m	平均应力
σ_{nominal}	净截面名义应力
σ_{peak}	缺口峰值应力
σ_{res}	残余应力
τ	剪切应力
φ	椭圆的定位角 (参量角) (图 5-16)
ω	角频率, rad/s

缩略词

CA	恒幅
CCT	中心裂纹拉伸 (试样)
COD	裂纹张开位移
CT	紧凑拉伸 (试样)
M(T)	中心裂纹拉伸 (试样)
OL	过载
PD	电位降
VA	变幅
UL	负过载

单位和换算系数

1m (米) = 10^3 mm (毫米) = 10^6 μ m (微米)

1in = 25.4mm, 1mm = 0.04in

应力: 1MPa = 10^6 Pa (1Pa = $1\text{N}/\text{m}^2$)

1ksi = 6.90MPa, 1MPa = 0.145ksi

应力强度因子: 1MPa $\sqrt{\text{m}}$ = 0.910ksi $\sqrt{\text{in}}$, 1ksi $\sqrt{\text{in}}$ = 1.099MPa $\sqrt{\text{m}}$

1kc = 1000 周