



全国高技术重点图书·新材料领域

材料的疲劳

王中光 编著 李葆华 校

国防工业出版社

716321
S85

材料的疲劳

(美) S. Suresh 著
王中光等译 李家宝等校

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

材料的疲劳 / (美) 苏尔茨 (Suresh, S.) 著; 王光中译. —北京: 国防工业出版社, 1993

书名原文: Fatigue of Materials

ISBN 7-118-01168-1

- I. 材…
- II. ①苏… ②王…
- III. 材料-疲劳理论
- IV. TB301

FATIGUE OF MATERIALS

S. Suresh

Cambridge University Press 1991

材料的疲劳

(美) S. Suresh

王光中译 李家宝等校

责任编辑 杜豪年

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京市怀柔县王史山印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 印张 18⁵/₈ 插页 2 481 千字

1993 年 10 月第一版 1993 年 10 月第一次印刷 印数: 0 001—3000 册

ISBN 7-118-01168-1 / TB · 50 定价: 25.00 元

《全国高技术重点图书》 出版指导委员会

主任：朱丽兰

副主任：刘 杲 卢鸣谷

委员：(以姓氏笔划为序)

王大中	王为珍	王守武	牛田佳	卢鸣谷	叶培大
刘 仁	刘 杲	朱丽兰	孙宝贵	师昌绪	任新民
杨牧之	杨嘉墀	陈芳允	陈能宽	张钰珍	张敏祥
罗见龙	周炳铤	欧阳莲	赵忠贤	顾孝诚	谈德颜
龚 刚	梁祥丰				

总干事：罗见龙 梁祥丰

《全国高技术重点图书·新材料领域》 编审委员会

主任：师昌绪

委员：颜鸣皋 熊家炯 赵家祥 漆宗能 杜豪年

译者的话

本书译者之一的王中光教授 1989 年在美国宾夕法尼亚大学工作期间，经 Campbell Laird 教授的介绍，结识了本书的作者，当时在美国布朗大学工作的 Subra Suresh 教授，得知他正在写一本有关材料疲劳基本原理方面的专著。1991 年 7 月这本“材料的疲劳”刚一问世，作者就赠送王中光教授一册。读后觉得这本书在宏微观结合上写得相当有特色，国内正缺乏一本这样的专著，很有必要将其翻译出版，介绍给国内读者。在开始这一工作时，首先遇到的是版权问题，通过作者的努力，英国剑桥大学出版社同意将本书的中文翻译权转让给我们。其次是在国内出版的问题，经师昌绪教授的推荐，国防工业出版社欣然同意接受本书的出版工作。在本书的翻译过程中，作者又在每章之后增补了习题，并无偿寄给我们翻译。

本书的序以及第 1、2、7、8、9 和 14 章由王中光翻译，第 3 和 15 章由夏月波翻译，第 4 和 5 章由朱世杰翻译，第 6 和 11 章由于维成翻译，第 10 和 12 章由臧启山翻译，第 13 章由韩小华翻译，习题由孙正明翻译。第 10、11 和 13 章由王中光校对，序和其余各章由李家宝校对，最后由王中光审阅了全部译文，并由赵忠和王小蕙输入计算机磁盘。

由于译者水平有限，错误之处在所难免，敬希读者多加指正。

译者

译 序

早在 19 世纪中叶人们就发现金属存在疲劳断裂现象。从生产实践方面看，任何运动机械都难以避免疲劳的发生，因此，疲劳、磨损和腐蚀已成为材料当前三种最主要的破坏形式。虽然经过了 100 多年的研究，找出了材料产生疲劳损伤和发生断裂的一些规律，但距离问题的最终解决还有十万八千里。而且随着动力机械运转速度的不断提高与使用寿命的不断延长，这个问题变得愈来愈突出。所以尽管材料的疲劳是一门老学科，研究该问题的科技工作者仍然有增无减。他们一方面进一步研究材料的疲劳断裂规律，另一方面寻找提高疲劳寿命的有效途径。

我国政府和有关科技人员已认识到材料疲劳问题的重要性，国家计委于 1988 年在中国科学院金属研究所开始筹建以王中光教授为主任的“材料疲劳与断裂国家重点实验室”，它于 1991 年 5 月建成并通过了验收。这个实验室拥有国内最先进的配套设备，除了不同吨位的疲劳试验机外，还有先进的测试设备和单晶生长装置，为开展疲劳的基础性研究创造了条件。实验室人员配套，有优良的学风和强烈的进取心。他们为了使国内疲劳科学技术工作者对本学科的进展有一个系统的认识，在王中光教授的主持下，翻译了由美国 S. Suresh 教授撰写、英国剑桥大学出版社出版的“Fatigue of Materilas”一书。

本书内容丰富，有以下几个特点：(1) 对于包括金属、无机非金属、半晶和非晶各类材料以及复合材料在内的广泛材料体系的疲劳研究成果，特别是近 30 年来的进展，做了系统的总结和评述；(2) 在内容选择方面，着重对于材料疲劳的科学概念和基本机制作有连贯的分析，而不是仅仅对实验事实作简单的描述；

(3) 把力学原理与微观机制结合起来, 对不同材料体系的疲劳行为进行了综合的和统一的处理; (4) 尽最大可能把基本概念推广应用于说明构件中实际存在的疲劳问题; (5) 每章后面附有习题, 这有助于加深读者对内容的理解。因此, 对于我国从事材料疲劳工作的研究人员和工程技术人员, 本书无疑是一本极有价值的参考书, 而对于有关专业的研究生和大学生, 本书可以作为他们的教科书和课外参考书。

感谢本书作者 S. Suresh 教授和原出版社(Cambridge University Press)给予中国学者翻译与出版权; 感谢国防工业出版社的大力支持, 使本书能及时问世。

师 昌 绪

1992.8.6

中文版序

长期以来，中华人民共和国的科技人员在同材料疲劳的科学与应用有关的国际社会里起着重要的作用，我非常感谢中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室的同行们把我的《材料的疲劳》一书译成中文。通过有成效的研究，也通过对学生、设计人员、工程师和科学工作者在疲劳领域进行有关基本概念、基础知识和方法学方面的适当教育，工程界在实际应用中控制和阻止疲劳损伤和疲劳破坏的能力已大大增强。我衷心期望，本书的中文版将在材料疲劳的力学原理和微观机制方面，以及在这些概念的实际潜在应用方面，使大量的中国学生、工程师和学生获得系统的知识，受到一定的启迪。

我要感谢剑桥大学出版社(Cambridge University Press)允许将本书译成中文，我也要感谢中国国防工业出版社为本书中文版的出版所作出的努力。我要特别感谢王中光教授，由于他的兴趣、热情和辛勤工作才使本书得以译成中文，我还要感谢本书的其他译者，他们是李家宝副教授、于维成副教授、夏月波副教授、臧启山教授、朱世杰博士、韩小华博士和孙正明博士。我深信，他们在疲劳领域中的专业知识和工作经验会从根本上保证本书中文版的整体质量。

最后我要感谢中国科学院技术科学部主任、中国科学院金属研究所名誉所长、中国国家自然科学基金委员会前副主任师昌绪教授，他热情地为中文版写了序，将本书介绍给中国读者。

美国麻省理工学院(MIT)

材料科学与工程

S. Suresh

Richard P. Simmons教授

序

材料的疲劳指的是材料在循环载荷作用下所发生的性能变化。有关材料疲劳形变和断裂的研究可追溯到 19 世纪。长期以来，这方面的工作主要集中于探寻提高疲劳裂纹萌生抗力和疲劳破坏抗力的工程设计方法。但是在最近的几十年中，伴随着“材料科学”和“断裂力学”的发展，关于材料疲劳的研究已发展成为科学研究和应用研究中的一个主要领域，它涉及众多的学科，诸如材料科学（包括金属、陶瓷、高分子和复合材料各学科）、机械、土木、航空工程、生物力学、应用物理和应用数学。由于对先进材料的重视程度日益增长，疲劳研究的范围正加快步伐继续拓宽。

撰写这本书的目的在于提出材料循环形变和疲劳断裂的原理。为此书中把重点放在阐明科学概念和机制上。但由于许多工程应用领域都极其关注材料的疲劳问题，因此只要可能，就把基本概念向实际情况推广延伸。

在撰写的过程中，我力图实现下列目标：

(1) 尽可能用定量的语言对循环形变、疲劳裂纹萌生和扩展在力学、物理和微观机制上作完整的处理；

(2) 提供一个了解金属、非金属和复合材料疲劳行为的统一科学基础；

(3) 通过对各种处理疲劳问题方法的意义和局限性进行认真分析，对这些方法的前景作出合理的评价。

疲劳研究发展到今天，使得我们在交代本书要讨论哪些问题时可以不作任何说明。书中第一章将详细介绍整本书所包含的内容。对于其中的某些问题，为便于后面叙述，这里也提供了一些有关的背景材料。这本书可以做为对材料疲劳行为感兴趣的研究

人员的参考指南和研究生疲劳课程的教材，书中的有关章节也可用作机械工程、材料科学和其它相关领域中的高年级大学本科生和一年级研究生的导论性课程的教材，或者用作实习工程师的短期疲劳课程的教材。上材料力学行为课或断裂力学课的高年级大学本科生和研究生会发现，这本专著是他们的教科书的有用补充。

关于材料的疲劳已有大量资料发表，它们跨越一百多年的时间跨度，因此一本专著不可能覆盖这个学科的全部论题和结果。疲劳是一个存在大量经验性规律和矛盾观点的研究领域，这一事实使情况进一步复杂化。因此，为了使前面提到的撰写本书的目标能够均衡得到照顾，在挑选论题和参考资料时，我不得不依靠我自己的判断。我对于这一研究领域的认识是在过去 12 年中通过与许多美国和外国同事的合作、讨论和交往形成的；全书正文和参考文献目录中都引用了同事们的贡献。

在组织本书的各个章节时，我没有像许多材料科学专著的作者通常所做的那样，根据材料体系的成分或组织结构分类叙述。相反，对于类别广泛不同的材料，我提出对疲劳的统一处理方法，与此同时，指出组织结构在影响循环形变和疲劳断裂中的重要作用。前面几章主要针对延性纯金属和合金，讨论疲劳机制和与疲劳有关的力学问题。后面几章把这些概念推广到脆性固体（例如陶瓷和陶瓷复合材料），以及半晶体和非晶固体（例如高分子和有机复合材料）。

我感谢向我提供了资料和原始照片的许多同事，他们是 R.W. Hertzberg, H. Kobayashi, T.C. Lindley, T. Nicholas, T. Ogawa, C.M. Rimnac, R.O. Ritchie 和 M.T. Takemori。我也感谢 J.R. Brokenbrough, C. Laird, M. Miller, H. Mughrabi, P. Neumann, R.M.N. Pelloux 和 A.K. Vasudevan，他们阅读了各章的手稿，并提出了有帮助的意见。我要向 A.S. Argon 和 C.H. Shih 表示特别的谢意，前者对于基本概念的表述提供了有见识的建议，而后者热情地阅读了讨论断

裂力学的所有章节的手稿。

多年以来，我的疲劳研究工作一直得到美国能源部、国家基金委员会和海军研究机构的资助，我非常感谢它们的支持。我在布朗（Brown）大学工程分部固体力学与材料科学小组的同事和学生通过提供富有启发性的和友好的学术环境，对于我的研究工作做出了巨大贡献。

写这本书的计划是在 R.W. Cahn 的鼓励和支持下萌发的。在准备手稿的整个过程中，他的热情和对这一工作的兴趣给我提供了强大的动力。还应当特别提到剑桥大学出版社的 R. Bentley, S. Capelin 和 I. Pizzie，他们对手稿进行了有效的编辑，对我的询问和担心总能及时做出反应。T. Judd 在帮我准备图稿中，技术娴熟。

我要向我的妻子 Mary 表达我的深切感谢之情，感谢她在整个工作中的支持、献身和耐心。我们的小女儿 Nina 和 Meera 在我许多小时专心工作的间隙中与我作伴，使我可以获得令人开心的短暂休息。

最后，我愿意把这本书献给我母亲 Lakshmi 的六十岁生日。她为我的教育做出了无数牺牲，对此我衷心表示感谢。

S. Suresh

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究内容及其历史发展过程	1
1.2 疲劳设计方法	8
1.2.1 总寿命法	9
1.2.2 损伤容限法	9
1.2.3 不同方法的比较	11
1.3 机理性基础知识的重要性	11
1.4 连续介质力学	13
1.4.1 线弹性原理	15
1.4.2 应力不变量	17
1.4.3 塑性原理	18
1.5 延性单晶体的形变	23
习题	27
第 2 章 延性固体的循环形变	30
2.1 单晶体的循环应变硬化	31
2.2 单晶体循环硬化的不稳定性	36
2.3 单晶体的循环饱和	38
2.4 沿驻留滑移带的形变	41
2.5 驻留滑移带的位错结构	44
2.5.1 合金化效应和交滑移的影响	46
2.5.2 试验温度的影响	47
2.5.3 复合模型	48
2.6 驻留滑移带的形成	49
2.7 迷宫结构和胞结构的形成	55
2.8 晶体结构的影响	56

X II

2.8.1 体心立方晶体的位错结构	56
2.8.2 体心立方晶体在疲劳过程中的形状变化	58
2.9 小结: 单向形变与循环形变的比较	60
2.10 晶界效应	62
2.11 多晶体的循环硬化和软化	63
2.12 滑移特征效应和合金化的影响	67
2.13 沉淀效应	69
2.14 Bauschinger 效应	72
2.14.1 术语	72
2.14.2 机制	73
2.15 单轴疲劳和多轴疲劳的连续介质模型	76
2.15.1 并联亚单元模型	79
2.15.2 加工硬化模量场	81
2.15.3 循环塑性的双表面模型	86
2.15.4 其它方法	89
2.15.5 金属基复合材料的 Bauschinger 效应	90
2.16 循环蠕变(棘齿效应)	93
习题	96
第 3 章 延性固体的疲劳裂纹萌生	97
3.1 表面粗糙度和疲劳裂纹萌生	97
3.1.1 早期的观察和观点	98
3.1.2 近期的试验结果	100
3.2 空位偶极子模型	102
3.3 裂纹沿 PSB 萌生	109
3.4 表面在裂纹萌生中的作用	111
3.5 环境对裂纹萌生的影响	112
3.6 循环滑移的运动学不可逆性	113
3.7 裂纹沿晶界萌生	114
3.8 工业合金中的裂纹萌生	119
3.8.1 夹杂和气孔近旁的裂纹萌生	119

3.8.2 微观力学模型	123
3.9 环境对工业合金疲劳裂纹萌生的影响	124
习题	125
第4章 疲劳寿命的应力或应变唯象描述方法	128
4.1 应力—寿命法	129
4.2 平均应力对疲劳寿命的影响	132
4.3 累积损伤	134
4.4 表面处理的影响	135
4.5 应变—寿命法	138
习题	142
第5章 断裂力学原理及其在描述疲劳中的应用	144
5.1 Griffith 断裂理论	144
5.2 能量释放率和裂纹扩展驱动力	146
5.3 线弹性断裂力学	148
5.3.1 断裂的宏观表现方式	149
5.3.2 平面问题	150
5.3.3 K 控制的条件	158
5.3.4 断裂韧性	159
5.3.5 疲劳裂纹扩展的描述	159
5.4 G 和 σ 的等效性	160
5.5 单向加载的塑性区尺寸	161
5.5.1 Irwin 近似	161
5.5.2 Dugdale 模型	162
5.5.3 Barenblatt 模型	163
5.6 循环加载的塑性区尺寸	164
5.7 弹—塑性断裂力学	167
5.7.1 J 积分	167
5.7.2 Hutchinson—Rice—Rosengren(HRR)奇异场	168
5.7.3 裂纹顶端张开位移	169
5.7.4 J 控制的条件	170

5.7.5 疲劳裂纹扩展的描述	172
5.8 含微裂纹固体的 I 型场	175
5.9 复合型断裂力学	178
5.9.1 延性固体的 I—II 复合型断裂	179
5.9.2 微开裂固体的 I—II 复合型断裂	181
5.10 裂纹偏折	183
5.10.1 分叉弹性裂纹	184
5.10.2 由裂纹偏折引起的多轴断裂	187
5.10.3 分叉裂纹的塑性近顶端场	188
习题	191
第 6 章 延性固体疲劳裂纹的扩展	193
6.1 裂纹扩展的描述	194
6.1.1 断裂力学方法	194
6.1.2 疲劳寿命计算	196
6.2 疲劳裂纹扩展的微观阶段	197
6.2.1 第 I 阶段裂纹扩展	197
6.2.2 第 II 阶段裂纹扩展及疲劳辉纹	200
6.2.3 有关辉纹形成的模型	201
6.2.4 环境对第 II 阶段疲劳的影响	204
6.3 疲劳裂纹扩展的不同区段	204
6.4 疲劳裂纹的近门槛扩展	206
6.4.1 有关疲劳门槛现象的模型	208
6.4.2 微观组织结构尺寸的影响	210
6.4.3 滑移特征的影响	212
6.4.4 疲劳门槛值的测定	216
6.5 裂纹扩展的中间区	218
6.6 高扩展速率区	222
习题	223
第 7 章 恒幅疲劳裂纹扩展的阻滞	226
7.1 塑性诱发的裂纹闭合	227

7.1.1	机制	227
7.1.2	解析模型	233
7.1.3	数值模型	237
7.1.4	载荷比对疲劳门槛值的影响	239
7.2	氧化物诱发的裂纹闭合	241
7.2.1	机制	242
7.2.2	环境效应的本质	243
7.3	裂纹面粗糙诱发的裂纹闭合	246
7.3.1	机制	247
7.3.2	疲劳门槛的显微组织效应的实质	248
7.4	粘滞性流体诱发的裂纹闭合	250
7.4.1	机制	251
7.4.2	对裂纹扩展的影响	251
7.5	相变诱发的裂纹闭合	253
7.6	疲劳裂纹闭合的基本特征	255
7.7	裂纹闭合的定量化处理问题	256
7.8	疲劳裂纹的偏折	258
7.8.1	线弹性分析	258
7.8.2	预测结果和实验观察	262
7.9	其它阻滞机制	265
7.9.1	复合材料中的裂纹桥接	266
7.9.2	裂纹顶端屏蔽	271
7.10	先进金属体系中的裂纹扩展阻滞	272
	习题	274
第 8 章	应力集中部位的疲劳裂纹萌生和扩展	277
8.1	应力—寿命法	277
8.2	局部应变法	278
8.3	缺口疲劳的断裂力学分析	281
8.3.1	裂纹形核门槛	283
8.3.2	缺口部位的裂纹扩展	283

8.4	不扩展的拉伸疲劳裂纹	286
8.5	循环压缩中的裂纹萌生	287
8.5.1	机制	288
8.5.2	应力状态的影响	291
8.5.3	第一周循环的作用	293
	习题	295
第 9 章	疲劳小裂纹	297
9.1	小裂纹的定义	299
9.2	相似性	300
9.3	显微组织对小裂纹扩展的影响	300
9.4	小裂纹的门槛条件	302
9.4.1	过渡裂纹尺寸	302
9.4.2	循环塑性区的临界尺寸	305
9.4.3	滑移带模型	305
9.5	小裂纹扩展的连续介质力学方法	308
9.5.1	小裂纹的近顶端场	308
9.5.2	近顶端塑性	309
9.5.3	缺口根部塑性	310
9.6	疲劳裂纹的物理微小性效应	313
9.6.1	力学效应	313
9.6.2	环境效应	315
9.7	“短裂纹问题”的起源	317
	习题	319
第 10 章	变幅疲劳	321
10.1	变幅谱载荷	321
10.2	累积损伤概念	323
10.3	拉伸超载的阻滞效应	324
10.3.1	塑性诱发的裂纹闭合	326
10.3.2	裂纹顶端钝化	327
10.3.3	残余压应力	327