

MECHANICS OF FATIGUE

疲劳力学

■ 许金泉 著



科学出版社

疲劳力学

Mechanics of Fatigue

许金泉 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍一种全新的疲劳理论体系。传统的疲劳理论一般只是一些试验经验的总结,或是与试验数据库的类比。当实际应力状态与试验条件差别较大时,寿命估算往往无法进行。新理论体系则提供了一个完整的疲劳力学理论框架。在少量的材料疲劳特性确定之后,可对任意应力状态的疲劳准则、寿命进行统一的评价。疲劳的种类很多,机理各不相同。新理论体系依据各种疲劳损伤演化的支配性机理及其耦合演化关系,建立相应的损伤演化律,从而导出具有一定理论依据的寿命评价公式。新理论不仅可以统一单轴疲劳的寿命评价方法,明确材料的疲劳特性常数等,而且还可以导出疲劳等效应力等新概念,非常方便地处理多种疲劳载荷混合作用的问题。书中详细介绍金属材料的普通疲劳、应变疲劳、静态疲劳、腐蚀疲劳以及蠕变疲劳中的寿命评价公式的导出过程及其应用,也简单介绍新理论在具有应力集中或奇异点的疲劳以及界面疲劳中的应用。

本书可供力学、机械、材料、土木类专业的研究生以及相关工程技术人员参考,也可作为相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

疲劳力学/许金泉著. —北京:科学出版社,2017.6

ISBN 978-7-03-052936-7

I. ①疲… II. ①许… III. ①疲劳力学 IV. ①O346.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第116091号

责任编辑:赵敬伟/责任校对:彭涛

责任印制:张伟/封面设计:耕者工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎影印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:25 3/4

字数:502 000

定价:158.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

万物皆有缺陷，亦皆会自行产生缺陷。缺陷生灭不息，有累积之势。其势有强弱，故万物之数各异。观其象，察其理，形其势，知其数，道其存焉。数相违，势必伪，理必悖，象必妄，故贵在知数。

前 言

疲劳是工程中最常见的失效形式，也是一个较为古老的学科，但迄今尚没有一个具有普适性的理论体系。无论从应用还是理论的角度看，从试验经验升华为科学理论，已是疲劳研究所面临的最迫切任务。因为问题相对古老并且非常困难，关于疲劳理论的研究既不太容易吸引关注，也难以获得同行的共识。但其科学价值及其对人类社会技术进步的意义，却是毋庸置疑的，因此更需要有淡泊名利的科研工作者，来进行艰苦的科学摸索。

疲劳理论必须包含两个方面的内容，一是发生疲劳的条件（即疲劳准则），二是疲劳寿命的评价方法。从理论要求的角度看，关于疲劳的准则及评价方法中，应只包含材料疲劳性能常数以及所选定的评价参数。疲劳性能作为一种材料特性，不会随着材料几何形态和受力状态而改变。这是材料强度学理论的基本要求。针对特殊工况总结得出的经验方法，是做不到这一点的（但可为建立相关理论提供必须的试验基础）。疲劳理论的作用，就如同强度和断裂理论一样，一旦材料的疲劳性能被确定，则对于任意形状构件和应力状态，无需另行试验去建立专用的经验规律，就可以进行可靠的疲劳寿命及强度评价。

建立疲劳的力学理论是必要的。因为经验方法的局限性不但会导致试验成本和时间的损失，而且也难以应对实际应用中千变万化的应力状态；即使有了庞大的疲劳数据库，也仍难以满足实际应用的需要。试验数据一般以单轴试验为主，但即使是针对单轴应力状态，要通过试验来把握所有循环比或平均应力下的疲劳寿命，也是非常困难的。至于对多种疲劳载荷并存时的疲劳评价，仅靠试验是一项近乎不可能的工作。而应用中往往发生多种疲劳载荷并存的情况，其应力状态更为复杂，经验方法的局限性将更为明显。正是这种局限性，使得一些可靠性要求较高的构件，只能进行实体疲劳试验。但实体疲劳试验的载荷施加方式总会受到实验室条件的限制，仍会与实际工况有较大差别，因而仍会留下安全隐患。

建立疲劳理论是困难的，这是因为疲劳的机理还不十分清楚的缘故。机理性研究本来是建立理论的基础，但近几十年来已因偏离其本来目的而被庸俗化，乃至于谈及疲劳机理，就有空泛而不知所云的感觉。疲劳理论离不开疲劳机理。反过来，不能用来建立理论的所谓机理，也并不是科学的机理。目前并不缺少各类对疲劳机理的解释，但都不足以支撑理论的建立，甚至连材料的疲劳特性需要哪些参数来描述，也还并不清楚。

建立疲劳的力学理论是可能的。虽然疲劳试验数据会存在较大的离散性，但这

并不意味着不存在疲劳的客观规律。疲劳试验数据的离散性是必然的，这是因为试件的原始损伤或缺陷状态，即使取自同一材料，也不可能完全相同，而具有一定的分布范围的缘故。换句话说，疲劳本身是一个确定性事件，这个确定性事件有其本身的客观规律，但会受初始损伤的离散或概率分布（以及载荷的随机性）的影响而呈现一定的不确定性。客观规律是可以被表征的，问题只是如何正确地去表征。

作者自 1986 年在东京大学北川英夫、结城良治两教授指导下，开始疲劳研究工作以来，前 20 多年基本没有取得令自己和师长满意的结果，直到最近，疲劳问题终于“疲劳”了，才成功地将各类疲劳问题串了起来。本书是作者对建立疲劳力学理论的一种尝试，基本上以作者自己课题组的研究成果为主，因此纰漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。本书也是作者在上海交通大学开设的博士生课程讲稿的基础上成稿的，随着研究进展而不断补充，讲稿已使用多届。研究过程中承蒙日本长冈技术科学大学武藤睦治教授和九州大学村上敬宜教授的大力帮助，特在此表示感谢。

作 者

2016 年秋于上海交通大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 疲劳的概念和历史	1
1.2 疲劳研究现状及问题点	7
1.3 静力覆盖方法	11
1.4 常用的提高材料疲劳性能的方法	12
1.4.1 增长初始疲劳裂纹萌生寿命的方法	13
1.4.2 增长疲劳裂纹扩展寿命的方法	14
1.4.3 过载屈服	14
1.4.4 减小交变应力中的平均应力水平	15
1.5 几个工程实际中常见的疲劳问题	15
1.6 疲劳力学理论的基本观点及假设	15
1.7 本书的构成	16
思考题	17
第 2 章 疲劳的基本概念和基础知识	18
2.1 失效、破坏与疲劳	18
2.2 疲劳的分类	21
2.3 疲劳过程中的微观组织结构及性能的变化	23
2.4 交变载荷	24
2.4.1 基态交变载荷	25
2.4.2 混合态交变载荷	25
2.5 机械疲劳的基本力学参数	27
2.5.1 应力疲劳的基本参数	27
2.5.2 应变疲劳的力学参数	30
2.5.3 静态疲劳的力学参数	31
2.6 环境疲劳的环境参数	32
2.7 处理疲劳问题的力学方法	32
2.7.1 材料力学方法	33
2.7.2 断裂力学方法	37
2.7.3 损伤力学方法	44

2.8	材料内部的微观缺陷与损伤	52
2.9	初始损伤和临界损伤	53
2.10	特征长度的概念	55
2.11	黏弹性材料循环响应的滞后特性	57
2.12	本章小结	58
	思考题	58
第 3 章	应力疲劳的机理和一般性理论	60
3.1	应力疲劳机理的传统解释	60
3.2	疲劳裂纹的萌生机制和条件	63
3.3	原子的热扰动运动	65
3.4	基于热扰动运动的应力疲劳机理	67
3.5	体积疲劳损伤变量	69
3.6	应力疲劳的损伤演化律	70
3.6.1	损伤演化律的一般形式	70
3.6.2	存在疲劳极限的机理性依据	74
3.6.3	静态平衡位置 (平均应力) 的作用	75
3.6.4	损伤演化的无量纲参数	76
3.7	应力疲劳理论	76
3.8	疲劳准则	80
3.9	寿命计算方法	81
3.10	动静角与状态参数	83
3.11	疲劳试验数据离散的必然性	85
3.12	关于超长寿命疲劳的疲劳机理	86
3.13	本章小结	87
	思考题	87
	附录 复杂应力状态下公周期内最大主应力计算程序	88
第 4 章	单轴应力疲劳理论	92
4.1	基态交变应力下的损伤演化	92
4.2	基态交变应力下的理论 S-N 曲线	94
4.3	S-N 曲线中的材料常数和状态参数	95
4.3.1	损伤状态参数对 S-N 曲线形状的影响	95
4.3.2	疲劳特性常数 β, γ 对 S-N 曲线形状的影响	97
4.3.3	疲劳极限的作用	98
4.3.4	寿命比例系数对 S-N 曲线的影响	99
4.4	固定平均应力下的 S-N 曲线	99

4.5	固定循环比下 S-N 曲线	102
4.6	寿命周期内疲劳损伤的试验验证	108
4.7	寿命比例系数与循环比的试验关系	111
4.8	疲劳极限与平均应力的关系	114
4.9	等寿命疲劳强度曲线	118
4.10	寿命比例系数与平均应力的关系	119
4.11	单轴疲劳理论的统一形式	120
4.11.1	等效对称循环应力幅	120
4.11.2	等效对称循环寿命	121
4.11.3	寿命统一评价公式	121
4.11.4	试验验证	121
4.12	材料的疲劳特性常数	123
4.13	疲劳损伤累加规律	125
4.14	混合态交变应力作用下的单轴疲劳理论	127
4.15	压缩平均应力下的单轴疲劳	129
4.16	本章小结	133
	思考题	134
附录 4.1	$I(\sigma_a)$ 数据	134
附录 4.2	S-N 曲线试验数据拟合程序	137
附录 4.3	S-N 曲线生成程序	140
附录 4.4	混合态单轴疲劳寿命计算程序	144
第 5 章	多轴应力疲劳理论	149
5.1	多轴疲劳问题的传统处理方法	149
5.1.1	主应力振幅法	149
5.1.2	最大 Von-Mises 应力法	149
5.1.3	临界面法	150
5.2	多轴应力疲劳基本公式	151
5.2.1	多轴疲劳准则	152
5.2.2	寿命计算公式	153
5.3	比例加载多轴疲劳 (同频同相)	154
5.3.1	无静态应力的情况	154
5.3.2	有比例静态应力的情况	160
5.3.3	有任意静态应力的情况	162
5.4	异相多轴疲劳 (同频异相)	166
5.5	异频多轴疲劳	171

5.6	任意多轴疲劳计算例	172
5.7	关于结构中损伤演化的数值模拟	173
5.8	本章小结	173
	思考题	174
	附录 任意多轴疲劳寿命计算程序	174
第 6 章	静态疲劳理论	181
6.1	蠕变破坏及其传统寿命评价方法	181
6.2	静态疲劳的特征和机理	185
6.2.1	静态疲劳的特征与传统处理方法	185
6.2.2	静态疲劳的损伤演化机理	188
6.3	单轴静态疲劳理论	188
6.4	静态疲劳试验的加速方法	195
6.5	静态疲劳试验的注意点	196
6.6	多轴静态疲劳	197
6.6.1	Von-Mises 应力法	199
6.6.2	最大主应力法	199
6.6.3	静态等效平均应力法	200
6.6.4	应变能等效应力法	201
6.7	静态与循环的复合疲劳	202
6.8	本章小结	203
	思考题	204
	附录 静态疲劳数值积分程序	205
第 7 章	具有应力集中或奇异点的应力疲劳问题	208
7.1	实用工程方法	208
7.2	疲劳特征长度	209
7.3	疲劳裂纹的萌生方向和萌生寿命	213
7.4	具有微小缺陷材料的疲劳极限	216
7.5	宏观裂纹裂尖的循环应力	219
7.6	疲劳裂纹稳态扩展曲线	220
7.6.1	裂尖多轴疲劳寿命与扩展速率	220
7.6.2	韧性材料的稳态扩展曲线	223
7.6.3	脆性材料的稳态扩展曲线	224
7.7	小、微裂纹的疲劳扩展	227
7.8	微动疲劳和微动磨损	228
7.8.1	滑移界面端奇异场	229

7.8.2 微动疲劳的破坏路径和寿命	231
7.8.3 微动疲劳准则	233
7.8.4 微动磨损	234
7.9 面压疲劳	237
7.10 本章小结	241
思考题	241
附录 7.1 脆性材料裂纹扩展速率 (对称循环) 曲线生成程序	242
附录 7.2 韧性材料裂纹扩展速率曲线生成及调整程序	249
第 8 章 界面疲劳	254
8.1 界面的组织结构和界面模型	254
8.2 界面的受力特点	256
8.3 界面的静态破坏准则	260
8.3.1 界面裂纹沿界面破坏的准则	260
8.3.2 完好界面的破坏准则	264
8.3.3 界面法向应力为压应力时的失效准则	267
8.4 界面疲劳寿命评价方法	267
8.4.1 界面疲劳机理	268
8.4.2 界面裂纹疲劳扩展经验规律	269
8.4.3 界面起裂寿命评价	271
8.4.4 界面疲劳的评价参数	275
8.5 界面疲劳的 S-N 曲线	276
8.6 界面裂纹的多轴疲劳扩展	277
8.6.1 宏观界面裂纹的扩展	277
8.6.2 界面短裂纹的扩展	279
8.6.3 界面裂纹的疲劳特征长度	280
8.7 本章小结	281
思考题	282
第 9 章 应变疲劳理论	283
9.1 应变疲劳的破坏形式	283
9.2 材料的塑性和循环塑性变形特性	284
9.3 应变疲劳的损伤累积机理	293
9.4 单轴应变疲劳	296
9.4.1 试验规律	296
9.4.2 疲劳损伤及其演化	297
9.4.3 ϵ - N 曲线的数学表达式	299

9.4.4	应变疲劳的临界损伤	301
9.4.5	单轴对称应变疲劳寿命试验例	302
9.4.6	单轴非对称应变疲劳的寿命评价方法	304
9.5	应变疲劳的材料特性常数	305
9.6	多轴应变疲劳的损伤累积与寿命评价方法	305
9.6.1	基于流动应力的损伤演化和寿命评价	305
9.6.2	关于等效应变幅和应变范围的考察	307
9.7	拉剪对称比例应变疲劳	308
9.8	J 积分范围在裂纹扩展问题中的应用	309
9.9	本章小结	311
	思考题	311
	附录 单轴应变疲劳寿命计算程序	312
第 10 章	应力腐蚀和腐蚀疲劳	316
10.1	腐蚀反应的驱动力和损伤演化	316
10.2	自然腐蚀	319
10.3	应力腐蚀	320
10.4	多轴应力腐蚀极限准则	325
10.5	裂纹的腐蚀开裂扩展速率	326
10.6	腐蚀疲劳	330
10.6.1	对称腐蚀疲劳	331
10.6.2	低循环应力幅下的腐蚀疲劳	333
10.6.3	非对称腐蚀疲劳	334
10.6.4	腐蚀疲劳极限	336
10.6.5	载荷频率的影响	337
10.7	腐蚀疲劳的裂纹扩展	338
10.7.1	腐蚀疲劳裂纹扩展的总体特征	338
10.7.2	关于腐蚀疲劳裂纹扩展门槛值	340
10.7.3	裂纹扩展速率曲线与寿命曲线的关系	341
10.8	本章小结	342
	思考题	343
	附录 腐蚀疲劳寿命计算程序	343
第 11 章	蠕变疲劳理论	347
11.1	蠕变变形及其本构关系	347
11.1.1	稳态蠕变本构关系的分段唯象表示	347
11.1.2	迁移蠕变本构关系	350

11.1.3 黏弹性材料的循环变形特性	351
11.2 黏弹性断裂力学方法	352
11.3 蠕变疲劳寿命的经验评价方法	355
11.4 稳态蠕变的损伤模型和寿命评价方法	357
11.4.1 几何损伤及其演化律	357
11.4.2 静态疲劳损伤	358
11.4.3 耦合损伤演化的寿命计算方法	359
11.4.4 试验验证	360
11.5 具有应力奇异点的蠕变疲劳	365
11.6 多轴蠕变疲劳的临界平面法	372
11.7 蠕变疲劳损伤演化律	373
11.7.1 损伤演化律	373
11.7.2 蠕变疲劳的临界损伤	374
11.7.3 对称循环蠕变疲劳	375
11.7.4 非对称应变控制循环	376
11.7.5 非对称应力控制循环	377
11.7.6 具有最大应力保持时间的循环应力疲劳	381
11.7.7 极低频疲劳	381
11.8 蠕变疲劳中的耦合损伤累积	382
11.9 关于多轴蠕变疲劳寿命评价参数的考察	383
11.10 本章小结	384
思考题	384
附录 11.1 蠕变破坏寿命计算程序	385
附录 11.2 蠕变疲劳寿命计算程序	387
参考文献	391

第1章 绪 论

工程结构的寿命及安全性评价是不可或缺的。很少有结构一经受载就失效的,其安全性问题实际上主要是寿命及剩余强度的问题。虽然相关研究已如汗牛充栋,但至今却仍没有一个具有一定普适性的疲劳理论,不同的人按各自的方法进行评价,结果往往难以相互比较,也难以判断其真实性,因此实际应用中除了试验经验外还没有其他可靠的方法。本章对相关研究现状、问题点及工程处理方法作简单介绍,目的在于提供一些关于疲劳的感性认识基础,从而便于理解建立疲劳理论的必要性和重要性,并引入一些基于材料强度学理论要求的基本假定和观点,为后续研究提供立足点。

1.1 疲劳的概念和历史

金属材料的疲劳现象,早在 19 世纪初期即被发现^[1]。经过第一次工业革命,人们发现汽轮机主轴等构件,会在应力水平远低于材料强度的情况下,经过一定的工作时间(承受循环载荷)后发生断裂。这一现象被形象地称为疲劳(fatigue)。随后人们发现,大多数材料在承受外部循环载荷作用时,都会有疲劳现象。在实际应用中,工程结构的破坏,80%以上都是由疲劳引起的^[2-4],以至于一旦发生事故,总会使人们联想到材料的疲劳。这使得疲劳问题已成为了保障工程结构安全和寿命的关键。现实中往往将结构失效的原因归结为疲劳后,就谁也不用对事故负责。这反过来说明了对于疲劳问题,实际上还处于谁也说不清楚的状态。另一方面,工程应用对疲劳寿命评价的要求却是越来越多样和迫切,疲劳的概念也是处于不断的发展之中的。从现象上看,材料受外部载荷(不一定需要限定为循环载荷)作用时,不是马上,而是经过一段正常工作时间后才发生破坏的现象,都可称为疲劳。这里所谓的一段时间,称为疲劳寿命(fatigue life),是指有较长的时间经历的,而不包括像韧性断裂那样在最终断裂发生前的非常短时的耗时(短耗时的破坏一般作瞬时破坏处理)。因此,关于疲劳的研究,虽然古老并且众多,却还是远远滞后于工程实际需求的。

人们一直试图从材料微观结构的变化来理解疲劳的本质,位错(局部塑性变形)、空洞、微裂纹等微观缺陷的发展被认为是引起疲劳的内在原因。但微观缺陷为什么会发展,则一直众说纷纭。20 世纪末损伤力学的出现^[5],为人们提供了一种从唯象角度看待材料微观缺陷发展变化的方法,即将各类微观缺陷对疲劳强度

或寿命的综合影响,用一个高度抽象化了的损伤变量来表征,而无需纠结于究竟是何种缺陷以及其大小如何。从损伤力学的角度看,损伤在外部载荷作用下发生渐变(损伤累积与演化)的过程,就是疲劳过程,而疲劳断裂则发生在损伤发展增大到某个临界值时。目前损伤力学已成为人们认识和了解疲劳现象的主要途径。但是,损伤力学并没有解决疲劳机理的问题,即损伤为什么会累积、演化,以及按什么样的客观规律进行演化的问题,而只是提供了一种唯象分析方法。

疲劳是自然界、工程界中普遍存在的现象。严格地说,没有任何一种材料,即使其不受外力的作用,其寿命会是真正无穷大的(有风化等作用)。但是,在实际应用中,如果其寿命足够长,长得超过我们的预期或足以满足使用要求,则我们就可以认为其寿命是“无穷”的,不再有疲劳问题。当然,这实际上是一种忽略了极其缓慢的疲劳损伤累积的做法。但无论是科学研究还是实际应用,抓住主要因素忽略次要因素,都是必须的。因此,在早期的疲劳研究中,人们主要关心如何才能使得结构材料具有足够长的寿命方面。人们发现,当循环应力幅小于某一极限值时,寿命就足够长,工程应用中足可以认为是“无穷”。该极限应力幅就被称为疲劳强度(fatigue strength)或疲劳极限(fatigue limit)。与材料强度是材料承受外部静载荷的能力一样,疲劳强度被认为是材料承受周期性载荷的能力。只要将应力幅控制在疲劳极限以下,就可认为不会发生疲劳问题。随着工业技术的发展,人们逐渐认识到,构件只需具有一定的寿命,保证在使用期间内安全就可以了,而不必一定要将应力幅限制在疲劳极限以下。这种设计理念,称为有限寿命设计,在航空航天乃至汽车工程等领域,是不可或缺的技术,因为它不仅关乎成本,而且关乎结构重量,直接关系到机械结构的能耗或关键功能。关于疲劳寿命的研究(应力幅在疲劳极限之上)也得到了迅速的发展,并出现了所谓的“等寿命设计方法”(即各部件基本上具有相同的寿命)等新的设计理念。随着材料科学的发展,人们还发现,不仅周期性变化的载荷会引发疲劳,固定载荷也会引发某些材料(如陶瓷、光纤等)的疲劳,即在承载一段时间后发生破坏^[6-8]。值得指出的是,材料疲劳极限的概念,是与我们对“无限寿命”的理解以及对 S-N 曲线的数学描述密切相关的一个概念(后面还会讲到,它也是一个与我们对疲劳问题的认识和处理方法相关的状态参数)。金属材料一般以能经受 10^7 个循环,就认为其寿命足够长,所以常以 10^7 个循环数后未破坏的疲劳应力幅作为疲劳极限或疲劳强度(但实际上具体经历多少个循环数并不是问题的关键,重要的是,在此寿命以后,极少量的应力幅减小就会大幅增加寿命)。然而,金属材料超长寿命的疲劳试验结果表明^[9,10],低于该疲劳极限的交变应力,仍会在更长的循环数下引发疲劳断裂,从而引发了金属材料究竟有无“疲劳极限”的争论。但是这种争论似乎没有意义,因为它只是由于人们对“无限寿命”理解的不同而已。从工程应用的角度,只要能保证满足设计要求的寿命,就可以作为疲劳极限值使用。

疲劳是一个过程，但这个过程不是人们能够简单地用直观的方法所能观察到的（能直接观察到的只是疲劳的结果即疲劳断裂。裂纹的疲劳扩展从整体上看确实是整个疲劳过程的体现，但从局部来看，也只是局部材料疲劳的结果）。这是因为对于绝大多数工程结构，在发生最终的疲劳破坏前，通常并不允许有明显的塑性变形（否则塑性变形将导致零部件尺寸的改变，在未到寿命前就会因不满足设计要求而被判断为失效）。实际应用中的疲劳破坏多表现为脆性破坏。正是因为疲劳过程的这种隐蔽性，导致了其引发的破坏的突然性，从而使得其引发事故的可能性和危害性更为巨大。当然，也会有一些寿命要求较短且几何尺寸精度要求不高的零件，可以允许疲劳过程中有明显的塑性变形，甚至在生产过程中有意地利用其循环塑性变形特性（如来回弯折细钢丝使其断裂等，但严格地说，此时循环塑性破坏的含义要大于疲劳）。疲劳过程容易受环境的影响，温度、腐蚀、辐射等，都会对材料的疲劳行为产生很大的影响。这意味着疲劳实际上可能会有许多不同的种类，并且会有不同的疲劳机理，因此需要采用不同的评价方法来处理不同种类的疲劳。实际上在静态破坏中也一样，我们需要针对不同的静态失效形式，采用不同的失效准则。

正是因为疲劳现象十分普遍，种类繁多，所以现实中存在着多种疲劳形式和叫法。各种形式的疲劳，有的只是载荷形式或试验方法的不同，有的则连疲劳机理本身也不同。影响疲劳的因素很多，在未建立起相应的疲劳理论前，由于对其支配性因素的认识不足，所以连试验方法本身，也会影响疲劳试验结果。因此，不同试验者、不同试验方法所得到的试验结果，往往也缺乏严密的可比性。为了避免这种混乱，各国都制定了相应的标准疲劳试验方法^[1]。本来，所谓标准试验法，是人们获取可靠的材料特性的一种统一试验方法，一旦获取了材料特性，就可应用于任意几何形状及受力状态的问题。但是，在疲劳问题中，材料有什么样的疲劳特性常数本身，尚且是未知的。因此，关于它的所谓标准试验法，实际上更多的只是以标准方法去获取一些试验数据。这些数据必然是与试验条件（应力状态、交变载荷形式等）密切相关的，同一试验条件可使不同试验者的结果具有可比性。然而标准试验的试验条件显然不一定与实际问题相同。因此，在试验数据和工程实际问题之间，还有一道巨大的鸿沟。填补这一鸿沟的做法，不外乎以下三种：一是强行将试验数据或由其总结得来的经验规律适用于实际问题，这是一种削实际问题之足去适试验数据之履的做法，实属无奈之举。二是针对实际问题重新另行试验，显然这种方法的代价是高昂的，并且复杂问题的应力状况等实际上在实验室也是难以模拟的（如多种频率的载荷同时作用等），也失去了学术研究的意义。三是建立有一定普适性的疲劳理论，即通过标准试验方法测得材料疲劳特性，然后用疲劳理论和疲劳特性常数去解决实际问题，就像强度或失效理论在静强度问题中的作用一样。

迄今为止，尚没有统一的疲劳分类方法，因此，对各种疲劳的命名存在一定程度的混乱，极易导致基本概念的混淆。这里我们先介绍一下目前存在的几种主要分

类方法,较为系统的分类在第 2 章中说明。

1. 按载荷频率进行分类

按载荷频率可分为高频疲劳、低频疲劳和静态疲劳三种。高频疲劳 (high frequency fatigue) 指载荷频率较高 (一般在 10Hz 以上) 时的疲劳; 低频疲劳 (low frequency fatigue) 则是指载荷频率较小 (一般在 0.1Hz 以下) 时的疲劳, 这两种疲劳也被统称为循环疲劳; 静态疲劳 (static fatigue) 则是指载荷恒定时的疲劳, 传统上常将蠕变破坏作为静态疲劳, 但实际上也有在断裂前根本没有明显蠕变变形的情况 (静态疲劳一般只发生在原始缺陷丰富的陶瓷、光纤、岩石等材料中)。在实验室试验中, 出于试验时间的考虑, 一般高频疲劳用于应力幅较小 (弹性范围内)、以循环计数的寿命较长的疲劳, 而低频疲劳一般对应于应力幅较大 (最大应力超过屈服极限)、以循环计数的寿命较短的疲劳。然而这种对应性只是为了试验上的方便, 在实际问题中并不一定存在。也就是说, 高频载荷也可以引发塑性变形或导致短寿命破坏, 低频载荷也可以只引起弹性应力或具有很长寿命。需要注意的是, 目前已形成了一种习惯, 即将高频疲劳认为是弹性应力循环的应力疲劳, 而将低频疲劳认为是应变幅大于屈服应变的应变疲劳, 并引入了相应的专有名词: 高周和低周疲劳。通常, 高周疲劳 (high cycle fatigue) 是指具有较长寿命的应力疲劳 (变形在弹性范围内), 而低周疲劳 (low cycle fatigue) 则是指只具有较短寿命的应变疲劳 (变形超出弹性范围)。显然, 高低周疲劳的区分, 主要是从寿命 (cycle) 的角度来命名的, 与以频率来区分的方法还是有区别的。现实中, 高低周疲劳与高低频疲劳经常被搞混, 这是因为寿命的长短是相对的, 高低周的区分本身就是模糊的。

2. 按试验载荷控制方式进行分类

按试验载荷控制方式可分为应力控制疲劳和应变 (位移) 控制疲劳两种。应力控制疲劳 (stress controlled fatigue) 是指在试验中应力幅保持恒定或受到变幅控制 (即应力幅按预先设定的方式变化) 的疲劳形式, 而应变控制疲劳 (strain controlled fatigue) 则是指在循环载荷作用过程中公称应变幅保持恒定或受到变幅控制 (即应变幅按预先设定的方式变化) 的疲劳形式。一般高频疲劳常采用应力控制, 而低频疲劳则采用应变控制方式进行。必须高度注意的是, 即使最大名义应力小于材料的屈服强度, 两者也不是完全等效的, 这是因为在某一固定的名义应力情况下, 在疲劳寿命的后期, 应变会略有增大, 如果固定应变幅, 实际上会减小所施加的名义应力幅。应变控制一般用在有循环塑性变形的情况下, 此时的应力应变由材料的循环塑性变形特性决定, 其关系曲线呈滞环形式, 在每个循环中都有能量耗散。显然这种分类方法仅是按实验室条件下试验载荷的施加形式所进行的。实际结构的载荷施加方式一般处在应力控制和应变控制之间, 与这两种实验室控制方式是有差别