

疲劳设计准则

〔英〕T.V. 达根 J. 伯恩 著
雷慰宗 刘元镛 译

国防工业出版社

疲 劳 设 计 准 则

T.V.达根
〔英〕 J.伯 恩 著

雷慰宗 刘元镛 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书详细介绍了应力-应变分析, 裂纹形成, 疲劳裂纹扩展和最后破坏等问题, 用以计算构件的疲劳完整性。书中包括了一些新的研究数据和基本理论。

本书可供工程技术人员疲劳设计研究用, 并可作为工科院校有关专业的教科书。

FATIGUE AS A DESIGN CRITERION

T. V. Duggan J. Byrne

MACMILLAN PRESS LTD 1977

*

疲劳设计准则

[英] T. V. 达根 J. 伯恩 著

雷慰宗 刘元镛 译

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $5\frac{3}{4}$ 142 千字

1982年10月第一版 1982年10月第一次印刷 印数: 0,001—7,000册

统一书号: 15034·2379 定价: 0.75元

序

在金属疲劳或日益进展的断裂方面的大部分研究工作，主要着重于基本机理的基础性研究或者集中于对一些影响因素的评价上。因此尽管有关的文献很多而且正以惊人的速度不断增加，至今对如何应用疲劳数据于设计仍未受到足够的重视，以致对实际构件进行疲劳试验仍然是一种普遍的做法。

本书的主要目的是想建立将疲劳数据应用于设计的方法和步骤。为此，对材料的机械性能、影响这些性能的因素和在实际构件上的应用等做了讨论。

在评价构件的疲劳完整性时，必须考查应力-应变分析、裂纹形成、疲劳裂纹的发展和最后破断。所有这些方面都详细地作了叙述，而且还涉及到一些新的研究数据和一些原始理论。本书的内容是以多年来从事研究工作和对工程方面的大学生和进修生所进行的教学工作积累起来的经验为基础的。

本书并不企图代替论述疲劳的各个方面的问题的一些出色的教科书。然而确曾为了能包括下述各个方面而做了一切努力：高循环和低循环疲劳；循环加载下的多向应力系统；简单的蠕变-疲劳问题；材料的循环特性；疲劳的冶金方面；裂纹形成寿命的估计；断裂力学及其在疲劳裂纹发展和快断方面的应用以及一些环境因素的影响。每章都附有内容广泛的参考文献目录，使得从事这方面工作的读者能充份地去查阅与断裂和疲劳有关的最新的研究报告。

希望这本书对研究工作者、应力分析者、设计工程师和冶金师有所帮助。此外，写这本书也是为了满足大多数取得了机械工程包括材料机械性能学位和毕业文凭的人员的需要，同时也提供

了一本有用的基础教材供许多大学和技术院校采用。的确，检查过去十年来毕业生在这个领域内的毕业设计情况，十分明显地说明确需要有一本综合性的而又比较简明的课本，我们衷心地希望这本书至少能部分地满足这一需要。

应该说明，在朴茨茅斯技术学院机械系曾经以讲义的形式成功地将本书的内容作为短期进修生课程的基础。所以我们感谢我校材料组机械性能方面的同事们所给予的直接或间接的帮助以及工业方面的合作者，特别是罗尔罗伊斯公司机械完整性和材料工程方面的朋友们。最后，我们愿对出版者、所有与发行本书有关的先生们，对他们的关心和合作表示谢意。对本书有任何批评，请向作者提出！

T. V. 达根

J. 伯恩

于朴茨茅斯

1977

译 者 序

达根 (Terance V. Duggan) 博士是英国朴茨茅斯技术学院机械系副教授, 在工艺设计、疲劳、断裂力学及将疲劳数据应用于设计等方面曾撰写过一些著作, 发表过许多文章。

这本书是达根博士与伯恩 (James Byrne) 讲师合作, 在多年来从事研究工作和对工程方面的大学生和进修生所进行的教学工作积累起来的经验的基础上最近完成的著作。读者对象是研究人员、应力分析者、设计工程师和冶金师。也可供大学和技术院校作基础性教材用。全书的内容比较完整、系统、新颖。涉及的面比较宽, 有基础性理论, 有最新的研究结果。特别重视实际的应用和指导设计。是这方面国外最新出版的比较好的一本书。

在翻译过程中本书的某些章节承蒙 628 所和西北工业大学的几位同志和老师审阅, 特此一并致谢。

书中难免有错译误译之处, 欢迎读者批评指正。

译 者

1980年

目 录

符号	1
第一章 影响疲劳特性的因素	7
1.1 引言	7
1.2 高循环和低循环疲劳	8
1.3 抗高循环疲劳设计	12
1.4 加载型式的影响	13
1.5 尺寸效应和应力梯度	15
1.6 表面光洁度和定向特性	17
1.7 应力集中效应	19
1.8 平均应力的影响	22
1.9 环境因素	27
1.10 结束语	30
参考文献	31
第二章 复合应力系统的疲劳分析	34
2.1 引言	34
2.2 三向应力状态的一般情况	34
2.3 静破坏理论	41
2.4 复合波动应力	46
2.5 方法的步骤	48
2.6 蠕变和疲劳复合	50
2.7 结束语	55
参考文献	55
第三章 材料的循环行为	57
3.1 引言	57
3.2 疲劳裂纹的形成	57
3.3 低循环破坏	59
3.4 高应变低循环疲劳	60
3.5 低循环疲劳数据表示法	62
3.6 变形型破坏	72
3.7 破坏机理在实践中的应用	73

3.8 结束语	75
参考文献	75
第四章 疲劳的冶金方面	77
4.1 引言	77
4.2 金属微观结构的现实性	77
4.3 疲劳裂纹的形成和发展	79
4.4 断裂机理	84
4.5 疲劳极限	87
4.6 表面状态和处理	89
4.7 环境的影响	92
4.8 擦伤疲劳	94
4.9 高温疲劳	95
4.10 疲劳破坏	97
4.11 结束语	105
参考文献	105
第五章 裂纹形成寿命的评定	107
5.1 引言	107
5.2 在集中地区的应力和应变的确定	107
5.3 裂纹形成寿命的预测	117
5.4 影响高应变疲劳的一些因素	121
5.5 结束语	123
参考文献	124
第六章 断裂力学和疲劳裂纹扩展	126
6.1 引言	126
6.2 格里菲思理论	127
6.3 线弹性断裂力学	130
6.4 疲劳临界裂缝尺寸	138
6.5 疲劳裂纹扩展	140
6.6 影响裂纹扩展速率的因素	146
6.7 估算裂纹扩展寿命	150
6.8 疲劳裂纹扩展试验和分析	152
6.9 结束语	159
参考文献	160
附录 指导性例子	164

符 号

- A 材料常数
横剖面面积
- A_1 }
 A_2 } 常数系数
 A_3 }
- a 中央裂纹的半裂纹长度
边缘裂纹的裂纹长度
椭圆短轴长度的一半
孔半径
诺伯材料常数
- a_c 临界裂纹长度
- B 材料常数
试件厚度
- b 材料常数
椭圆长轴长度的一半
- C 材料常数
蠕变速率
- C_e 对应于一个循环的弹性截距的应变范围
- C_L 加载方式的因子
- C_p 对应于一个循环的塑性截距的应变范围
不扩展裂纹的条件
- C_r 尺寸效应因子
- C_1 }
 C_2 } 主应力方向的蠕变速率
 C_3 } 材料常数

c
 c_1
 c_2
 c_3

} 考虑材料和几何形状的复合常数

D 损伤系数

对数延性

$\frac{da}{dN}$ 疲劳裂纹扩展速率

E 弹性模量

E_r 正割弹性模量

F 用于描述应力-应变行为的材料常数约束因子

f 函数

频率

G 剪切弹性模量

$\mathcal{G}$ 应变能释放率

g 材料常数

I_1

I_2

I_3

} 应力不变量

K_0 临界应力强度因子

K_I 疲劳强度减弱因子

K_{II} 剪切疲劳强度减弱因子

K_s 考虑表面光洁度影响的因子

K_t 理论的或几何的应力集中系数

K_{ts} 理论的或几何的剪切应力集中系数

K_{max} 最大应力强度因子

K_{min} 最小应力强度因子

K_e 应变集中系数

K_σ 应力集中系数

K_I I型应力强度因子

- K_I I型应力强度因子
 K_{II} II型应力强度因子
 K_{IC} 平面应变断裂韧性
 K_{ISCC} 在特定腐蚀下的门槛应力强度因子
 k 材料常数
 M 弯矩
 m 材料常数
 N 循环次数
 N_f 破坏时的循环次数
 N_c 到达临界条件的循环次数
 n 材料常数
 p 数值指数
 Q 缺陷形状参数
 q 数值指数
 缺口灵敏度指标
 q_s 缺口剪切灵敏度指标
 R 计算应力比
 RA 面积的减缩量
 RF 储备系数
 RF_a 交变应力的储备系数
 RF_m 平均应力的储备系数
 r 缺口半径
 r_p 塑性区半径
 r_e 局部的应变比
 r_o 局部的应力比
 S 表面能
 S_a 对应于完全反逆加载的任意循环次数的固有疲劳强度
 S'_a 对应于完全反逆加载的任意循环次数的部分疲劳强度
 S_c 完全反逆加载的固有疲劳或持久极限

- S'_c 完全反逆加载的部分疲劳或持久极限
 S_c 材料或构件的临界强度
 S_f 疲劳强度系数
 S_p 单调加载的屈服或保证强度
 S'_p 循环加载的屈服或保证强度
 S_{sa} 对应于完全反逆加载的任意循环次数的固有剪切疲劳强度
 S'_{sa} 对应于完全反逆加载的任意循环次数的部分剪切疲劳强度
 S_{sp} 单调加载的剪切屈服强度
 S_{su} 极限剪切强度
 S_u 极限拉伸强度
 S_w 工作强度
 T 在特定加载条件下的破坏时间
 t 厚度
 加载持续时间
 U 应变能
 W 试件深度
 x 线性坐标
 Y 柔性函数
 Y_0 修正的柔性函数
 y 线性坐标
 z 线性坐标
 α 材料常数
 α_1 在对数图表上塑性应变对循环次数的斜率
 α_2 在对数图表上弹性应变对循环次数的斜率
 β 沿着裂纹前沿测得的角度
 γ 剪切应变
 γ_s 单位面积的表面应变能

- γ_p 单位面积的塑性功因子
 ΔK 应力强度范围
 ΔK_I I 型的应力强度范围
 ΔK_{ITH} 低于该值时疲劳裂纹停止扩展的应力强度范围
 ΔK_{I0} 门槛应力强度范围
 $\Delta \epsilon$ 应变范围
 $\Delta \epsilon_e$ 弹性应变范围
 $\Delta \epsilon_a$ 持久应变范围
 $\Delta \epsilon_{e0}$ 零平均应力的弹性应变范围
 $\Delta \epsilon_{L0}$ 相当于零平均应力的持久或疲劳极限的应变范围
 $\Delta \epsilon_T$ 总应变范围
 $\Delta \sigma$ 局部应力范围
 $\Delta \sigma_0$ 名义的或计算的应力范围
 δ 发生破坏所要求的材料临界深度
 ϵ 应变幅值
 $\left. \begin{matrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{matrix} \right\}$ 主应变
 ϵ_c 相应于临界条件的应变幅值
 ϵ_f 断裂应变
 ϵ'_f 疲劳延性系数
 ϵ_{end} 持久或疲劳极限的应变当量
 ϵ_m 平均应变
 ϵ_{max} 最大应变幅值
 ϵ_{min} 最小应变幅值
 ϵ_0 名义应变幅值
 ϵ_{yp} 屈服应变
 θ 极坐标
 ν 波桑比

- ν_e 在弹性范围内的波桑比
 ν_p 在塑性范围内的波桑比
 ν' 考虑有一定程度塑性修正的波桑比
 ρ 缺口半径
 σ 正应力
 σ_{alt} 正应力的交变分量
 σ_{alte} 正应力的等效交变分量
 σ_e 等效应力幅
 σ_f 断裂应力
 σ_m 正应力的平均分量
 σ_{me} 正应力的等效平均分量
 σ_{max} 最大应力幅值
 σ_{min} 最小应力幅值
 σ_0 名义的或计算的应力幅值
 σ_s 代替循环应力的等效静应力
 $\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{matrix} \right\}$ 主应力幅值
 τ 剪切应力
 τ_{alt} 剪应力的交变分量
 τ_m 剪应力的平均分量
 τ_{max} 最大剪应力幅值
 τ_{min} 最小剪应力幅值
 $\left. \begin{matrix} \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{matrix} \right\}$ 最大剪应力幅值
 ϕ 塑性模量
 椭圆积分

第一章 影响疲劳特性的因素

1.1 引言

目前所用的估算构件疲劳强度或循环寿命的方法都还有许多有待改进的地方，而对用于评价疲劳完整性的可靠方法的确定来说又有一定的需要。任何这类方法都要利用基本的材料数据，这些数据可在实验室内用简单试样或是在恒载（应力），恒应变（位移）下，或可能是在应力和应变的乘积为恒量下试验得到。为了方便和简化起见，这样一些试验都喜欢用光滑试件作出，虽然也必须考虑试验某些类型的切口试件或模拟构件可能有的优点。

疲劳特性与许多因素有关，除了在使用状态下试验真实使用构件，而在实验室的试验中要包括全部可能的影响因素是不可能的。因而当用实验室内得到的疲劳数据进行真实构件的设计时，务必适当考虑这些可能影响疲劳特性的因素。如果有人研究一真实构件并将其与简单疲劳试片比较，那末立即可见差异是明显的。由于各种明显的理由，要进行真实构件试验并非总是可能的，设计师必须使他自己满足于可适用的基本材料数据，以及利用这种资料进行分析的方法。

实验数据表明：影响材料拉伸强度的一些同样的因素也影响疲劳强度（相反的说法不一定正确）。因此，已力求把疲劳强度与拉伸强度联系在一起^[1,2]。必须强调指出：这并不是一个普遍地要推荐的工程实用方法，然而在缺乏比较可靠的资料时，在许多包括初始可用性研究的情况下设计师仍可能认为这是一种有用的方法，因为在那些情况下基本的疲劳数据并不是随意可得到的。无论如何，基本的或内在的疲劳数据是利用加工和控制达到很高

精度和表面光洁度的, 具有标准尺寸并在无害环境下(相对地说)一般承受完全对称的或反复的等幅单向载荷型式的光滑试件得到的。这些条件完全脱离真实的设计条件, 而试件充其量只不过反映材料在室温下可能被认为是基本的一些因素。这有可能将内在的疲劳强度用于材料的对比, 当它是有一定的价值时, 就应用于所设计的构件来说还是有一定限度的。

至今尚未被适当地研究的⁽⁸⁾一种可能把疲劳数据应用于设计的方法, 似乎是确定构件的单调的和循环的应变分布以及试图把这样的分布与成核、裂纹扩展和裂纹增长速率联系起来。理想地说, 单调和循环应变分布应该利用已知的材料特性关系通过理论研究得到。单调应变分布将明显地比循环应变分布次要, 这是作者本人的观点, 因为循环应变硬化或软化无疑地将影响疲劳过程⁽⁸⁾。任何一种确定构件内应变分布的理论方法都要满足三个基本关系, 即:

(1) 平衡方程;

(2) 变形协调方程;

(3) 材料的应力-应变关系。

当加载条件仅是弹性应变占主要时, 材料的特性关系用虎克定律表示, 倘若能够满足平衡和变形协调方程, 则可得到应力和应变分布。但是, 如果加载使得在构件或结构中发生局部屈服时, 除出现弹性应变外还有塑性应变, 材料的特性关系将不再是线性的。

1.2 高循环和低循环疲劳

某一给定材料的内在疲劳曲线的预计给设计师为在动力加载下进行抗破坏设计提供所需要的基本材料数据。在该阶段, 把内在的疲劳曲线定义为在实验室内由加工和抛光到高精度的光滑试样, 并承受对称循环的单向应力的试验得到的曲线。为了用作设计需要把基本的或内在的疲劳曲线加以修正, 这就要求考虑影响

疲劳强度的各种因素，而这在实验室试片的情况下一般是无法实现的。

在很大程度上，可把疲劳问题方便地分为两类^[4]，即一类是涉及应变（或变形）循环，一类是涉及载荷（或名义应力）循环。因此，为了得到特定材料的内在疲劳数据，在实验室内试验光滑试样的方法应该与构件在使用中可能受到的循环分类有关，这样的做法，不能认为是不合理的。作为本书的目的，指出疲劳曲线可以用在恒应变（或变形）循环或用以往的更常规的恒载（或不严格地说是应力）循环的方法的条件下，在实验室内试验光滑试样得到是足够的了。假如应力水平未明显地超过材料的宏观屈服强度，两种型式的曲线或多或少将是相同的。另一方面，有高应变因而有明显的宏观塑性产生，应力和应变之间的关系已不再是线性的，而在循环加载条件下由材料所表现出来的循环应变硬化或软化特征，则使问题更为复杂化了^[5]。因此，区别高应变低循环疲劳（LCF）和高循环疲劳（HCF）显得十分必要，前者通常是用试验的试样在恒应变（或变形）条件下得到，后者则是在恒载条件下得到。

高循环疲劳——意味着破坏需要由很多次循环引起的——指的是在这种应力（或应变）和循环的组合下不会产生宏观塑性或屈服。因为在这些条件下，可应用普通的应力和应变之间的弹性关系式，高循环疲劳曲线一般用应力幅 S_a 作纵坐标，用到破坏时的循环次数 N_f 作横坐标，如图 1-1 所示。

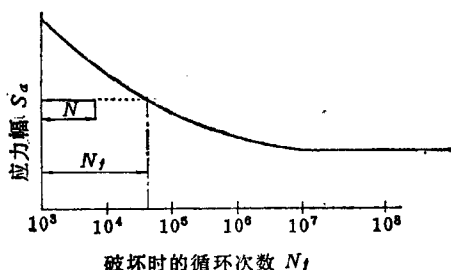


图1-1 高循环疲劳范围的疲劳曲线是用试验几个在不同应力水平下的同样试件并用最佳曲线拟合试验数据得到