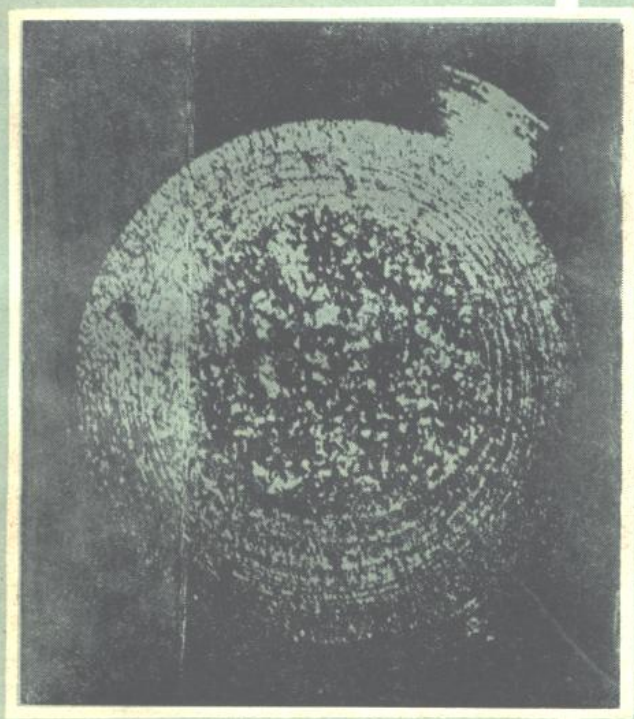


[英] N.E. 弗 罗 斯 特
K.J. 马 什 L.P. 普 克 著
汪 一 麟 邵 本 速 译

金
属
疲
劳



冶金工业出版社

金属疲劳

[英] N.E. 弗罗斯特 K.J.马什 L.P.普克 著

汪一麟 邵本述 译

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书从金属物理和工程力学特别是断裂力学的观点,全面阐述了金属材料、机器零件和结构构件的疲劳现象和疲劳规律,详细分析了疲劳裂纹萌生和扩展的机理和影响因素。作者根据大量的疲劳试验研究结果提出了疲劳方面的一些新见解,以澄清过去在这方面的错误概念和神秘观点。全书共六章:一、绪论;二、裂纹的萌生;三、普通试样的疲劳强度;四、应力集中和裂纹对疲劳强度的影响;五、裂纹的生长;六、其他各种疲劳问题。最后还有七篇附录。本书可供从事金属强度设计研究的科学研究人员和工程技术人员使用,也可供高等工业院校有关专业的教师、研究生和高年级学生参考。

金 属 疲 劳

[英]N.E.弗罗斯特 K.J.马什 L.P.普克 著

汪一麟 邵本述 译

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 173/8 字数 459 千字

1984年11月第一版 1984年11月第一次印刷

印数00,001~7,000册

统一书号:15062·4048 定价2.80元

目 录

第一章 绪论	1
参考文献	6
第二章 裂纹的萌生	7
2.1 引言	7
2.2 表面检验	8
2.3 彻体性能的变化	25
2.3.1 滞后回线与阻尼测量	25
2.3.2 机械性能、刚度、硬度等的变化	26
2.3.3 物理性能的变化	27
2.3.4 应变时效效应：渐增应力处理、休息期、 间歇热处理	28
2.3.5 扩散与表面发射研究	31
2.3.6 X射线衍射研究	32
2.4 对表面裂纹萌生的综论	33
参考文献	44
第三章 普通试样的疲劳强度	49
3.1 引言	49
3.2 疲劳极限或长期疲劳强度	49
3.3 表面光洁度的影响	58
3.3.1 切削方法	59
3.3.2 电抛光的影响	60
3.3.3 消除应力的影响	61
3.3.4 锻造表面的影响	62
3.3.5 综论	63
3.4 不同试验方法与尺寸的影响	66
3.4.1 综论	72
3.5 平均应力影响	76
3.5.1 综论	87

3.6 复合应力与各向异性的影响	89
3.6.1 综论	98
3.7 应力作用频率的影响	100
3.8 温度的影响	104
3.8.1 低温疲劳	105
3.8.2 高温疲劳	106
3.8.3 热疲劳	116
3.8.4 综论	118
3.9 环境影响	119
3.9.1 腐蚀疲劳机理	122
3.9.2 在水和盐水中的疲劳强度	124
3.9.3 湿度的影响	127
3.9.4 保护措施	128
3.9.5 隔绝大气	130
3.9.6 综论	136
参考文献	139

第四章 应力集中和裂纹对疲劳强度的影响 147

4.1 引言	147
4.2 切口周围的弹性应力分布	150
4.3 实验用切口试样在零平均载荷下的特性	153
4.3.1 实验数据	153
4.3.2 $K_f - K_t$ 关系	161
4.4 切口试样上的非扩展性裂纹	167
4.5 在零平均应力下导致一定长度或深度的裂纹扩 展所需的最小交变应力	178
4.5.1 具有人造裂纹的试样的试验	178
4.5.2 具有疲劳裂纹的普通试样的试验	178
4.5.3 具有在切口处生长的疲劳裂纹的试样的试验	180
4.5.4 测定裂纹长度与导致裂纹生长所需应力 之间关系的试验	182
4.6 零平均载荷切口疲劳数据的分析	188

4.6.1 锻造材料	188
4.6.2 铸造材料	196
4.7 平均载荷的影响	197
4.7.1 切口试样	197
4.7.2 有裂纹的试样	204
4.8 复合应力的影响	208
4.9 温度的影响	212
4.10 环境的影响	213
4.11 宏观裂纹长度—循环扩展应力关系的补充说明	222
参考文献	226

第五章 疲劳裂纹的生长 230

5.1 引言	231
5.2 线弹性断裂力学	233
5.2.1 裂纹生长型式	233
5.2.2 应力强度因子	234
5.2.3 裂纹方向	238
5.2.4 屈服影响	239
5.2.5 在疲劳裂纹生长方面的应用	240
5.3 裂纹生长的断口金相分析	242
5.3.1 宏观外貌	242
5.3.2 裂纹方向	244
5.3.3 微观外貌	248
5.4 裂纹生长的金属物理观点	255
5.5 疲劳裂纹生长速率的测定	258
5.6 几种疲劳裂纹生长理论	263
5.6.1 Head理论	264
5.6.2 几何相似假说	265
5.6.3 净面积应力理论	266
5.6.4 累积应变假说	269
5.6.5 位错理论	270
5.6.6 能量理论	271

5.6.7 Frost和Dixon理论	271
5.6.8 断裂力学裂纹生长理论	274
5.6.9 与实验的相互关系	276
5.7 各种材料的疲劳裂纹生长数据	282
5.8 疲劳裂纹生长中的界限效应	300
5.9 影响裂纹生长的其他因素	303
5.9.1 厚度的影响	303
5.9.2 试验频率的影响	304
5.9.3 载荷变化的影响	305
5.9.4 环境的影响	306
5.9.5 应力状态的影响	309
5.9.6 提高抗疲劳裂纹生长能力的方法	313
5.10 结构中的疲劳裂纹	316
5.10.1 有裂纹结构的剩余静强度	316
5.10.2 使用寿命的估算	324
参考文献	327
第六章 其他各种疲劳问题	335
6.1 短期疲劳	335
6.1.1 引言	335
6.1.2 总应变幅试验	339
6.1.3 塑性应变幅试验	340
6.1.4 断裂形式与平均应变的影响	342
6.1.5 切口试样	345
6.1.6 综述	347
6.2 变应力幅下的疲劳	349
6.2.1 引言	349
6.2.2 Palmgren—Miner法则和早期的实验研究	351
6.2.3 其他估算方法	355
6.2.4 模拟使用条件的程序加载	361
6.2.5 随机加载	365
6.2.6 伺服液压试验法	369
6.2.7 汽车的结构疲劳试验	371

6.2.8 加速试验	373
6.2.9 综论	374
6.3 机械加工的影响	376
6.3.1 引言	376
6.3.2 加工硬化的影响	376
6.3.3 残余应力的影响	378
6.3.4 综论	383
6.4 表面处理	386
6.4.1 电镀金属	386
6.4.2 阳极氧化	393
6.4.3 表面硬化冶金方法	394
6.4.4 软层	399
6.5 压力圆筒	401
6.6 微动磨损	413
6.7 销钉、铆钉和螺栓联接	420
6.7.1 销钉联接	420
6.7.2 铆钉联接和螺栓联接	425
6.8 焊联接	430
6.8.1 引言	430
6.8.2 结构钢中的对接焊缝	430
6.8.3 结构钢中的填角焊缝	438
6.8.4 轻合金中的对接焊缝	442
6.8.5 提高疲劳强度的方法	443
6.8.6 点焊缝	445
6.8.7 胶接、钎焊和压力焊联接	448
6.9 冷缩配合件	450
6.10 螺旋联接	455
6.11 滚动接触	462
6.12 材料疲劳极限的快速测定法	465
6.13 疲劳试验结果的统计分析	471
6.13.1 引言	471
6.13.2 在S—N曲线上的应用	472

6.13.3 组合分布	476
6.13.4 根据统计理论的试验方法	479
6.14 复合材料	483
6.15 零件与结构	484
参考文献	494
附录 1 表示材料应力—应变关系时用的术语	512
参考文献	514
附录 2 重复加载与断裂	515
参考文献	517
附录 3 拉伸试样与疲劳试样断裂后外貌的比较	518
附录 4 延性金属中塑性变形的基本概念	520
参考文献	522
附录 5 疲劳试验机	523
A5.1 普通轴向应力试验机	523
A5.2 伺服液压试验机	526
A5.3 其他试验机	529
参考文献	530
附录 6 测定普通疲劳性能用的试样与测试方法	532
A6.1 试样	532
A6.2 试验和试验结果的表示	534
参考文献	539
附录 7 对于各种形状的应力集中系数	540
参考文献	546

第一章 绪 论

无论是金属材料还是非金属材料，只是在制成为工作零件或结构之后，才对人类有实用价值。工程设计就是这种制造全过程中的一个环节。

设计人员面临的一个主要问题是如何选择合适的材料，从而制成专门设计的零件或结构。材料的性能要保证它能完成所规定的任务，在保证的使用期内不致发生破坏，并且还要使它的售价为用户所接受。为了做到这一点，设计人员必须知道零件或结构在使用中所承受的载荷、其工作环境、预期的使用寿命和制造成本。这些资料决定了作专门设计时所用材料的选择范围。为了最后决定选择何种材料，设计人员必须知道材料在各种不同载荷下和各种不同环境中的性能（即材料的性能），知道了这些性能以后，设计人员还必须能够将其与所设计的零件或结构的承载能力联系起来。应力分析和断裂力学这两门课程就是专为达到这个目的而发展起来的。

然而产生了一些不确定的因素：零件或结构在使用中所承受的载荷往往只能粗略地估计，制造和装配方法可能产生设计时未知的残余应力，局部部位的实际几何形状可能与图上规定的几何形状有出入，从而使原来的应力分析产生误差，或者制造时所用材料的性能可能与设计人员所设想的有所不同。因此，为了获得合格的产品，按各种零件和结构的任何常见组合来选择材料和许用应力时，经验是很重要的。

传统的设计是根据安全系数（假定包括所有未知的和不能精确了解的因素）的概念、材料的抗拉强度和名义应力分析法来进行的。当对材料的性能、断裂机理、详细的应力分析和使用载荷知之不多时，这无疑是一种唯一可用的方法。所取的安全系数通常是以个人的直观和以往的经验为根据。在很多情况下，这种方

法很有成效。例如，将许用设计应力限制为 80 兆牛顿/米²，就能制成许许多多的软钢零件和结构，而且能使之成功地进行运转。这时只要采用基本的应力分析法即可，而无需作复杂的应力分析、精密的试验或熟知断裂机理。

设计人员总是不遗余力地完成更经济的设计。为此，设计人员必须提高许用设计应力，冶金工作者已答应为提高各级材料的抗拉强度承担责任。但是设计人员立刻发现，适用于某种软钢零件或结构的安全系数，如用于新的高强度钢（或其他材料）时，不一定能获得令人满意的使用性能。传统设计之所以有成效，主要是由于避免了过去的错误而在熟知的场合采用了熟知的材料。

在工程设计的历史上，早就认识到必须去掌握引起材料或零件可能破坏的各种不同方式。破坏必定是由断裂或变形过大造成的，由于静拉伸、压缩或剪切等静载荷引起的破坏已为人所共知。早期还想设计制成一个永不破坏的零件或结构。

但是，随着蒸汽机和机械运输机的发展以及机械设备的广泛使用，承受重复载荷的运动零件的破坏事件愈来愈普遍。破坏发生在名义应力很低而载荷反复变化之处，通常位于零件或结构截面改变的地方。1830年，Albert^[1]曾对矿用焊接起重链重复加载而持续试验到 10^5 次循环，这表明一百多年前工程技术人员就为这些破坏事件而感到烦恼了。1850年到1865年之间，Hodgkinson^[2]和Fairbairn^[3]都曾将梁作了重复弯曲试验。Fairbairn用一个由水轮驱动的机构在 6.7 米长的锻铁组合梁的中心处重复加载。Fairbairn发现该梁在 120 千牛顿的中心载荷作用下发生静力破坏，而大小仅为 30 千牛顿的重复载荷就会引起梁的破坏。

材料承受重复载荷而发生断裂时，看不出有显著的变形，而呈现了突然折断的现象。Rankine^[4]早在1840年就指出，材料承受重复载荷而发生的断裂呈脆性。由于这些破坏发生在工作一度令人满意的零件上，因此一般认为，材料在承受载荷后发生了疲劳，或者连续重复施加的载荷通过某种方式使材料的承载能力耗尽了。这样就创造了“疲劳”一词来说明这种破坏，此词一直沿

用至今。随着日益需要更有效和更经济的零件和结构（例如，要求工作速度较高，重量最轻），疲劳破坏的数量不断增加，直到现在，对于在室温下或接近室温下工作的承载金属零件，疲劳破坏仍是最常见的破坏原因。

工程技术人员和冶金工作者长期来一直在研究，为什么材料受一次作用的应力时并不发生破坏，而受连续作用的应力时却发生了破坏。Gough^[5]、Moore和Kommers^[6]以及Mann^[7]早就进行了这方面的探讨，值得指出的是，自从Wöhler^[8]发表了他的经典疲劳实验结果以来，已经一百多年了。他设计了各种型式的疲劳试验机，并作了金属试样的首次疲劳试验，并特别注意试验载荷的大小。他根据钢铁试样的试验得出，决定试样的寿命不是载荷循环内的最大拉应力，而是所加的应力幅，而且无论施加多少次应力循环，总存在一个不致引起试样破坏的最大应力幅。自从Wöhler的著作发表以来，人们充分地研究了不同的材料在各种不同的载荷和环境条件下试验时的疲劳性能。此外，还将零件和结构作了疲劳试验，试验时常使其承受与使用时同等大小的载荷循环。尽管大多数工程技术人员和设计人员已经注意到疲劳问题，而且已经积累了大量的实验数据，目前仍有许多设备和机器发生重大事故。常有这样的情况，设备或装置的总体功能要求已得到满足，但使用中还会发生事故，这是由于与整个装置的功能要求显然没有直接关系的一个零件发生了疲劳破坏所致。因此，零件设计在某方面的疏忽是引起疲劳破坏的主要原因。使用中的破坏最能引起工程设计人员对零件设计的关注。当使用中发生了破坏，不论是象彗星式飞机或伊丽莎白皇后二世号轮船上的涡轮叶片那样引人注意或令人惊奇，还是象车辆短轴那样微不足道，通常总有内行来鉴定出事原因。一些原因在发生破坏之后是这样地清楚，使人难以理解为什么在事故发生以前不这么清楚^[9]。这是因为：适合于特定情况的正确的资料不都是可以得到的，设计人员必然只能根据手边的数据来估计疲劳性能。材料的疲劳性能与零件在使用中的性能很少具有某种普遍的关系，由于无知或偶

然的过载，或零件制成后使用要求有所改变，往往精确的使用载荷是难以知道的。进一步的原因是：传统的设计是将材料视为一个无裂纹的连续体。但是现在我们知道，要作合理的设计和材料评价，就需要了解有裂纹的连续体。许多材料、零件和结构在制造时本来就有裂纹或缺陷，或者在使用期内的某一个阶段出现了裂纹。本书始终表明，要搞清任何疲劳问题，就必须了解一个有裂纹的物体在承受载荷时的性态。

大多数实验室试验和使用性态两方面的疲劳资料是在对有裂纹材料性态的研究以前获得并进行解释的，所以没有基本的中心论点可将这些数据联系起来。因此，疲劳资料几乎都是孤立的几套数据，与其他几套数据没有明显的关系。

本书的目的是要将材料、零件和结构有关疲劳的各个方面合成一体来加以论述。过去只学过材料力学这门课程的读者，在阅读第二章以前应当参看附录1~7，其中介绍关于疲劳试验、应力集中和材料应力—应变关系的一些基本概念。

有水平的读者一看就知，只有第二章微观裂纹的萌生和第五章宏观裂纹的扩展这两章对于搞清整个疲劳问题最有价值，在某种意义上的确是这样，金属疲劳的全部精髓就在这两章，其余几章都是由此派生出来的。本来很想把这两章组合起来，辅以其余几章。但经熟思后，决定维持普通试样的疲劳强度、切口试样的疲劳强度这样的常规次序，以便按照历史的发展来了解金属疲劳，从而逐步导出引起裂纹生长所需的循环应力和金属宏观裂纹扩展特性的重要概念。第二章说明疲劳裂纹萌生的机理，接下来第三章介绍和说明影响材料普通试样疲劳强度的因素的一套丰富和详细的资料。第四章介绍关于应力集中或切口影响的资料，用引起宏观裂纹生长所需的应力来加以说明。然后，第五章论及疲劳裂纹扩展的理论和其情况的描述，并提供有关数据。最后，第六章涉及疲劳的某些专题，对这些专题作了比较详细的讨论，按照所了解的微观裂纹萌生和宏观裂纹扩展过程的方式来进行解释。

在任何一本关于金属疲劳的书籍中，计量单位特别是应力单

位都存在问题。英国疲劳数据单位常以吨力/英寸²计，航空工程的数据单位通常以10³磅力/英寸²（一般记为k.s.i）计，与美国习用的相同，英国和美国的断裂力学单位几乎都以k.s.i.(in)^{1/2}计，当然还有欧洲大陆的实用单位，例如公斤力/毫米²。因此，为了一致起见，本书不用上述这些实用单位，而全部采用S.I.（国际制）单位。虽然这样会给不习惯于采用S.I.单位的人带来一些不便，但是作者认为，这种合乎逻辑而首尾一贯的单位制将来肯定要采用的，其优点远远胜过了这个缺点。

常用单位的换算如下：

应力	1吨力/英寸 ² = 15.4443兆牛顿/米 ²
	10 ³ 磅力/英寸 ² = 6.8948兆牛顿/米 ²
	1公斤力/毫米 ² = 9.8067兆牛顿/米 ²
	1兆牛顿/米 ² = 0.064749吨力/英寸 ²
	= 0.145038 × 10 ³ 磅力/英寸 ²
	= 0.101972公斤力/毫米 ²
力	1吨力 = 9.9640千牛顿
	10 ³ 磅力 = 4.4482千牛顿
	10 ³ 公斤力 = 9.8067千牛顿
	1千牛顿 = 0.100361吨力
	= 0.224809 × 10 ³ 磅力
	= 0.101972 × 10 ³ 公斤力
应力强度因子	10 ³ 磅力/英寸 ^{3/2} = 1.0988兆牛顿/米 ^{3/2}
	1兆牛顿/米 ^{3/2} = 0.91005 × 10 ³ 磅力/英寸 ^{3/2}

参 考 文 献

1. ALBERT, W. A. J. *Arch. Miner. Geognosie Berg. Hüttenkunde*, **10**, 215 (1838).
2. HODGKINSON, E. A. H.M.S.O. Command paper No. 1123 (1849).
3. FAIRBAIRN, W. *Phil. Trans. R. Soc.* **154**, 311 (1864).
4. RANKINE, W. J. M. *Proc. Instn civ. Engrs* **2**, 105 (1843).
5. GOUGH, H. J. *The fatigue of metals*. Scott, Greenwood, and Son, London (1924).
6. MOORE, H. F. and KOMMERS, J. B. *The fatigue of metals*. McGraw-Hill, New York (1927).
7. MANN, J. Y. J. *Aust. Inst. Metals*. **3**, 222 (1958).
8. WÖHLER, A. *Z. Bauw.* **8**, 642 (1858); **10**, 583 (1860); **13**, 233 (1863); **16**, 67 (1866); **20**, 74 (1870); *Engineering* **11**, 199 (1871).
9. FIELD, J. E. and SCOTT, D. The diagnosis of service failures. *Institution of Mechanical Engineers Conference on safety and failure of Components, University of Sussex* (1969).

第二章 裂纹的萌生

2.1 引言

承受循环应力的延性金属一般在自由表面上发生破坏，因而本章只讨论在自由表面上产生疲劳裂纹的金属；至于在表面下产生裂纹的其他材料将在后面几章中进行讨论。

多晶延性金属的破坏与具有自由表面的晶粒有关，而与金属体内的晶粒无关，其理由如下：

(1) 表面晶粒与大气直接接触，因此，如果环境是破坏过程中的一个因素，则这些晶粒显然受其影响较大。

(2) 表面晶粒是多晶体上不完全受邻近晶粒支持的部分。因为多晶体上邻近晶粒中的滑移系是互不相关的，所以具有自由表面的晶粒要比金属体内受其他晶粒包围的晶粒更易发生塑性变形。

(3) 已经知道，如果在试样达到预期寿命的一定比率（例如20%）后中止进行疲劳试验，从测试部分上去除一层很薄的金属，再在同样应力值下继续进行试验，则试样的总寿命将比原试样的预期寿命要长^[1]。如果在试验全过程中每隔一段时间去除一层表层，则其寿命将超过预期寿命许多倍。事实上，如应力幅保持不变，而去掉的次数相当多和去除的一层相当厚，则其寿命将只受到试样初始截面积的限制。

(4) 从承受交变轴向应力而断裂的大试样的测试部分内部切下（即从所受应力大于普通试样疲劳极限的材料上切下）的小试样的疲劳强度不低于原材料的疲劳强度^[2]。

(5) 如果用冶金方法或表面加工方法使试样表面硬化，则试样的疲劳强度总的来说可获得提高。同样，任何使表面软化的方法均使试样的疲劳强度降低。

(6) 当名义上均质的金属疲劳试样承受沿其截面均布的应力而发生断裂后, 如对其作金相检验, 将看不出试样体内有裂纹。但是, 在某些情况下, 在试样内部的含夹杂物或缺陷处或在硬化表层下会形成裂纹。

因此, 发生破坏和开裂与表面晶粒有关, 只有当表面晶粒中形成的裂纹扩展而通过试样时, 试样体内裂纹通过的那部分晶粒才发生破坏。这意味着在疲劳试验中直接观察裂纹的扩展过程是比较简单的。一般只有一条裂纹深入金属相当深, 但是软金属(例如铜、软钢)表面特别是在经过较短耐久期(例如少于 10^5 次循环)后引起破坏的应力级下进行试验时, 可用肉眼可看得见许多附加的裂纹。另一方面, 在硬金属合金例如高强度钢和铝合金试样表面上, 用肉眼只看得见一条引起完全破坏的裂纹。

2.2 表面检验

在试验过程中, 经适当制备的试样表面可用金相技术进行分析^[3]。这些技术主要包括用冶金方法制备试样表面, 用光学显微镜直接检验表面, 或用电子显微镜检验所制备的表面复制品。

一般在低倍率和中等倍率下可以看出, 在静载荷下形成的滑移线是鲜明的直线, 它们均匀地分布在每个晶粒上。在高倍率下可以看出, 这些独立的线是具有不同高度的平行线滑移带。在循环应力下产生的滑移线形成了滑移带, 它们不一定一直延伸而通过晶粒, 随着试验的进行, 在老的滑移线旁边形成了新的滑移线, 各滑移带之间的中间区显然没有滑移^[4]。图2.1表示疲劳试验中试样表面上出现的滑移线。

从本世纪起, 有许多研究人员都研究了疲劳试样表面上滑移线的发展过程。早在1903年, Ewing 和 Humphery^[5]就对瑞典铁试样施加超过其疲劳极限的应力值而作了旋转弯曲试验, 而每隔一段时间中止试验, 将试样表面进行抛光和浸蚀。他们发现, 一开始只有少数几条滑移线, 但随着试验的进行, 在现有的滑移线旁边形成了新的滑移线, 从而产生了滑移带。虽然这些滑移带