

疲劳断口定量分析

Fatigue Fractography Quantitative Analysis

刘新灵 张 峥 陶春虎 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

疲劳断口定量分析

Fatigue Fractography Quantitative Analysis

刘新灵 张 峥 陶春虎 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

疲劳断口定量分析 / 刘新灵, 张峥, 陶春虎编著. —北京:
国防工业出版社, 2010. 9

ISBN 978 - 7 - 118 - 07062 - 0

I. ①疲... II. ①刘... ②张... ③陶... III. ①疲劳断
裂 - 定量分析 IV. ①0346. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 182109 号

※

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 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 $\frac{3}{4}$ 字数 188 千字

2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	宋家树	蔡 镛	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	彭华良	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

序 言

断口是试样或零件在试验或使用过程中断裂后所形成的相匹配的表面。断口记录了材料或零件在载荷、缺陷和环境共同作用下断裂前的不可逆变形,以及裂纹的萌生和扩展直至断裂的全过程,是断裂过程的“黑匣子”。断口的形貌、色泽、粗糙度、裂纹扩展途径等受断裂时的应力状态、环境介质、材料性质及其缺陷等因素影响,并与时间相关。对断口进行分析可以反推断裂过程、寻找断裂原因、评定断裂性质。

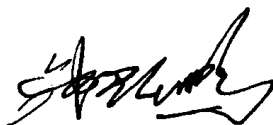
断口分析可以分为定性分析和定量分析,它们是相辅相成的两个方面,各有所长、各有所用。一般认为,定性分析在先,定量分析在后,定性分析容易,定量分析困难。如历史悠久的中医学,在人类的发展历程中起到了举足轻重的作用,但近年来受到一些人的置疑,其原因就是缺乏定量分析的依据。但有些事物,往往是首先通过定量分析才能达到最后的定性。如政治上和法律上对人的判断,就不能从一两件事物本身作出定性的判断,而要从具体的、定量的分析入手,积累一定的证据之后,才能给出宏观的定性结论。目前失效的诊断、预测与预防工作主要停留在定性分析方面,需要开展断口的定量分析工作,深入挖掘断口上丰富的信息。

疲劳断裂是一种重要的失效模式,疲劳断裂在断裂前没有明显的宏观塑性变形,断裂没有先兆信息,往往造成灾难性的

后果,引起巨大的经济损失和人员伤亡。疲劳断口形貌特征包括有疲劳弧线、疲劳条带、疲劳沟线、临界裂纹长度、瞬断区大小等,疲劳断裂过程中材料内部因素或外部条件变化时,在疲劳断口上就会留下不同的形貌特征,通过对疲劳断口形貌特征的定性和定量分析,可以获得大量有价值的信息,为疲劳断裂机理研究、原因分析和材料疲劳抗力提高、疲劳断裂预防提供重要技术依据。

近二十年来,人们在金属疲劳断口物理数学模型、定量反推原始疲劳质量以及疲劳应力等方面进行了一系列的研究工作,取得了较大的进展。本书的几位作者,均长期在失效分析第一线工作,在产品失效诊断和预测预防方面积累了丰富的经验。《疲劳断口定量分析》一书就是几位作者在集成前人研究成果,在对疲劳断口定量分析方面长期系统研究和实践的基础上,发展了疲劳断口定量分析的理论、技术和方法编写而成的。

愿该书的出版对于推动失效分析朝着从感性到理性、从定性到定性与定量相结合、从诊断到预测预防、从事后分析到事前的安全评估方向发展有所帮助和启迪。



前 言

断裂力学认为,结构件的寿命是应力状态和应力水平,构件的原始制造质量,包括初始缺陷尺寸的大小、形状、分布形式、部位和数量等,构件的几何形状,材料的工作环境等变量的函数。绝大多数产品尤其是航空关键结构与材料,在实际工作过程中多承受交变载荷的反复作用,其失效大多为疲劳断裂。据统计,航空产品构件的断裂失效中大约 70% 为疲劳断裂所致。

对于产品的疲劳断裂而言,构件实际断裂过程中的疲劳寿命与疲劳应力的断口定量反推分析是至关重要的。通过对产品断裂失效构件疲劳寿命与疲劳应力的断口定量反推分析,不仅可以得到构件实际的疲劳循环寿命,包括疲劳裂纹的萌生寿命与扩展寿命,而且可以得到疲劳裂纹扩展不同阶段所受到的应力,同时有利于同类构件的寿命预测与失效评估。定量分析的结果不仅对于正确地确定构件的失效模式和原因有着极其重要的工程应用价值,而且将推算的载荷与寿命反馈给设计部门,对损伤容限设计和给出定检周期具有重要的借鉴。再如在含缺陷(裂纹)的产品构件的服役和处理方面,一方面可能过早的报废,造成极大浪费,而另一方面无依据的使用又可能存在很大的安全隐患。采用失效评估技术,则可在确保产品安全可靠使用的基础上,使产品在经济上得到最大限度的利用。

本书分为 8 章,前 4 章分别介绍了断口定量分析的基本概念和研究进展,疲劳断裂特征的物理数理模型,疲劳断口定量分析方法及常用模型,金属结构材料疲劳断口定量分析。第 5 章分析了疲劳断口定量反推的影响因素,第 6 和第 7 章分别阐述了构件疲

劳扩展寿命和构件疲劳应力断口定量分析的实例。第8章介绍了失效分析预测预防的基本概念、相关研究进展以及疲劳断口定量分析在失效预测预防中的作用。

第1章由北京航空材料研究院陶春虎博士撰稿,第2章由北京航空航天大学张峥博士撰稿,其余章节由刘新灵博士撰稿,全书由刘新灵博士统稿,陶春虎博士审定。

与本书成书基础的相关研究工作,得到了原国防科工委科技与质量司李锦华、王宇宏以及北京航空材料研究院的大力支持。在本书的编著过程中,得到了中国航空工业集团公司失效分析中心同仁们的大力协助,陈鸷、谢明立、习年生等人在中国航空工业集团公司失效分析中心工作期间所作的相关研究工作,也为本书增添了色彩。中国工程院院士钟群鹏教授和北京科技大学褚武杨教授对本书给予了很高的评价,钟群鹏院士还亲自为本书撰写了序言。在此一并表示感谢。

由于疲劳断口定量分析是一项科学性、工程性均很强的工作,所以涉及的领域也很广泛,受工作和认识的局限,本书难免有不妥之处,希望读者提出宝贵意见。

作者

2010年5月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 定性分析与定量分析	1
1.2 断口定量分析在失效分析中的作用	3
1.3 疲劳断口定量分析的主要技术和方法	7
1.4 断口定量分析的主要模型	9
1.5 疲劳断口定量分析研究进展	10
参考文献	13
第 2 章 疲劳断裂特征	14
2.1 疲劳弧线	14
2.2 疲劳小弧线	17
2.3 疲劳条带	17
2.4 疲劳沟线	18
2.5 临界裂纹长度	19
2.6 疲劳瞬断区大小	20
2.7 疲劳瞬断区内放射线的物理数学模型	20
2.8 疲劳条带与环境损伤休止条纹的区别	21
参考文献	22
第 3 章 疲劳断口定量分析方法及常用模型	23
3.1 疲劳断裂特征及形成机理	23
3.1.1 疲劳裂纹萌生与扩展过程	24
3.1.2 疲劳起源阶段	24
3.1.3 疲劳裂纹稳定扩展阶段	25
3.1.4 裂纹快速扩展或瞬断阶段	28

3.1.5	裂纹各阶段的形成机理	29
3.2	疲劳裂纹扩展的阶段特性	35
3.2.1	疲劳裂纹扩展速率曲线	35
3.2.2	基于 ΔK 的裂纹扩展速率表达式	36
3.3	Paris 公式	38
3.3.1	Paris 公式定量反推疲劳扩展寿命	39
3.3.2	Paris 公式定量反推疲劳应力	43
3.3.3	Paris 公式定量反推原始疲劳质量	44
3.4	列表梯形法	45
3.5	断口宏观特征定量分析的方法	47
3.6	Frost and Dugdale 模型	49
3.7	疲劳特征的测量方法	50
3.7.1	疲劳特征观察与分析	50
3.7.2	疲劳条带的测定	50
3.7.3	疲劳弧线的测定	53
3.8	断口定量分析疲劳扩展寿命的主要程序和步骤	53
3.9	断口定量分析疲劳应力的主要程序和步骤	56
	参考文献	58
第4章	金属结构材料疲劳断口定量分析	60
4.1	断口定量分析疲劳扩展寿命	60
4.1.1	Paris 公式定量反推疲劳扩展寿命 适用性验证	60
4.1.2	梯形法反推疲劳扩展寿命	62
4.1.3	Paris 公式与梯形法的比较	64
4.1.4	断口宏观特征模型反推疲劳扩展寿命	65
4.2	疲劳扩展第一阶段与第二阶段	68
4.3	疲劳断口定量反推与断裂力学之间关系	71
4.3.1	宏观裂纹扩展速率与微观裂纹扩展速率	71
4.3.2	宏、微观裂纹扩展速率反推扩展寿命 结果的评价	75

4.4	不同试验条件对裂纹扩展速率的影响	77
4.4.1	频率及保持时间对疲劳裂纹扩展速率的影响	77
4.4.2	温度对裂纹扩展速率的影响	78
4.4.3	应力比 R 对裂纹扩展速率的影响	78
4.5	应力比 R 对裂纹扩展速率表达式的修正	81
4.6	断口定量反推疲劳应力	85
4.6.1	宏观特征模型反推疲劳应力	85
4.6.2	Paris 公式的方法	88
4.7	几种材料疲劳应力断口定量分析举例	90
4.7.1	18Cr2Ni4WA 钢	90
4.7.2	TC4 钛合金	91
4.7.3	LC9 铝合金	93
4.7.4	GH4169 高温合金	95
4.8	疲劳应力断口定量反推结果的分析	97
	参考文献	98
第 5 章	疲劳断口定量分析的影响因素	100
5.1	断口定量反推疲劳扩展寿命的影响因素	100
5.1.1	Paris 公式	100
5.1.2	梯形法	105
5.1.3	断口宏观特征模型	106
5.2	断口定量分析疲劳应力的影响因素	106
5.2.1	疲劳条带间距测量误差	107
5.2.2	裂纹扩展材料常数 c 、 n 值的影响	114
5.2.3	裂纹形状因子 Y 的影响	115
5.2.4	复杂载荷状态对疲劳应力反推结果的影响	116
	参考文献	117
第 6 章	构件疲劳扩展寿命的定量分析	118
6.1	同类构件系统定量分析	119
6.2	载荷谱下断口定量分析	121

6.2.1	等幅谱	121
6.2.2	随机载荷谱	122
6.2.3	块随机谱	125
6.3	构件疲劳寿命定量分析典型案例	125
6.3.1	垂尾疲劳试验断口定量分析	125
6.3.2	轰六飞机下壁板及垫板裂纹断口分析	128
6.3.3	歼7E飞机框横梁裂纹分析	132
6.3.4	飞机中央翼框及长桁疲劳寿命估算	136
6.4	特定方法在定量分析疲劳扩展寿命 中的应用	139
6.4.1	对称疲劳扩展方法的利用	140
6.4.2	裂纹扩展方向改变的情况	142
6.4.3	从同一断面的两侧起源向中间扩展 交叉的情况	144
6.4.4	其他情况	144
6.5	构件定检周期的评估方法	144
6.6	断口定量分析方法评价工艺效果	146
6.7	某发动机后机匣焊缝寿命分析与安全评估	149
6.8	某中减齿轮疲劳扩展寿命反推	154
	参考文献	157
第7章	构件疲劳应力断口定量分析	158
7.1	断口定量分析疲劳应力的思路	158
7.2	叶片振动应力分析	160
7.2.1	振动疲劳试验条件下叶片应力反推	161
7.2.2	压气机转子叶片振动应力反推	164
7.2.3	不同条件下反推振动应力的过程分析	166
7.3	螺栓疲劳应力断口定量反推	170
7.4	机翼根部连接带板疲劳应力反推	173
7.5	齿轮疲劳应力反推	177
7.6	孔两侧对称开裂情况下的裂纹形状因子	182

7.7 裂纹扩展速率变化趋势在分析失效原因中的应用	183
参考文献	187
第8章 失效分析预测预防	188
8.1 失效分析预测预防相关内容	188
8.1.1 基本概念和研究内容	188
8.1.2 失效分析预测预防的相关学科	189
8.2 疲劳断口定量分析在失效预测预防中的作用	192
8.3 失效分析过程	195
8.4 安全评估	198
8.4.1 材料性能的评估	198
8.4.2 含缺陷零件的安全评估	199
8.4.3 系统的安全评估	202
8.4.4 压力容器安全评定	202
8.4.5 压力管道的安全评估	203
8.5 剩余寿命预测	205
8.6 可靠度预测	206
8.7 失效预防理论、技术和方法的进展	211
8.8 原始疲劳质量评估	212
8.8.1 原始疲劳质量的内涵	213
8.8.2 确定原始疲劳质量的含义	213
8.8.3 结构细节原始疲劳质量的评估方法	213
8.8.4 结构细节原始疲劳质量在工程应用中的局限	215
8.8.5 材料原始疲劳质量	217
8.8.6 反推原始疲劳质量的关键因素	218
8.8.7 原始疲劳质量应用举例	220
参考文献	221

Contents

Chapter 1 Summary	1
1.1 Qualitative analysis and quantitative analysis	1
1.2 Role of fractography quantitative analysis in failure analysis	3
1.3 Main techniques and methods for fractography quantitative analysis	7
1.4 Main models of fractography quantitative analysis	9
1.5 Development of fractography quantitative analysis	10
References	13
Chapter 2 Fatigue fracture features	14
2.1 Beach marks	14
2.2 Small beach marks	17
2.3 Fatigue striation	17
2.4 Fatigue ditch	18
2.5 Critical crack length	19
2.6 Size of rapid fracture zone of fatigue	20
2.7 Physical and mathematical model on cheverons at fatigue fast fracture region	20
2.8 Difference between fatigue striation and diapause strips by enviroment damage	21
References	22

Chapter 3 Main models of fractography quantitative analysis	23
3.1 Features and formation mechanism of fatigue cracks	23
3.1.1 Initiation and propagation of fatigue cracks	24
3.1.2 Initial stage of fatigue cracks	24
3.1.3 Steady propagation stage of fatigue cracks	25
3.1.4 Fast fracture stage of cracks	28
3.1.5 Mechanism of different crack propagation stages	29
3.2 Stage characteristic of fatigue crack propagation	35
3.2.1 Propagation rate curve of fatigue crack	35
3.2.2 Crack propagation rate expression based on ΔK	36
3.3 Paris Formula	38
3.3.1 Fatigue propagation life quantitative inversion by Paris Formula	39
3.3.2 Fatigue stress quantitative inversion by Paris Formula	43
3.3.3 Initial fatigue quality quantitative inversion by Paris Formula	44
3.4 Tabulation trapezoidal method	45
3.5 Quantitative analysis methods by macro fracture features	47
3.6 Frost & Dugdale Formula	49
3.7 Measuring methods of fatigue features	50
3.7.1 Observation and analysis of fatigue features	50
3.7.2 Measurement of fatigue striation	50
3.7.3 Measurement of beach marks	53