

抗疲劳制造原理与技术

Principle & Technology
Of Anti-Fatigue Manufacture

王珉 著

江苏科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

抗疲劳制造原理与技术/王珉著;左敦稳等
编. —南京:江苏科学技术出版社,1999.3
ISBN 7-5345-2769-4

- I. 抗…
- II. ①王…②左…
- III. 航空材料-疲劳理论
- IV. V250

抗疲劳制造原理与技术

著 者 王 珉
责任编辑 黄元森

出版发行 江苏科学技术出版社
(南京市中央路 165 号,邮编:210009)
经 销 江苏省新华书店
照 排 南京展望照排印刷有限公司
印 刷 江苏新华印刷厂

开 本 889mm×1194mm 1/32
印 张 18.75
插 页 6
字 数 460 000
版 次 1999 年 3 月第 1 版
印 次 1999 年 3 月第 1 次印刷
印 数 1—1 000 册

标准书号 ISBN 7-5345-2769-4/TH·68
定 价 42.00 元(精)

图书如有印装质量问题,可随时向我社出版科调换。

致 读 者

社会主义建设的根本任务是发展生产力,而社会生产力的发展必须依靠科学技术。当今世界已进入新科技革命的时代,科学技术的进步不仅是世界经济发展、社会进步和国家富强的决定因素,也是实现我国社会主义现代化的关键。

科技出版工作肩负着促进科技进步,推动科学技术转化为生产力的历史使命。为了更好地贯彻党中央提出的“把经济建设转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来”的战略决策,进一步落实中共江苏省委、江苏省人民政府作出的“科技兴省”的决定,江苏科学技术出版社于 1988 年倡议筹建江苏省科技著作出版基金。在江苏省人民政府、省委宣传部、省科委、省新闻出版局负责同志和有关单位的大力支持下,经省政府批准,由省科学技术委员会、省出版总社和江苏科学技术出版社共

同筹集,于1990年正式建立了“江苏省金陵科技著作出版基金”,用作支持自然科学范围内的符合条件的优秀科技著作的出版补助。

我们希望江苏省金陵科技著作出版基金的建立,能为优秀科技著作在江苏省及时出版创造条件,以通过出版工作这一“中介”,充分发挥科学技术作为第一生产力的作用,更好地为我国社会主义现代化建设和“科技兴省”服务;并能带动我省科技图书提高质量,促进科技出版事业的发展和繁荣。

建立出版基金是社会主义出版工作在改革中出现的新生事物,期待得到各方面给予热情扶持,在实践中不断总结经验,使它逐步壮大和完善。更希望通过多种途径扩大这一基金,以支持更多的优秀科技著作的出版。

这次获得江苏省金陵科技著作出版基金补助出版的科技著作的顺利问世,还得到江苏联合信托投资公司的赞助和参加评审工作的教授、专家的大力支持,特此表示衷心感谢!

江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会

DV85/02

前 言

人类开始认识疲劳已经有一百多年的历史了,由疲劳破坏所带来的恶果时时激励着人类不断地去探求和奋斗,以便完全掌握疲劳破坏发生的规律。以民用航空为例,从 1954 年英国彗星号喷气客机接连发生机毁人亡事故,到 1985 年日本航空公司 Boeing747 大型喷气客机由于后气密隔板突然发生疲劳破坏而坠毁,造成机上 520 人丧生的人间惨剧,这些事故都引起世界各国工业部门特别是航空工业部门的极大震惊。

尽管疲劳问题已经引起人们的重视,但疲劳破坏在国民经济各个部门仍不断发生。因此,认识疲劳、了解疲劳破坏的机理、探求抗疲劳设计和制造的方法并去指导现代工业技术的发展,已经成为一个重要课题。

抗疲劳制造技术是指在不改变零部件

材料和截面尺寸的前提下,通过在制造工艺过程中改变材料的组织及应力分布状态来提高零部件疲劳寿命的制造技术。如飞机起落架的内孔螺纹挤压成形技术,在超高强度钢的内孔中采用丝锥挤压来完成传统的车削螺纹,在成形出螺纹的同时对其根部实施强化,实现了起落架和机身同寿命的目标,这是典型的抗疲劳制造技术在航空工业中的具体应用。

到目前为止,国内外尚未见到一本全面、系统地介绍抗疲劳制造技术方面的专著,与当前正在形成的提高重要零部件寿命的抗疲劳制造技术的推广应用很不适应。为此,我们在近几年国家自然科学基金、航空科学基金项目研究以及博士和硕士研究生论文的基础上编写了此书,其目的是为了推动该项技术在我国的研究和推广应用,给广大从事这方面研究的科研人员、相关企业的技术人员和管理人员以及有关政府部门的决策人员提供一本全面、系统地介绍抗疲劳制造技术及其最新发展状况的教材或参考读物。

本书共 10 章,其突出的特点是内容系统、全面、工程实用性强,同时反映了近几年国内外在该领域的最新研究成果。

第一章绪论,主要介绍疲劳的定义、发展简史、研究现状以及抗疲劳制造方法。第二章金属表面理论与位错,主要介绍有关金属表面结构及位错的基本性质。第三章疲劳相关理论,主要介绍线弹性力学理论、疲劳破坏原理以及疲劳寿命预测理论,此外还对有关抗疲劳设计方法进行了介绍。第四章抗疲劳的研究分析方法,列举了有限元在抗疲劳研究分析中的应用,介绍了疲劳试验以及相应的测试分析技术。第五章抗疲劳制造原理,主要从影响疲劳性能的因素和提高零部件抗疲劳性能的途径两方面来进行阐述。第六章螺纹滚压和挤压技术,主要介绍螺纹滚压和冷挤压形变原理及技术。第七章孔的带开缝衬套冷挤压技术,主要介绍一种较为先进的孔冷挤压工艺原理及技术。第八章喷丸强化技术,主要介绍喷丸强化机理、工艺系统以及它在工业生产特别是在航

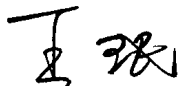
空工业中的应用。第九章高能束抗疲劳制造技术,主要对激光及等离子注入技术在抗疲劳制造技术中的应用进行阐述。第十章工程应用实例,列举了以上各工艺技术在航空制造工程中的应用实例。

本书在编写过程中,参阅并引用了国内外诸多同行专家、学者的研究成果,作者在此深表谢意。

本书的出版得到了江苏科学技术出版社的大力支持,作者表示衷心的感谢。

左敦稳博士、孙暄博士、傅仕伟博士和张永康博士在参加成稿工作中付出了辛勤的劳动,陈传飞、张华等人绘制了书中的图表,作者对他们表示诚挚的感谢。

由于“抗疲劳制造”这一概念提出的时间不长,还未形成完整的理论体系,本书的编写仅是一种尝试,加之成稿时间较短、作者水平有限,因此,缺点、错误在所难免,恳请读者提出宝贵意见。



1998年8月于南京

目 录

1	前言
1	第一章 绪论
2	第一节 疲劳基本定义
3	第二节 疲劳研究的发展简史
9	第三节 疲劳研究发展现状
13	第四节 抗疲劳制造方法简介
15	第二章 金属表面理论与位错
15	第一节 金属的界面与表面
15	一、金属的界面
16	二、金属的表面
17	三、表面粗糙度
19	四、微凸体的接触
22	五、塑性接触和形变硬化的影响
23	第二节 金属表面组织结构
23	一、金属的表面形貌
25	二、机械加工后的金属表面组织
26	三、金属表面晶体结构
30	第三节 位错的基本性质
30	一、位错的定义与柏氏矢量
32	二、位错的基本形式

38	三、位错强化机制
41	第三章 疲劳相关理论
41	第一节 线弹性断裂力学
42	一、断裂的宏观表现方式
43	二、应力强度因子 K
46	三、 K 控制的条件
48	四、断裂韧性
52	五、线弹性断裂力学在非完全弹性体中应力的推广
58	第二节 金属的疲劳破坏机理
59	一、疲劳裂纹萌生
62	二、疲劳裂纹扩展
66	三、最后断裂
66	四、疲劳断口的特征
72	第三节 疲劳的累积损伤理论
72	一、线性累积损伤理论
73	二、修正线性损伤理论
74	三、其他理论
74	第四节 疲劳裂纹扩展理论及寿命预测
74	一、疲劳裂纹扩展理论
76	二、疲劳裂纹扩展寿命预测
79	第五节 抗疲劳设计方法
79	一、无限寿命设计法
79	二、名义应力有限寿命设计法
80	三、局部应力应变分析法
82	四、损伤容限设计法

84	五、疲劳可靠性设计
87	第四章 抗疲劳的研究分析方法
87	第一节 有限元分析理论基础及应用
87	一、塑性变形体模型及屈服准则
90	二、加载条件与加载曲面
93	三、弹塑性本构关系及其矩阵表达式
97	四、有限元分析过程
102	五、小弹塑性有限元基本解法
104	六、残余应力的计算
104	七、工程应用实例——冷挤压孔的有限元分析
108	第二节 上限元理论及其应用
110	一、上限元法(UBET)的理论基础
110	二、上限元法在分析内螺纹挤压成形中的应用
118	三、计算实例
121	第三节 疲劳试验
122	一、疲劳试验与设备的分类
123	二、疲劳特征试验分类
137	三、疲劳试验数据分析和处理
140	第四节 测试分析方法
140	一、光塑性力学分析
160	二、云纹法
166	三、X射线应力测试方法
170	四、电子显微分析

176	第五章 抗疲劳制造原理
176	第一节 各因素对疲劳性能的影响
177	一、材料静强度的影响
179	二、显微组织的影响
183	三、热处理组织的影响
186	四、表面状况的影响
187	五、应力集中的影响
189	六、尺寸效应的影响
190	七、表层残余应力的影响
197	八、腐蚀环境的影响
200	九、载荷频率的影响
201	第二节 提高零部件疲劳性能的途径
201	一、减少应力集中
205	二、提高零件的表面强度
208	三、配合连接过程中提高疲劳寿命的途径
209	第六章 螺纹滚压和挤压技术
209	第一节 概述
210	第二节 螺纹滚压
211	一、螺纹滚压成形过程及其特点
215	二、螺纹滚压加工方法
220	三、螺纹滚压参数的选择
227	四、螺纹滚压工具
229	五、滚压螺纹质量分析
230	第三节 内螺纹挤压成形概述
230	一、内螺纹挤压成形的优缺点
232	二、内螺纹挤压成形的研究现状

233	三、内螺纹冷挤压成形的理论基础
234	第四节 内螺纹冷挤压成形与增寿机理
234	一、内螺纹冷挤压成形机理
240	二、挤压螺纹表层组织结构的变化与作用
241	三、螺纹表面显微硬度与疲劳性能
245	四、采用不同挤压工艺时螺纹的残余应力
251	五、表面粗糙度的影响
252	第五节 高强度钢内螺纹冷挤压成形的 试验研究
252	一、技术关键与技术路线
254	二、挤压丝锥的设计
259	三、工件对内螺纹冷挤压成形的影响
265	四、挤压速度对内螺纹冷挤压的影响
267	五、冷却润滑液对内螺纹冷挤压的影响
271	六、挤压螺纹的质量分析
278	七、大直径内螺纹的冷挤压成形试验
281	八、挤压丝锥的损伤机理
288	第六节 疲劳对比试验
288	一、试验条件
289	二、试验结果与讨论
291	三、疲劳断口分析
294	四、改善螺纹零件疲劳性能的途径
296	第七章 孔的带开缝衬套冷挤压技术
296	第一节 概述
297	一、孔的抗疲劳强化技术
303	二、孔的冷挤压技术的研究现状

308	第二节 孔的带开缝衬套冷挤压工艺
308	一、工艺系统的基本硬件组成
316	二、带开缝衬套冷挤压工艺过程
317	三、带开缝衬套冷挤压工艺参数
322	四、带开缝衬套冷挤压工艺质量控制
324	第三节 孔壁受力分析及疲劳寿命预测
324	一、孔壁受力及残余应力分析
327	二、弹塑性应力场分析
335	三、工程寿命预测模型的建立
339	第四节 带开缝衬套冷挤压孔的微观分析
340	一、试验条件及分析方法
343	二、强化层微观结构分析
354	三、位错强化机理分析
356	第五节 疲劳对比试验及断口宏、微观分析
357	一、试验条件
359	二、试验结果与分析
363	三、疲劳断口分析及裂纹扩展特征
369	第六节 材料对挤压强化效果的影响
369	一、冷挤压强化中常用工件材料
370	二、材料对冷挤压强化的敏感性
375	第八章 喷丸强化技术
375	第一节 概述
378	第二节 喷丸强化机理
378	一、喷丸表层的弹塑性变形和残余压应力

387	二、喷丸后表层的组织结构变化
393	三、喷丸对表面粗糙度的影响
394	第三节 喷丸设备及弹丸
395	一、气动式喷丸机
399	二、机械离心式喷丸机
401	三、内孔喷丸机
401	四、手提式气动喷丸机
402	五、旋片(板)喷丸器
404	六、零件运转机构
405	七、喷丸设备的选择原则
406	八、弹丸
408	第四节 喷丸强化工艺及质量控制
408	一、喷丸强化工艺参数
411	二、喷丸强化工艺质量的控制和检验
415	第五节 喷丸强化工艺对疲劳强度的影响
416	一、钢制零件喷丸强化的效果
420	二、铝合金的喷丸强化效果
421	三、钛合金的喷丸强化效果
424	四、高温合金的喷丸强化效果
425	五、飞机结构材料的喷丸强化效果
429	第九章 高能束抗疲劳制造技术
429	第一节 概述
435	第二节 激光相变硬化
435	一、激光相变硬化的参数控制
444	二、各种材料抗疲劳性能的改善

458	第三节 激光冲击强化
458	一、激光冲击过程分析
467	二、激光冲击区表面质量对疲劳寿命的影响
477	三、激光冲击强化效果的直观检验与控制
484	四、激光冲击抗疲劳断裂优化试验
495	五、激光冲击改善材料抗疲劳性能的机理分析
513	第四节 激光表面合金化
513	一、试验方法
514	二、试验结果分析
518	第五节 爆炸冲击
523	第六节 离子注入表面处理
523	一、离子注入的特点
524	二、离子注入改善材料抗疲劳性能的机理
528	三、离子注入抗疲劳试验结果及分析
537	第十章 工程应用实例
537	第一节 螺纹挤压强化工艺应用实例
538	第二节 带开缝衬套冷挤压工艺应用实例
538	一、飞机制造中的应用实例
547	二、飞机维修中的应用实例
550	第三节 喷丸强化工艺应用实例
560	参考文献

第一章

绪 论

随着现代科学技术的飞速发展,现代工业设备要求在高温、高速、高压等条件下使用的场合越来越多,承受的交变应力越来越高,疲劳破坏问题日益突出。现代工业中的许多关键性动力设备,如发动机的涡轮转子、叶片,核压力容器和核燃烧器件等都严重地遭到疲劳的袭击。根据国外的统计,在现代工业各个领域,大约有 80% 以上的结构强度破坏都是由于疲劳破坏造成的,如轴、曲轴、连杆、齿轮、弹簧、螺栓、压力容器、海洋平台、汽轮机叶片和焊接结构等,很多机械零部件和结构件的主要破坏方式都是疲劳,而且遍布在工业、交通、军事等要害部门,给航空、造船、交通运输、动力机械、化工机械、工程机械等工业造成严重威胁。因此,机械零件的抗疲劳设计和制造已成为现代工业生产中的重要课题。

为了更好地探讨抗疲劳的制造方法和原理,本章先介绍有关疲劳的基本定义以及相关理论。

第一节 疲劳基本定义

疲劳是一门包含许多学科的研究分支,涉及的知识面很广,不仅与固体力学中的弹性力学、塑性力学、断裂力学、振动、应力分析关系很密切,还跟数学、物理、化学、冶金、机械、金属物理等学科有千丝万缕的联系。它既包括微观领域,又包括宏观模型;既有机理和理论的研究,又有实验科学的分析。1964年,日内瓦的国际标准化组织(ISO)在《金属疲劳试验的一般原理》中给疲劳下了一个描述性定义:金属材料在应力或应变的反复作用下所发生的性能变化叫疲劳。美国材料试验学会对疲劳的定义为:材料在某一点或某些点上受到变化的应力和应变,经过足够次数的变化后最终产生裂纹或完全断裂,在材料结构中局部渐进发生的这种永久变化过程称之为疲劳。

疲劳学主要研究材料或结构在交变载荷作用下的强度问题、应力状态与寿命的关系。疲劳破坏是指当材料或结构受到多次重复变化的载荷作用后,应力值虽然始终没有超过材料的疲劳极限,甚至比弹性极限还低的情况下就可能发生的破坏,是一种在交变载荷重复作用下材料或结构的破坏现象。在上述定义中,“局部”表明疲劳过程是在局部区域而不是在整个零件或结构上起作用,而“渐进性”是指疲劳过程是在一段时间或使用时间内发生,疲劳破坏往往来得很突然,表面上并无任何迹象可寻。一般,疲劳破坏有以下特点:

- ① 疲劳破坏是循环应力或循环应变作用下的破坏。
- ② 疲劳破坏必须经历一定的载荷循环次数。
- ③ 零件或试样在整个疲劳过程中不发生宏观塑性变形,其断裂方式类似于脆性断裂。
- ④ 疲劳断口上明显地存在两个区域。