

机械连接结构的微动 疲劳理论与工程应用

李 欣 ◎ 著

FRETTING FATIGUE THEORY AND
ENGINEERING APPLICATIONS
OF MECHANICAL CONNECTION
STRUCTURES



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

机械连接结构的微动 疲劳理论与工程应用

李 欣 ◎ 著

FRETTING FATIGUE THEORY AND
ENGINEERING APPLICATIONS
OF MECHANICAL CONNECTION
STRUCTURES



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

微动疲劳是机械连接结构最常见的一种失效形式, 绝大多数的机械紧密配合, 如螺栓连接、榫连接、铆接、花键连接等在交变载荷或振动环境下都会发生微动问题, 严重影响机械装备的可靠性和服役性能。本书从工程实践中导致机械连接结构微动疲劳的一般模式出发, 系统介绍微动疲劳的损伤机理、研究方法和试验手段, 并以典型螺栓连接结构和高强化内燃机紧固连接结构微动疲劳问题为例, 介绍了微动疲劳理论在实际工程问题中的应用。

本书将理论与工程实践相结合, 考虑复杂交变载荷对微动疲劳行为的影响, 加深了对微动疲劳损伤机理的理解, 可为机械紧固连接结构的抗疲劳设计及装配工艺的制定提供指导。

本书可作为机械疲劳和摩擦学相关领域的科研技术人员、学校师生的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

机械连接结构的微动疲劳理论与工程应用 / 李欣著. — 北京: 北京理工大学出版社, 2019.8

ISBN 978-7-5682-7308-4

I. ①机… II. ①李… III. ①机械元件-联接-微动磨损-研究 IV. ①TH131

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第150022号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710毫米×1000毫米 1/16

印 张 / 11.25

字 数 / 177千字

版 次 / 2019年8月第1版 2019年8月第1次印刷

定 价 / 46.00元

责任编辑 / 张海丽

文案编辑 / 张海丽

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

微动疲劳作为一种物理-化学过程,其机理与演化行为非常复杂,涉及机械强度学、摩擦学、接触力学和材料学等多个学科。微动导致紧固连接结构的接触面发生局部磨损,进而使零部件更容易发生疲劳失效,导致结构疲劳寿命急剧下降。另外,微动疲劳现象发生在两零部件的接触面内,隐蔽性强,难以及时发现,较常规疲劳问题更为危险。微动疲劳广泛存在于机械紧固连接结构中,是螺栓连接、榫连接、铆接、花键连接和过盈配合等结构的主要失效形式。因此,微动疲劳引起了航空航天、核能、交通运输、海洋船舶等对安全性和可靠性要求较高的工业部门的高度重视,甚至在生物医学、电工行业也出现了因微动疲劳导致的严重失效问题。可见,微动问题涉及的工业领域广泛,引起的失效问题突出,因此被称为“工业的癌症”。

虽然人们发现微动现象已有近100年的时间,但由于微动现象的复杂性,至今仍未见对其机理有突破性认识的理论出现,甚至在某些基本概念上,研究者之间还存在着较大的分歧。鉴于国内专门论述微动疲劳问题的著作较少,少数几本经典著作发表时间较早,有必要对近些年国内外学者对微动疲劳问题的研究进展进行介绍。本书试图对微动疲劳相关的概念、理论和研究方法进行梳理,结合作者近些年对微动疲劳问题的研究成果,以期抛砖引玉,促进相关学者对微动问题的研究。

本书从微动疲劳的基本概念及主要影响因素、微动摩擦学与接触力学基本理论、微动疲劳试验设计与试验方法、微动疲劳损伤机理与定量分析方法、多轴交变载荷作用下的微动疲劳分析、微动疲劳工程案例等方面对微动疲劳问题进行阐述和分析。可作为机械疲劳及摩擦学相关领域的科研技术人员、学校师生的参考书。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金面上项目(51275043)、中国博士后科学基金项目(2016M591060)的资助和支持,在此表示感谢。

感谢北京理工大学左正兴教授、廖日东教授、张卫正教授、覃文洁副教授、刘金祥副教授,北京建筑大学杨建伟教授的指导与支持。

本书的研究方法和试验技术难免存在不足,敬请广大读者指正。

目 录

第1章 概述	1
1.1 微动疲劳的基本概念	1
1.1.1 微动疲劳的概念和基本术语	1
1.1.2 微动疲劳的损伤机理及其与微动磨损的区别和联系	3
1.2 工程中的典型微动失效问题	5
1.2.1 各种紧固连接结构	6
1.2.2 榫连接	8
1.2.3 弹性支撑与间隙配合	10
1.2.4 过盈配合	12
1.2.5 柔性绳索	13
1.3 学科的形成与发展	14
1.4 微动疲劳损伤规律研究的分析方法	16
1.4.1 试验方法	16
1.4.2 理论研究方法	18
1.4.3 数值分析方法	21
1.5 微动疲劳的主要影响因素	23
第2章 微动的力学与摩擦学理论	26
2.1 引言	26
2.2 微动的接触力学理论	26
2.2.1 弹性接触的 Hertz 理论	27
2.2.2 非协调接触的初始滑动问题	31
2.2.3 考虑远端载荷时的初始滑动问题	33
2.2.4 协调接触的问题	35

2.3	微动摩擦学的基本理论	38
2.3.1	三体理论	39
2.3.2	微动图理论	40
2.3.3	能量耗散理论	42
2.4	有限元接触算法	43
2.4.1	接触系统的约束条件	43
2.4.2	接触问题的虚位移原理	44
2.4.3	接触问题的数值算法	44
2.4.4	有限元接触分析中的几个问题	47
2.4.5	微动疲劳接触区有限元应力场分析	49
2.5	小结	51
第3章	微动问题的试验研究方法	53
3.1	引言	53
3.2	微动疲劳典型试验的原理及主要控制参数	54
3.3	微动疲劳试验工况	56
3.4	微动现象的分析方法	56
3.5	典型微动疲劳试验系统	57
第4章	微动疲劳损伤模型	60
4.1	引言	60
4.2	微动疲劳损伤模型的建立	60
4.2.1	微动疲劳参数对微动疲劳行为的影响分析	61
4.2.2	微动损伤相关系数的建立	64
4.2.3	多轴疲劳的临界面法	66
4.3	微动疲劳损伤模型预测结果分析	70
4.3.1	试验数据	70
4.3.2	临界面位置的分析方法	71
4.3.3	微动疲劳模型预测结果及适用性分析	74
4.4	小结	78
第5章	多轴交变载荷作用下微动疲劳行为研究	80
5.1	问题来源与研究目的	80
5.2	多轴交变载荷作用微动疲劳试验系统设计	81
5.2.1	加载系统的结构设计	81
5.2.2	试件与微动垫的结构设计	84

5.3	试验系统的加载原理	85
5.4	试验方案的确定	86
5.5	试验结果分析	88
5.5.1	试件磨损和疲劳裂纹分析	88
5.5.2	法向载荷的动态特性对微动疲劳行为的影响	90
5.6	小结	94
第6章	螺栓连接微动疲劳特性研究	95
6.1	引言	95
6.2	影响螺栓连接疲劳性能的主要因素	97
6.3	螺栓连接的受力形式	98
6.4	螺栓连接的疲劳试验研究	99
6.4.1	试验设计	99
6.4.2	螺栓连接的预紧力控制	100
6.4.3	试验流程	101
6.5	仿真分析	101
6.6	结果讨论	102
6.6.1	有限元分析结果	102
6.6.2	试验结果分析	106
6.7	小结	109
第7章	内燃机微动疲劳损伤的试验研究	111
7.1	引言	111
7.2	V型内燃机载荷模式分析	112
7.2.1	V型内燃机典型工况受力分析	112
7.2.2	V型内燃机主轴承载荷的典型模式分析	115
7.3	结构模型设计	116
7.4	试验系统设计	117
7.5	试验参数设计	120
7.5.1	试验载荷的确定	120
7.5.2	螺栓预紧力的测量与施加	121
7.6	试验结果	125
7.7	小结	128
第8章	内燃机典型载荷下接触行为有限元分析	129
8.1	引言	129

8.2	子模型法	130
8.2.1	局部子模型的建立	130
8.2.2	子模型接触分析流程	131
8.3	紧固面接触有限元计算结果分析	135
8.3.1	机体隔板与主轴承盖紧固面接触分析结果	135
8.3.2	结构模型接触分析结果	143
8.4	小结	146
第9章	内燃机紧固面微动疲劳损伤机理及预防措施	147
9.1	引言	147
9.2	内燃机典型载荷下的紧固面微动疲劳行为和机理研究	147
9.2.1	内燃机机体微动疲劳行为分析	147
9.2.2	V型内燃机机体与主轴承盖紧固面微动疲劳机理	149
9.3	缓解内燃机微动疲劳的措施	150
9.4	小结	154
附录		156
参考文献		161

第 1 章

概 述

1.1 微动疲劳的基本概念

1.1.1 微动疲劳的概念和基本术语

当相互接触的两弹性体处于振动工况时，虽然在法向（接触面法线方向）载荷的作用下，从宏观层面上接触表面保持“近似紧固”的状态，但在微观层面，由于切向（接触面平行方向）载荷以及两弹性体非协同形变的作用，会在接触区局部产生相对的滑动，这一相对滑动一般为微米量级，称之为“微动”（fretting）。如图 1.1 所示，由于微动的存在，机械零部件接触表面发生磨损，或引起疲劳裂纹的萌生与扩展，最终导致整个机械连接结构的失效。

微动疲劳（fretting fatigue）是指在交变载荷作用下，相互接触的两表面间发生微小的滑动（一般其位移量为微米级，通常在几微米到几百微米之间），进而加速疲劳裂纹的萌生和扩展，导致疲劳失效的现象。由微动磨损导致接触表面的损伤，在交变载荷的作用下，更容易发生疲劳破坏。相同试件的疲劳试验，存在微动作用时的疲劳寿命比不存在微动作用时的疲劳寿命降低 30%~50%。对大量试验数据的研究发现，微动条件下材料的疲劳极限会降低到普通疲劳极限的 1/4。罗尔斯·罗伊斯公司（Rolls-Royce）对航空发动机的一些关键零件的研究表明，微动损伤导致构件的

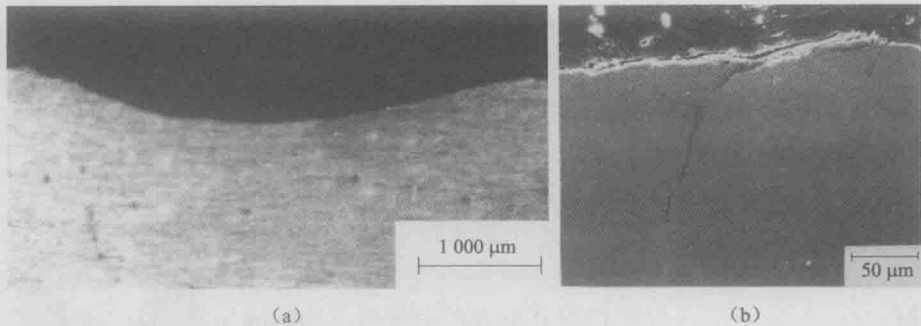


图 1.1 微动产生的磨损和疲劳裂纹
(a) 微动产生的磨损; (b) 微动产生的疲劳裂纹

使用寿命下降约 30%，特别是对长寿命构件的影响更严重。微动疲劳造成的失效在工业领域广泛存在，绝大多数的机械紧密配合，如螺栓连接、榫连接、铆连接和花键连接等都易发生微动疲劳现象。

由于微动现象与机理的复杂性，对微动问题的研究又分为微动磨损、微动疲劳和微动腐蚀等几个研究方向，不同学者对微动概念的理解也有所不同。为便于表述和开展研究工作，本书以美国材料与试验协会（ASTM）规定的术语为准，一些主要名词和术语说明如下：

微动（fretting）：微小振幅的往复运动，通常为两接触表面的切向运动。

微动损伤（fretting damage）：由微动引起的接触表面的凹陷、划痕、剥落以及材料的转移。

微动疲劳（fretting fatigue）：在微动和脉动应力与应变共同作用下的微动损伤位置的裂纹形成、扩展及完全断裂的过程。

常规疲劳（plain fatigue）：一般用来描述不存在微动情况的疲劳问题。

微动磨损（fretting wear）：由于微动引起的磨损。

法向载荷（normal force）：接触界面法线方向的载荷。

切向牵引力（tangential force）：与接触界面平行的作用力。

滑移（slip）：接触表面的局部滑动。

部分滑移（partial slip）：在一个加载循环中，接触体的接触面上只有部分发生相对滑动的接触状态。

全局滑移（gross slip）：在一个加载循环中，接触体的接触面上所有对应点都发生相对滑动的接触状态。

滑移量（displacement amplitude）：峰-峰相对位移除以 2 或总循环位移除以 4。

1.1.2 微动疲劳的损伤机理及其与微动磨损的区别和联系

微动疲劳是在微动损伤影响下的疲劳破坏。已有的研究表明,微动在大多数情况下影响裂纹的成核、微裂纹的萌生、微裂纹扩展、宏观裂纹的形成和早期扩展,为微动裂纹的萌生和扩展提供了推动力。从宏观上讲,推动力包括:

(1) 微动时作用在接触表面的切向力产生的剪切应力。根据剪切互等定理,材料微元体所受的剪切应力有两组,分别平行和垂直于接触表面。平行于接触表面的剪切应力引起平行于表面的裂纹,并在此方向上扩展,导致材料的脱层损失;垂直于表面的剪切应力引起垂直于接触表面的裂纹,并在垂直方向上扩展,形成疲劳裂纹。

(2) 微动表面的接触压力。在接触区材料内部形成剪切应力和拉应力,促使在其作用方向上的裂纹萌生和扩展,对疲劳损伤起主要作用。

(3) 受力结构承受的远端轴向载荷。发生微动疲劳破坏的构件一般情况下会承受平行于微动滑移方向的载荷作用,这种载荷与微动共同作用,是微动疲劳裂纹萌生和扩展的主要动力之一。

Sproles 等对前人的研究成果进行了总结,提出了一个裂纹萌生模型,如图 1.2 所示。这一模型将微动疲劳裂纹的萌生过程分为 4 个阶段:

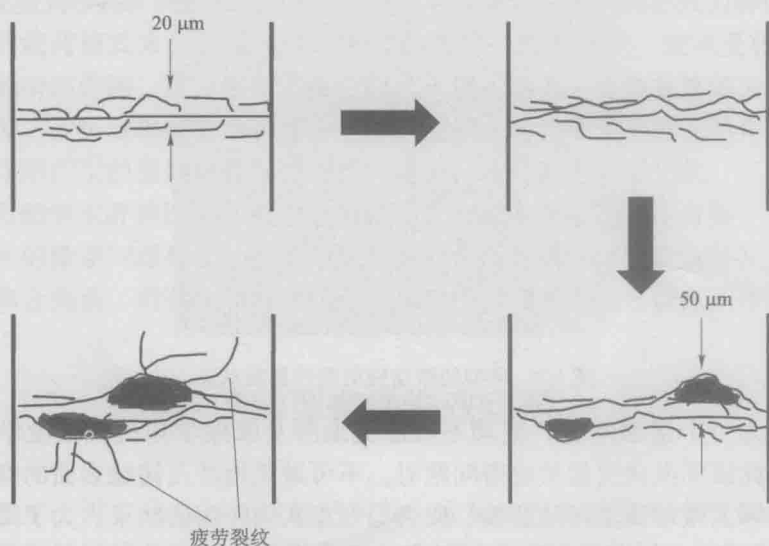


图 1.2 微动疲劳裂纹的萌生过程

(1) 由于接触表面微动摩擦力的作用形成深度为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右的平行和垂直于表面的微裂纹层。

(2) 微裂纹扩展形成表面脱层，进而形成磨屑。

(3) 由于裂纹的增加形成深达 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的深坑，疲劳裂纹从此处产生。

(4) 经历脱层和磨损的表面应力分布复杂，形成不同方向的裂纹。

在裂纹萌生的初始阶段，往往会在深坑的底部形成多条微裂纹，在微动磨损的作用下，大部分微裂纹被磨掉，无法形成扩展型裂纹。只有少数裂纹在外加载荷的作用下形成最终的扩展型裂纹。这一过程又可分为两个阶段：

(1) 在微动力和外加载荷的作用下向深度方向扩展。一般表现为裂纹沿与接触面倾斜的方向扩展。

(2) 当裂纹达到一定深度后，微动作用逐渐减弱，对裂纹的进一步扩展已不起作用，从此裂纹扩展只受远端外载荷的作用。裂纹转向与接触面垂直的方向。

典型的微动疲劳裂纹扩展状态如图 1.3 所示。

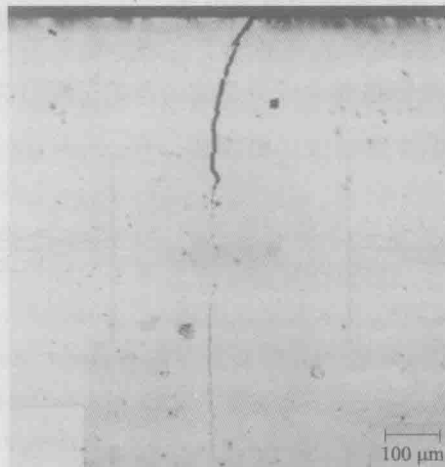


图 1.3 典型的微动疲劳裂纹扩展状态

作为一个接触问题，微动不可避免地涉及摩擦学和机械强度学等学科，因此谈到微动引起的疲劳问题时，不可避免地涉及接触表面的磨损问题。实际上微动现象正是磨损、疲劳等现象共同作用的结果。为了降低研究难度，研究者分别应用机械强度学和摩擦学的研究方法对微动问题开展研究工作，这就形成了所谓的“微动疲劳”和“微动磨损”的概念。

从研究的对象来讲,微动疲劳侧重于考察微动引起的裂纹形成、扩展和疲劳断裂的问题;微动磨损侧重于研究由于微动引起的黏着、磨料、氧化和磨损等问题。

从损伤机理来讲,微动磨损指两接触体在较大的接触压力和微动的共同作用下,在接触表面引发裂纹,在往复的微动作用下,裂纹扩展进而使接触表面的材料脱离母体形成磨屑,磨屑又进一步参与到接触表面的磨损中来。由于接触体除承受接触压力和微动所需的很小的推动力之外,不受其他形式载荷的作用,损伤的宏观表现形式为接触表面材料的剥落和磨损。该状态下,一般不会造成整个结构的疲劳破坏。微动疲劳指构件或材料一方面在表面某处受到微动的作用,另一方面自身还承受较大的外部交变载荷(拉压、弯曲、扭转及其合成载荷,称为远端载荷)。微动或微动与外载荷的共同作用使接触表面产生裂纹,进而扩展,宏观上表现为构件的疲劳断裂。

从接触状态来讲,微动疲劳一般发生在相对滑移量较小,接触表面处于局部滑移的状态下。此时接触区边缘位置的应力集中加大,磨损量相对较小,有利于疲劳裂纹的萌生和扩展,进而产生疲劳断裂。微动磨损一般发生在相对滑移量较大,接触表面处在全局滑动的状态下。在该状态下,接触表面整体的磨损率都较高,由于微动或外部载荷萌生的微裂纹很容易被磨掉,无法形成持续的扩展进而发生疲劳断裂,接触体的主要失效形式为磨损。

从载荷模式来讲,发生微动磨损的构件一般不承受(或承受较小的)外部载荷的作用,这就限制了疲劳裂纹扩展的动力,导致最终的失效形式为磨损。发生微动疲劳的构件一般会承受较大的外部交变载荷的作用,使微动作用产生的微裂纹有足够的扩展动力,最终发生疲劳失效。

虽然学术界将微动问题划分为微动疲劳和微动磨损两个方面,但实际工程中的微动问题往往是疲劳与磨损共同作用的结果。两者既存在竞争也存在耦合关系,需要针对具体问题,从损伤机理入手开展研究工作。

1.2 工程中的典型微动失效问题

理论上讲,凡是相互接触的构件,在振动环境或受到交变载荷作用时,接触区域均会产生微动现象。在机械行业的很多部门,如航空航天、核能工业、铁路运输、海洋船舶等部门均有因微动引发的失效问题,甚至

在生物医学、电子工业等领域也存在因微动导致的严重失效。

由于微动疲劳的隐蔽性强，失效形式与常规疲劳和磨损现象类似，导致失效分析中难以甄别，现将典型的微动疲劳问题总结如下，以供参考。

1.2.1 各种紧固连接结构

常用的紧固连接方式，如螺栓连接和铆接等，当被连接件承受横向交变载荷（平行于接触面方向的载荷）或处在振动环境中时，均易发生由微动引起的失效。虽然螺栓或铆钉的预紧作用将被连接件压紧在一起，根据圣维南原理可知，预紧力的作用范围是有限的。如图 1.4 所示，距离预紧力作用点越远，接触压力越小，导致当被连接件承受横向载荷作用时，接触区外沿会发生微动现象。易发生微动损伤的位置如图 1.5 所示。

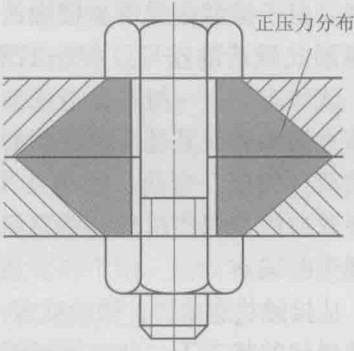


图 1.4 螺栓连接被连接件的应力分布情况

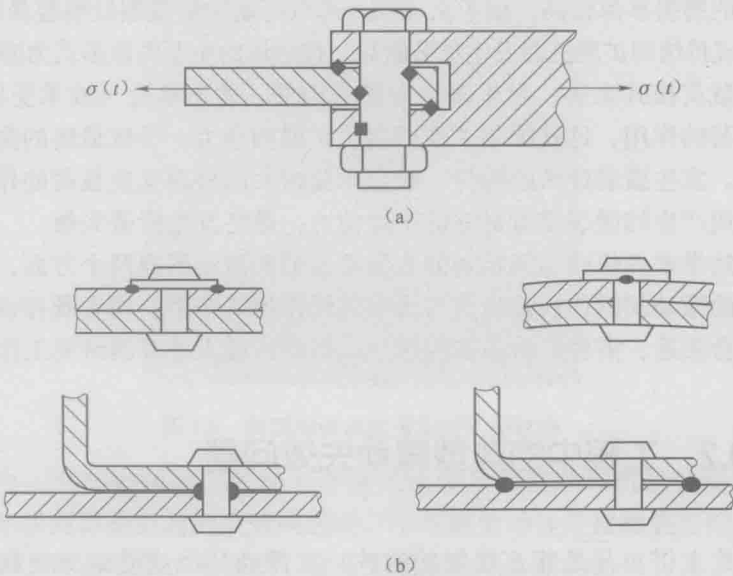


图 1.5 连接结构常见的微动损伤位置

(a) 螺栓连接易发生微动损伤的位置；(b) 铆接易发生微动损伤的位置

典型案例1：某强化V型柴油机机体-主轴承座紧固面微动疲劳问题。

某V型柴油机样机在进行耐久性考核至387 h时，机体第二隔板发生疲劳破坏，拆解后发现，主轴承盖与机体隔板紧固连接位置有明显的磨损现象，裂纹在主轴承盖与隔板的紧固面的中间部位萌生，进而不断扩张。至发现故障停机时，机体隔板仅有一侧约50 mm与机体相连。其微动疲劳失效如图1.6所示。

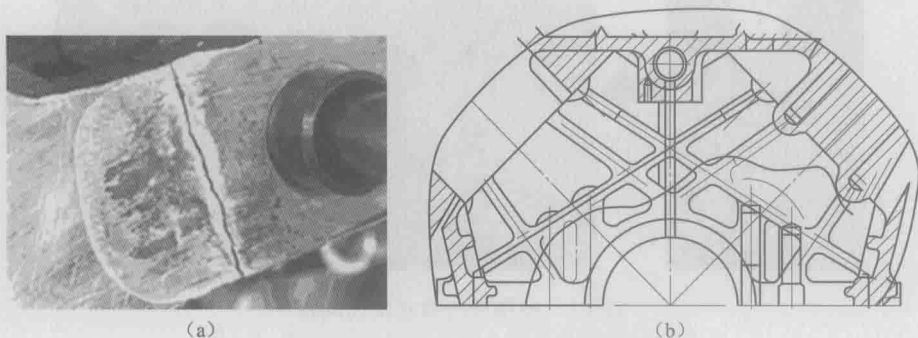


图1.6 内燃机机体紧固面的微动疲劳失效

(a) 机体与主轴承座螺栓连接紧固面上的微动疲劳裂纹；(b) 机体隔板疲劳裂纹的扩展情况

典型案例2：飞机蒙皮铆接的微动疲劳失效。

2002年5月25日，中国台湾“华航”B747-200 B型飞机发生坠海事故，导致225名乘客及机组成员遇难。事故调查原因为机尾下方蒙皮的铆接处发生微动疲劳，导致机体结构损坏。飞机蒙皮铆接孔附近的微动疲劳裂纹如图1.7所示。北大西洋公约组织航空研究报告指出，约90%的飞机结构件的疲劳破坏起始于微动造成的损伤。

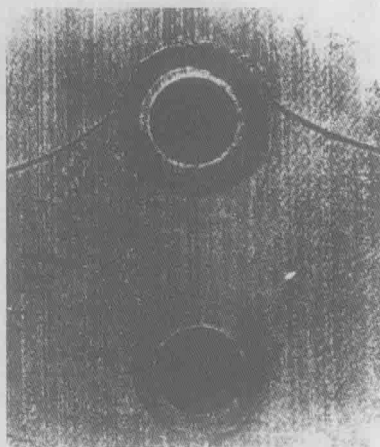


图1.7 飞机蒙皮铆接孔附近的微动疲劳裂纹

典型案例3：种植牙的微动损伤问题。

种植牙是一种常规的口腔外科手术，采用带螺纹的牙根材料与牙床紧固连接，并在其上安装人工牙冠。由于金属钛耐

磨性和耐腐蚀性好,弹性模量低,与骨相近,能产生共振;无毒无副作用,无刺激,在体内能够保持长期稳定,生物相容性好,为牙根的理想材料。然而,如图1.8所示,由于牙齿在咀嚼过程中受到交变载荷的作用,钛合金牙根易发生微动疲劳失效。

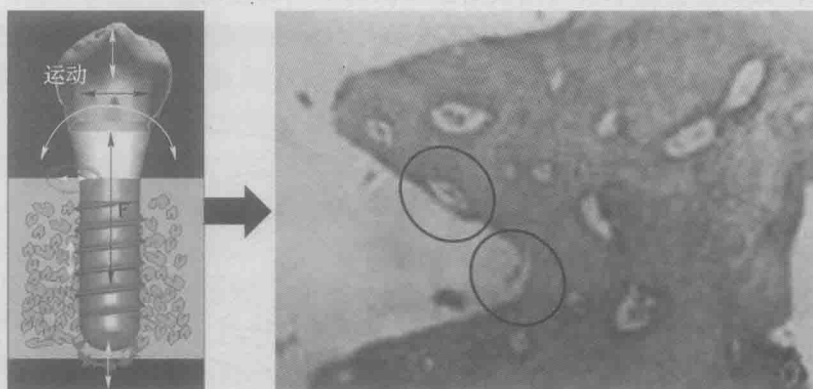


图1.8 种植牙的微动损伤问题

1.2.2 榫连接

榫连接结构是工程中一种重要的连接形式。最典型的应用为航空发动机轴流式压气机、涡轮以及燃气轮机等动力机械中叶片与轮盘之间的连接。首先,由于结构极其复杂,将轮盘与叶片整体加工工艺上很难实现。其次,涡轮等部件通常工作在较高的温度下,为避免热应力带来的轮盘与叶片的疲劳问题,需要采用间隙配合的方式进行装配。再次,由于气动效应的影响,叶片在工作过程中会产生高频振动,利用榫连接产生的接触阻尼作用,可缓解振动对叶片带来的危害。基于榫连接的上述特点,导致其叶片榫头与轮盘榫槽接触位置易发生微动疲劳问题。图1.9所示为航空发动机叶片的工作状态与受力特点。在非工作状态下叶片与轮盘处于放松状态,随着发动机转速的增加,叶片在离心力的作用下通过榫连接结构与轮盘压紧在一起,由于气动力作用,导致叶片发生摆动,进而在榫连接接触面上产生微动损伤。由图1.10可知,榫头接触区在微动作用下会产生纵向和横向的裂纹,其中横向裂纹的扩展是导致叶片断裂的主要原因。接触区的应力分布也表明,榫头发生横向裂纹的位置也基本为接触应力及切应力最大的位置。