

微动磨损

周仲荣 Léo Vincent 著



科学出版社

微 动 磨 损

周仲荣 Léo Vincent 著

国家杰出青年科学基金
国际合作项目 联合资助

科 学 出 版 社

2002

内 容 简 介

本书介绍了微动摩擦学的发展历史、研究现状和发展趋势,主要研究了微动磨损的动态过程、微动区域的划分、微动运行机制和破坏规律的二类微动图。着重探讨了疲劳裂纹萌生和扩展、表面磨损二种损伤机制和摩擦学白层的形成和演变机理,并从微动的角度比较了微动磨损和微动疲劳的内在联系。根据微动图理论,提出了减轻微动损伤的可能措施,讨论了固体、半固体和液体润滑介质对微动磨损的影响和润滑的有效性。最后,引用一个工业微动损伤的典型实例,对高空电缆失效问题进行了分析。

本书可供摩擦学、表面工程、机械工程、材料学、疲劳与失效、力学、生物医学工程等专业以及在交通运输、航空航天、电力、核电等工业领域从事产品研究、设计、制造、使用、维修等方面的科技人员和大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

微动磨损/周仲荣等著. —北京:科学出版社,2002

ISBN 7-03-009885-4

I. 微… II. 周… III. 微动磨损… IV. TH117.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第082758号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年3月第一版 开本:850×1168 1/32

2002年3月第一次印刷 印张:7 3/8

印数:1—2 500 字数:155 000

定价:20.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

微动是二接触表面的极小振幅(微米量级)的运动,通常发生在一个振动环境下的近似紧配合的接触表面。然而,由于没有宏观的相对运动,微动现象从设计到失效分析几乎未引起相关学者的重视。其实,微动可以造成接触表面摩擦磨损,引起构件咬合、松动或形成污染源等等;微动也可以加速裂纹的萌生、扩展,使构件的疲劳寿命大大降低。微动在许多工业重要部门已成为一些配合零部件失效的主要原因之一。

近一个世纪以来,不少学术期刊和学术会议发表了大量有关微动摩擦学方面的论文,研究成果丰硕。我国有二十余个科研单位先后涉及微动摩擦学的研究;1997年,在国家自然科学基金委的大力资助下,首届中国“微动摩擦学国际专题会议”在成都举行,该次会议引起国内外同行的极大兴趣,得到了高度评价,也是中国微动摩擦学的研究走向国际的重要标志。

微动通常可分为微动磨损、微动疲劳、微动腐蚀。本书是作者在广泛文献的基础上,总结了作者在微动磨损及相关领域的最新研究成果,并经系统分析整理编写而成。本书内容直接取材于作者在国内国外专业期刊上发表的学术论文和在国家杰出青年科学基金、国际合作项目等课题资助下取得的成果。撰写此书的目的在于向读者介绍该领域的最新进展,并在工程实际中推广应用这些成果,从而推动微动摩擦学学科的发展。

本书介绍了有关微动的基本知识及微动摩擦学的发展概况、基本理论,以帮助读者对本学科有一个较系统的了解,接着介绍了当前微动试验的主要设备以及本书内容所使用的测试材料、参数变化范围及分析手段,研究了微动磨损的动态过程、微动区域的划分,阐述了微动的运行机理和破坏规律的二类微动图,着重探讨了

微动磨损的二种破坏机制:微动裂纹的萌生和扩展、接触表面的磨损过程。根据微动的共性,本书比较、总结了微动磨损与微动疲劳的内在联系,根据微动图提出了预防和减轻微动磨损的措施,并着重讨论了在不同物理状态的润滑介质下的微动磨损特性及润滑效果,最后利用微动图理论研究分析了高空电缆的微动损伤。

需要指出的是,发现微动摩擦失效现象至今已近一个世纪,但由于试验设备、分析计算手段的限制,微动摩擦学的迅速发展主要起始于 20 世纪 80 年代,因此其基本概念、理论体系等都有待进一步完善。由于微动现象十分复杂,学科交叉性强,加上作者受到专业知识的限制,本书部分地方必然会存在一些欠妥之处,敬请广大读者批评指正。

本书部分章节的内容包含了我在法国留学期间我的导师 Léo Vincent 和我的合作研究成果。本书个别章节的部分内容包含了朱旻昊博士等的一些工作,编写工作也得到了他的大力协助,作者在此表示衷心的感谢。

在本书出版之际,作者铭记着已故导师——西南交通大学前校长孙翔,感谢他在我出国留学前后给予我的无私关心和支持,作者愿以此书告慰孙翔老师的在天之灵。

周仲荣

2001 年于成都

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 微动摩擦学的基本概念和实例	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 常见微动实例	3
1.2 微动摩擦学发展概况	7
1.2.1 历史回顾	7
1.2.2 发展现状和最新进展	9
1.3 微动摩擦学的弹性接触力学分析	11
1.3.1 静止接触状态——Hertz 弹性接触理论	11
1.3.2 完全滑移状态	14
1.3.3 部分滑移状态	17
1.3.4 部分滑移与完全滑移的相互转化	26
1.4 微动磨损机理	28
1.4.1 早期理论	28
1.4.2 微动磨损理论的新进展	30
1.5 微动疲劳失效的评估	33
1.5.1 微动疲劳强度评估-经验公式	34
1.5.2 裂纹萌生	34
1.5.3 裂纹扩展	36
1.6 小结	37
第 2 章 实验研究方法	38
2.1 微动试验系统	38
2.1.1 试验装置现状	38
2.1.2 微动磨损试验装置	39
2.1.3 微动疲劳试验装置	41
2.1.4 预应力下微动磨损试验装置	42

2.2	试验材料	42
2.2.1	铝合金	42
2.2.2	工业用合金钢	44
2.2.3	钛合金	45
2.2.4	聚合物	46
2.3	微动试验工况	47
2.3.1	载荷	47
2.3.2	位移振幅	47
2.3.3	频率	47
2.3.4	表面粗糙度	47
2.3.5	接触形式	47
2.3.6	微动循环次数	47
2.4	微动现象分析方法	48
第3章	微动图理论	49
3.1	摩擦力变化过程	49
3.1.1	初始过程	49
3.1.2	F_t - D 曲线	51
3.1.3	F_t - D 曲线的变化模式	54
3.2	微动区域	58
3.2.1	滑移区	58
3.2.2	部分滑移区	59
3.2.3	混合区	62
3.3	影响微动区域的因素	64
3.3.1	机械参量	64
3.3.2	材料性质	76
3.4	微动图	79
3.4.1	运行工况微动图	79
3.4.2	材料响应微动图	80
3.5	小结	82
第4章	微动损伤机理	83
4.1	微动裂纹	83
4.1.1	概述	83

4.1.2	裂纹萌生和扩展方式与微动区域的关系	88
4.1.3	裂纹长度	93
4.1.4	材料对微动裂纹的影响	98
4.2	表面磨损	104
4.2.1	一般过程	104
4.2.2	第三体的演变	106
4.2.3	颗粒剥离机理	108
4.2.4	小结	109
4.3	摩擦学白层	109
4.3.1	微动白层的起源和演变	111
4.3.2	微动白层的形成条件及其演变的预测	114
4.3.3	白层的形成机制	118
4.3.4	白层对磨损过程的影响	121
4.3.5	小结	122
第 5 章	微动磨损与微动疲劳	124
5.1	预应力下的微动磨损	124
5.1.1	微动图特性	124
5.1.2	裂纹扩展特性	125
5.1.3	应力-破坏分布图	127
5.2	微动疲劳	129
5.3	微动磨损与微动疲劳的关系	134
5.3.1	接触磨损与局部接触疲劳	134
5.3.2	局部接触疲劳与整体疲劳	137
5.4	小结	140
第 6 章	微动磨损的防护	141
6.1	防护措施概述	141
6.1.1	消除微动的滑移区和混合区	141
6.1.2	增加接触表面强度	142
6.1.3	降低摩擦系数	142
6.1.4	材料的选用和匹配	143
6.2	表面工程在微动摩擦学中的应用	143
6.2.1	表面机械强化	143
6.2.2	表面热处理与热化学处理	144

6.2.3	电镀与电沉积	145
6.2.4	热喷涂	146
6.2.5	气相沉积	147
6.2.6	高能密度处理	148
6.3	润滑对微动损伤的减缓作用	149
6.3.1	固体润滑及固体润滑涂层	149
6.3.2	半固体润滑	162
6.3.3	液体润滑	170
6.3.4	小结	179
第7章	工业微动实例——高空电缆失效的研究	183
7.1	试验方法概述	183
7.1.1	试验系统	184
7.1.2	电缆线及其夹紧机构	185
7.1.3	电缆及其夹持系统的载荷条件	188
7.2	接触分析	189
7.2.1	接触方式和微动斑	189
7.2.2	微动损伤区域图	190
7.2.3	微动区域和微动裂纹	195
7.2.4	铝导线断裂分析	197
7.3	单根导线的微动疲劳试验	200
7.3.1	试验装置	200
7.3.2	表面损伤	201
7.3.3	微动裂纹	203
7.4	润滑脂对电缆线微动疲劳性能的影响	206
7.4.1	微动斑	206
7.4.2	微动裂纹	208
7.4.3	微动损伤区域图	209
7.5	小结	211
	参考文献	212
	作者发表的主要相关文献	226

第 1 章 绪 论

1.1 微动摩擦学的基本概念和实例

1.1.1 基本概念

为区别于传统的滑动和滚动,微动(Fretting)指的是二个接触表面发生极小幅度的相对运动^[1,2],它通常存在于一个振动工况(如发动机运转、气流波动、热循环应力、疲劳载荷、电磁震动、传动等)下的“近似紧固”的机械配合件之中,一般其位移幅度为微米量级。相应地,微动摩擦学是研究微动运行机理、损伤、测试、监控、预防的学科。然而,望文生义,微动摩擦学经常被大家误解为一门非常特殊、狭窄的学科,而且由于接触表面没有宏观的相对运动,微动现象从设计、使用过程、失效分析及维修几乎未被大家认识,更谈不上重视。因此,在失效分析中,一般只强调材料质量、强度、磨损等问题,极少将配合面的微动摩擦作为考虑的一个因素。其实,微动在工程实际中普遍存在,涉及到学科如机械、材料、力学、物理、化学甚至生物医学、电工等也相当广泛。因此,其普遍性、复杂性和研究难度都远远超过常见的滑动和滚动摩擦。

微动可以造成接触表面摩擦磨损,引起构件咬合、松动、功率损失、噪声增加或污染源形成等;微动也可以加速疲劳裂纹的萌生和扩展,使构件的疲劳寿命大大降低。

实际的微动现象十分复杂,根据简单化的球/平面接触模型,按不同的相对运动方向,微动可分为四类基本运行模式(如图 1.1 所示):①切向式微动,或称平移式微动,这是最普遍的微动方式;②径向式微动;③滚动式微动;④扭动式微动。后面三种微动形式在工业中也经常出现,但研究报道相对很少。另外,综合两种以上基本微动模式或者上述微动模式与其他运动(如冲击)相结合的复

合式微动也时有发生,且问题更为复杂,研究工作也更少。

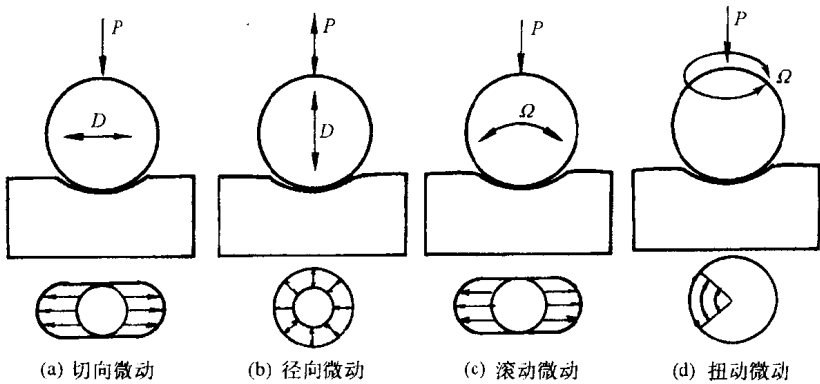


图 1.1 四种基本微动运行模式示意图

有关文献研究表明,绝大部分研究工作都集中在第一类平移式微动方面。它们又通常分为以下三种模式,如图 1.2 所示。

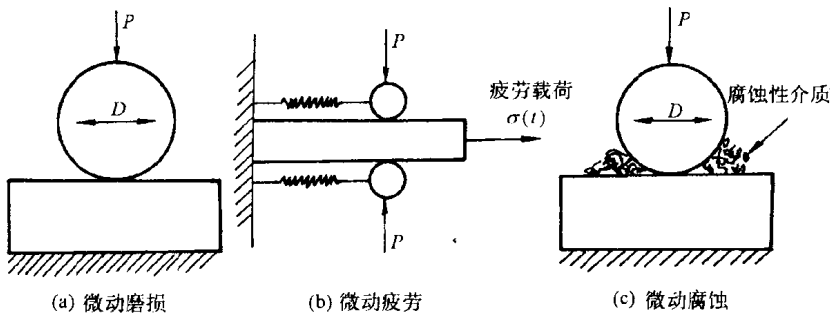


图 1.2 常见微动模式示意图

(1) 微动磨损 (Fretting Wear): 接触表面的相对位移是由外界振动引起的微动,接触构件只受局部接触载荷,或者承受固定的预应力(如拉、压、弯曲应力等),如图 1.2(a)所示。

(2) 微动疲劳 (Fretting Fatigue): 接触表面的相对运动是由一接触体承受外界交变疲劳应力引起变形而产生的微动,如图 1.2(b)所示。

(3) 微动腐蚀 (Fretting Corrosion): 在腐蚀性介质(如海水、酸雨、腐蚀性气氛等)中的微动模式,如图 1.2(c)所示。

需要指出的是,不少人认为微动磨损、微动疲劳、微动腐蚀是三种不同的损伤机制,其实严格地说,它们只是微动的三种模式,不同模式下产生的破坏可通称为微动损伤(Fretting Damage)。由微动引起的表面磨损和由微动引起的疲劳(裂纹的萌生与扩展)才是两种基本的破坏机制(本书不考虑腐蚀问题),而这两种机制在以上三种微动模式中都可存在。例如,本书将指出,宏观裂纹(长达几个毫米)在无外加交变应力时同样可以在局部接触载荷下形成。

应当说明,部分国外书籍以及国内一些学者使用的术语较为混乱,如接触磨损、接触腐蚀、微动摩蚀、微振磨蚀等用于微动或微动磨损。事实上,在国际摩擦学界,有关微动方面的术语的使用日趋规范,上面介绍的内容已被大多数学者所接受。

1.1.2 常见微动实例

微动损伤普遍存在于机械行业、航空航天器、核反应堆、电力工业、桥梁工程、交通运输工具甚至人工植入器官等领域的紧密配合部件中,已成为大量关键零部件失效的主要祸患之一,被认为是工业中的癌症。代表性的微动损伤实例有以下几类:

(1) 各种连接件,包括各种螺栓、铆钉、销连接和搭接,图 1.3 示出了部分螺栓、铆钉和销连接常见的微动损伤位置。

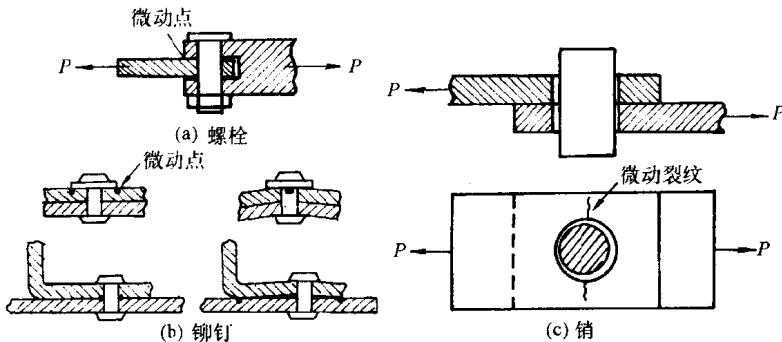


图 1.3 连接中常见的微动损伤

(2) 各种紧固机构和夹持机构,例如内燃机车柴油机连杆盖与连杆紧配合齿形结合面上产生微动疲劳裂纹(如图 1.4 所示),又如电缆在其夹持器边缘产生的微动磨损和微动疲劳(如图 1.5 所示)。

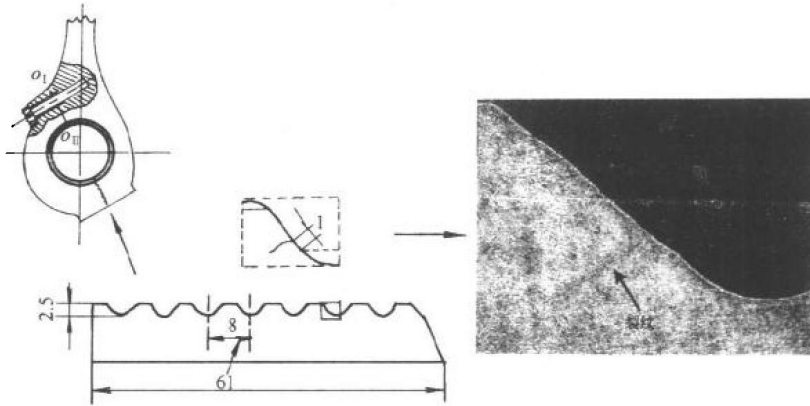


图 1.4 连杆/连杆盖的齿形结合面处的微动疲劳裂纹

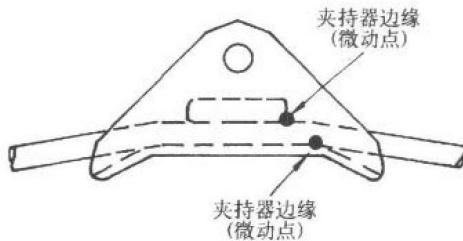


图 1.5 导线夹微动损伤示意图

(3) 各种榫槽配合、花键配合,如涡轮叶片的榫槽配合发生的微动疲劳损伤,如图 1.6 所示。

(4) 各种绳索类构件(如电缆、钢丝绳、斜拉索等),如电缆在风和自重作用下在吊线夹附近内部铝丝发生微动疲劳损伤。

(5) 各种过盈配合,如轮轴类部件。图 1.7 示出了铁路机车车辆轮-轴压配合处在运行过程中承受交变弯曲应力而发生微动疲劳断裂,即车轴冷切。

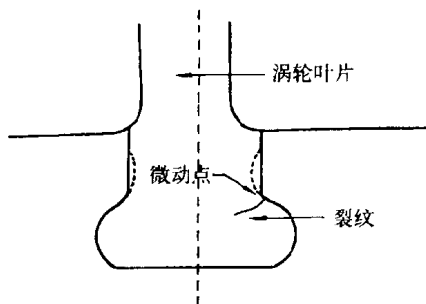


图 1.6 榫槽配合微动疲劳示意图

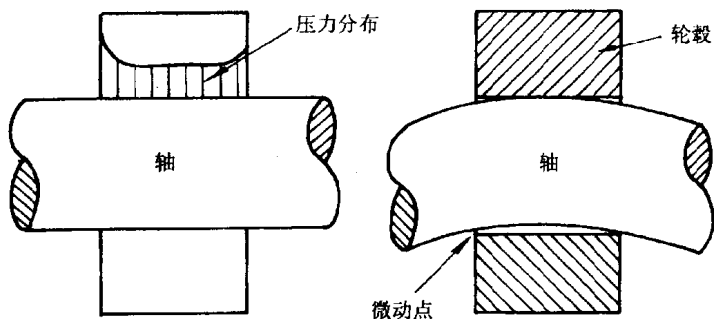


图 1.7 轮轴配合微动疲劳示意图

(6) 各种间隙配合,如蜗轮发动机叶片在高速转动时相邻叶片的叶冠发生微动磨损。

(7) 各种弹性支撑机构,如核反应堆薄壁燃料棒的弹性支撑机构(如图 1.8 所示)发生的微动损伤,可造成铀燃料棒表层破坏,引起核污染。

(8) 置于振动环境下堆积的零件,如堆积的金属板在运输过程中在局部地区发生微动磨损,造成表面擦伤、脱皮或夹沙。

(9) 滚珠轴承的滚珠在承受法向交变载荷后在内外滚道上留下通常被称为“伪布氏压痕”的圆形凹坑状微动损伤。

(10) 各种人工植入件,如人工关节与骨刺处在人体运动时易

发生微动磨损,产生的磨屑引发肌体的污染,又如人工种植义齿因微动损伤造成的松动或断裂等。

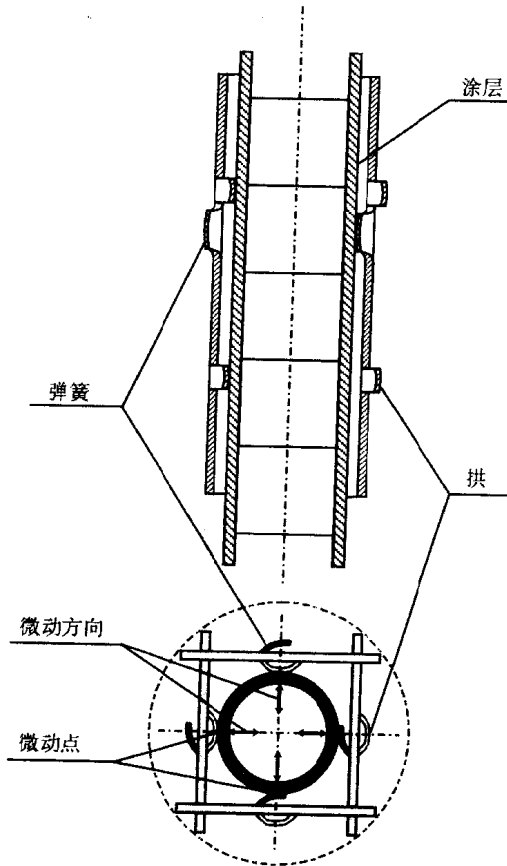


图 1.8 核反应堆中燃料棒弹性支持机构微动损伤示意图

(11) 各种电接触部件,如部分仪器设备中的电接触件在机械振动、电磁作用、热波动下导致表面微动损伤、信号失真或失灵。

(12)其他。

以上典型的配合件在各种振动环境下,极易导致配合面的微动损伤,继而影响整体结构的使用寿命。

1.2 微动摩擦学发展概况

1.2.1 历史回顾

为了说明微动摩擦学发展的全过程,我们按年代顺序将本学科及相关摩擦学领域已经取得的一些主要进展简介如下^[3]:

1911年,Eden、Rose 和 Cunningham^[4]首先观察到微动与疲劳的联系

1924年,Gillet 和 Mack^[5]发表了机器紧固件因微动导致疲劳寿命明显降低的报告

1927年,Tomlinson^[6]认为腐蚀是次要因素并提出了一种微动机理

1941年,Warlow-Davies^[7]注意到微动可以加速疲劳破坏

1949年,Mindlin^[8]提出在一定条件下,微动接触区存在滑移区和非滑移区,并对接触表面的应力分布等作了计算分析

1950年,Bowden 和 Tabor^[9]发表了经典专著“*The Friction and Lubrication of Solids*”

1950年,第一届“ASTM Symposium on Fretting Corrosion”^[10]在美国的 Philadelphia 召开,并宣读五篇论文,会上由 I-Ming Feng 和 Rightmire^[11]提出了一种微动理论

1951年,Uhlig^[12]在美国“*J. Appl. Mech*”发表了题为“*Mechanism of fretting corrosion*”的论文

1964年,Bowden 和 Tabor^[13]发表了经典专著“*The Friction and Lubrication of Solids*”的第二部分

1969年,Nishioka、Nishimura 和 Hirakawa^[14]提出了一种早期的微动疲劳模型

1970年,Hurrick^[15]在英国“*Wear*”发表了“*The Mechanism of Fretting*”的综述论文,认为微动分为三个过程

1972年,Waterhouse^[1]发表了首部编著“*Fretting Corrosion*”,

Hoepfner^[16,17]提出了微动疲劳极限的概念

1974年,“Specialists Meeting on Fretting in Aircraft”^[18]在德国 Munich 召开,共发表论文 16 篇

1976年,Endo 和 Goto^[19]把断裂力学的概念应用于微动疲劳

1977年,Waterhouse^[20]将 Suh^[21]的大位移滑动磨损的剥层 (delamination)理论引入微动磨损的研究

1978年,Czichos^[22]发表了关于对摩擦、磨损、润滑科学技术的系统研究的专著“Tribology”

随着人们对微动损伤的危害性认识的不断加深,20世纪80年代后,由于现代工业技术的需要、相关学科的发展以及分析测试技术水平的提高,微动摩擦学的研究得到迅猛发展,相关进展如下:

1981年,Waterhouse^[23]编辑出版了由 10 篇论文组成的“Fretting Fatigue”论文集

1982年,第二届“ASTM Symposium on Materials Evaluation under Fretting Conditions”^[24]在美国 Philadelphia 召开,会上宣读了论文近 20 篇

1985年,Johnson^[25]发表专著“Contact Mechanics”,系统总结了在局部滑动、滑动下的应力、位移、能量等大小及分布

1985年,期刊“Wear”编辑出版了在英国 Nottingham 召开的“Fretting Wear Seminar”^[26]会议专辑,共发表了 15 篇论文

1988年,期刊“Wear”在 Waterhouse 退休之际,编辑出版了为表彰他对发展微动摩擦学所作出的贡献而收集的 13 篇论文专辑^[27];在该专辑中,Berthier、Vincent 和 Godet^[28]提出“Velocity Accommodation”理论

1990年,Godet^[29]提出微动三体理论

1990年,第三届“ASTM Symposium on Standardization of Fretting Fatigue Tests Methods and Equipment”^[30]在美国的 Philadelphia 召开,会上共宣读了 20 篇论文

1992年,Waterhouse^[31]发表了“Fretting Wear”综述论文