



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

工程与材料科学系列



复合微动磨损

周仲荣 朱昱昊 著





国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA .



复合微动磨损

周仲荣 朱旻昊 著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书介绍国内外微动摩擦学的前沿研究成果,一方面丰富了微动摩擦学的基础理论,对促进摩擦学学科的发展具有重要意义;另一方面,本书的研究成果对指导减缓工业实际中的微动损伤具有重要参考价值。

全书分六章:第一章简要回顾国内外微动摩擦学的发展历史,介绍了相关基本概念,并分析归纳常见的微动损伤现象;第二章综述了现有微动磨损理论,重点介绍了二类微动图理论;第三章和第四章分别介绍了径向微动和复合微动的实验装置和基础实验研究;第五章综述了表面工程技术抗微动损伤的研究现状;第六章综合实例介绍表面工程抗微动损伤的方法。

本书适合从事摩擦学、表面工程、机械设计等专业的科研人员和工程人员使用,也适合作为摩擦学表面工程专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

复合微动磨损/周仲荣,朱旻昊著. —上海:上海交通大学出版社,2004

国际自然科学基金项目

ISBN 7-313-03634-5

I. 复... II. ①周... ②朱... III. 微动磨损 IV. TH117.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 007888 号

复合微动磨损

周仲荣 朱旻昊 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

上海锦佳装璜印刷发展公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:15 插页:4 字数:372 千字

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷

印数:1-1 500

ISBN7-313-03634-5 TH·105 定价:32.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

由于机械、流体、热循环、电磁等引起的振动,微动磨损普遍存在于看似“静止”的各种间隙或紧配合的接触界面。它不仅可以导致表面磨损,产生磨屑,引起配合面咬合、松动、噪声产生、电阻增加或周边环境污染等,也可以加速裂纹萌生、扩展,使构件的使用寿命大大降低。

微动磨损又常被人们称为原位磨损,因早期损伤有时很难被检测到,所以其破坏具有隐蔽性,但当发现时,有可能已发生灾难性后果。

在摩擦学领域,微动磨损看似非常特殊、狭窄,其实不然,微动磨损不仅十分普遍,而且其运行和破坏机制也是摩擦学领域中最为复杂的摩擦磨损方式之一,并越来越受到许多科技工作者的高度重视。今年在美国召开的第14届“材料磨损”国际会议中,微动磨损被专门设立一个分会场进行讨论;国际上已连续召开了3届有关微动磨损的系列会议。这一切都表明了微动磨损在摩擦学研究中的重要地位。

本书主要是作者近6年来在国家自然科学基金、国际合作项目和铁道部科技开发项目等资助下取得的最新研究成果。全文共分六章,其中:第一章简要回顾了国内外微动摩擦学的发展历史,介绍了与微动摩擦学相关的基本概念,并归纳分析了工业实际中常见的微动损伤现象;第二章综述了现有的微动磨损理论,并重点介绍了作者早期有关切向微动磨损理论(二类微动理论)的一些工作;第三章和第四章重点介绍了径向及复合微动磨损装置的研制和基础实验研究;第五章综述了表面工程技术减缓微动损伤的研究现状,重点介绍了固体润滑涂层和硬质涂层在切向、径向和复合微动模式下的损伤机理;最后一章,针对我们研究的铁路工业中的一个实例,介绍了如何利用表面工程手段减缓微动损伤的方法。书中部分章节包含徐进、徐桂珍和陈光雄3位博士的一些研究工作,在此表示衷心感谢。

撰写本书的目的在于向读者介绍国内外微动摩擦学的研究现状、发展趋势以及所在单位微动磨损研究的最新进展,以达到交流研究经验、推广研究成果、促进我国微动摩擦学发展的目的。

需要指出的是,由于微动摩擦学是一门学科交叉性很强的学科,加上作者受到本书篇幅和专业知识的限制,因此,在本书编写中必然会存在一些错误和不足,敬请广大读者批评指正。

作者

2003年6月于成都

目 录

第一章 概述	1
1.1 微动、微动摩擦学及其发展历史	1
1.2 微动摩擦学的基本概念	2
1.3 微动的运动状态及其力学分析	4
1.4 常见微动实例	13
参考文献	29
第二章 切向微动磨损理论	33
2.1 微动磨损理论	33
2.2 微动磨损试验方法	39
2.3 运行工况微动图	42
2.4 材料响应微动图	56
2.5 微动磨损与微动疲劳	62
2.6 从微动到往复滑动的过渡区	65
参考文献	69
第三章 径向微动机理	71
3.1 力学分析	71
3.2 径向微动的实现	74
3.3 径向微动的运行机理	79
3.4 径向微动的损伤机理	90
参考文献	94
第四章 复合微动机理	95
4.1 复合微动的实现	95
4.2 复合微动运行机理	101
4.3 复合微动的损伤过程	110
4.4 微动白层	120
4.5 复合微动损伤机理	132
参考文献	137
第五章 涂层的微动损伤机理	142
5.1 减缓微动损伤的措施	142

5.2 表面工程技术抗微动损伤的研究现状	144
5.3 涂层的切向微动损伤机理	158
5.4 涂层的径向微动	195
5.5 MoS ₂ 涂层的复合微动	205
参考文献	213
第六章 工业应用实例分析	221
6.1 研究方法	221
6.2 连杆齿型配合面损伤机理分析	223
6.3 连杆齿型配合面表面工程设计	228
参考文献	234

第一章 概 述

1.1 微动、微动摩擦学及其发展历史

微动(Fretting)是指在机械振动、疲劳载荷、电磁振动或热循环等交变载荷作用下,接触表面间发生的振幅极小的相对运动(位移幅度一般为微米量级)^[1,2],这些接触表面通常名义上是静止的,即微动发生在“紧固”配合的机械部件中。**微动摩擦学**是研究微动运行机理、损伤、测试、监控、预防的一个学科分支,它是一门日益发展的新兴交叉学科,涉及的学科广泛,如机械学、材料学、力学、物理学、化学,甚至生物医学、电工学等。

对微动现象的认识至今尚不足一个世纪,首次报道是在1911年,Enden, Rose 和 Cunningham在其疲劳试验机夹具与钢试件配合处观察到了棕色氧化磨屑^[3]。1924年 Gillet 和 Mack 发现了机器紧固件因微动导致疲劳寿命明显降低^[4]。真正意义上的研究,一直到1927年 Tomlinson^[5]研究时才开始,他设计的装置实现了微幅旋转运动,并在钢试样表面观察到了棕红色的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 氧化铁,由于氧化铁是摩擦过程中钢与空气中的氧发生化学反应的产物,因此他创造了“微动腐蚀(Fretting corrosion)”一词;他指出产生损伤必须要有他称之为“滑移(Slip)”的相对运动,这对后来的研究具有指导意义。此后,人们注意到微动可以加速疲劳破坏^[6,7],而且微动和疲劳的交互作用更危险,可以使疲劳强度大大降低^[8]。

早期,微动的研究发展极缓慢,1949年 Mindlin^[9]提出了在一定条件下微动接触区存在滑移区和粘着区,并最早计算了接触应力分布,这标志着微动的研究进入了一个新的发展阶段。随战后现代工业的发展,微动损伤的危害日益突出,相关研究迅速增加。20世纪50年代初在美国 Philadelphia 召开了首届微动摩擦学会议,并出版了第一本论文集^[10]。这一时期提出了一些微动磨损理论,如 Uhigh 等^[11]认为微动破坏是机械和化学作用共同作用的结果;Feng 和 Rightmire^[12]则提出一种磨损速率变化理论,将微动过程划分为4个阶段;1969年 Nishioka^[13]等提出了一种早期的微动疲劳模型;1970年 Hurrick^[14]在他的一篇综述论文中将微动分为3个过程;1972年 Waterhouse 发表了首部有关微动的论著《Fretting Corrosion》^[1]。

进入20世纪70年代以后,随着新学科之间的相互交叉和科学技术的迅速发展,微动摩擦学也得到了迅猛发展。新的学术思想不断地被引入到微动摩擦学的研究,例如, Hoeppner^[15], Endo 和 Goto^[16]等将断裂力学方法引入微动疲劳的研究, Waterhouse^[17]等人将 Suh^[18]的大位移滑动磨损的剥层理论(Delamination theory)引入微动磨损的研究。

随着分析、测试技术的发展,一些新的理论模型提出了,20世纪80年代末 Berthier, Vincent 和 Godet^[19]提出了微动运动调节理论; Godet^[20]提出了微动的三体理论; Hills 与 Nowell^[21,22]和 Dang van 等^[23]对微动疲劳力学的分析丰富和发展了 Mindlin 理论; Vingsbo^[24]最先提出了微动图概念;随后在90年代初 Zhou 和 Vincent^[25~29]建立了二类微动图理论,揭示了微动运行机制和损伤机制之间的内在规律,为微动摩擦学的研究提供了有效工具。这些

理论标志着微动摩擦学进入了一个崭新的发展阶段。近十余年以来,微动摩擦学的研究日趋活跃,研究论文迅猛增加,国际交流频繁,如1985年期刊《Wear》编辑出版了在英国 Nottingham 召开的《Fretting Wear Seminar》^[30]会议专辑;1988年期刊《Wear》在 Waterhouse 退休之际,编辑出版了为纪念他对发展微动摩擦学所作出的贡献的论文集^[31];1990年第三届《ASTM Symposium on Standardization of Fretting Fatigue Tests Methods and Equipment》^[32]在美国的 Philadelphia 召开;1993年《International Symposium on Fretting Fatigue》^[33]在英国的 Sheffield 召开;1996年在英国的 Oxford 召开了《Euromech 346 on Fretting Fatigue》^[34]会议;1998年在美国 Salt Lake City 召开了《2nd International Symposium on Fretting Fatigue》^[35];2001年在日本召开了《3rd International Symposium on Fretting Fatigue》,并形成每3年一次的微动疲劳系列国际会议;2004年会议将在法国里昂召开。在2003年国际材料磨损会议(WOM 2003)上,首次设立了微动摩擦学的分会,说明微动摩擦学的研究在摩擦学领域已取得了相当的地位。

微动领域最早的华裔学者是 I-Ming Feng^[36],1956年他与 Rightmire 在美国合作提出了描述微动过程的著名物理模型^[12]。而国内微动摩擦学的研究起步较晚,上世纪70年代才出现微动一词,真正的研究直到80年代才开始,但也缺乏系统深入的研究。1997年在成都召开了首届《国际微动摩擦学专题会议》^[37],罗唯力、周仲荣和刘家浚的论文^[36]综述了中国的研究现状,他们总结了大约10所大学和科研机构所进行的在微动研究人才培养及在碳钢、合金钢、铝合金、钛合金、钢缆绳、聚合物、陶瓷、电接触、润滑剂和反应堆部件等方面的基础和应用研究。此外,还提出了今后的研究方向。

1.2 微动摩擦学的基本概念

1.2.1 微动损伤

微动是一种相对运动幅度很小的摩擦方式,其造成的材料损伤通常表现为两种形式^[38~40],即:

(1) **微动导致的磨损**:微动可以造成接触面间的表面磨损,产生材料损失和构件尺寸变化,引起构件咬合、松动、功率损失、噪声增加或形成污染源。

(2) **微动导致的疲劳**:微动可以加速裂纹的萌生与扩展,使构件的疲劳寿命大大降低,微动疲劳极限甚至可低于普通疲劳极限的1/3。这种损伤形式往往危险性更大,可能会造成一些灾难性的事故。

实际上,许多设计、工艺和维修人员在实践中都曾遇到过这些损伤,只是对它不认识和不了解。在工程实际中判断是否发生了微动损伤,一般可通过如下4个步骤进行:

(1) 判断是否有振动源或承受交变载荷。电磁作用、噪声、冷热循环和流体运动等外加作用也可产生振动而导致微动;而实际的工程问题,往往外加载荷是多种形式的叠加。这是微动发生的内因。

(2) 判断损伤是否发生在名义上静止的紧配合界面上。这是微动产生的必要条件。

(3) 判断是否存在微动损伤的表面形貌。相对滑动痕迹可作为判断的重要依据,一般可参照同一部件的其他部分,检查局部的表面形貌的变化,如粗糙度、塑性变形、划痕、表面和亚

表面裂纹等。

(4) 判断磨屑的特征。普通的铁锈成分为 $\alpha\text{-Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 具有层状结构较易分散的特性, 而钢的微动磨屑为棕红色 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, 比普通铁锈红得多, 磨屑也不同于滑动磨损, 由于磨屑难排出微动接触界面, 经反复碾碎而细化、氧化, 磨屑中观察不到金属颗粒。对于铝合金和钛合金等有色金属, 磨屑往往呈黑色(而通常的氧化铝为白色)。

1.2.2 微动的分类

在微动摩擦学领域, 习惯上将微动分为 3 类(如图 1-1 所示)^[40], 即:

(1) 微动磨损(Fretting wear): 通常是指接触表面的相对位移由接触副外界振动引起的微动, 接触副只承受局部接触载荷, 或承受固定的预应力, 如图 1-1(a)所示。

(2) 微动疲劳(Fretting fatigue): 是指接触表面的相对位移由一接触副承受外界的交变疲劳应力引起的变形而产生的微动, 如图 1-1(b)所示。

(3) 微动腐蚀(Fretting corrosion): 是指在电解质或其他腐蚀性介质(如海水、酸雨、腐蚀性气氛等)中发生的微动。微动过程都有腐蚀发生, 但这时腐蚀作用占优势, 如图 1-1(c)所示。

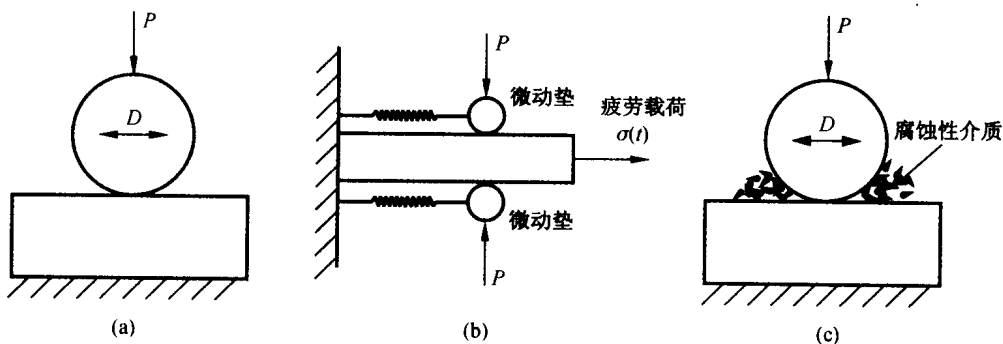


图 1-1 微动的分类示意图

(a) 微动磨损; (b) 微动疲劳; (c) 微动腐蚀

P —法向压力; D —位移幅值; $\sigma(t)$ —交变应力

需要指出的是, 微动磨损、微动疲劳和微动腐蚀并不是 3 种损伤机制, 而只是微动的 3 种类型。损伤机制只有两种, 即微动导致的表面磨损和疲劳。换一种说法, 可描述为: 微动损伤是微动磨损、微动疲劳和微动腐蚀造成的材料表面磨损和疲劳的统称。

实际的微动运动形式十分复杂, 以球/平面接触模型为例, 按不同的相对运动方向, 微动可分为 4 种基本运行模式^[39,40](如图 1-2 所示), 即: ① 切向微动, 或称平移式微动; ② 径向微动; ③ 滚动微动; ④ 扭动微动。后 3 类微动形式虽然在工业中也经常出现, 但研究报道却极少, 而两种或两种以上的微动模式的叠加, 即复合微动, 因其问题复杂性大大增加, 研究更是少见。

在核反应堆的微动损伤研究中, 国外一些学者习惯将在径向存在微幅冲击的运动称为冲击微动^[41~43], 实际上这是一种冲击与切向微动复合的复杂微动, 与之相对应, 也有学者将切向微动称为摩擦微动, 但这不为大多数学者所接受。在国内对微动现象也使用很多名词, 如“咬蚀”、“震蚀”、“磨蚀”、“微振磨蚀”和“微振磨损”等, 这些称呼与国际习惯不接轨, 建议根据工况条件使用微动磨损、微动疲劳和微动腐蚀等名词。

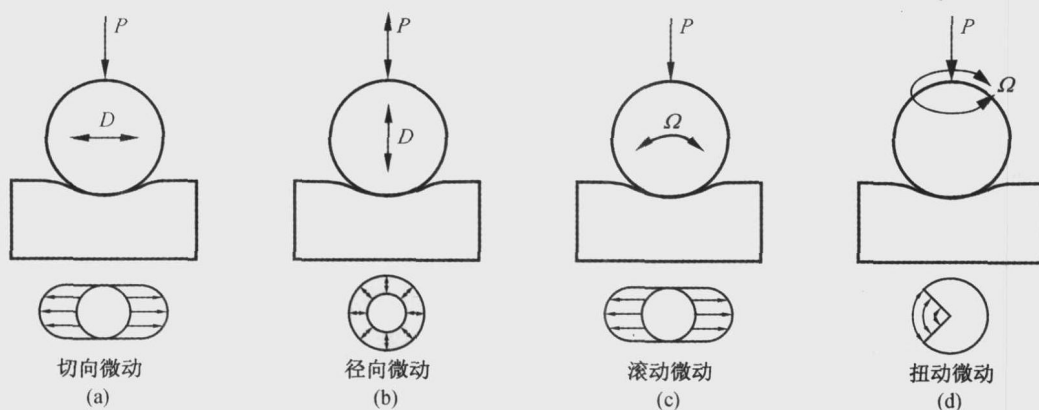


图 1-2 微动运行的 4 种基本模式示意图

P —法向压力; D —位移幅值; Ω —角度振幅

1.3 微动的运动状态及其力学分析

1.3.1 微滑的产生

摩擦是接触材料相对运动时所发生的重要物理现象,一个物体置于平面上,其顶部施加压力 P 后,在与界面平行的方向上施加切向力 T ,如图 1-3(a)所示,同时存在摩擦力 F_f 与之达

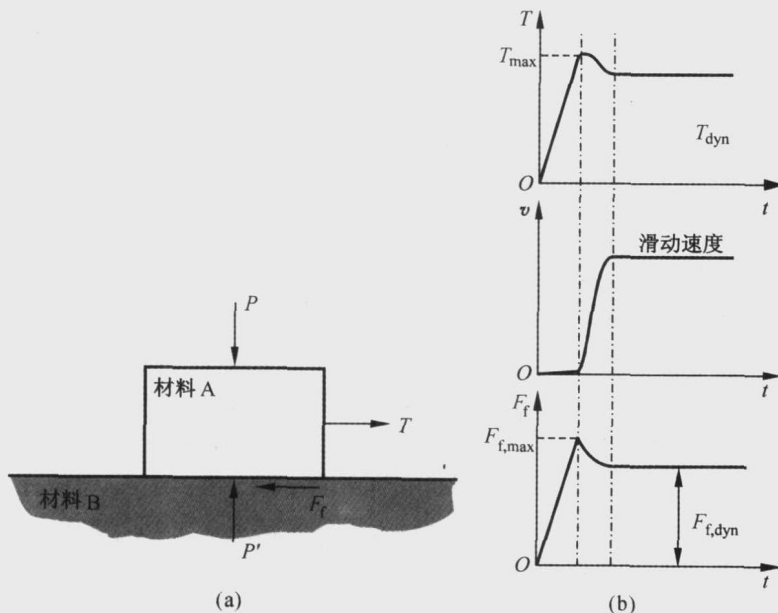


图 1-3 平面/平面接触摩擦模型示意图

(a) 力的平衡;(b) 切向力、相对速度和摩擦力与时间的关系

到平衡。如图 1-3(b)所示,当施加的切向力从 0 线性地增加到 $T_{\max}$,此期间相对速度为 0,物体仍处于静止,此现象为“静摩擦”;一旦切向力超过 $T_{\max}$,相对速度在一很短的加速过程中沿接触面从 0 增加到一个稳定的滑动速度,物体加速所需要的力超过了原来施加的切向力,此后,达到相对稳定的滑动速度,切向力降到一常数值 T_{dyn} ,此现象称为“动摩擦”。Coulomb 的实验^[44]证明了最大静摩擦力在运动开始时与接触面积无关,而依法向力呈正比,所以静摩擦系数可以定义为

$$\mu_s = \frac{T_{\max}}{P} \quad (1-1)$$

对给定的摩擦系统该比值是常数,因此摩擦粘着的条件为: $T < \mu_s P$ 。在滑动条件下,摩擦力为常数,同样可以定义动摩擦系数为

$$\mu_d = \frac{T_{\text{dyn}}}{P} \quad (1-2)$$

对于球/平面接触,因接触压力是非均匀的,情形与上述平面/平面接触有所不同。可以把球/平面接触看成由一系列无限小的平面单元组成,而法向力的大小则由压力分布确定,如图 1-4所示。如果假设切向力是常数,在接触区外部的单元法向载荷小,已经处于滑动状态,而内部单元法向载荷大,仍处于粘着状态。结果,每个单元的摩擦力不同,有的单元处于静摩擦,有的单元处于动摩擦。摩擦力的总和与施加的切向力相平衡,这就是接触中心粘着,而接触边缘发生微滑(Micro-slip)。因此,微滑产生的条件为 $T < \mu P$ 。

在微动条件下,相对运动存在两种情况:第一种情况,接触中心粘着而接触边缘存在微滑,习惯称之为部分滑移(Partial slip);另一种情况,两接触体各点之间均发生相对滑移,习惯上称之为完全滑移(Gross slip)。

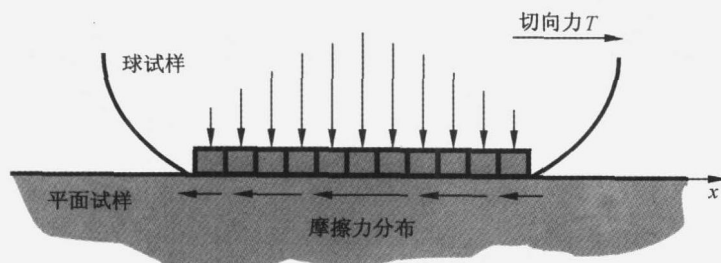


图 1-4 球/平面接触的摩擦力分布示意图

1.3.2 完全滑移

1.3.2.1 切应力分布

若施加在球上的法向压力为 P ,根据 Hertz 理论,接触区 Hertz 半径 a 为^[45]

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{P}{E^*} R} \quad (1-3)$$

其中

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (1-4)$$

这里 R 是球的半径, E_i 和 ν_i 分别是不同接触材料的杨氏弹性模量和泊松比。

如果切向力达到极限摩擦力 ($T = \mu P$), 两个接触体将处于完全滑移状态。此时, 切向力 $T(t)$ 可用振幅为 $2T_{\max}$ 的交变循环载荷描述 (如图 1-5(a) 所示), 切向力从 0 增至 $T_{\max}$, 当到达 $T_{\max}$ 时, 接触载荷沿 x 方向滑动 δ 的位移; 切向力从 $T_{\max}$ 变到 $-T_{\max}$, 载荷被固定不动, 当一旦达到 $-T_{max}$, 则接触载荷沿 x 的反向滑动 δ 的位移。根据 Hertz 理论, 各阶段切应力分布 (见图 1-5(b)) 由下式给出^[46]:

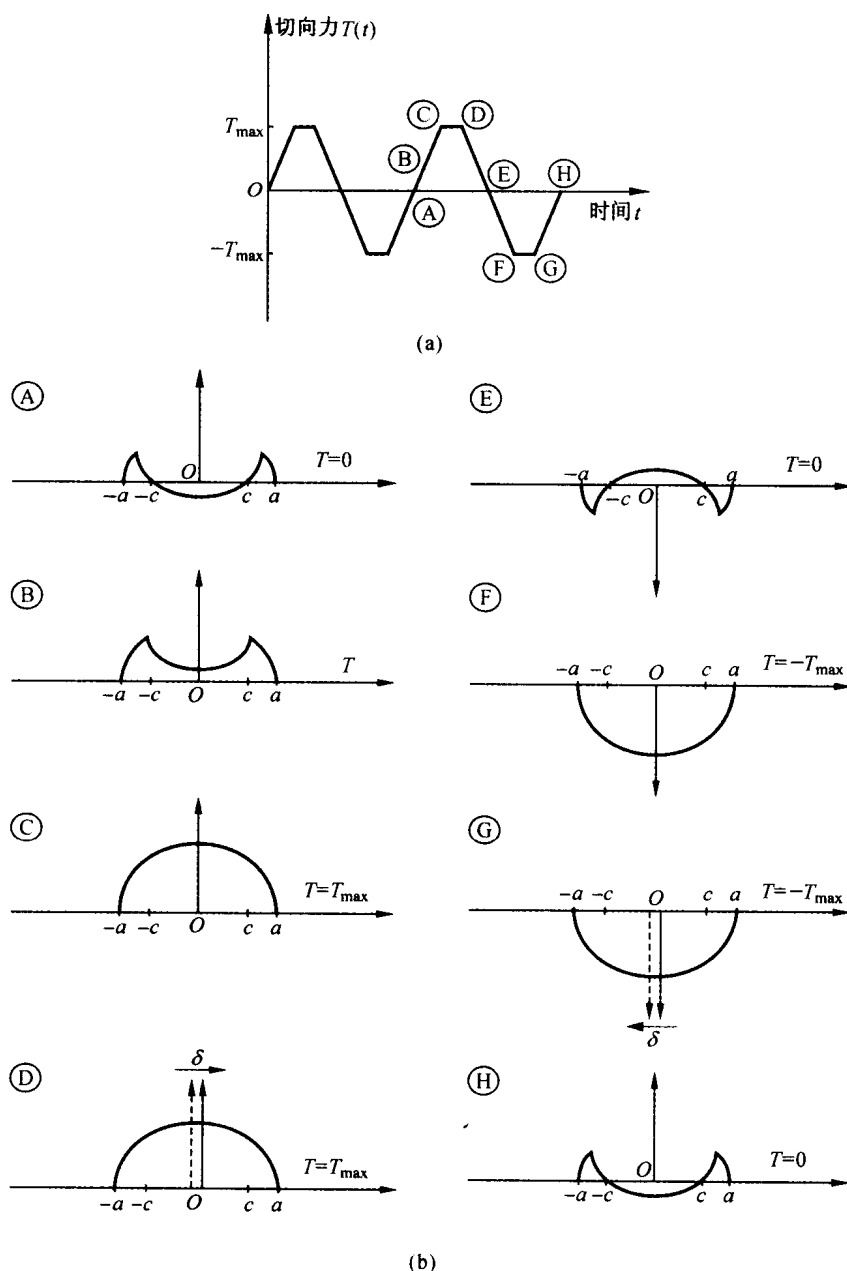


图 1-5 完全滑移条件下承受交变切向力时的切应力分布

(a) 切向力随时间的变化; (b) 切应力分布

$$\begin{cases} p(x) = \mu p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} & c \leq |x| \leq a \\ p(x) = -\mu p_0 \left[\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} - 2 \frac{c}{a} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \right] & |x| \leq c \end{cases} \quad (1-5)$$

这里 c 是 T 的函数:

$$\frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{T_{\max} - T}{2\mu P}} \quad (1-6)$$

p_0 是接触中心最大压应力:

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (1-7)$$

1.3.2.2 表面拉应力分布

在同种材料组成的接触副和给定摩擦系数 μ 下, Hamilton 和 Goodman^[47] 计算了接触表面拉应力分布。

对球/平面接触, 其表面应力分布如图 1-6 所示, 表面拉应力可表示为

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = -\frac{\mu\pi p_0 x(4+\nu)}{8a} + \frac{p_0 [2\omega + (1-2\nu)(G_0 r^{-2} - 2G_0 x^2 r^{-4} + \lambda x^2 r^{-2})]}{a} & -a \leq x \leq a, 0 < r \leq a, x \neq 0 \\ \sigma_{xx} = \frac{-(1+2\nu)p_0}{2} & x = 0 \end{cases} \quad (1-8)$$

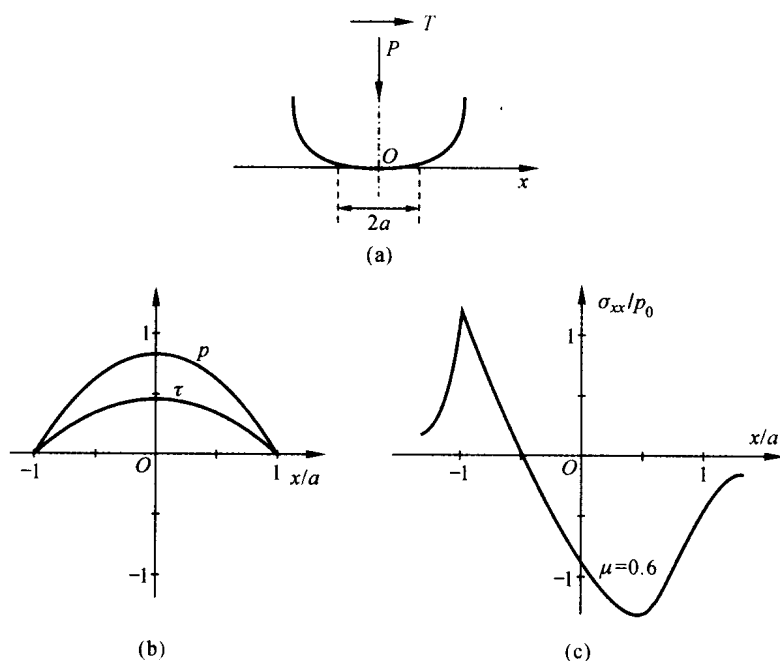


图 1-6 完全滑移状态下接触表面的应力分布示意图

(a) 接触模型; (b) 压应力和切应力分布; (c) 拉应力分布

其中

$$G_0 = \frac{\sqrt{(a^2 - r^2)^3}}{3} - \frac{a^3}{3} \quad (1-9)$$

$$\lambda = -\sqrt{(a^2 - r^2)} \quad (1-10)$$

最大拉应力处于接触边缘($x = -a$)处(见图 1-6(c)),其值为

$$\sigma_{\max} = \frac{\mu\pi p_0(4 + \nu)}{8a} + \frac{p_0(1 - 2\nu)}{3a} \quad (1-11)$$

1.3.3 部分滑移

1.3.3.1 切应力分布

部分滑移问题的求解方法首先由 Cattaneo^[48]于 1938 年提出,并由 Mindlin^[9]在 1949 年独立给出了球/平面接触的切应力分布的解。他发现,对于球/平面接触,如果 $T < \mu_s P$, 接触处于部分滑移,接触区可划分为两部分,即一环形微滑区和一个半径为 c 的粘着区, Mindlin 模型的微滑圆环如图 1-7 所示。粘着区半径 c 与 Hertz 接触半径的关系为

$$\frac{c}{a} = \left(1 - \frac{T}{\mu P}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1-12)$$

不断增加切向力,结果粘着区的接触圆周向接触中心扩展,接触区的切应力可表示为

$$p(x) = -\mu p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} + p'(x) \quad |x| \leq a \quad (1-13)$$

这里 x 是在切向力方向的坐标,第一项代表滑移环内的滑动切应力分布, $p'(x)$ 代表弹性变形范围内粘着区的切应力分布:

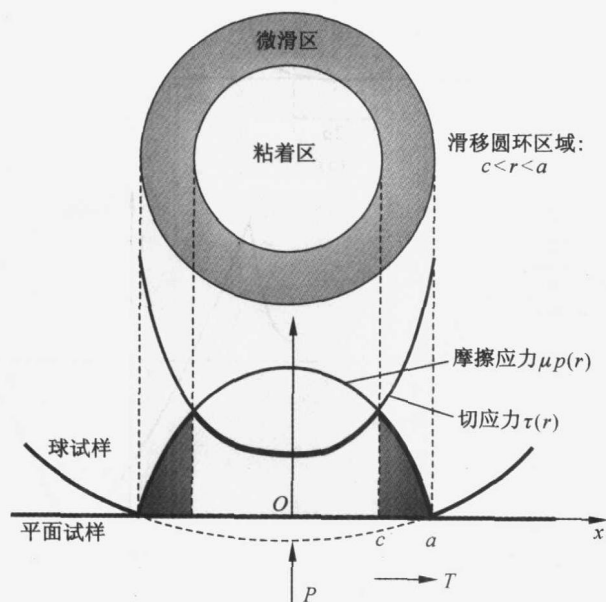


图 1-7 Mindlin 模型的滑移圆环示意图

$$p'(x) = \mu p_0 \frac{c}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad |x| \leq c \quad (1-14)$$

球/平面接触的切应力分布如图 1-8 所示。在粘着区的边界上出现切应力的奇点,而在完全滑移状态切应力是接触区位置的连续函数。

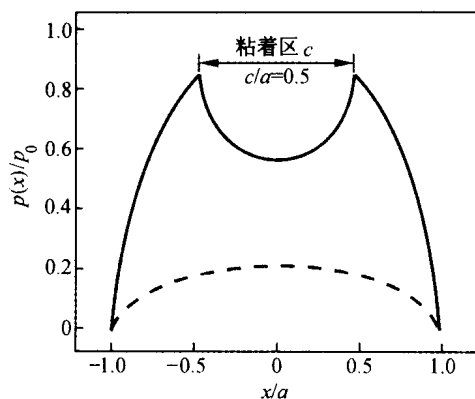


图 1-8 部分滑移条件下接触表面切应力分布
(实线:部分滑移;虚线:完全滑移)

当接触表面施加交变切向力 $T(t) < \mu P$ 时,根据 Mindlin 理论,切应力分布(如图 1-9 所示)可表示为

$$\begin{cases} p(x) = -\mu p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} & c \leq |x| \leq a \\ p(x) = -\mu p_0 \left[\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} - 2 \frac{c}{a} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \right] & c_{\max} \leq |x| \leq c \\ p(x) = -\mu p_0 \left[\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} - 2 \frac{c}{a} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + \frac{c_{\max}}{a} \sqrt{1 - \frac{x^2}{c_{\max}^2}} \right] & |x| \leq c_{\max} \end{cases} \quad (1-15)$$

这里 $c_{\max}$ 可由下式表示:

$$\frac{c_{\max}}{a} = \sqrt{1 - \frac{T_{\max}}{\mu P}} \quad (1-16)$$

而且 c 是 $T(t)$ 的函数:

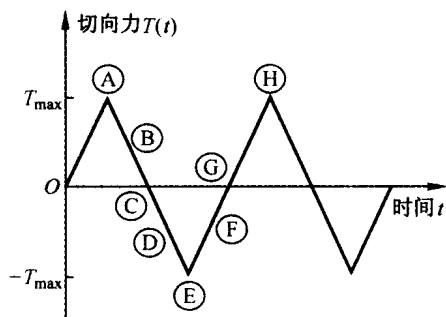
$$\frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{T_{\max} - T}{2\mu P}} \quad (1-17)$$

1.3.3.2 表面拉应力分布

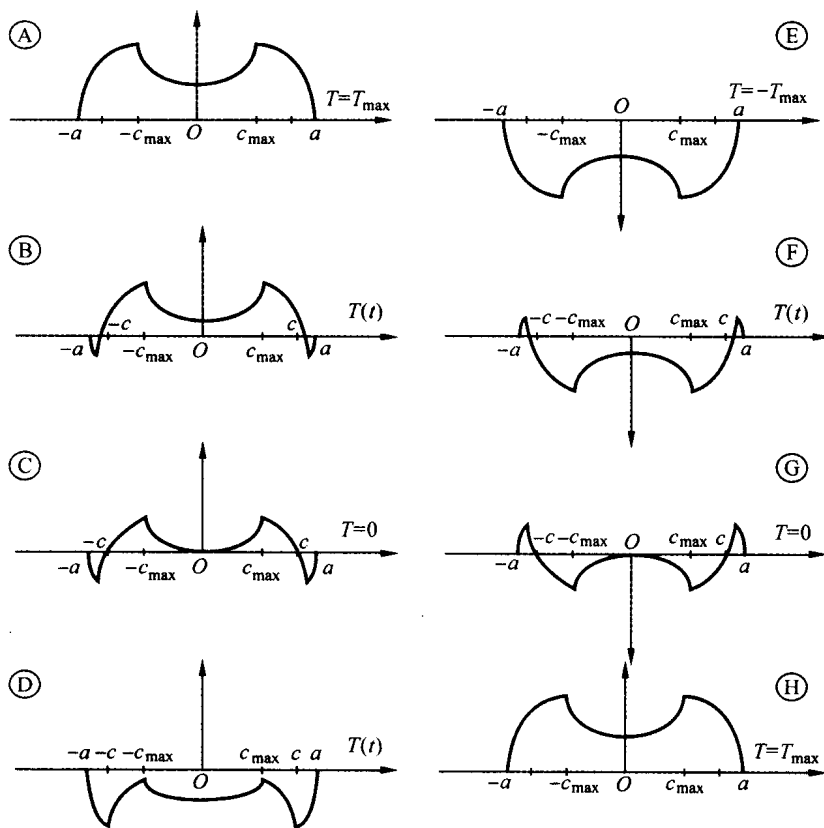
对球/平面接触的部分滑移状态,Hamilton 和 Goodman^[47] 给出了接触表面拉应力分布。在微滑区的表面拉应力可表示为

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^* - \frac{b}{a} \sigma_{xx}^{* *} \quad (1-18)$$

式中: σ_{xx}^* 为滑移状态下的应力值(见式 1-8)。



(a)



(b)

图 1-9 部分滑移条件下承受交变切向力时的切应力分布示意图

(a) 切向力随时间的变化; (b) 切应力分布

$$\sigma_{xx}^{*} = \frac{(1-2\nu)a^2}{3x^2} - \frac{\mu}{4} \left[\frac{a}{x}(\nu-4)\left(\frac{a^2}{x^2}-1\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{x}{a}(\nu+4)\arctan\left(\frac{x^2}{a^2}-1\right)^{-\frac{1}{2}} - \frac{2\omega^3}{x^3}\left(\frac{x^2}{a^2}-1\right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (1-19)$$

接触表面拉应力分布如图 1-10 所示。

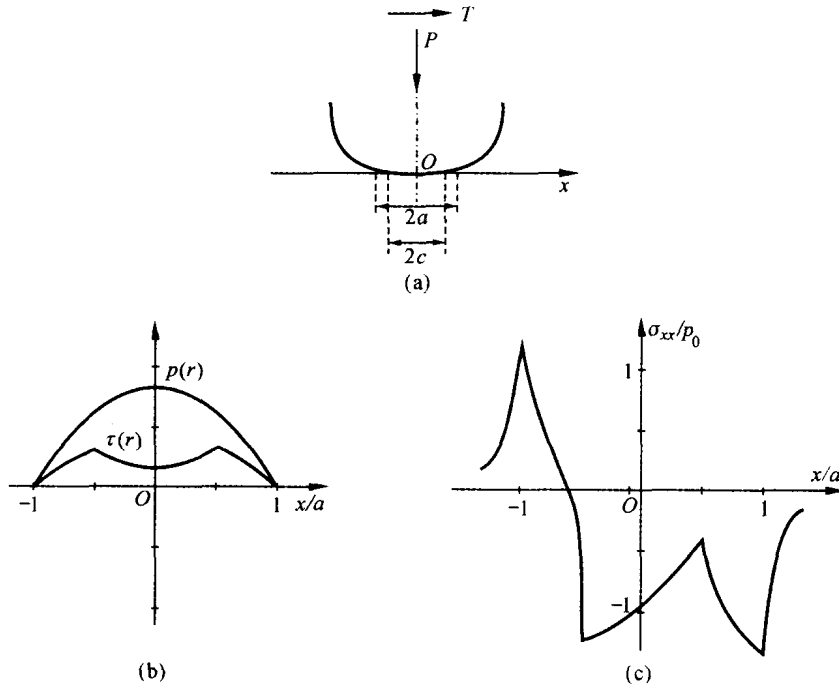


图 1-10 部分滑移状态时接触表面的应力分布示意图

(a) 接触模型; (b) 压应力和切应力分布; (c) 拉应力分布

1.3.3.3 切向力-位移曲线

图 1-11 示出了在外加激振力作用下切向力和切向位移的关系, 切向力很小时, 位移与切向力几乎呈线性关系, 表面产生的微滑由弹性变形协调; 切向力较大时, 接触区的微滑伴随着

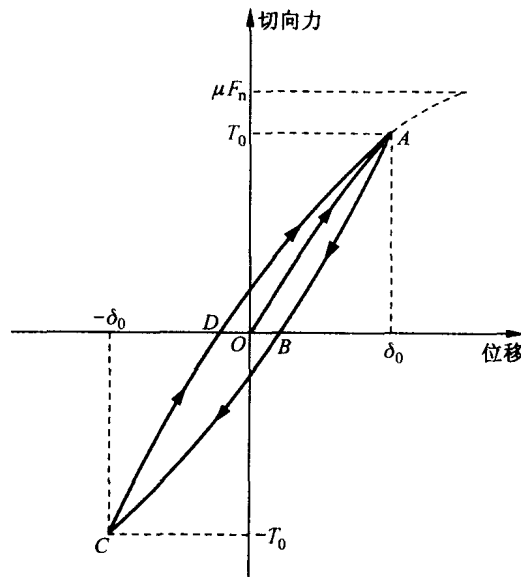


图 1-11 部分滑移状态时激振力作用下切向力和切向位移的关系