

JIXIEGOUJIAN DE WEIDONGPILAO

机械构件的微动疲劳

何明鉴 著

国防工业出版社

TH117.1

H30

机械构件的微动疲劳

何明鉴 著

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

机械构件的微动疲劳/何明鉴著. —北京:国防工业出版社, 1994

ISBN 7-118-01366-8

I. 机… II. 何… III. 机械元件—微动磨损—疲劳磨损
IV. TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 10512 号

机械构件的微动疲劳

何明鉴 著

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 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 14.5 343 千字

1994 年 9 月第 1 版 1994 年 9 月北京第 1 次印刷 印数 1—2000 册

ISBN 7-118-01366-8/TH·95

定价:14.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)



序 言

微动疲劳也称微动磨损疲劳,是指材料或构件在微动磨损影响下的疲劳问题。早在本世纪初,人们就已观察到微动磨损现象,它因接触表面之间相对活动量很小而得名。美、英、前苏联和加拿大等国在微动磨损机理方面已做了大量的研究工作并形成学派。

在飞机和航空发动机上,相当大的一部分零部件都存在微动磨损,其中有些是关键件,如压气机和涡轮盘与叶片的榫联接,机匣的联接,盘和轴的联接等。用先进的方法精确分析接触表面及构件内部的应力、位移等是研究微动疲劳的基础。

我国对微动磨损的研究起步较晚,70年代方出现微动磨损一词,直至80年代初才开展这方面的工作。研究表明,对于某些高寿命的构件,由于微动磨损的影响,寿命会下降30%以上,若对此现象估计不足,就可能成为事故产生的根源。

本书根据作者多年对此课题做了大量的研究工作,把自己研究的和与英国牛津大学教授联合研究的,结合国内外发表的有关文献,研究微动疲劳的经验,写成此书。书中介绍了微动疲劳的概念;断裂力学和弹性应力分析在微动疲劳中应用;并将在工程中常见的微动疲劳破坏作了介绍;突出介绍了航空燃气涡轮发动机的叶片和轮盘联接的燕尾榫和枞树榫出现的微动疲劳;对叶片振动给微动疲劳的影响作了分析和试验研究,并将微动疲劳的研究创新性地归纳成十条,作为研究构件微动疲劳的任务。

当然,微动疲劳这门学科的研究方兴未艾,在科研道路上还会遇到新情况,发现新问题。本书作者这几年的辛勤劳动,带有开创性的研究工作,在微动疲劳学科的研究上起到带头作用,也必将在机械行业、航空发动机行业研制工作上起到进一步的推动作用。

吴大观

一九九三年十一月

前 言

现代工业的发展,在许多行业中,对构件的工作可靠性要求愈来愈高,又希望其工作寿命尽可能长,这就使微动疲劳在机械构件中渐渐成为突出问题。世界上的一些先进工业国,率先开展了一系列的研究工作,并逐渐形成一门新的学科。80年代后期,笔者以访问学者的身份,前往英国牛津大学,在工程科学系以鲁依斯(Ruiz C)教授为首的固体力学研究中心,研究机械构件的微动疲劳问题,有机会了解这一领域中的最新成果。回国之初,原航空工业部(现中国航空工业总公司)直接资助笔者建立课题组,进行构件微动疲劳的研究。在此基础上,又先后申请到航空科学基金和国家自然科学基金的资助,使这项研究工作得以深入开展。

在中国航空工业总公司科学技术委员会专职常务委员、我国航空发动机专家吴大观先生的热情鼓励和支持下,笔者着手撰写本书。成书过程中又得到鲁依斯教授的大力帮助。本书介绍了笔者在国外和国内的研究成果及国外和国内学者的有典型意义的研究成果。为使较大范围的读者能够看懂,对一些概念和理论上的难点,书中尽可能作较详细的解释,但读者仍需具备弹性力学、断裂力学及有限元方法等方面的基本知识,才能较顺利地阅读本书。

本书由中国航空工业总公司资助出版。吴大观先生对本书初稿逐句地作了仔细审阅,提出了宝贵意见和建议,并为本书写了序言。在此表示衷心感谢。

何承人为译、校本书第一章和第二章的英文参考资料做了认真、细致的工作。笔者的研究生黄润泽、孙永烈、黄红坚、雷鸣、战洪飞等参加了本书的绘图工作。黄润泽和孙永烈参加了枞树榫联接的微动疲劳的研究工作,作出了贡献。

作 者

一九九四年七月

于南京航空航天大学

内 容 简 介

微动疲劳是一门新兴的学科。由于工作可靠性要求和希望工作寿命不断提高,在机械行业、航空航天领域及其他行业中,机械构件的微动疲劳问题显得日益重要。世界各先进国家都愈来愈重视这一领域的研究。本书论述了微动磨损和微动疲劳的基本概念和机理;几种典型结构模型在典型受力状态下的微动疲劳的力学分析和实验研究;用断裂力学分析微动疲劳寿命的计算方法及有关的实验;作为有代表性的机械构件的实例,较详细地论述了叶片和轮盘榫联接的微动疲劳特性的计算方法和实验方法,这种方法可以推广应用于分析其他工程构件的微动疲劳。

本书可供各行业中从事机械构件的强度设计、疲劳和断裂研究的科研人员、工程师及高等院校的教师、学生使用和参考。

目 录

第一章 微动磨损和微动疲劳	1	§ 2-3 微动疲劳实验概述	43
§ 1-1 引言	1	一、实验的类型	43
§ 1-2 学科的形成	2	二、实验的目的和内容	44
一、基本概念和术语	2	三、实验设备	44
二、学科的形成	5	§ 2-4 微动疲劳理论的实验验证	47
§ 1-3 微动磨损的机理	7	一、微动疲劳的门坎值	47
一、微动磨损机理诸观点	8	二、微动疲劳裂纹的形成	50
二、微动磨损的初始阶段	12	三、微动疲劳裂纹的扩展	58
三、微动磨损的稳定阶段	14	§ 2-5 影响微动疲劳的因素	65
四、微动磨屑	15	一、滑动振幅	65
五、氧化的作用	16	二、接触压力	67
六、摩擦力和摩擦系数	19	三、载荷频率	68
§ 1-4 实验研究概述	19	四、气体环境和湿度	69
一、实验目的	19	五、外载大小和外载类型	71
二、对实验设备的要求	19	第三章 力学分析	73
三、微动副和试验件	21	§ 3-1 半空间体和半平面体受力时	
§ 1-5 各种参数对微动磨损的影响	21	的应力分布	73
一、振幅的影响	22	一、半平面体边界上受集中力	73
二、接触压力的影响	23	二、半空间体边界面的一直线上受法	
三、频率的影响	24	向均布载荷	75
四、循环次数的影响	24	三、半平面体边界上受法向均布载荷	76
五、环境温度的影响	25	四、半空间体受法向力	77
六、气体成分的影响	26	§ 3-2 接触问题	79
七、环境湿度的影响	27	一、接触于一点的两弹性体的挤压——	
八、接触处试件形状的影响	27	赫芝问题	79
§ 1-6 实验举例	28	二、两弹性球的接触	81
第二章 微动疲劳	31	三、球体与平面、球体与球座接触	83
§ 2-1 一般概念	32	四、两圆柱体、圆柱体与平面接触	83
一、研究内容	32	§ 3-3 有切向力的接触	84
二、微动疲劳和普通疲劳	32	一、法向压力和交变切向力共同作用	
三、微动疲劳曲线	34	时两弹性球的接触	84
§ 2-2 微动疲劳的基本理论	35	二、二维弹性圆柱体接触	88
一、微裂纹的形成	35	§ 3-4 几种结构模型的微动疲劳计算	
二、疲劳裂纹的形成	38	分析	90
三、疲劳裂纹的扩展	41	一、拉一压载荷	91
四、两类微动疲劳门坎值	42	二、弯曲载荷	95

三、扭转载荷	99	二、一对叶片的模型	161
四、阻尼作用	102	三、三对叶片的模型	171
§ 3-5 结构模型的实验研究	103	§ 5-4 室温环境下的实验	176
一、拉-压实验	104	一、试件和实验设备	176
二、弯曲实验	106	二、疲劳寿命	176
§ 3-6 小结	107	三、微裂纹及扩展断裂部位	179
第四章 微动疲劳的断裂力学分析	109	第六章 榫联接的进一步研究	182
§ 4-1 微动疲劳中的应力强度因子	109	§ 6-1 燕尾榫联接在高温环境中的 微动疲劳特性	182
§ 4-2 微动桥式的研究模型	115	一、计算分析	183
一、研究方案	116	二、实验	187
二、试件的载荷	116	三、小结	189
§ 4-3 应力强度因子计算	119	§ 6-2 底角不是 45° 的燕尾榫	189
一、桥足的压力分布	119	一、燕尾的形状——结构模型	189
二、应力强度因子	120	二、计算分析	191
§ 4-4 短裂纹的应力强度因子修正 和裂纹扩展速率	124	三、实验	194
一、应力强度因子修正	124	四、计算和实验结果分析	194
二、裂纹扩展速率	125	五、小结	195
§ 4-5 断裂力学预测微动疲劳寿命	126	§ 6-3 叶片振动引起的微动疲劳	195
一、均方根法研究承受随机载荷的 试件	128	一、计算分析	196
二、微动疲劳的 S_r - N 曲线	131	二、实验	198
三、裂纹扩展曲线	135	三、计算和实验结果分析	199
四、桥足压力分布对微动疲劳寿命 的影响	137	四、小结	199
五、桥足距对微动疲劳寿命的影响	139	§ 6-4 盘上周向开槽的燕尾榫	200
六、桥足载荷对微动疲劳寿命的影 响	140	一、结构模型	200
§ 4-6 小结	141	二、计算分析	201
第五章 燕尾榫联接的微动疲劳	143	三、周向和轴向开槽的燕尾联接比 较	205
§ 5-1 研究概况	143	四、减薄了的盘的计算分析	206
一、燕尾榫的微动损伤	143	五、实验及结果分析	208
二、结构模型的设计准则	144	六、小结	211
三、结构模型和实验设备的逐步发 展	146	§ 6-5 叶片和盘的枞树榫联接	212
§ 5-2 计算方法	149	一、结构模型	213
一、接触问题的有限元方法	149	二、计算模型	213
二、接触状态及其条件表达式	150	三、接触状态、应力和相对位移	215
三、有限元混合法	151	四、微动损伤参数 FD	219
四、计算程序	158	五、综合参数 FFD	220
§ 5-3 盘上轴向开槽的燕尾榫联接 的计算分析(底角 45°)	160	六、危险点	221
一、结构模型	160	七、实验概述	222
		八、实验结果	223
		九、小结	224
		参考文献	225

第一章 微动磨损和微动疲劳

§ 1-1 引言

微动疲劳是指构件在有微动磨损时的疲劳强度和疲劳寿命问题。可见,微动疲劳是考虑了微动磨损作用影响的构件或材料的疲劳和断裂的有关理论和实践的科学。由于这门学科形成较晚,我国可能有许多读者不了解其实质,误认为微动疲劳涉及范围窄或与现有工程结构疲劳断裂问题关系不大或没有关系。

在研究微动疲劳时,可能会出现四种情况;第一,微动磨损很严重;第二,微动磨损程度为中等;第三,微动磨损很小;第四,不存在微动磨损。其中第四种就是普通疲劳问题。从这个意义上讲,微动疲劳包含了普通疲劳,是对结构疲劳问题的更深入的研究。

微动磨损一词在学科形成的早期其含义较广泛,它包含了微动作用产生的各种后果,如材料被磨去,形成疲劳裂纹等。早在本世纪初,人们就已观察到微动磨损现象,它因接触表面之间相对滑动量很小而得名(滑动量以微米计)。微动磨损常发生在名义上相对静止的两物体的接触表面之间。用螺钉或铆钉联接的两搭接板之间的接触表面,在交变工作载荷作用下会产生微小相对滑动,引起微动磨损。类似情况,在轮盘和轴的静配合表面,叶片榫头和轮盘上榫槽的配合表面,键联接的接触表面,多股钢丝绞成的钢缆绳中的钢丝之间的接触表面,各种螺纹联接和铆钉联接的构件与构件之间,构件与联接件之间的接触表面等都可能产生微动磨损。微动就是指接触表面之间小幅度的滑动。

用某种材料设计一种试验件,可以用来研究微动磨损的机理,因此有时又称材料的微动磨损,它可避开具体构件的真实工况和复杂形状。微动磨损机理主要指磨屑和微裂纹形成的原理和过程,磨屑的特征,磨损过程和特征及影响上述过程和特征的种种因素等。由于研究工作的发展,一批专门用于研究微动磨损和微动疲劳的试验机相继问世。测试手段也在不断完善和发展。接触表面的相对滑动量,接触表面附近的应变、温升、摩擦系数、磨损量等,都是一些难测的参数,至今都难说有比较理想的测试方法。

微动疲劳逐渐形成一门独立的学科,主要原因有两点。第一,微动磨损对疲劳强度或说对疲劳寿命影响很大,而且在各种机械构件中广泛存在微动磨损现象。已有的研究表明,对长寿命的构件,微动磨损会使其寿命降低30%以上,也有降低80%的例子。航空发动机和飞机上的构件也是这样。第二,微动磨损和微动疲劳是一个比较复杂的研究科目,涉及的范围非常广。如果说它是磨损问题,则它是唯一同时涉及到粘着、磨料、氧化和疲劳这四种磨损机理的一种特殊磨损。研究中,对计算技术、测试手段和试验设备等都有较高的要求。同时它又是疲劳强度和疲劳寿命问题,涉及到疲劳领域中的一切理论和实践。

在航空发动机和飞机上,相当多的构件都存在微动磨损,其中有些是关键零部件,如压气机和涡轮的榫联接,机匣的联接,盘和轴的联接,飞机上大量的铆钉联接等。研究构件的疲

寿命而不考虑微动磨损的影响,显然是不对的。

构件微动疲劳的研究任务,现阶段可归纳成以下各点:

- (1)所研究的接触表面是否存在微动磨损;
- (2)构件在工作载荷和微动磨损共同作用下,接触表面的应力和位移分析及构件体内应力分析;
- (3)工作时,构件接触表面上接触状态的变化;
- (4)接触表面上磨损程度分析;
- (5)接触表面上是否会产生裂纹,裂纹是否会扩展,预测裂纹萌生和扩展的位置。建立微动磨损作用下的断裂力学;
- (6)微动疲劳寿命估算方法;
- (7)微动磨损、蠕变和疲劳的交互作用;
- (8)微动疲劳的影响因素;
- (9)预防微动疲劳的措施;
- (10)同其他学科的关系和交互作用,例如利用微动磨损作为振动阻尼等。

以上是一般归纳。深入研究一具体构件的微动疲劳还会碰到更具体的问题。例如,对叶片和盘的榫联接,研究榫齿的加工误差对微动疲劳的影响就有重要意义。

构件微动磨损和微动疲劳的理论和实验研究与其他领域密切相关。人们曾把微动磨损当作摩擦学的一部分,但它同传统的摩擦学又截然不同。接触表面常常承受很高的压力,许多飞机和发动机构件的接触都是如此。用先进的方法精确计算接触表面及构件内部的应力、位移等,仍是研究微动疲劳的基础,在力学上要用到接触问题的理论。被广泛应用的有限元方法也是本科目的强有力的计算手段。晚近发展起来的边界元方法也用来分析接触问题。

微动磨损的影响,对于工作寿命较短的发动机,往往被掩盖了。对于工作寿命长达4000h以上的构件,微动疲劳可能成为突出问题。英国的罗·罗公司及世界上其他一些航空发动机公司对微动疲劳十分重视。国外一些航空公司和大学,研究构件的微动疲劳已有好多年。他们发现,微动疲劳已成为某些叶片和盘的榫联接破坏的主要原因。

我国对微动疲劳的研究起步较晚,70年代才出现微动磨损一词,80年代初才开展这方面的工作。迄今,在疲劳寿命设计、可靠性设计及强度标准中,我们都还没有把微动磨损的影响考虑进去,在故障分析中也没有这个概念。希望本书的出版能促进这一领域的研究工作,并对有关的工程技术人员和学者有所裨益。

§ 1—2 学科的形成

一、基本概念和术语

微动磨损是指两个构件在接触表面上因有很小的、反复的相对滑动,造成对构件表面的机械损伤。它可能造成多种后果,例如由于磨损使表面材料散失而使联接松动,不能正常工作;或者由于表面受到微动损伤,萌生裂纹,在适当的外载荷作用下,裂纹扩展导致构件断裂等。

已经知道,只要有十分之一微米($0.1\mu\text{m}$)的表面相对滑动距离,就可以造成表面的微动

损伤,这也是“微动磨损”一词的由来。因为滑动距离小,使人们长期没有察觉。也因为滑动距离小,使微动磨损具有独特的性质(例如磨屑不易逸出),滑动距离太大就会不具备这些特点,就不是微动磨损,而成为普通的大滑动摩擦磨损。不同学者从自己的研究结果出发,得出不同的数值,有的认为微动磨损的最大滑动距离是 $300\mu\text{m}$,有的则认为是 $250\mu\text{m}$ 或 $200\mu\text{m}$,这与材料性质等有关。重要的是有了一个大致的数量认识,而不在于几十微米的差异。

上面所说,微动磨损是指对表面造成的机械损伤,这仅是一个基本出发点。在实际工程中,微动磨损造成的后果还要受到其他因素的影响甚至控制。在腐蚀环境中,受到机械损伤的表面被腐蚀,即使在空气中也会受氧化;在高温环境中,腐蚀和氧化将加速进行等因数的参与,不仅对微动磨损造成的后果产生很大影响,而且还可能形成不同的微动磨损机理。因此,在学科的发展过程中,还出现了描述这些现象的其他一些名词和术语,如微动腐蚀;咬蚀;微振磨损等。

为了行文方便和初步分清概念,将一些名词和术语说明如下:

微动(Fretting)——指两构件(物体)接触表面间的一种相对滑动的动作或运动状态,它的特征是相对滑动的距离很小,是反复的、周期性的。

微动频率(Fretting Frequency)——单位时间内往复滑动的次数。

微动振幅(Fretting Amplitude)——又称滑动幅值,即半个周期里相对滑动的距离。

微动磨损(Fretting Wear)——由微动造成的表面损伤,如材料损失、表面形貌变化、表面或亚表面出现微裂纹或扩展性裂纹。

微动腐蚀(Fretting Corrosion)——微动在腐蚀环境(包括电解质)中发生,腐蚀因素在微动磨损及其导致的后果方面起极重要作用。

微动损伤(Fretting Detriment)——微动造成的不良后果的统称,包括微动磨损、微动腐蚀、形成微动疲劳裂纹等。

二次微动(Secondary Fretting)——接触界面上已脱离母体的材料继续受挤压、研磨作用。磨屑大小、形状、成份(主要是被氧化程度)和结构都在不断变化,并对后续的磨损产生影响。

比磨损率(Wear Value)——单位垂直负荷下、单位滑动距离造成的材料体积损失 [$\text{m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$]。在振幅相同情况下比较才有意义。

微动疲劳(Fretting Fatigue)——这个名词用在两种情况:

第一,两个接触体在较大的接触压力作用下,加上微动,可以在接触表面引发裂纹。在反复微动作用下,裂纹扩展,使裂纹与外表面之间的材料脱离母体,剥落下来成为磨屑。产生裂纹是因为材料疲劳所致,因此叫做微动疲劳。这是微动磨损的机理之一。由于物体除承受接触压力和产生微动所需的甚小推动力之外,不受别的力,因此只是局部材料的疲劳,一般不造成整个物体疲劳破坏。

第二,构件或材料(制成试验件)一方面在表面某部位遭受微动损伤,另一方面自身还承受较大的外部工作载荷(拉一压、弯曲、扭转及其合成载荷等)。微动或微动与外载的共同作用,使表面产生裂纹、裂纹扩展、构件断裂。此情况被称为机械构件的微动疲劳(断裂)或材料的微动疲劳(断裂),断裂两字常被省去。

在使用“微动疲劳”一词时,一般都指第二种。在可能引起混乱之处可根据上下文意义判明其含义或直接作出说明。

以接触表面相对滑动距离很小为特征的微动磨损,可以在两种情况下出现。一种是两个紧固联接起来的构件的接触表面(用螺栓、铆钉或压配合等方法),彼此在名义上相对静止,而工作时由于外载荷的作用,构件发生应变和变形,接触表面会产生微小的相对滑动。以螺栓联接的搭接板为例,工作时由于外载荷作用,联接处两板的接触表面、螺栓头和板的接触表面等可能发生微动。另一种情况是,两构件虽然不是紧固联接,由于其特殊构造和装配型式,在工作中出现微动。这方面的典型例子是轮盘和叶片的榫头联接。以航空发动机的压气机或涡轮叶片的榫联接为例,一般说,榫头装入榫槽中是有间隙的,不工作时能活动。轮盘旋转时,叶片的离心力使叶片榫头表面紧贴在榫槽表面上。随着转速增高,叶片离心力加大,榫头在榫槽中沿径向向外滑动,造成榫头和榫槽接触面微动。转速变化的一次循环,微动就经历一个周期。

图 1-1 可说明微动磨损和微动疲劳是怎样产生的。图 1-1(a) 所示为一个一端固定

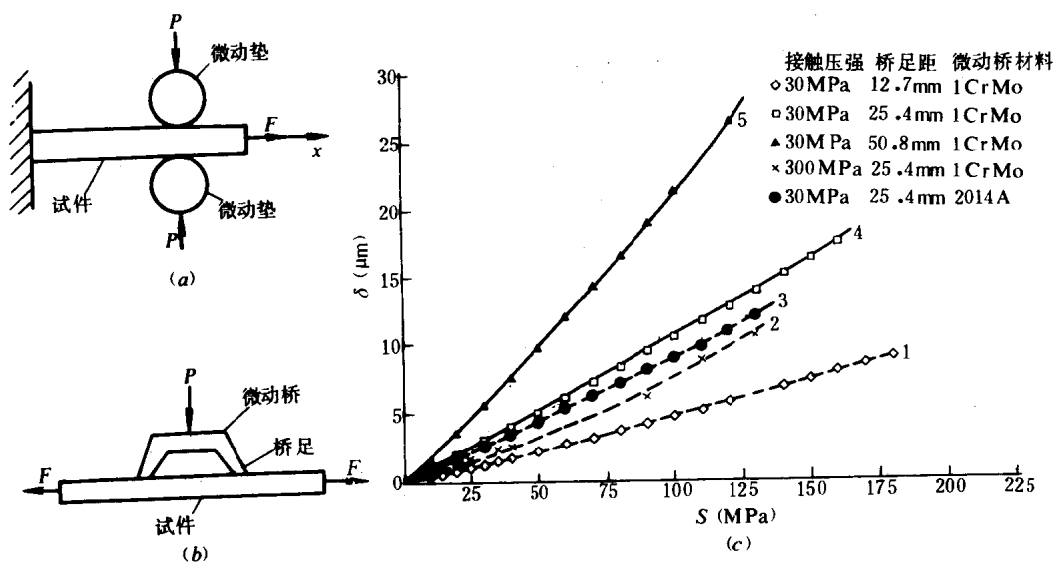


图 1-1 微动磨损和微动疲劳实验原理图

的平板试件在自由端受 x 向的循环拉力 F 作用,另有上下相对的圆柱体(或球体)受力 P 作用压在试件上。圆柱体或球体称为微动垫,它本身既前后左右移动,也不旋转。试件和微动垫理论上是直线或点接触,实际上是面接触。在拉力 F 作用下,试件因弹性应变而伸长,接触表面便产生相对滑动。因弹性伸长量一般都很小,这种相对滑动便是典型的微动。随着拉力 F 的循环交变,微动也周期性发生。这种方案使微动振幅可以调节:当微动垫的位置向试件的固定端靠近时,振幅变小,反之亦然。改变拉力 F 的大小,也可改变微动振幅。

图 1-1(b) 所示方案的原理基本一样。试件两端受循环交变拉力 F ,微动桥受力 P 的作用压在试件上。两个微动桥足与试件表面之间可以是平面接触,也可能是圆柱面或球面与平面接触。在力 F 作用下,试件的弹性伸长使接触表面产生微动。如果把微动桥放在试件的中部,即微动桥与试件的组合体成左右对称,则两桥足的微动振幅相同,反之则不同。改变微动桥足距或改变拉力 F ,都可以改变微动振幅。显然,微动桥足距大或拉力 F 大,微动振幅就大,

反之亦然。

图 1—1(c) 为一个试验例子,清楚说明桥足距和拉力 F 造成的应力幅 S 的大小对微动振幅 δ 的影响。图中横坐标为由拉力 F 造成的应力幅值;纵坐标为微动振幅。图中曲线表明,随着应力上升,微动振幅几乎都成正比上升(当然在试件的弹性变形范围内)。此外,比较第 1 和第 5 条曲线,在接触压强都是 30MPa,微动桥材料都是 1CrMo 合金钢(所有五条曲线的试件材料都是 $3\frac{1}{2}$ NiCrMoV 合金钢)的情况下,两者仅微动桥足距不同。从曲线看到,在同一应力水平下,曲线 5 的微动振幅要比曲线 1 大得多。因为曲线 5 的桥足距为 50.8mm,而曲线 1 的仅为 12.7mm。

上述实验方案,既可以研究接触表面的微动损伤,也可以研究试件的微动疲劳。并且有压紧力 P ,外载荷 F ,微动振幅,外载和微动频率等可以控制的参数供选择(这种方案的外载和微动频率相同);可设置环境气氛。在这两个方案中,微动垫与试验件之间的接触表面就是受微动损伤的表面,此时试验件在交变外载荷 F 的作用下的疲劳强度和疲劳寿命,就是受微动磨损影响的疲劳强度和寿命——即微动疲劳问题。可想而知,因微动磨损使试验件表面受损伤,试件的疲劳强度或疲劳寿命将下降。应该指出,图 1—1 的实验方案不能完全模拟真实构件的微动磨损和微动疲劳,因为真实构件的接触表面形状一般都比较复杂,受力情况也比较复杂。

图 1—2 所示为微动磨损实验方案。一圆柱的端面受力 P 的作用压在一平板平面上,平板作往复平行微小振动,使圆柱与平板接触部位产生微动。平板除受圆柱端面压紧力外,只承受作微小振动所需的很小推动力,因此平板除在接触部位有微动磨损外,一般不存在疲劳破坏问题。它于专门用来研究微动磨损机理等有关问题而不涉及构件的微动疲劳。

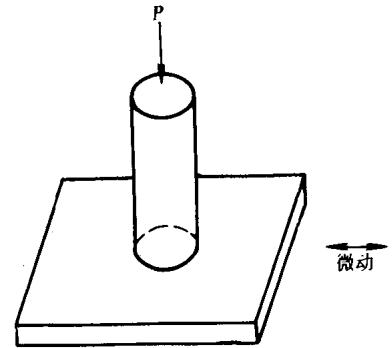


图 1—2 微动磨损示意图

二、学科的形成

人们对微动磨损的认识是比较晚的。虽然 1911 年伊登(Eden)、罗斯(Rose)和坎宁安(Cunningham)等人在一篇公开发表的题为“金属的耐久性”的疲劳试验研究报告中,描述疲劳试验的夹紧件出现锈蚀,使试件难以从夹紧件中取下的现象,但无法对此种现象作出解释,也未作深入研究。1924 年,吉勒特(Gillett)和麦克(Mack)的金属疲劳试验研究报告说,他们的试件没有在预期的部位破坏,而是在夹紧部位破坏了,但也未作进一步研究。此外,人们在工程机械中,发现零件之间的接触表面如果接触压力很大,也易出现如同伊登等人报告的夹紧件的锈蚀现象。例如键与键槽之间,滚珠轴承的滚珠和跑道之间,轴和孔的压配合表面的边缘,这些在 19 世纪就开始出现的结构,被人们发现有现在被称为“微动磨蚀”的现象。

许多学者认为汤姆林森(Tomlinson)是第一个系统研究微动磨损的人。从 1927 年开始,他设计了专门的设备,发表了一些研究心得。他认为,发生微动损伤的条件是“表面必须紧紧地压在一起”、“不停地来回滑动”。他提出的这两点,虽然当时没有条件深入研究和阐述,但直到现在,仍然是公认的产生微动磨损的基本要素。他的研究成果最有意义的贡献是,

揭示了伊登等人所观察的锈蚀,以及键联接的某种锈蚀,不是在静止状态发生的,是接触表面有某种微小相对滑动情况下产生的,这就奠定了创立微动损伤学科的基础,并使用了“Fretting”(微动)一词。此后便有愈来愈多的人从事这项研究。但较早期的研究结果都处于比较零碎的状态。在40年代初,戴斯(Dies)提出的微动磨损微粒的报告,强调微粒的硬度的重要性,因为硬微粒能起磨料的作用。而大多数金属氧化物都比金属本身的硬度高,因而微动接触副中的氧化环境具有重要意义。萨克曼(Sakmann)和赖特迈尔(Rigtmire)关于氧化条件对微动磨损影响的研究,得出相同的结论。但是戈弗雷(Godfrey)等人的研究报告指出,不能氧化的材料(例如某些非金属)也同样产生微动磨损,并且进一步认为,被磨下的微粒的氧化以及金属表面的氧化,对微动磨损的影响都不是重要的。显然戴斯等人与戈弗雷等人在氧化作用方面的看法不同。

对微动损伤的深入系统的研究,有赖于发展先进的计算方法以及先进的实验设备、先进的制造工艺、先进的测试手段以及显微摄影技术等。实验设备要能够精确地调整和控制影响微动损伤的各种参数,如压紧力、滑动幅值、载荷大小和频率、环境温度、氧化或腐蚀环境的建立等。测试手段要能精确地测定上述各参数值之外,还要精确测定实验过程中出现的参数及实验结果,如测定实验进行时接触表面的温升、电阻、摩擦系数以及微动时材料的磨损量等。显微和摄影技术用以观察被微动的表面的形貌变化,微裂纹的形成和裂纹的扩展等。

在40年代和50年代,各国学者用较大的精力探索微动磨损的机理。所谓微动磨损机理,就是引起微动磨损的原因、条件,微动损伤现象、磨屑形成原理和过程,微裂纹的产生和扩展等。此后对微动磨损机理的研究一直没有间断过,直到现在仍然是一个热门研究课题。迄今,对微动磨屑形成机理,有两个有代表性的理论,一是粘着理论,另一个是脱层理论。但它们都不能完美地解释磨屑形成的全过程。粘着理论似乎更适用于微动磨损的初始阶段,而脱层理论则能较好地解释微动磨损的稳定阶段。

机械构件中观察到的微动损伤现象是开展微动磨损研究课题的起因,所以微动磨损机理和构件的微动疲劳两个项目的研究必然是相辅组成,交叉进行的。

构件的微动疲劳研究可以分为两个阶段。第一阶段是设计一种试验件,研究该试验件有微动时裂纹的形成和扩展、试验件的微动疲劳强度和寿命、影响因素等,力图从中找出某种具有普遍意义的规律。这种试验研究的参数是人为设计成好控制、好测量。由于试验结果往往代表了某种材料的性能,因而称之为材料的微动疲劳特性或寿命。第二阶段是研究工程中实际的机械构件的微动疲劳。与人为设计的试验件不同,实际工程构件不仅几何形状比较复杂,而且承受的外载荷也比较复杂,在接触表面及其附近呈现复杂的应力形式,此外还有环境气氛等,这些都不是为了研究微动疲劳而人为设计的参数,而是构件的实际工作条件,靠我们分析出其中造成微动疲劳的因素及影响程度,并且要有先进的计算方法分析应力和位移等。

1941年沃洛戴维斯(Warlow Davis)研究了钢制试验件,报告称,由于微动磨损,使试件的疲劳强度下降了13%~18%。与此同时,刘(Liu)、科坦(Corten)和辛克莱(Sinclair)研究了钛合金试件,变化多种参数,报告称,最严重的情况下,由于微动磨损的作用,钛合金的疲劳强度下降了80%,说明钛合金对微动损伤很敏感。

由于机械工业、铁路运输、航空与航天、核能工业、航海等各领域中都发现了重要零部件出现微动疲劳问题,针对具体工程构件的研究受到广泛重视。

美国、英国、原苏联、日本、加拿大及西欧的一些国家都积极进行了微动损伤和微动疲劳方面的研究。美国材料试验学会(ASTM)在50年代初出版了第一本关于微动磨损的文集。英国诺丁汉大学的沃特豪斯博士(Waterhouse R. B)在70年代和80年代都出版了专著,总结了他本人及同行的研究成果。原苏联的高列加(Голега Н. П)也在70年代出版了专著。1974年北约航空研究与发展顾问团(AGARD)召开学术会议,讨论飞机上的微动损伤和微动疲劳并出版了文集。1985年4月英国召开了微动损伤和微动疲劳的学术讨论会。80年代初,在英国国防部和罗·罗公司的支持下,在牛津大学建立了微动疲劳的博士学位攻读项目。以牛津大学科学工程系鲁依斯(Ruiz C)博士为首的有笔者参加的课题组,在微动磨损领域作了一些细致的探索,对轮盘和叶片的榫联接的微动疲劳特性作了系统研究,并有三名取得了博士学位。

在早期,微动磨损是作为摩擦学的一部分在教科书或其他摩擦学著作中作介绍,现在已经形成一个内容丰富的学科,涉及广泛的知识领域。微动损伤引起的疲劳强度下降,严重影响产品使用的可靠性,已引起各重要机械行业的重视。罗·罗公司对航空发动机一些关键零件的研究表明,微动损伤导致构件的使用寿命下降约30%,特别是对长寿命的构件影响更严重。

我国,从80年代开始有人注意研究这一课题。在航空部门,80年代后期和90年代初,作为预研项目投入了一些资金作基础研究,航空科学基金也资助了一些项目。铁路运输部门在与美国合作研究车轮和轮轴的压配合联接的微动疲劳。最近国家自然科学基金资助了微动疲劳研究项目。虽然我国已开始重视这一领域的研究,但多数工程技术人员对微动损伤的概念不清楚,甚至一无所知。工程实际中大量的微动损伤问题,或者没有被发现,或者被研究单位、生产单位、维修单位当作其他损伤而作出错误的处理,以致故障重复出现而得不到解决。因此,无论从理论探讨和工程应用方面,我国都迫切需要开展深入的研究。

§ 1-3 微动磨损的机理

在微动磨损机理方面的研究各国学者已经进行了大量工作。由于微动损伤的基础仍然是机械损伤,所以采用“微动磨损”一词。但这不等于别的因素是次要的。恰恰相反,诸如氧化这样的因素,有时起着很重要的作用,有氧化和无氧化会使微动的后果(以产生磨屑多少来衡量,或者以是否产生微裂纹及裂纹数目和深度来衡量等)截然不同。微动磨损还与材料的粘着性能有关;与磨屑的形状和性质有关,因为磨屑形成后会反过来影响相继的磨损过程;还发现微动磨损过程伴随有电化学反应及局部的很高的温升,使材料软化或重新结晶等。总之,影响微动磨损的因素很多(可以举出五十多种),不过其中有些是次要的。从一般摩擦磨损理论出发,微动磨损同时具有其中的粘着、磨料、氧化、疲劳等四种机理。

在没有微动损伤时材料的疲劳寿命,即使在严格相同的实验条件下,所得结果也有很大分散性,但常常能服从某种分布——如正态分布。而以某种指标来衡量的(也可以寿命衡量)微动磨损和微动疲劳的实验结果分散性更大,甚至难以拟合某种分布规律。不同学者对同一种试验所得的结果可能不同。这一方面引起对微动损伤机理的不同看法,另一方面使人们去发现尚不知道的影响微动损伤过程的新因素和新机理。

应该说,从各国学者的研究结果中,已经得出对微动损伤理论的一些共同看法,如:

(1)微动磨损是以机械性损伤为基础,这种损伤有可能用某种数学模型来量化;

(2)机械性损伤之外的因素(如氧化)能使微动损伤过程大为改观,甚至在量方面起主导作用,这使得微动损伤问题复杂化;

(3)接触表面的摩擦力(由法向压力和摩擦系数决定)是造成机械损伤的重要因素;

(4)磨屑的形状、大小、成分对相继的微动磨损过程有重要影响;

(5)很小的相对滑动($0.1\mu\text{m}$)便足以造成微动损伤;

(6)微动磨损与普通磨损虽然大不相同,但普通磨损的某些理论和分析方法,也可适当地用于分析微动磨损。

上述认识还不能说是微动损伤的系统理论。在论述微动磨损机理时,必须弄清每个过程的具体细节,例如磨损是怎样开始的,磨屑的形成原理、形成过程、成分,微裂纹的形成原因和过程,影响各过程的因素等。

对微动磨损和微动疲劳的机理、影响因素和后果,在有些问题上长期存在争议,甚至不同学者根据自己的实验结果得出相反的结论。图 1-1(a)所示实验模型,作用力 F 是正负交变的,即试件交变的受拉和受压。有两种不同的实验。第一种,在试件受拉应力的半个周期内,微动垫施加压力 P ,在受压应力的半个周期内微动垫离开试件(不接触)。第二种,在试件受压应力的半个周期内,微动垫施加压力 P ,在受拉应力的半个周期内微动垫离开试件(不接触)。结果,不同的学者实验结论不同,而且各自都有“合乎道理”的解释。一些学者认为,第一种实验比第二种实验的疲劳寿命(以疲劳裂纹扩展到一定深度来衡量)长,原因是在受拉应力时因微动产生的微裂纹,在紧接着的压应力作用下不会扩展;而在受压应力时因微动产生的微裂纹,在紧接着的拉应力作用下极易扩展。如科林斯(Collins J A)等人就得到这种实验结果并作上述解释。与此同时,奥康纳(O'Connor J J)等的实验结果相反,是第二种实验比第一种实验的疲劳寿命长。他们的解释是,试件受压应力时表面微动磨损不易诱发裂纹。

很难说哪种结果不对,只能从中看到微动损伤问题的复杂性,有些机理需进一步探讨。

一、微动磨损机理诸观点

对微动磨损机理的认识,先是继承了摩擦学的理论,后在大量实验观察的基础上,逐渐建立起来的。往往是对实验结果作解释,然后上升到理论,便成为一种对磨损机理的理论认识。但到目前为止,还没有一个完美的理论能解释所观察到的全部微动磨损现象和实验结果,每个理论只能解释其中的一部分,有的覆盖的内容多些,有的少些。把众多学者的实验结果及观察到的微动磨损现象归纳起来,认为一个满意的微动磨损理论或机理,至少应能解释以下事实:

(1)铁的微动磨屑主要由 Fe_2O_3 组成;

(2)循环数一定时,低频微动比高频微动损伤较大;

(3)材料损失随着负荷和滑动振幅的加大而增加;

(4)低于室温比高于室温损伤要大;

(5)在干空气中比湿空气中损伤大;

(6)微动磨损前阶段和后阶段在材料损失速率,磨屑形状和成分等方面有差异。

从 30 年代以来,各学者提出的较好的理论或零星见解,都能或多或少地解释上述问题中的一个或几个,但也有争议。现在研究微动磨损理论,应立足于新发现,而不仅仅满足于能

解释这些事实。

这里,介绍一下历来各学者发表的有代表性的关于微动磨损理论的观点。

1. 分子磨损理论

汤姆林森等人在研究微动磨损现象时,探知在相对滑动很小的情况下也会有微动磨损引起材料损失,便粗略认为它是一种分子磨损过程。接触面在接触压力和往复滑动的共同作用下,范德瓦尔斯力将起作用,导致材料脱离母体,这显然是一种物理作用。这是最早的微动磨损理论。这种粗略的认识由于难以用来解释微动磨损的种种现象而慢慢被抛弃了。

2. 粘着理论

戈弗雷(Godfrev)等人从微动磨损产生的磨屑作判断,认为微动磨损主要是一种机械作用。在相对滑动中接触表面的粘着点被撕开而产生磨屑碎粒。如果磨屑随后被氧化,则可能加速磨损过程。但由于不能氧化的非金属材料也会产生微动磨屑,因而氧化不是产生微动磨屑的必要条件。这个理论可以解释很多材料在微动磨损初始阶段的情况。

3. 机械和化学共同作用理论

这是由尤利格(Uhlig)提出的,理论的要点是:

(1)由于机械运动(接触表面相对滑动)使表面凸峰点互相摩擦,刮去金属表面的氧化层及其他附着物,并把暴露的纯金属也刮掉一些,造成磨损并出现磨屑。这是机械作用。

(2)被刮去氧化层后的金属表面重新氧化,生成新的氧化层。这是氧化作用。

(3)由于机械作用刮去氧化层,因此氧化层愈厚,每次滑动刮下的磨屑愈多。

可见,机械作用强烈(接触压力大,相对滑动幅值大等)和氧化作用强烈(纯金属暴露多,有充足的氧供用,一次循环中氧化的时间长等)都使磨损量大。尤利格提出一个计算一次循环(机械运动—滑动往复一次)中金属磨损量的公式:

$$W = (K_0 L^{\frac{1}{2}} - K_1 L) \frac{1}{f} + K_2 b L \quad (1-1)$$

式中 K_0, K_1, K_2 ——主要与材料性质有关的常数;

L ——接触表面之间的总压力;

b ——滑动幅值;

f ——滑动频率,因此 $1/f$ 是周期。

式(1-1)第一项(圆括号所含)代表氧化的作用。运动周期长,则氧化时间长,磨损量大。压力 L 对氧化的作用不是单调的,太大或太小都对氧化作用不利。从数学上看,当

$$L = \frac{1}{4} \left(\frac{K_0}{K_1} \right)^2$$

时氧化作用最大。由于一般情况下 K_0 和 K_2 是相同数量级, K_1 要小两个数量级,所以在实验的合理参数范围内,氧化项不会是负值。

式(1-1)第二项代表机械作用项,与接触压力 L 和相对滑动幅值 b 成正比。

若总共经历 N 个滑动循环,则总磨损量为

$$W_t = N \cdot W = (K_0 L^{\frac{1}{2}} - K_1 L) \frac{N}{f} + K_2 b N L \quad (1-2)$$

有些学者确实用搜集磨屑,称磨屑重量的方法确定磨损量,但要精确是困难的。因为磨损量本来就很少,又不易收齐,损失稍许,相对误差就很大。再者,试件上金属损失的重量与磨屑的重量并不相等,因为磨屑变成了氧化物,重量还要换算。所以许多情况下是测量试件