

* 学科发展 *

材料疲劳断裂研究的现状和发展

王 中 光*

(金属研究所)

【提要】 材料疲劳断裂研究是一门应用性很强的学科，本文对该学科的意义和作用、国内外发展简况及目前的研究进展进行了论述并就今后应优先选择的项目和学科发展对策提出了建议。

一、意义和作用

150 多年来,由于疲劳断裂造成的恶性事故屡次发生。1842 年 5 月 10 日,法国国王在巴黎郊外的凡尔塞宫举行盛大庆典,庆典后人们涌向车站乘火车回城,火车行驶途中因机车车轴出现疲劳断裂,致使列车倾覆,造成数十人丧生。1954 年 1 月世界上第一架喷气式民航客机“彗星号”首次航行因部件材料疲劳断裂坠入地中海。1980 年 3 月在英国北海油田作业的亚历山大基兰德号海洋平台在风暴中倾覆,沉入大海,许多人葬身鱼腹,也是疲劳断裂造成。这些悲剧往往是突然发生的,事先没有明显的预兆。正是这些不断出现的疲劳断裂事故,大大推动了人们对于材料疲劳断裂的研究。疲劳断裂由于涉及人类生活的许多方面,甚至已经出现了以疲劳断裂为主题的幻想小说和电影。1948 年,飞机工程师纳维尔·舒特(Nevil Shute)出版了他的预言小说《无平坦大道》(《No High Way》),描写人们同疲劳断裂作斗争的故事,这本书曾多次再版,并被改编成电影《升空无坦途》(《No High Way to the Sky》),将人们带到对疲劳断裂进行思考的幻想空间。

材料疲劳的研究不仅涉及材料的发展和产品水平的提高,而且事关产品的安全使用。据美国国家标准局 1982 年向国会提出的报告,美国由于断裂和为防止断裂所花经费高达 1190 亿美元,相当国民经济总产值的 4%。国际著名疲劳学者、《工程材料与结构疲劳断裂》杂志主编英国雪菲尔德(Sheffield)大学教授 K. J. Miller 去年 10 月在中国的讲演中,当谈到疲劳断裂研究的重要性和紧迫性时指出,西方工业发达国家每年因断裂和腐蚀所造成的损失已高达 GNP 的 8%。他大声疾呼通过广泛的多边国际合作,加强疲劳断裂的研究,开发出优异的抗疲劳结构材料,改善设计规范,精确预测产品的疲劳寿命,提高产品的安全可靠。我国尚缺乏这方面的统计数字,但在石油、煤炭、铁路、航空和电力等部门都曾发生过一些因疲劳断裂引起的恶性事故,损失是巨大的。如果对材料和结构在使用条件下的行为有深刻的研究和清晰的了解,就能研制出耐疲劳的材料,那么大部分事故就可以预防和避免,即使出了事故,也较容易找出原因,采取改进措施。

在我国,由于对材料的疲劳现象没有进行充分的研究,对于材料性能只满足于静强度指

* 材料疲劳与断裂国家重点实验室主任。

标,忽视材料的动态性能和使用条件下的行为,不能向设计者提供可靠的疲劳理论、设计计算公式和完整的疲劳性能数据,使我国机械工业的绝大部分零部件的设计还停留在静强度或类比强度阶段,产品可靠性差,浪费大,缺乏国际竞争能力。因此,加强材料疲劳的研究,乃是改造老材料,研制新材料,加速设计更新,提高我国产品质量和延长产品使用寿命,减少或避免恶性事故的发生,增强产品国际竞争能力的必由之路。

二、国外发展简况

随着科学技术的发展和对产品质量要求的不断提高,材料疲劳研究中基础理论和工程应用两个方面互相促进,发展势头长盛不衰。疲劳已成为材料力学性能研究中一个综合性很强的分支学科,它涉及力学、物理、化学、材料学、机械学、应用数学等多种学科领域。材料疲劳的基础研究始于本世纪初,但只是最近 30 余年才取得一些突破性的进展。从 50 年代开始,人们普遍认识到,不从微观水平上对疲劳基本过程进行了解,不对整个疲劳过程及其各阶段的本质进行系统的研究,就不可能有抗疲劳安全设计的进一步发展。基于这种认识,由于晶体塑性的位错理论的建立、液压伺服疲劳试验系统的出现和电子显微术的广泛应用,自 60 年代末以来,国外疲劳机理的研究有很大发展,使人们对于疲劳的基本过程和行为有了较清楚的了解,并在改进老材料和发展新材料中发挥了作用。例如,由于认识到滑移的集中或局部化是促进疲劳裂纹萌生的主要原因,因此通过预变形、均匀分布非共格质点、细化晶粒、降低层错能、表面改性等可以分散滑移或降低形变集中的措施,使材料的疲劳寿命得以大大提高;由于认识到最佳抗疲劳裂纹萌生的组织结构不一定具有最好的抗裂纹扩展的能力,因此人们可以根据裂纹萌生和裂纹扩展的相对重要性,有意识地设计材料的组织结构,使其既具有抗疲劳裂纹萌生又有抗疲劳裂纹扩展的能力。材料疲劳的研究成果也使工程设计发生了巨大的变化,目前国外在飞机、汽车、电站设备、锅炉及压力容器、海洋工程、原子能工程等方面,都已采用或部分采用了疲劳强度设计,以取代传统的静强度或类比强度设计。由于材料疲劳研究的进展和 60 年代初线弹性断裂力学开始应用于疲劳断裂的研究,疲劳设计理论和方法发生了重要的变化,即从过去经典的安全应力概念进入到以“损伤容限”为基础的断裂力学设计方法,从名义应力设计过渡到反映疲劳破坏本质的应变设计,并进入能预测疲劳寿命和提供可靠性指标的阶段。而且由于材料疲劳性能研究的发展,近几年世界各工业发达国家都采用材料性能数据直截了当地预测构件的寿命,逐渐抛弃了用整机试验以确定寿命,既不准确又不经济的方法。

但是材料的疲劳现象是一个十分复杂的问题,有人分析指出,与疲劳有关的因素有 40 多个。虽然疲劳的研究取得了很大的进展,但人们还没有完全掌握疲劳断裂的规律和本质,还不能完全防止因疲劳断裂引起的灾难性事故。现有的疲劳的无限寿命设计、安全寿命设计或损伤容限设计方法,都没有充分考虑影响材料疲劳寿命主要过程的微裂纹和短裂纹扩展,因而或偏于保守,或偏于危险。

在美国、德国、英国和日本等工业发达国家,疲劳的研究日益受到重视,从工业部门到高等学校和科研机构都有水平较高的研究力量和现代化的实验设备,并且通过国家投资建立了实验中心,通过协调机构统一安排不同层次的研究工作。例如德国现有 500 多个材料试验所(站),进行着包括疲劳在内的材料力学性能的研究,其中斯图加特大学的国立材料试验所

(NMPA), 由战后的十几人发展到今天的 200 多人, 每年经费达 2 亿马克之巨, 已成为西欧电站材料和设备的强度研究中心。

三、国内研究进展

疲劳研究, 历来包括结构和材料疲劳两个方面。前者着眼于宏观, 寻求零构件或整机抗疲劳的优化设计以及疲劳损伤程度和寿命的预测。后者则着眼于微观, 从材料组织结构的角度研究疲劳现象的物理、化学、力学过程及其微观机制, 以期通过控制材料的内在因素, 改善材料的抗疲劳性能或发展新型的抗疲劳材料。为改变我国机械产品设计的落后局面, 加强国际竞争能力, 我国机械委有关部门于几年前提出了关于振兴疲劳强度设计的研究报告。报告提出, 到 2000 年要在疲劳强度理论及设计方法上有新的突破, 完成从静强度设计到动强度设计的过渡, 使我国机械行业强度设计的总体水平达到国外 70 年代末到 80 年代初的水平。

同国外一样, 我国材料疲劳的研究比结构疲劳的研究起步要晚, 大体始于 60 年代初。前 20 年, 由于种种原因, 屡遭挫折, 甚至被迫完全停止, 只是到了 80 年代, 才有了一个稳定发展的环境。“六五”期间, 在国家科委的资助下, 中科院金属所、中科院力学所、西安交通大学、华中工学院、北京钢铁学院(现北京科技大学)和清华大学合作承担了国家科委重大基础理论课题“材料微观结构与力学性能的研究”。在此基础上, 这六个单位又共同承担了国家自然科学基金委员会的“七五”重大项目“金属材料的断裂规律及机理若干问题的研究”。与此同时, 在中国科学院的资助下, 中科院力学所、金属所、腐蚀与防护所和固体物理所共同承担了重大基础研究项目“材料的变形、损伤和断裂行为的机制及其力学理论的研究”。在以上项目中, 着重选择了材料疲劳领域中某些活跃的前沿问题进行研究, 包括单多晶体的循环形变累积损伤和裂纹萌生规律、复相材料的疲劳断裂过程、长短疲劳裂纹的扩展规律及其门槛值、疲劳断裂机制图、表层组织对疲劳断裂的作用机理、环境(温度和介质)对疲劳断裂的作用和缺口件的疲劳过载效应等等, 通过这些项目以及各部门和国家基金委资助的其它有关材料疲劳的研究, 我国材料疲劳研究的整体水平有了很大提高。近几年来, 我国每年有 50—60 篇有关材料疲劳的论文在国际刊物上发表。1990 年在美国夏威夷举行的第四届国际疲劳学术会议上, 我国的论文数为 54 篇, 约占会议论文总数的 1/5。由于我国材料疲劳的研究比国外发达国家晚起步半个多世纪, 虽然个别成果目前已进入国际先进行列, 但从总体上讲, 与先进国家相比, 还存在很大差距, 我们还缺乏开创性的、处于领先地位的系统的研究成果, 研究成果的工程应用才刚刚开始, 目前还不能说, 我们在国际上已取得了一席之地。

为加强我国材料疲劳的研究, 使我国在这一学科领域内尽快进入国际舞台, 并有能力解决国家在经济建设中的重大科学问题, 国家计委于 1988 年投资建设了“材料疲劳与断裂国家重点实验室”, 这个实验室已于 1991 年建成, 并通过了国家验收。这是加强我国材料疲劳断裂研究和培养有关人才的战略性措施。这个实验室设在中国科学院金属研究所, 主要从事与材料疲劳断裂有关的基础性研究, 其主要研究方向包括: (1)通过对材料, 包括传统金属材料 and 新型材料的疲劳断裂规律及机理的研究, 发展材料疲劳断裂的微观理论, 寻求具有高疲劳性能的最佳显微组织设计, 建立可靠的材料疲劳损伤的评价和疲劳寿命预测方法; (2)利用力学、物理学、化学及材料科学的新知识、新技术和新方法, 建立和发展定量断口学, 开拓材料断裂失效分

析的新途径; (3) 针对我国国民经济建设和高技术发展中出现的某些断裂问题和重大断裂事故, 进行分析研究, 探讨解决的途径和方法, 对材料的合理使用提供理论依据和指导。围绕上述的主要方向, 该实验室的研究内容包括了材料疲劳这一领域里当前最活跃和最主要的学科前沿问题。该实验室的工作目标是, 在疲劳断裂本质和物理过程的基础性研究方面要进入国际先进行列; 对于具有应用背景的基础性工作则要在国民经济中发挥作用。近几年来在有关部门的支持下, 该实验室已经取得了显著的成果, 1989—1991 年间共发表论文 278 篇(其中有 67 篇发表在国际刊物上), 有些论文被国内外作者多次引用, 1989 年以来获中科院科技进步一等奖一项, 三等奖一项; 中科院自然科学一等奖一项, 二等奖三项, 三等奖两项; 铁道部科技进步三等奖一项; 石油天然气总公司三等奖一项。还为航空、石油、化工、铁道等工业部门完成了多起以疲劳断裂为主的重大事故分析, 创造了上亿元人民币的经济效益和明显的社会效益。现在, 该实验室正在为不断提高研究水平, 增强参与世界学术竞争能力和为国民经济发展做出重大贡献而努力奋斗。该实验室竭诚欢迎国内外的材料疲劳专家、学者和青年科学工作者来实验室访问、讲学、工作和进行合作研究, 共同把我国材料疲劳研究的水平提到一个新的高度。

四、优先选择项目建议

随着我国社会主义市场经济的建立和扩大对外开放, 我国机械产品将面临严重的挑战, 产品的高质量和合理的价格是在竞争中取胜的必要条件。因此, 改变我国机械产品的传统设计方法, 对产品进行寿命预测和可靠性分析, 已刻不容缓, 而对于制造机械产品的材料在疲劳载荷作用下的形变与断裂行为的深刻了解, 乃是产品设计、寿命预测和可靠性评估的基础。为适应国民经济发展的新形势, 有必要采取有力的对策, 加快材料疲劳断裂研究的进展。

1. 继续加强基础研究。如果不从微观水平上对材料疲劳的基本损伤过程进行系统的研究并获得深刻的了解, 就不可能可靠和有效地预报和提高寿命。疲劳强度设计准则包括所谓的无限寿命直到允许损伤, 因此对材料的循环形变损伤、裂纹萌生和裂纹的扩展, 特别是短裂纹行为的了解, 是提高疲劳寿命和完善疲劳强度设计方法的基础, 需要着力加以研究。在这里还必需考虑环境(温度和介质)和变幅载荷中载荷交互作用的影响。为简化因素, 选择纯材料和单双晶体作为研究对象无疑是必要的, 但是必须重视传统工程结构材料的疲劳研究, 特别是对广泛应用的钢的疲劳组织结构敏感性的研究。

2. 重视高新技术发展中有关材料疲劳的研究。随着高新技术的发展, 大量的新型材料不断涌现, 它们或作为机械装备中的结构材料, 或作为电子器件中的功能材料, 都将在一定环境和载荷下使用。载荷的变化, 温度的起伏或两者的结合, 会使它们遇到疲劳变形、断裂和使用寿命问题。这些新型材料的内部组织结构与传统材料的差异, 带给它们以新的变形和破坏模式, 这不但是对材料疲劳研究的新挑战, 也提出了许多新的研究课题。例如界面循环塑性与界面疲劳断裂、热机械疲劳、裂纹诱导相变、裂纹的闭合与屏蔽等。对于这些问题的研究将能为新型材料的强韧化途径和使用中的可靠性提供理论的指导。

3. 建立新的疲劳寿命预测方法。近十年来的大量研究证明, 微裂纹和短裂纹的扩展是控制疲劳寿命的主要过程。因此, 建立以短裂纹为基础的疲劳寿命预测方法, 乃是对传统的疲劳寿命预测方法的根本变革。这里需要在各种载荷和环境条件下进行系统的实验和积累大量的

数据,并由此建立和发展合理的理论模型,广泛的国际合作将会加速这一工作的进程。1991年欧洲多个国家建立了名为“欧洲随机载荷疲劳研究”的国际圆桌(Round-robin)试验计划,共同研究几种典型工程材料在随机载荷作用下的短裂纹行为,以期建立新的疲劳设计准则和寿命预测方法。这一计划的主持人 K. J. Miller 教授已正式邀请中国参加这一计划,我国已决定由“材料疲劳与断裂国家重点实验室”牵头,组织有关研究所和高等院校参加这一国际多边合作。

4. 建立断裂失效典型案例库和图谱。在机械装备的失效中,很大一部分是由于断裂,特别是疲劳断裂造成的。断裂失效分析或诊断是遵循断裂研究的相反过程,通过对断裂件的观察研究,回推断裂原因和机制,虽具有“亡羊补牢”和“事后诸葛亮”的性质,但这些花费巨额代价得到的信息是极其宝贵的。因此很有必要把散布于个人或单位的断裂失效事例收集整理,建立我国机械装备断裂失效典型案例库和断口图谱,它们对于今后合理选材、改进设计、安全运行以及断裂失效分析有重要的参考价值。

5. 发展疲劳损伤的无损检测和诊断技术。材料系统和结构在服役过程中,由于载荷和环境的作用或不测事故,会受到损伤,为确保系统和结构的安全运行,必须发展损伤的无损检测和诊断技术。显然,这类技术的有效应用,有赖于对损伤微观过程的深入研究,建立材料损伤参量与检测或诊断信号之间的真实关系。

五、结 语

材料疲劳的研究涉及许多学科领域。早在 1963 年,美国陆军材料研究部就专门召开了有各学科人员参加的疲劳研讨会,会后出了一本书,叫做《fatigue—An Interdisciplinary Approach》。编者在前言中说:“统一的疲劳理论的建立有待于许多学科的合作”。目前,在疲劳的研究中,宏观与微观、材料与力学的结合已成为一种趋势。从 1983 年开始,我国的航空学会、力学学会、机械工程学会和金属学会每两年联合召开一次全国性的疲劳学术会议。1991 年 9 月在山东威海召开了第五届会议,共有近 300 人参加,宣读了 200 多篇论文,这次会议的一个明显特点是代表中一半以上是来自各学科领域的具有博士和硕士学位的青年疲劳工作者以及在读的研究生。根据一些青年科学工作者的倡议,由“材料疲劳与断裂国家重点实验室”主办,于 1992 年 5 月 14 日至 16 日在沈阳召开了首届全国青年疲劳学术讨论会,来自全国各地以及香港的 74 名代表参加了会议。会上,青年学者们交流了他们在材料疲劳研究中取得的成绩,并就当前疲劳研究动态和发展进行了广泛深入的讨论,充分反映出青年学者思想活跃、思维敏捷的特点。

只要今后国家和各有关部门能够对疲劳断裂的研究给予长期和稳定的支持,只要各学科通力合作,并造就一支特别能战斗的青年科技队伍,相信我国的材料疲劳断裂研究会在今后的将来在总体上进入国际先进行列,并为我国国民经济的发展做出更大的贡献。