

文章编号: 1001-4888(2024)01-0095-20

综述: 微纳米尺度材料与结构的 原位疲劳实验及性能研究进展*

李振凯, 闫亚宾, 轩福贞

(华东理工大学 上海市智能感知与检测技术重点实验室, 上海 200237)

摘要: 随着集成电路芯片、传感器、柔性电路系统、微/纳机电系统等微机械装置向集成化和小型化不断发展, 如何预测其内部微纳米尺度结构和材料的机械性能及其可靠性成为了制约上述微机械装置进一步发展和应用的关键问题之一。在这些装置的长期服役过程中, 微纳米尺度材料的疲劳性能又成为了近年来人们关注的热点问题。针对上述问题, 首先, 调研了与微纳米尺度材料原位疲劳实验方法和疲劳性能研究有关的文献。然后, 总结了微纳米尺度原位疲劳实验方法和疲劳性能的研究现状, 包括含有孪晶组织金属、梯度组织或粗细晶金属以及在单轴、多轴应力状态下的金属疲劳性能研究, 并归纳了微纳米尺度界面疲劳损伤行为的研究现状。最后, 对微纳米尺度材料的疲劳性能研究进行了展望, 提出了对未来发展方向的思考。

关键词: 微纳米尺度; 原位疲劳实验; 疲劳性能; 展望

中图分类号: TG115 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-030

0 引言

从 2000 年开始, 微纳米尺度材料与结构的力学性能引起了人们的广泛关注, 因为这些结构是包括集成电路系统、传感器、柔性电路系统、微/纳机电系统 (Micro/Nano-Electromechanical Systems, MEMS/NEMS) 在内的各种先进微机械装置的重要组成部分^[1-3]。微纳米尺度结构具有体积小、质量轻和功耗低等优点, 因此被广泛应用在航空航天、电子通信、工业设备、汽车自动化、军事、医疗卫生、生物技术等领域中^[4-15] (图 1)。随着微纳米尺度材料应用的日益广泛, 深入研究其疲劳性能已成为人们关注的重点问题。各种各样的微/纳机电系统中包含了很多功能各异的小型执行器和传感器, 这些小型组件在目标寿命期内通常要承受静载或者循环载荷^[16-18], 还有一些在高温、强化学腐蚀环境下工作的部件, 会不可避免地导致服役小型组件机械特性逐渐但显著的退化, 即微纳米尺度材料的疲劳损伤, 并最终导致整个微纳系统的故障^[19-20]。

在材料科学中, “疲劳”一词的概念最初由 BRAITHWAITE^[21] 正式提出, 随后, 英国的 GOUGH^[22] 在 1924 年出版了第一部疲劳相关的专著《The fatigue of metals》。我国的疲劳专著始于高镇同教授在 1980 年出版的《疲劳性能测试》^[23]。“疲劳”一词定义了由于反复施加应力或应变而引起的材料性能的变化, 通常意味着材料发生断裂, 进而导致失效, 最终会影响装置的正常使用^[24-25]。在 20 世纪 20 年代, 许多大型设备如飞机、承压设备、航空发动机叶片等由于疲劳造成的事故给人们带来了惨痛的教

* 收稿日期: 2023-02-14; 修回日期: 2023-04-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52275149, 51835003)

通信作者: 闫亚宾 (1984—), 男, 博士, 副研究员。主要研究方向为微纳米材料强度学。Email: yanyabin@ecust.edu.cn

轩福贞 (1970—), 男, 博士, 教授。主要研究方向为机械强度学、智能传感与健康感知技术。Email: fzxuan@ecust.edu.cn

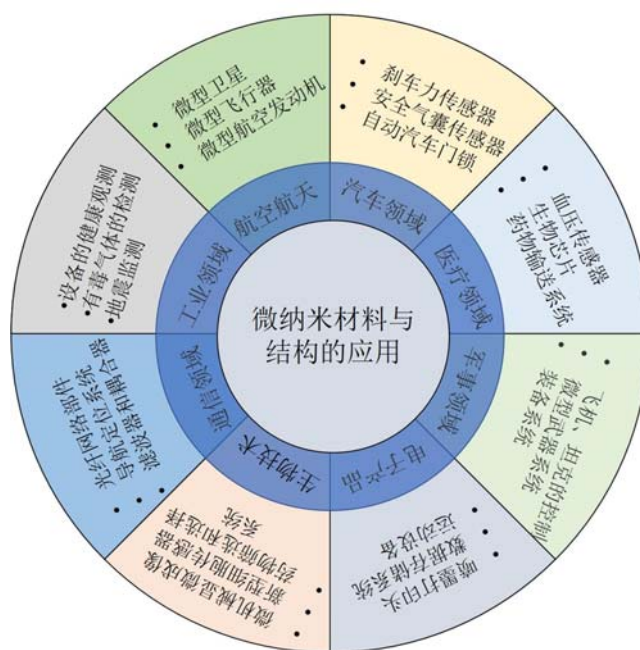


图 1 微纳米尺度材料与结构在各领域中的应用实例

Fig. 1 Examples of applications of micro and nano materials and structures in various fields

训^[26-29],这些惨痛的教训也推动了相关领域工作的开展,到今天为止,已发展出了适用于不同环境下不同服役设备的疲劳寿命评估方法,如基于损伤模式的压力容器设计技术^[30]。除金属的疲劳寿命评估以外,疲劳裂纹的研究也得到了研究者的广泛重视,如吴圣川等^[31]概述了各种描述金属材料疲劳裂纹扩展的模型。随着人们对疲劳失效宏观金属材料的不断深入研究,研究者们发现金属的一些微观特性,如晶粒大小、晶体取向、晶界、组织类型等,对材料的疲劳性能有很大影响。ZHANG 等^[32]发现超细晶镍的疲劳裂纹扩展显著慢于传统粗晶镍。SURESH 等^[33]和 CHOWDHURY 等^[34]证实了疲劳裂纹在相邻两个不同取向的晶粒中裂纹扩展方向会发生偏折,并且在靠近晶界处的裂纹扩展会被短暂阻隔。YIN 等^[35]通过驻留疲劳实验和模拟,在钛合金中发现了在“软取向”和“硬取向”晶粒之间应力分布的不均匀性。WEI 等^[36]发现通过改变钢的组织类型,在不影响延性的前提下,其屈服强度提高了一倍。这些研究结果都清楚地表明微观特性对材料的宏观力学性能有很大影响。充分表征微纳米尺度材料的疲劳性能,可帮助人们全面理解金属材料从微观到宏观各个尺度的疲劳破坏行为,以确保不同尺度金属材料的使用可靠性^[37-38]。

众所周知,材料的尺寸不同,其力学性能也会不同,即常说的金属材料具有强烈的尺寸依赖性^[39-41]。在微纳米尺度下,材料的一些微观特性对疲劳性能的影响更加凸显出来。SENTHILKUMAR 等^[42]证实了纳米级氧化铝复合材料的疲劳寿命高于微米级试样;YIN 等^[43]的研究结果表明晶粒细化可以提高铝合金的疲劳寿命;TANAKA 等^[44]通过不同晶粒尺寸铜薄膜的疲劳实验发现,随晶粒尺寸减小,疲劳寿命增加。这些研究成果充分表明,尺寸效应不仅体现在屈服强度上,同样也适用于金属的疲劳性能。大型结构件受力通常有 5 种形式,即拉伸、压缩、弯曲、扭转、剪切,或者受力组合的形式。当受力复杂的大型设备,如压力容器等,出现失效时,由于尺寸较宏观,因此进行对应的疲劳实验,操作上不会有太大难度。但同样的疲劳实验,把尺寸缩小到微纳米尺度,将对实验技术提出很大挑战。因此,目前对微纳米尺度材料进行定量疲劳实验的报道较少,使得相关研究工作相较于宏观材料还远远不够^[45-54]。但是随着微纳米尺度材料使用的普及,对疲劳特性的研究是必要的,也是必须的。为了深入分析微纳米尺度材料疲劳的研究现状,从而更好地服务于后续微纳米尺度材料疲劳特性的研究发展,我们在大量阅读文献的基础上,对现有相关文献进行了归纳总结。本文的主要内容包括:疲劳实验技术的发展、微纳米尺度金属疲劳力学性能的研究现状以及未来的发展方向。

1 疲劳性能的研究现状

1.1 疲劳实验技术的发展

科学研究推动了实验技术的进步,新的实验技术又极大地促进了科学研究的发展,两者相互促进,共同发展。为了进行微纳米尺度下金属材料的疲劳性能研究,实验现象的观测、试样的制备等都是研究者们需要解决的问题。最初人们观察物质只能依靠光学显微镜,为突破光学显微镜放大倍数和分辨率低下的局限性,后来人们设计了透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)以及扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)^[55]。由于聚焦离子束系统(Focused Ion Beam, FIB)在微纳米尺度下具有超精细加工的优势,因此该技术在微纳米尺度试样的制备上越来越受到青睐。显而易见,随着 SEM 以及 FIB 的联合使用,为研究者进行微纳米尺度下的疲劳试样的制备和实验现象的观测提供了极大的便利。FIB 技术的发展使人们对金属材料的研究尺度可以达到微纳米量级;SEM 技术的发展,使人们摆脱了传统的疲劳分析手段,即以往只能对疲劳后试样的损伤和断裂机制进行观测,现在能够实现实时观测疲劳损伤的演化,因此 SEM 和 FIB 技术已成为微纳米尺度金属疲劳行为研究的主流手段^[56]。在通过文献检索“in situ”、“micro/nano scale”和“fatigue”等类似的关键词时,不难发现,从 2000 年到 2020 年间,关于原位疲劳的相关文章数量逐年增加(图 2),这表明原位疲劳实验的研究已逐渐成为大家关注的焦点^[56]。在原位疲劳实验技术的使用上, YAN 等^[57]以及 SUMIGAWA 等^[58]开发的原位疲劳实验方法也可应用于其他微纳米尺度材料的疲劳性能研究中。

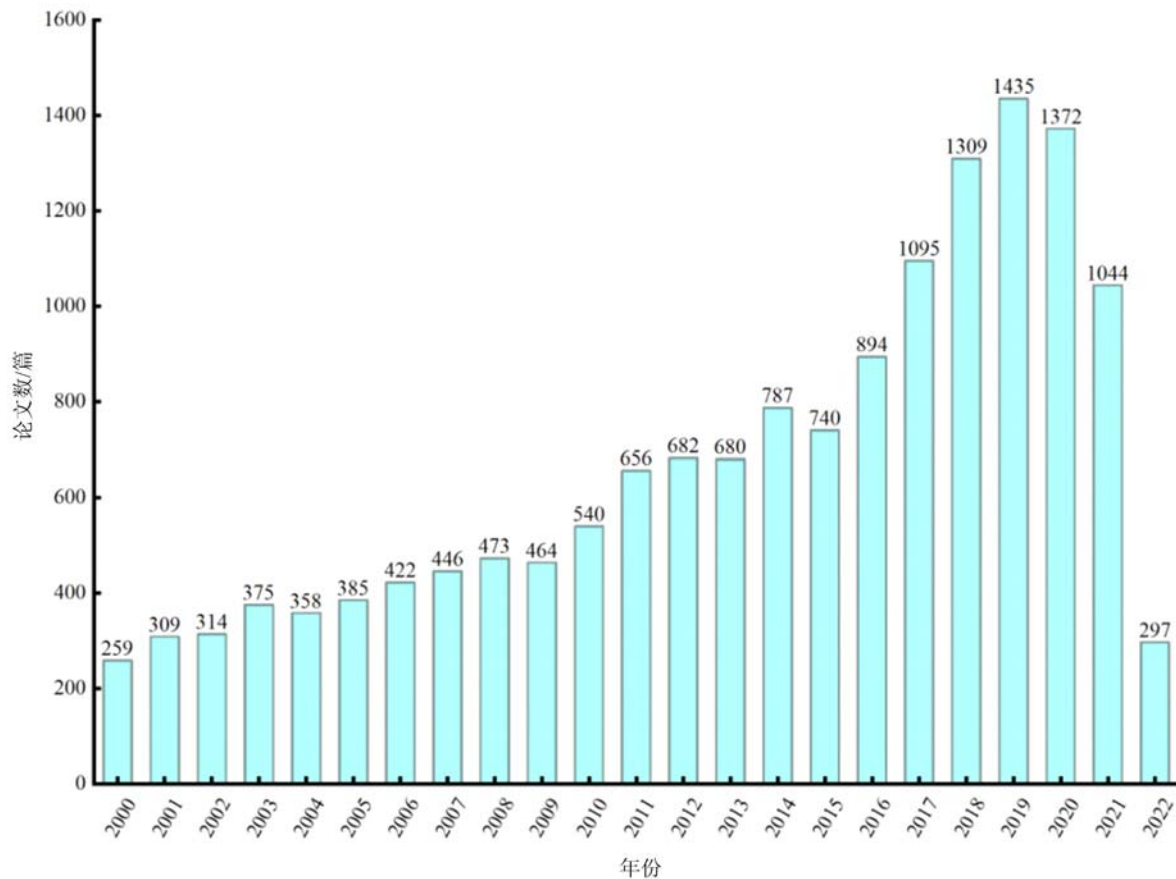


图 2 2000~2022 年原位疲劳领域论文发表情况

Fig. 2 Papers published in the field of in-situ fatigue from 2000 to 2022

我国的 SEM 研发工作开始于 20 世纪 70 年代,第一台 DX-3 型 SEM 在 1978 年斩获了全国科学大会奖,这标志着我国 SEM 研发成果从无到有的巨大飞跃^[59]。目前,北京中科科仪公司(原中国科学院科学仪器厂)是我国 SEM 设备的主要生产商。我国生产的 SEM 电镜与日立、日本电子、蔡司和 FEI 等

国际主流厂商生产的设备相比,分辨率相对较低,因此我国使用的大多数扫描电镜,主要依赖进口^[60]。在扫描电镜的基础上,出现的基于扫描电镜的原位力学测试平台为力学性能测试和显微组织演变表征的同步性研究提供了可能。张泽主持了国家自然科学基金重大科研仪器设备研制专项《针对若干国家战略需求材料服役条件下性能与显微结构间关系的原位研究系统》,他所在的研究团队开发了在 1200℃ 环境温度下仍可保持纳米级分辨率成像的原位力学测试平台,解决了高温条件下成像难的重要问题^[61]。总体而言,目前我国 SEM 电镜生产链条的完整性和精密制造水平与国际主流电镜厂商相比仍有较为明显的差距,因此,为了提高我国的科技核心竞争力,应立足高端仪器自主创新研发,研制更多自主可控的先进精密仪器,真正实现我国的科技自立自强。

1.2 具有孪晶结构的金属疲劳行为研究

在金属材料结构领域中,制备出超高强度、超强断裂韧性、良好延展性以及优异的抗疲劳、蠕变稳定性的纳米孪晶(Nano-twinned, NT)金属材料,在材料领域被认为是一项重大突破^[62]。SINGH 等^[63]对 NT 金属的低周疲劳裂纹扩展行为进行了较早的研究,发现增加孪晶密度、孪晶层厚度,均可提高材料的抗疲劳性能。PAN 等^[64]也得到了与 SINGH 等一致的研究结果,即含有孪晶组织的金属试样,其疲劳性能更加优异。尺寸范围从几微米到几十纳米的微纳米尺度材料,通常会表现出力学性能的尺寸相关性现象。如在金属材料中常见的“越小越强”现象,即金属的屈服强度随样品尺寸的减小而提高。类比金属材料“越小越强”的特性,在目前含孪晶金属的疲劳性能研究中,发现金属的抗疲劳性能随孪晶组织占比的增大而增大,研究结果体现了“越孪越强”的现象。当研究者们发现孪晶金属的抗疲劳性能更加优异后,又进一步研究了孪晶界在整个循环变形中的演化规律。SHUTE 等^[65]和 ZHANG 等^[66]发现微观组织含有孪晶的铜的疲劳寿命优于粗晶铜。LI 等^[67]和 ZHANG 等^[68]系统地研究了以共格孪晶界为内晶界的铜孪晶及其合金的疲劳裂纹行为发现,与随机晶界不同,孪晶界的开裂行为强烈地依赖于其取向和加载方向。HECKMAN 等^[69]进一步研究晶粒结构全为纳米孪晶的铜合金的疲劳行为发现,断裂机制随孪晶厚度由薄到厚,经历了沿晶断裂到持久滑移带控制变形再到脱孪晶控制变形的机制,该发现进一步证实了孪晶对金属材料的疲劳损伤机制有很大影响。

上述研究的孪晶金属试样尺度属宏观范围,目前关于微纳米尺度孪晶试样的研究也有报道。ZHANG 等^[70]研究了不同纳米厚度铜膜的疲劳行为,发现挤压、侵入和裂纹行为在较厚铜膜中仅在孪晶界出现,但这些行为在较薄的铜膜中的孪晶界和晶界中都有出现。GLUSHKO 等^[71]利用图 3 中不同晶粒尺寸的薄膜,探究晶粒大小对金属薄膜疲劳性能的影响,发现在晶粒尺度上,首先在共格孪晶界附近的大晶粒中发生损伤,无大晶粒时,将先发生晶粒粗化,而后损伤开始于粗化的晶粒;并且,进一步证实了在全局尺度上,孪晶界的含量、织构和晶粒尺寸大小都对疲劳损伤有影响。除实验的研究结论报道外,PAN 等^[72]对 NT 铜的循环变形进行了一系列原子模拟,发现在 NT 样品和无孪晶样品中疲劳裂纹扩展机制的差异性,并且证明了高密度孪晶的 NT 试样在循环变形过程中,孪晶析出是控制材料塑性变形的主要因素,这与疲劳实验结果一致^[73-74]。

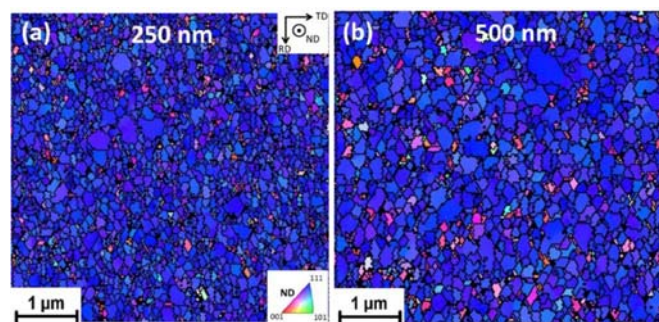


图 3 不同薄膜厚度的微观组织对比^[71]

Fig. 3 Microstructure of different film thicknesses^[71]

从目前对孪晶金属的研究内容来看,实验中多采用直流电沉积法制备孪晶金属,但利用这种方法批量生产微观组织均匀的纳米孪晶金属仍具有挑战性,在许多重要的结构材料中引入纳米孪晶组织也并

非易事,因此如何高效率制备孪晶金属材料值得关注。另外,现阶段对孪晶金属研究的种类较少,还需要更多的实验数据来验证已有的实验结论。疲劳寿命和裂纹扩展是研究金属疲劳性能的2个重点关注领域,目前对孪晶金属而言,关注点多在孪晶金属材料疲劳损伤的微观机制上,仍相对缺乏对其疲劳寿命预测和裂纹扩展规律的理论模型研究。

本小节对于孪晶金属疲劳性能的研究内容总结如下:SINGH等^[63]和PAN等^[64]的实验结果都证实了含孪晶组织金属的疲劳性能比无孪晶组织的金属性能要好。LI等^[67]和ZHANG等^[68]证实了晶体取向和加载方向显著影响孪晶界的开裂行为。HECKMAN等^[69]揭示了一种新的孪晶金属变形机制。ZHANG等^[70]和GLUSHKO等^[71]研究了多个影响因素对金属薄膜的疲劳损伤行为。PAN等^[72]通过原子模拟,证明了疲劳裂纹在NT样品中的扩展机制。这些发现为我们提供了有价值的信息和见解,为新材料的设计提供了新思路。

1.3 具有梯度组织或粗细晶金属的疲劳性能研究

材料的力学性能取决于材料的微观组织,梯度组织材料的典型特征是表面晶粒尺寸为纳米级别,随着深度增加,晶粒尺寸越来越大。因为这种梯度组织结构材料表现出了优良的力学行为,所以人们对这种梯度组织材料疲劳性能的研究也逐渐多了起来。LEI等^[75]通过观察梯度纳米结构(Gradient Nano-structured, GNS)全为奥氏体相的AISI 316L不锈钢疲劳断面(图4)发现,变形诱发的马氏体(Deformation-induced Martensite, DIM)转变被抑制,而且,通过与粗晶试样的对比发现,GNS试样的疲劳强度和寿命都有提高。这种疲劳强度和寿命同时提高的现象不同于传统的纳米结构材料在应力控制下的疲劳强度增强,在应变控制下疲劳寿命降低的现象。YANG等^[76]研究了具有梯度纳米晶铜和粗晶铜的应力-寿命($\Delta\sigma_a-N_f$)曲线(图5),发现具有梯度纳米晶(Gradient Nano-grained, GNG)表层的铜样品的疲劳极限和寿命显著提高,并且他们把疲劳强度和寿命同时提高的现象归因于GNG铜试样的表层结构有效阻止了裂纹形核。LONG等^[77]证实与具有微、亚微或纳米晶粒结构的均质铜相比,梯度纳米结构铜具有前所未有的高低周疲劳抗力。JING等^[78]研究不同体积分数GNG表层铜试样的疲劳现象发现,GNG层含量越高,越能有效抑制表面疲劳裂纹的萌生。



图4 316L不锈钢的典型断面扫描电镜图像^[75]

Fig. 4 SEM image of typical section of 316L stainless steel^[75]

除梯度组织金属的研究外,BOYCE等^[79]揭示了纳米晶(Nanocrystalline, NC)合金具有优异的抗疲劳性能,并指出裂纹萌生主要发生于粗晶处。MEIROM等^[80]发现疲劳诱发纳米铂膜晶粒粗化,并认为裂纹扩展机制可能是固有的裂纹起裂源和位错控制的。SHAMS等^[81]研究了晶粒尺寸对含碳CoCrFeMnNi高熵合金(Cantor)拉伸和循环变形行为的影响。SAJADIFAR等^[82]研究了不同几何尺寸的粗晶和超细晶钛在室温和不同应力幅下的超高周疲劳性能。PAN等^[83]研究了晶粒尺寸和热处理对GW83K镁合金变形不均匀性和疲劳行为的影响,其研究结果如图6所示,相比于细晶合金,粗晶合金的变形不均匀程度更加明显,当晶粒大小一致时,T6合金的变形不均匀程度更高。HANLON等^[84]研究了纳米晶纯镍和超细晶铝镁合金的疲劳行为,发现细晶虽能提高抗疲劳能力,但无法有效阻止裂纹扩展。CHLUBA等^[85]研究了晶粒尺寸、相容性对TiNiCuCo薄膜的疲劳性能影响。DENG等^[86]研究了晶粒尺寸对镍基高温合金GH4169疲劳裂纹萌生和扩展机理的影响,发现在细晶与粗晶材料之间存在裂纹萌生机制的转变。SCHINO等^[87]证实了晶粒细化能够提高合金的抗拉性能和抗疲劳性能。DU等^[88]通过研究IN792合金发现,细化晶粒可提高合金寿命。LI等^[89]通过四点弯曲疲劳实验,结合显微组织和断口观察,探讨了疲劳特征和声发射源机理。OU等^[90]把能量效率系数引入循环变形应变能的计算中,而且提出了一种半经验方法,能够有效预测疲劳裂纹的萌生。

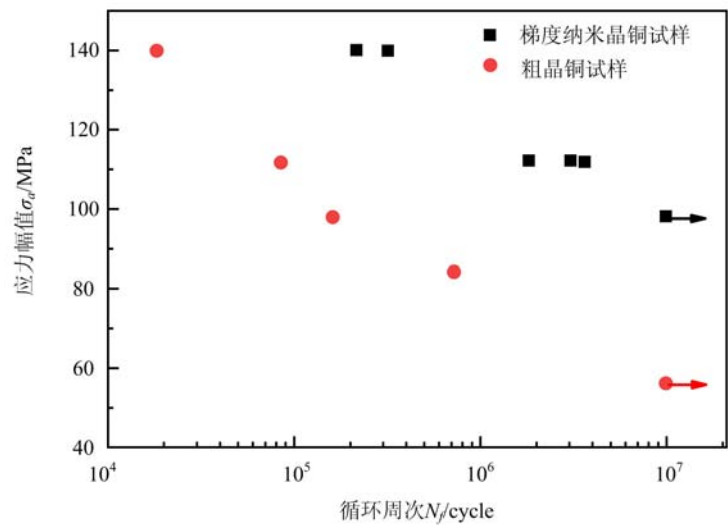


图 5 梯度纳米晶铜和粗晶铜的 $\Delta\sigma_a$ - N_f 曲线^[76]

Fig. 5 $\Delta\sigma_a$ - N_f curves of gradient nanocrystalline copper and coarse crystalline copper^[76]

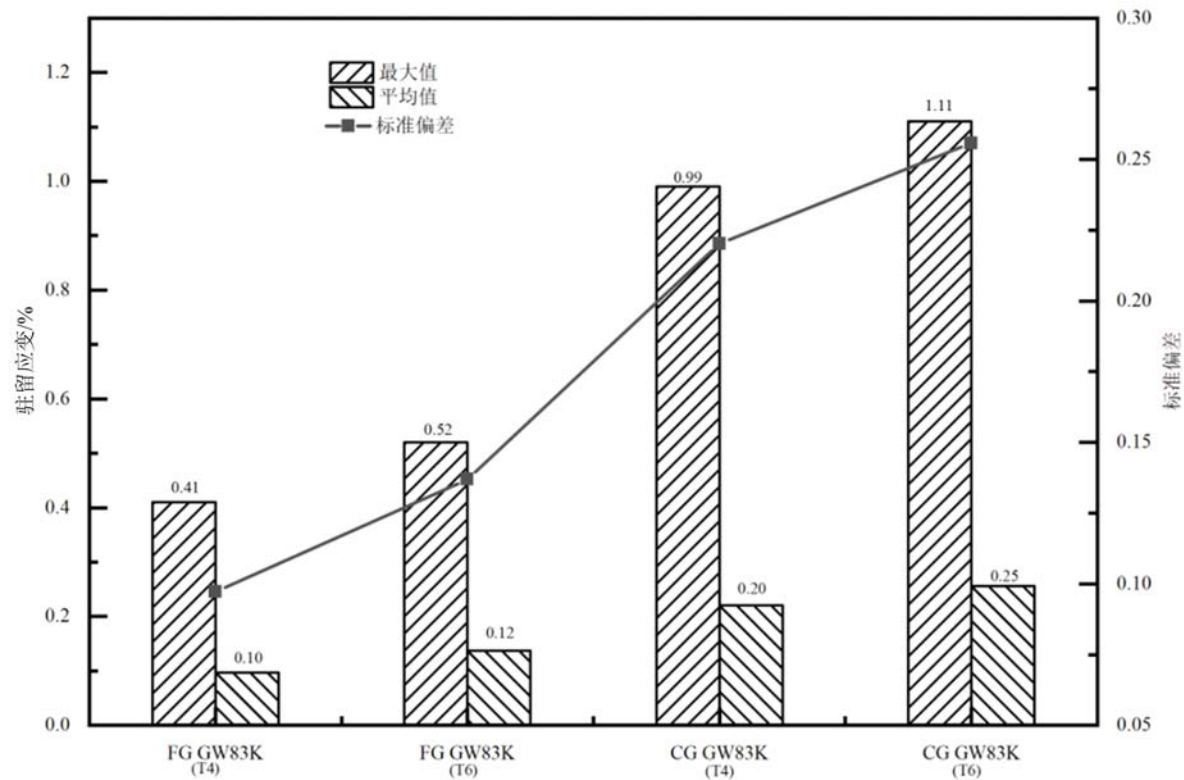


图 6 GW83K 合金在 T4 和 T6 条件下应变最大值、平均值和标准差的直方图^[83]

Fig. 6 Histogram of maximum strain, mean strain and standard deviation of GW83K alloy under T4 and T6 conditions^[83]

研究人员广泛进行了涉及不同金属种类的梯度组织和晶粒尺寸对金属疲劳性能的研究,证实了含梯度组织的金属材料具有优异的抗疲劳性能和晶粒细化能有效提高金属的抗疲劳能力。在目前的研究成果中,机理研究居多,并且在力学性能研究中,可用数学统计的方法定量论述晶粒尺寸对金属变形行为的影响,如 PAN 等^[83]的研究方法。此外,本小节的研究内容多发表在《Acta Materialia》等期刊中,在一定程度上说明梯度组织金属的研究结果受到了学者们的高度重视。

众所周知,具有梯度组织金属的力学性能不同于仅含有细晶和粗晶的金属。基于目前研究者们对材料的研究现状,现将本小节有关梯度组织和粗细晶金属的疲劳性能研究内容总结如下:LEI 等^[75]研究了表面层具有梯度组织的不锈钢的疲劳性能。YANG 等^[76]研究了具有 GNG 表层的铜样品的循环变形。LONG 等^[77]证明了梯度金属铜具有优异的高低周疲劳抗力。JING 等^[78]研究了 GNG 层体积分数对金属疲劳的影响。BOYCE 等^[79]通过金属的疲劳断口发现裂纹萌生处有粗晶聚集。SHAMS 等^[81]研究了晶粒尺寸对高熵合金的影响。SAJADIFAR 等^[82]研究了不同晶粒尺寸、不同应力幅值的金属钛的超高周疲劳性能。PAN 等^[83]研究了 GW83K 镁合金的变形和疲劳行为。HANLON 等^[84]、SCHINO 等^[87]和 DU 等^[88]证实了晶粒细化会提高金属的疲劳性能。CHLUBA 等^[85]研究了金属薄膜 TiNiCuCo 的疲劳行为。DENG 等^[86]证明了细晶和粗晶金属的疲劳裂纹萌生机制不同。OU 等^[90]提出的方法,可以提高疲劳裂纹萌生寿命的估算准确度。

1.4 单轴应力作用下的疲劳损伤研究

疲劳失效在金属结构中普遍存在^[91]。传统上,研究者只能对失效后的材料组织进行分析,但是这样不能实时观测微纳米尺度的疲劳裂纹在微观结构中的演化过程。BUFFORD 等^[91]利用原位透射电子显微镜(TEM)进行了纳米晶铜的单轴拉伸循环变形研究(图 7),揭示了纳米晶铜在加载过程中的微观结构演化过程。YAN 等^[57]利用如图 8 所示的疲劳实验加载方法,在扫描电镜下进行了一系列定量原位拉压疲劳实验,研究了不同应变幅值、不同加载频率下的微尺度单晶铜试样的疲劳现象,结果发现,疲劳寿命仅取决于应变幅值,加载频率不影响疲劳寿命。此外,微尺度单晶铜的疲劳寿命比块状铜短得多^[92],表现出明显的疲劳寿命尺寸效应的应变依赖性,如图 9 所示。HAYAKAWA 等^[93]研制了一种微尺度拉伸疲劳实验系统,该系统不仅可进行微尺度的原位疲劳实验,还可进行宏观块体材料的原位拉伸疲劳实验。HOSSEINIAN 等^[94]介绍的对超薄膜和纳米材料进行定量疲劳测试的技术,为普及纳米材料的研究提供了便利。SUMIGAWA 等^[58]利用自己的研究团队开发的可用于微米尺度金属单轴循环拉压的原位扫描电镜实验方法,对微米单晶铜的低周疲劳循环过程进行了详细观察,得出连续不断的循环加载会造成滑移带处的应力集中,进而导致疲劳裂纹萌生,从而证实了微米单晶铜的疲劳破坏过程是不同于块体材料的。

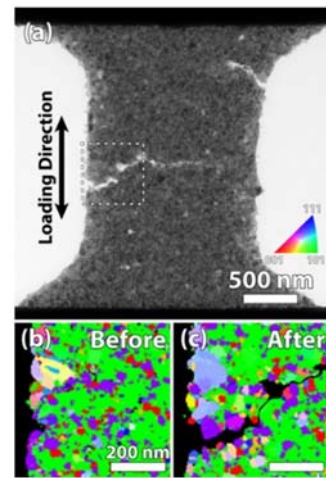


图 7 经过 357000 次加载循环失效后的纳米晶铜样品^[91]

Fig. 7 Nanocrystalline copper sample after failure of 357000 loading cycles^[91]

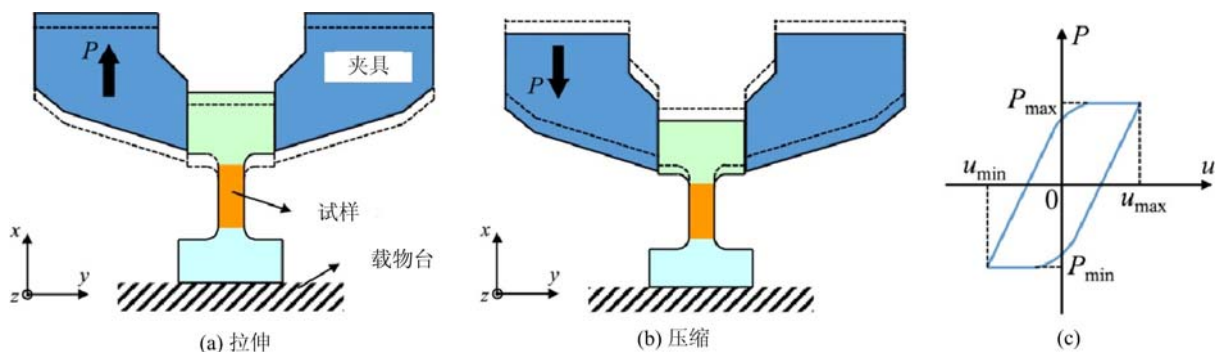


图 8 实验加载示意图^[57]

Fig. 8 Schematic diagram of experimental loading^[57]

目前,关于一维纳米材料力学性能的研究已有报道,但有关疲劳性能的研究结果尚十分有限。即使有些研究者进行了纳米线的疲劳性能测试,但目前仍处于定性状态,因此,开发一个可定量研究一维纳米材料疲劳行为的实验装置很有必要。ZHANG 等^[95]利用如图 10 所示的实验装置,在高分辨率 SEM

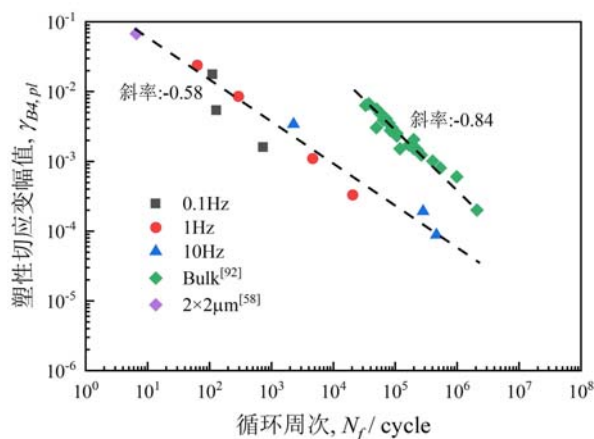


图 9 微尺度和块体单晶铜的塑性切应变幅值与循环周次的关系^[92]

Fig. 9 Relationship between plastic shear strain and fracture cycles of microscale and monolithic single crystal copper^[92]

内对单个纳米线进行了定量原位拉伸疲劳测试,结果表明,当施加的应力幅值大于材料的比例极限时,纳米线失效。YAO 等^[96]研究了纯钛箔片的疲劳裂纹扩展行为,发现薄箔片的断裂韧性和疲劳寿命较低。SCHWAIGER 等^[97]研究了不同厚度铜薄膜的疲劳行为,发现较薄的膜具有更强的抗疲劳性。ZHANG 等^[98]发现体心立方高熵合金 (High-entropy Alloy, HEA) 单晶微柱的屈服和流动应力以及应变硬化具有显著的尺寸效应。

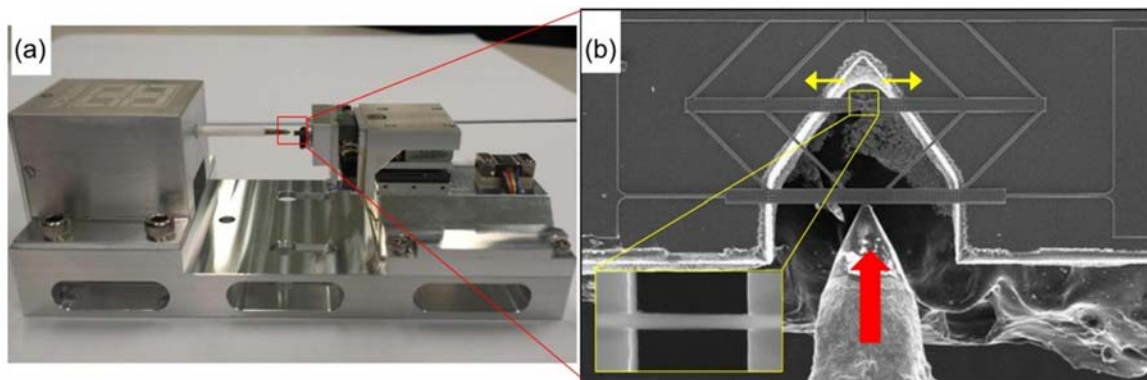


图 10 单个纳米线拉伸疲劳实验装置^[95]

Fig. 10 Single nanowire tensile fatigue experimental device^[95]

KELES 等^[99]研究了环境对 AISI304 奥氏体不锈钢疲劳裂纹扩展 (Fatigue Crack Growth, FCG) 行为的影响。KRAFT 等^[100]介绍了 2 种用于研究金属薄膜疲劳行为的新技术:第一种是在弹性衬底上沉积铜薄膜;第二种是在微加工悬臂梁上沉积 Ag 薄膜。TAKASHIMA 等^[101]对微机电系统 (MEMS) 或微系统技术 (Microsystem Technology, MST) 应用的微尺度试样进行的断裂和疲劳实验表明,裂纹萌生可以控制疲劳寿命。KLEIN 等^[102]研究了铜箔的疲劳裂纹扩展性能随厚度的变化规律。DAI 等^[103]研究了 2 种多晶铜箔在不同的箔厚度 t 与晶粒尺寸 d 比值下的微米尺度的疲劳行为,实验结果表明,材料的拉伸塑性及 t 和 d 的耦合效应共同决定疲劳寿命。HEINZ 等^[104]分析不同厚度 Al 薄膜在不同温度下的热循环变形结构发现,较薄薄膜的累积塑性应变较小。WIMMER 等^[105]分析了电沉积铜的低周疲劳性能,发现显微组织对失效循环次数和失效模式有一定的影响。

由于长期受限于实验条件,进行有关微纳米尺度金属的疲劳性能研究具有一定的技术难度。因此,在本小节中,总结概述了现有有关疲劳性能的研究内容,并重点介绍了目前所用到的原位疲劳实验方法,以推广到微纳米尺度材料的疲劳研究领域,涉及尺度范围包括一维、二维和三维。原位疲劳力学实验的突出优点在于能够动态观测疲劳过程中的微观结构演化,所以在描述材料循环加载过程中的微观

结构演化规律方面是常用的研究手段。值得注意的是,大多数对二维金属薄膜的疲劳性能研究,不可避免地包含了衬底的影响,在后续的研究中,应设法排除此项干扰,以便得到真实的金属薄膜本征疲劳性能。

研究者们对金属的拉伸疲劳性能进行了大量的研究,并且为了满足实验的需求,发展了一些简单可靠、准确性高的疲劳实验方法。在本小节中以单轴应力作用下有关的疲劳损伤研究为切入点,将学者们的主要研究进展总结如下:BUFFORD 等^[91]直接观测到疲劳循环过程中的微观结构演化。YAN 等^[57]和 SUMIGAWA 等^[58]利用自主研发的微纳米尺度力学测试平台定量研究了微纳米尺度材料的疲劳行为。不同于三维试样的测试,ZHANG 等^[95]开发了一种一维纳米线测试平台。YAO 等^[96]研究了不同厚度的纯钛箔片的 I 型疲劳裂纹扩展行为。ZHANG 等^[98]揭示了体心立方高熵合金(HEA)单晶的潜在变形机制。这些实验中使用的加载方法和样品制备方法对科研工作者具有重要的参考价值。

1.5 多轴应力作用下的疲劳损伤研究

对金属处于复杂应力状态下的疲劳性能,研究者们也做了一定的工作。SUMIGAWA 等^[106]提出了一种利用共振实验进行疲劳强度测试的方法,该方法克服了实验中存在的夹持、对准、施力加载等难题。BARRIOS 等^[16]利用图 11 所示实验装置,进行了纳米级高周疲劳(High and Very High Cycle Fatigue, HCF 与 VHCF)定量 SEM 实验,这项研究强调了短裂纹的扩展是不连续的。GUPTA 等^[107]研究了涂层对电镀镍微臂高周弯曲疲劳行为的影响,发现涂层能够有效隔绝孔洞和氧气的反应,显著提高微臂梁的疲劳寿命。

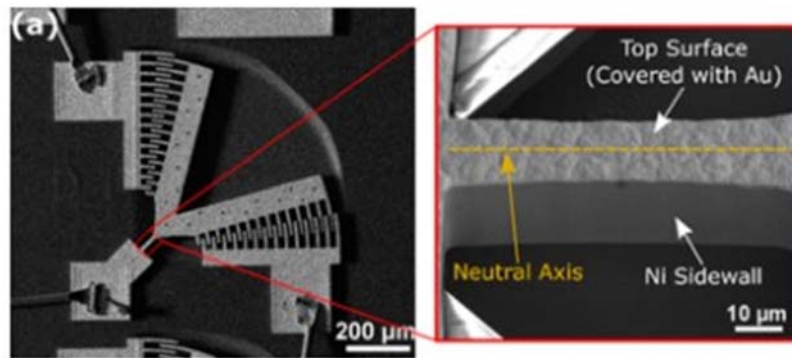


图 11 一个镍微谐振器与倾斜微臂的电镜图像^[16]

Fig. 11 Electron microscopic image of a nickel microresonator with a tilted microarm^[16]

FANG 等^[108]通过对图 12 所示的单晶金悬臂梁的共振振动疲劳实验,发现了在所有试样表面都形成了侵入/挤压的疲劳损伤。KIENER 等^[109]采用如图 13 所示的方法,对单晶铜悬臂梁进行弯曲疲劳实验,发现在加载过程出现了明显的单调硬化和包辛格效应。KAKIUCHI 等^[110]和 MIZUNO 等^[111]利用镁合金 AZ31 微柱和微悬臂梁试件进行疲劳实验,研究了尺寸和晶粒取向对疲劳性能的影响。BOYCE 等^[112]提出了新的金属微电子机

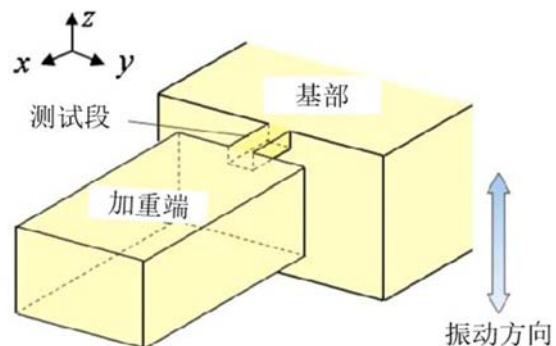


图 12 悬臂梁的示意图^[108]

Fig. 12 Schematic diagram of the cantilever beam^[108]

械系统疲劳实验方法,并将其应用于表征镍显微试样的高周疲劳行为。WIMMER 等^[113]利用如图 14 所示实验装置进行了多晶铜的循环弯曲实验,原位实验表明,晶粒尺寸、位错密度演化和晶粒取向(Taylor 因子)都对疲劳结构演化存在影响。DAI 等^[114]发现铝箔厚度越小,弯曲抗力越小。GAO 等^[115]对 ZnO 纳米线进行共振疲劳实验发现,超高周次后,试样仍无疲劳。LI 等^[116]采用原位透射共振方法,得到了 ZnO 纳米线的重要力学参数和弹性模量。苏飞等^[117]通过对电镀铜膜进行弯曲疲劳实验,

确定了寿命预测模型中的系数。

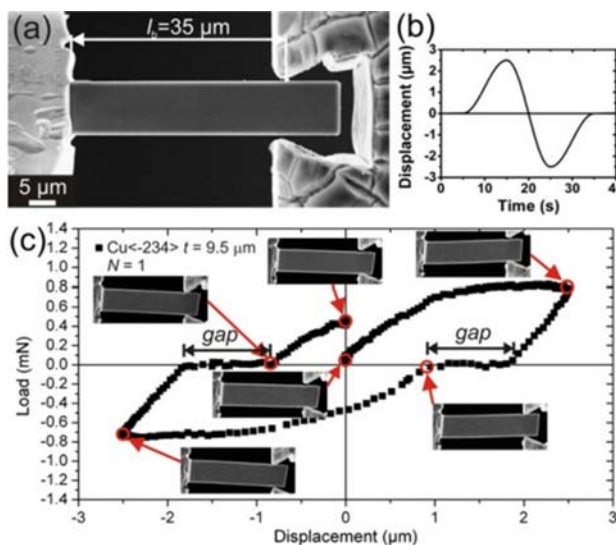


图 13 (a)加载前将弯曲试样和夹持器对准;(b)单次弯曲周期位移与时间的关系;(c)实测荷载-位移数据^[109]

Fig. 13 (a) alignment of bending sample and gripper before loading; (b) relationship between displacement and time in a single bending cycle; (c) measured load-displacement data^[109]

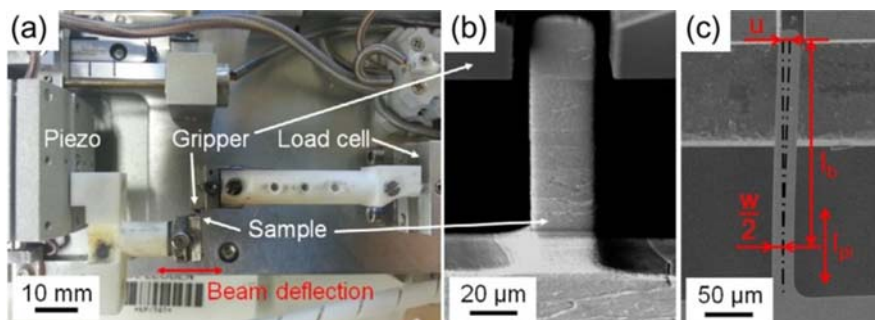


图 14 实验装置图以及循环弯曲实验设置的 SEM 图像^[113]

Fig. 14 Experimental device diagram and SEM image of cyclic bending experimental setup^[113]

进行微纳米尺度金属的疲劳实验通常涉及非常小的尺寸,因此实验结果的可重复性会受到影响。再者,进行微纳米尺度原位疲劳实验,样品的制备需要非常精细和耗时,需要专业的技能和操作经验,并且需要开发稳定的加载设备,成本很高。通常通过描述微纳米尺度单晶金属在循环加载过程中滑移带的挤压/侵入幅值来研究疲劳试件的损伤行为,如文献[108]。若想要研究微纳米尺度金属的疲劳裂纹扩展行为,尤其对单晶而言,有时在高分辨 SEM 镜头下,也很难观测到疲劳裂纹的扩展规律,需改进研究方法或者通过合适的后处理方法(如机器学习),来达到研究目的。

在 1.4 节中介绍了单轴应力作用下的金属疲劳性能研究,在本节中进一步总结了多轴应力作用下的微纳米尺度材料的疲劳研究进展。SUMIGAWA 等^[106]提出了一种利用共振实验进行疲劳强度测试的方法。BARRIOS 等^[16]利用 MEMS 微谐振器作为集成试验机,对镍微臂弯曲下的纳米级高周疲劳(HCF/VHCF)进行了定量 SEM 研究。GUPTA 等^[107]利用与 BARRIOS 等^[16]相同的设备,研究了涂层对电镀镍微臂的高周弯曲疲劳行为的影响。FANG 等^[108]通过对不同尺寸单晶金悬臂梁的共振振动疲劳实验,研究了微米和亚微米下的疲劳行为特征。KIENER 等^[109]采用一种新的方法对单晶铜悬臂梁进行原位微型化弯曲疲劳实验。WIMMER 等^[113]研究了微机械应变控制下多晶铜样品在扫描电子显微镜下进行的循环弯曲直至断裂的疲劳实验。

1.6 与金属界面有关的疲劳损伤研究

随着微电子技术的发展,很多电子元器件都是由多种材料制成的,因此复杂材料界面的研究就必不可少。WEI 等^[118]研究了 Cu 和 V 纳米金属多层膜的疲劳界面损伤,揭示了纳米材料异质结构的损伤

破坏机理。GUO 等^[119]通过纳米多层材料的断裂力学实验,揭示了裂纹在 SiN 层中的扩展和通过 SiN 与 Cu 界面的扩展行为。WANG 等^[120]采用不同类型的纳米悬臂梁试样,分别研究了 Cu/Si 界面边缘的单模和混合模裂纹萌生问题。SUMIGAWA 等^[121]采用如图 15 所示的循环弯曲实验,发现试样的断裂是发生在铜膜界面。YAN 等^[122]采用如图 16 所示的加载装置,对纳米悬臂梁试件进行了有环境因素控制的循环弯曲疲劳寿命研究,图 17 所示的应力幅值 $\Delta\sigma_a$ 与循环周次 N_f 曲线表明,环境处理降低了界面的疲劳强度。

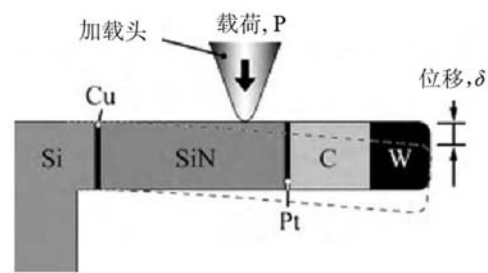


图 15 纳米悬臂梁试样和加载方式^[121]

Fig. 15 Sample and loading method of nano-cantilever beam^[121]

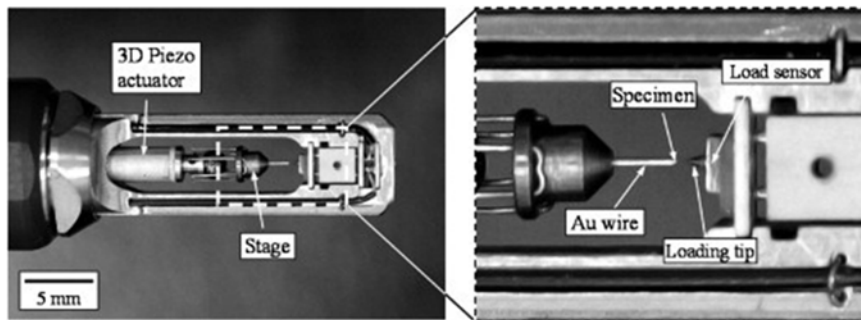


图 16 纳米尺度界面疲劳破坏实验采用的加载装置^[122]

Fig. 16 Loading device used in fatigue failure experiment of interface at nano scale^[122]

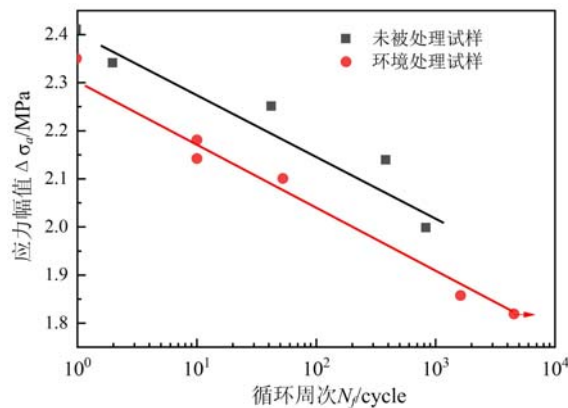


图 17 应力幅值 $\Delta\sigma_a$ 与循环周次 N_f 之间的关系^[122]

Fig. 17 Relationship between stress amplitude $\Delta\sigma_a$ and cycle times N_f ^[122]

在本小节中的研究成果中,以微纳米尺度悬臂梁的形式开展金属界面疲劳损伤的研究居多,包括预裂纹^[119]、环境^[122]等对界面损伤的影响。目前的金属界面疲劳损伤研究,主要以静态加载为主,而对微纳米尺度界面损伤的动态破坏行为的研究,暂未见到。另外,需开展更小尺度的纳米界面疲劳破坏研究,在已有的分析模型上引入纳米尺度的影响因素,建立有效的微纳米尺度界面疲劳损伤评价准则。

近年来对于金属界面的疲劳损伤研究有了很大的进展,在本小节中综述了与金属界面有关的疲劳损伤研究。WEI 等^[118]研究了 Cu 和 V 纳米金属多层膜的疲劳界面损伤。GUO 等^[119]为纳米多层材料的断裂力学实验和分析提供了一套新的研究方法。SUMIGAWA 等^[121]通过悬臂梁的疲劳实验证明了试样的断裂是由于纳米级铜膜的疲劳造成的。YAN 等^[120-122]研究了 Cu 和 Si 薄层之间界面边缘的单模和混合模裂纹萌生问题和环境对纳米构件 Cu 和 Si 薄层之间界面疲劳强度的影响。

通过对 1.2~1.6 小节中材料疲劳性能的研究现状描述,在表 1 中总结列出了一些研究学者在疲劳

领域所做的主要工作。

表 1 疲劳领域的主要工作
Tab.1 Main work in the field of fatigue

实验材料	研究学者	加载方式	主要贡献
金属薄膜	HOSSEINIAN 等 ^[94]	单轴	开发了可用于金属薄膜疲劳实验的新装置和新方法;研究了其抗疲劳性能
	KRAFT 等 ^[100]		
	SCHWAIGER 等 ^[97]		
	KLEIN 等 ^[102]		
孪晶金属	SINGH 等 ^[63]	单轴	明确了孪晶界对材料疲劳性能的影响
	PAN 等 ^[64]		
	LI 等 ^[67]		
	ZHANG 等 ^[68]		
	HECKMAN 等 ^[69]		
	ZHANG 等 ^[70]		
梯度组织结构金属	LEI 等 ^[75]	单轴	解释了含梯度纳米晶(GNS)金属拥有优异疲劳性能的原因
	YANG 等 ^[76]		
	LONG 等 ^[77]		
	JING 等 ^[78]		
纳米晶铜	BUFFORD 等 ^[91]	单轴	提供了加载过程中,微观组织的动态演化细节
单晶金属	YAN 等 ^[57]	单轴	开发了新的实验设备,研究了单晶金属的疲劳性能
	SUMIGAWA 等 ^[58]		
	SUMIGAWA 等 ^[106]	多轴	
一维金属材料	KIENER 等 ^[109]		
	ZHANG 等 ^[98]	单轴	开发了一维纳米线测试平台;证明了纳米线的耐疲劳性
	GAO 等 ^[115]	多轴	
含界面金属材料	WEI 等 ^[118]	单轴	研究了微纳米尺度界面的疲劳强度问题
	GUO 等 ^[119]	多轴	
	SUMIGAWA 等 ^[121]		
	WANG 等 ^[120]		
	YAN 等 ^[122]		

2 展望

在第 1 节中回顾了微纳米尺度金属疲劳性能的研究现状,包括实验设备、实验方法、实验现象以及现象背后的机理探究等,比较完整地呈现了目前有关微纳米尺度疲劳性能研究的进展。站在新的时代起点上,微纳米尺度的疲劳研究方向向何处发展是现在需要解决的重要问题。因此,总结未来的微纳米尺度疲劳研究发展方向是必要的。

2.1 展望一——疲劳性能的深层次、全方位研究

由于微纳米尺度的金属材料与块体材料相比,存在很明显的尺寸效应,这也是研究者们进行微纳米尺度金属疲劳性能研究的原因之一。关于尺寸效应的疲劳性能研究,还有进一步发掘的空间。现在许多具有高强高韧性能的合金不断被设计出来,如高熵合金,这些新材料的微纳米尺度疲劳性能,还有待

研究。SUMIGAWA 等^[58]开发的用于微米尺度金属完全反向的拉伸-压缩疲劳的原位扫描电镜观测技术和加载技术,还可用来研究其他不同金属的疲劳性能,以及双晶或者多晶的疲劳性能。对于含有涂层的金属微悬臂梁的疲劳性能的研究,可进一步研究涂层厚度的阈值,即涂层厚度达到什么状态,能够最大限度地阻碍金属的疲劳裂纹萌生。对于铁金属及其合金而言,由于其在不同的热处理下微观组织差异较大,常见的有珠光体、铁素体、马氏体、奥氏体等,还可开展不同微观组织的疲劳性能以及同时含有2种或2种以上不同组织的金属及合金的疲劳性能研究。由于微型金属的疲劳夹持,疲劳加载难度较大,目前虽然开发了许多有效的疲劳实验方法来进行疲劳实验,但仍然可以在此基础上探索新的、更广泛使用的便于用于各种试样、各种实验环境的疲劳加载方法,这仍是一个值得努力的方向。现在文献中提到的大多数的疲劳实验都是以拉压、弯曲分开的加载方式为主,在今后的研究中可以适当考虑不同的疲劳加载方式,如剪切、扭转及其各种加载方式的组合,因为有的微型机械设备是不单单处于单个受力状态的,多考虑一些复杂情况更加具有实用性。对于同一种金属,可全面研究金属在不同类型预裂纹下的疲劳扩展行为,并借助 SEM 观察裂纹的发展,根据电镜图像准确判断裂纹类型,增强对特定金属的疲劳扩展认知。现在有许多新型二维材料不断出现(如石墨烯、Mxenes 等),如何表征其力学性能,目前还面临着许多挑战^[123],有待开展进一步的研究。

环境因素是影响材料疲劳性能的一个重要因素。由于大多数的机械装置工作时并不一定总是处于常温状态下,要么机械装置本身处于高温环境中周而复始地工作;要么装置在工作时,有可能由于长时间的运行、润滑不良等因素,会自发地发生温度的升高,因此,温度对微纳米尺度金属疲劳性能的研究需不断深入。除实验方法外,还可采用有限元分析的方法,利用晶体塑性理论,结合仿真软件(如 ABAQUS),来模拟金属的疲劳实验,探究目前实验无法捕捉到的细节。

2.2 展望二——微纳米尺度疲劳试样的裂纹扩展模型的建立

对于金属的断裂失效分析,主要集中于金属的疲劳裂纹扩展分析,为此已经发展了各种各样的疲劳裂纹扩展模型和疲劳裂纹监测技术,如采用粒子滤波方法获得裂纹检测信息^[124]。工程上一般定义长度小于 0.5mm 的裂纹为短裂纹^[125],对短裂纹的扩展规律也多有报道^[126],但早期阶段的短裂纹研究很难达到微纳米尺度,近年来,随着扫描电镜的普及,对疲劳试样的微纳米尺度短裂纹的扩展分析也越来越普及,例如 ZHANG 等^[127]利用原位扫描电子显微镜,研究了块体材料中微纳米尺度疲劳裂纹的扩展规律。通过 1.4~1.6 小节的综述,可以了解到现在也有学者进行了微纳米试样的循环疲劳加载实验,比如 YAN 等^[57]、SUMIGAWA 等^[58]已经进行了微纳米尺度金属材料在循环载荷作用下的变形特性研究。但是,到目前为止,还没有看到实验样品是微纳米尺度的微纳米疲劳裂纹扩展分析。微纳米试样的疲劳裂纹分析属于短裂纹的研究领域,而短裂纹的扩展通常会占据整个疲劳寿命的 80% 以上^[128]。虽然以 Paris 公式为基础的经典的裂纹扩展定律^[129],能够解决长裂纹的扩展问题,但是 Paris 公式及其扩展模型更多的是作为经验公式描述长裂纹的稳态段扩展过程,较少涉及裂纹扩展的微观机理^[130-132]。然而,不同于长裂纹问题,微观短裂纹、物理短裂纹等呈现了特殊的扩展规律,这使得无论是经典疲劳概念还是线弹性断裂力学理论均很难准确预测短裂纹的扩展规律。因此,深入研究疲劳微裂纹的扩展特性,建立适用于微裂纹特殊扩展行为的理论模型成为了材料疲劳领域面临的挑战性难题之一。

2.3 展望三——数据时代下的疲劳研究发展

众所周知,我国是一个互联网大国。随着工业网络的普及,一种新的智能研究手段——机器学习,已经成为大家关注的焦点。数据科学和大数据技术必将替代传统的研究手段,在预测疲劳寿命方面发挥重要作用^[56]。近年来,随着机器学习算法的完善和计算机计算性能的大幅提升,机器学习已被广泛应用于材料性能预测领域^[133]。机器学习在材料结构与性能的预测中具有显著的优点,与传统的实验表征相比,节约了实验的试错时间和科研经费;与现在的有限元仿真计算手段相比,避免了现在仿真计算效率低下和模型是否可靠的问题。机器学习依托大数据和人工智能,通过采用支持向量机、神经网络等机器学习算法训练数据集来构建模型,以预测材料的力学特性,且预测结果精度很高。相信在不久的将来,一定能够实现以数据支撑的疲劳寿命预测及服役状态的微纳机电系统的智能化管理。

3 结束语

疲劳作为机械结构最普遍的失效模式之一,大到航空航天,小到微纳米尺度构件都有疲劳失效导致设备不能正常运行的现象存在。自疲劳概念提出以来,国内外学者从不同角度对不同服役条件的材料进行了探索研究,基于 FIB-SEM 的联合表征技术,为开展微纳米尺度的疲劳性能研究提供了可能性,开发设计纳-微-细观多尺度原位疲劳实验方法,研究一维、二维和三维不同微观组织材料的疲劳损伤行为,分析晶粒尺寸、晶体取向、晶体类别以及晶界等微观特性对材料疲劳性能的影响,可全方位了解金属的疲劳性能。未来,在人工智能和大数据时代的发展趋势下,建立数据驱动的疲劳性能研究,是极其重要的发展方向。

参考文献:

- [1] GÓMEZ-CORTÉS J F, NÓ M L, RUÍZ-LARREA I, et al. Ultrahigh superelastic damping at the nano-scale: a robust phenomenon to improve smart MEMS devices[J]. *Acta Materialia*, 2019, 166:346—356.
- [2] SIM G D, KROGSTAD J A, REDDY K M, et al. Nanotwinned metal MEMS films with unprecedented strength and stability[J]. *Science Advances*, 2017, 3(6):e1700685.
- [3] DONG K, CHOE H S, WANG X, et al. A 0.2 V micro-electromechanical switch enabled by a phase transition [J]. *Small*, 2018, 14(14):1703621.
- [4] MISHRA M K, DUBEY V, MISHRA P M, et al. MEMS technology: a review[J]. *Journal of Engineering Research and Reports*, 2019, 4(1):1—24.
- [5] MALUF N, WILLIAMS K. An introduction to microelectromechanical systems engineering[M]. Boca Raton: Artech House, 2004.
- [6] ARAB A, FENG Q. Reliability research on micro- and nano-electromechanical systems: a review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74:1679—1690.
- [7] 樊建勋. MEMS 传感器及其在航空领域的应用[J]. *电子技术与软件工程*, 2014(4):259—260 (FAN Jianxun. MEMS sensor and its application in aviation field [J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2014(4): 259—260 (in Chinese))
- [8] 刘媛, 邴志刚, 刘景泰. MEMS 及其在生物医学领域中的应用[J]. *天津工程师范学院学报*, 2005(4):40—42 (LIU Yuan, BING Zhigang, LIU Jingtai. Survey on MEMS technology and its application in biology domain [J]. *Journal of Tianjin University of Technology and Education*, 2005(4):40—42 (in Chinese))
- [9] 李德胜. MEMS 技术及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2002 (LI Desheng. MEMS technology and its application [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002 (in Chinese))
- [10] 闫晓军, 张锴, 伍晓明. MEMS 技术在智能航空发动机中的应用研究现状及前景[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(6):1210—1217 (YAN Xiaojun, ZHANG Kai, WU Xiaoming. Opportunities and challenges of MEMS technology in the environment of intelligent aero-engines[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(6):1210—1217 (in Chinese))
- [11] 宋锐, 刘宏立, 李和平. MEMS 姿态传感器在控制飞行器中的应用研究[J]. *科技创新导报*, 2016, 13(24):8—10 (SONG Rui, LIU Hongli, LI Heping. Research on application of MEMS attitude sensor in control aircraft [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2016, 13(24):8—10 (in Chinese))
- [12] 阚文星, 褚恩义, 刘卫, 等. 微起爆系统用 MEMS 安全保险装置研究现状与展望[J]. *含能材料*, 2022, 30(1): 78—94 (KAN Wenxing, CHU Enyi, LIU Wei, et al. A review on MEMS safety and arming devices for micro-initiation system [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2022, 30(1):78—94 (in Chinese))
- [13] 石静, 缪玲娟, 倪茂林. 新的鲁棒滤波算法及在微机电系统-惯性导航系统/全球定位系统中应用[J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(3):305—309 (SHI Jing, MIAO Lingjuan, NI Maolin. New robust filtering algorithm and its application to micro-electro-mechanical system-based inertial navigation system/global positioning system [J]. *Control Theory and Applications*, 2012, 29(3):305—309 (in Chinese))
- [14] HORNBECK L J. Spatial light modulator and method[P]. U. S. 4566935, 1986-1-28.
- [15] VAN KESSEL P F, HORNBECK L J, MEIER R E, et al. A MEMS-based projection display[J]. *Proceedings of*

- the IEEE, 1998, 86(8):1687—1704.
- [16] BARRIOS A, GUPTA S, CASTELLUCCIO G M, et al. Quantitative in situ SEM high cycle fatigue: the critical role of oxygen on nanoscale-void-controlled nucleation and propagation of small cracks in Ni microbeams[J]. Nano Letters, 2018, 18(4):2595—2602.
- [17] VAN SPENGEN W M. MEMS reliability from a failure mechanisms perspective[J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43(7):1049—1060.
- [18] HUANG Y, VASAN A S S, DORAISWAMI R, et al. MEMS reliability review[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2012, 12(2):482—493.
- [19] RAFIEE P, KHATIBI G, ZEHETBAUER M. A review of the most important failure, reliability and nonlinearity aspects in the development of microelectromechanical systems (MEMS)[J]. Microelectronics International, 2017, 34(1):9—21.
- [20] SOMÀ A, SALEEM M M, DE PASQUALE G. Effect of creep in RF MEMS static and dynamic behavior[J]. Microsystem technologies, 2016, 22(5):1067—1078.
- [21] BRAITHWAITE F. On the fatigue and consequent fracture of metals[C]//Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1854:463—467.
- [22] GOUGH H J. The fatigue of metals[M]. London:Scott, Greenwood, 1924.
- [23] 高镇同. 疲劳性能测试[M]. 北京:国防工业出版社, 1980 (GAO Zhentong. Fatigue performance test [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980 (in Chinese))
- [24] LALANNE C. Fatigue damage[M]. Manhattan: John Wiley & Sons, 2014.
- [25] 许金泉. 疲劳力学[M]. 北京:科学出版社, 2021 (XU Jinquan. Fatigue Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2021 (in Chinese))
- [26] 林建鸿, 王彬文. 飞机疲劳失效适航规章演变历程回顾[J]. 航空科学技术, 2022, 33(3):39—51 (LIN Jianhong, WANG Binwen. Evolution history of airworthiness regulations for aircraft structural fatigue designs [J]. Aeronautical Science and Technology, 2022, 33(3):39—51 (in Chinese))
- [27] 颜秉善, 程育仁. 钢轨疲劳寿命的统计分析[J]. 北方交通大学学报, 1983(2):156—165 (YAN Bingshan, CHENG Yuren. Statistical analysis of rail fatigue life[J]. Journal of North China Jiaotong University, 1983(2):156—165 (in Chinese))
- [28] 王小宁. 承压类特种设备疲劳失效的与防治[J]. 设备管理与维修, 2018(6):96—98 (WANG Xiaoning. Fatigue failure and prevention of pressure special equipment [J]. Equipment Management and Maintenance, 2018(6):96—98 (in Chinese))
- [29] 李其汉, 王延荣, 王建军. 航空发动机叶片高循环疲劳失效研究[J]. 航空发动机, 2003(4):16—18, 41 (LI Qihan, WANG Yanrong, WANG Jianjun. Investigation of high cycle fatigue failures for the aero engine blades [J]. Aero Engine, 2003(4):16—18, 41 (in Chinese))
- [30] 轩福贞, 宫建国. 基于损伤模式的压力容器设计原理 [M]. 北京:科学出版社, 2020 (XUAN Fuzhen, GONG Jianguo. Design principle of pressure vessel based on damage mode [M]. Beijing: Science Press, 2020 (in Chinese))
- [31] 吴圣川, 李存海, 张文, 等. 金属材料疲劳裂纹扩展机制及模型的研究进展[J]. 固体力学学报, 2019, 40(6):489—538 (WU Shengchuan, LI Cunhai, ZHANG Wen, et al. Recent research progress on mechanisms and models of fatigue crack growth for metallic materials[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2019, 40(6):489—538 (in Chinese))
- [32] ZHANG W, SIMPSON C A, LEITNER T, et al. The effect of anisotropic microstructure on the crack growth and fatigue overload behaviour of ultrafine-grained nickel[J]. Acta Materialia, 2020, 184:225—240.
- [33] SURESH S. Crack deflection: implications for the growth of long and short fatigue cracks[J]. Metallurgical Transactions A, 1983, 14(11):2375—2385.
- [34] CHOWDHURY P, SEHITOGLU H. Mechanisms of fatigue crack growth — a critical digest of theoretical developments[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2016, 39(6):652—674.
- [35] YIN L, UMEZAWA O. Influence of dispersed β phase on local deformation pattern in mill-annealed Ti-Fe-O alloy under dwell fatigue loading[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 152:106447.

- [36] WEI Y, LI Y, ZHU L, et al. Evading the strength-ductility trade-off dilemma in steel through gradient hierarchical nanotwins[J]. *Nature communications*, 2014, 5(1):1–8.
- [37] HOSSEINIAN E, PIERRON O N. Quantitative in situ TEM tensile fatigue testing on nanocrystalline metallic ultrathin films[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(24):12532–12541.
- [38] CONNOLLEY T, MCHUGH P E, BRUZZI M. A review of deformation and fatigue of metals at small size scales [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2005, 28(12):1119–1152.
- [39] UCHIC M D, SHADE P A, DIMIDUK D M. Plasticity of micrometer-scale single crystals in compression[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2009, 39(1):361–386.
- [40] GREER J R, DE HOSSON J T M. Plasticity in small-sized metallic systems: intrinsic versus extrinsic size effect [J]. *Progress in Materials Science*, 2011, 56(6):654–724.
- [41] DEHM G, JAYA B N, RAGHAVAN R, et al. Overview on micro-and nanomechanical testing: new insights in interface plasticity and fracture at small length scales[J]. *Acta Materialia*, 2018, 142:248–282.
- [42] SENTHILKUMAR R, ARUNKUMAR N, HUSSIAN M M. A comparative study on low cycle fatigue behaviour of nano and micro Al_2O_3 reinforced AA2014 particulate hybrid composites[J]. *Results in Physics*, 2015, 5:273–280.
- [43] YIN D, LIU H, CHEN Y, et al. Effect of grain size on fatigue-crack growth in 2524 aluminium alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 84:9–16.
- [44] TANAKA K, SAKAKIBARA M, KIMACHI H. Grain-size effect on fatigue properties of nanocrystalline nickel thin films made by electrodeposition[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10:542–547.
- [45] UCHIC M D, DIMIDUK D M, FLORANDO J N, et al. Sample dimensions influence strength and crystal plasticity[J]. *Science*, 2004, 305(5686):986–989.
- [46] LIU B, XU Z, CHEN C, et al. In situ experimental study on material removal behaviour of single-crystal silicon in nanocutting[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 152:378–383.
- [47] YOSHINO M, AOKI T, SHIRAKASHI T, et al. Some experiments on the scratching of silicon: in situ scratching inside an SEM and scratching under high external hydrostatic pressures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43(2):335–347.
- [48] WANG J, ZENG Z, WEINBERGER C R, et al. In situ atomic-scale observation of twinning-dominated deformation in nanoscale body-centred cubic tungsten[J]. *Nature materials*, 2015, 14(6):594–600.
- [49] RAMACHANDRAMOORTHY R, BEESE A, ESPINOSA H. In situ electron microscopy tensile testing of constrained carbon nanofibers[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 149:452–458.
- [50] ESPINOSA H D, BERNAL R A, FILLETTER T. In situ TEM electromechanical testing of nanowires and nanotubes[J]. *Small*, 2012, 8(21):3233–3252.
- [51] STINVILLE J C, YAO E R, CALLAHAN P G, et al. Dislocation dynamics in a nickel-based superalloy via in-situ transmission scanning electron microscopy[J]. *Acta Materialia*, 2019, 168:152–166.
- [52] KIENER D, MOTZ C, SCHÖBERL T, et al. Determination of mechanical properties of copper at the micron scale [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2006, 8(11):1119–1125.
- [53] DENG Y, BARNOUSH A. Hydrogen embrittlement revealed via novel in situ fracture experiments using notched micro-cantilever specimens[J]. *Acta Materialia*, 2018, 142:236–247.
- [54] YAN Y, SUMIGAWA T, KITAMURA T. A robust in situ TEM experiment for characterizing the fracture toughness of the interface in nanoscale multilayers[J]. *Experimental Mechanics*, 2018, 58(5):721–731.
- [55] WISCHNITZER S. Introduction to electron microscopy[M]. Oxford: Elsevier, 2013.
- [56] 轩福贞, 朱明亮, 王国彪. 结构疲劳百年研究的回顾与展望[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(6):26–51 (XUAN Fuzhen, ZHU Mingliang, WANG Guobiao. Retrospect and prospect on century-long research of structural fatigue [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(6):26–51 (in Chinese))
- [57] YAN Y, SUMIGAWA T, WANG X, et al. Fatigue curve of microscale single-crystal copper: an in situ SEM tension-compression study[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 171:105361.
- [58] SUMIGAWA T, BYUNGWOON K, MIZUNO Y, et al. In situ observation on formation process of nanoscale cracking during tension-compression fatigue of single crystal copper micron-scale specimen[J]. *Acta Materialia*,

- 2018, 153:270—278.
- [59] 李志荣, 郑佳, 赵蕴华, 等. 中韩扫描电子显微镜发展情况比较研究[J]. 全球科技经济瞭望, 2013, 28(11):64—68 (LI Zhirong, ZHENG Jia, ZHAO Yunhua, et al. Comparative study on the development of scanning electron microscope in China and South Korea[J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2013, 28(11):64—68 (in Chinese))
- [60] 李贺南, 宋微, 杨思思, 等. 我国扫描电镜产业的发展与预测研究[J]. 创新科技, 2016(9):38—40 (LI Henan, SONG Wei, YANG Sisi, et al. Development and prediction research of SEM in China[J]. Innovation Science and Technology, 2016(9):38—40 (in Chinese))
- [61] 王晋, 马晋遥, 唐亮, 等. 扫描电镜纳米分辨高温力学原位仪器研制进展[J]. 电子显微学报, 2022, 41(6):645—653 (WANG Jin, MA Jinyao, TANG Liang, et al. Development of in-situ with nano resolution for mechanical property testing at high temperature [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2022, 41(6):645—653 (in Chinese))
- [62] LI X, DAO M, EBERL C, et al. Fracture, fatigue, and creep of nanotwinned metals[J]. MRS Bulletin, 2016, 41(4):298—304.
- [63] SINGH A, TANG L, DAO M, et al. Fracture toughness and fatigue crack growth characteristics of nanotwinned copper[J]. Acta Materialia, 2011, 59(6):2437—2446.
- [64] PAN Q S, LU Q H, LU L. Fatigue behavior of columnar-grained Cu with preferentially oriented nanoscale twins [J]. Acta materialia, 2013, 61(4):1383—1393.
- [65] SHUTE C J, MYERS B D, XIE S, et al. Microstructural stability during cyclic loading of multilayer copper/copper samples with nanoscale twinning[J]. Scripta Materialia, 2009, 60(12):1073—1077.
- [66] ZHANG K, WEERTMAN J R. Microstructural changes produced by fatigue in high-purity copper severely deformed by cryogenic rolling[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40(10):2255—2263.
- [67] LI L L, ZHANG Z J, ZHANG P, et al. Controllable fatigue cracking mechanisms of copper bicrystals with a coherent twin boundary[J]. Nature communications, 2014, 5(1):1—7.
- [68] ZHANG Z J, ZHANG P, LI L L, et al. Fatigue cracking at twin boundaries: Effects of crystallographic orientation and stacking fault energy[J]. Acta Materialia, 2012, 60:3113—3127.
- [69] HECKMAN N M, BERWIND M F, EBERL C, et al. Microstructural deformation in fatigued nanotwinned copper alloys[J]. Acta Materialia, 2018, 144:138—144.
- [70] ZHANG G P, VOLKERT C A, SCHWAIGER R, et al. Damage behavior of 200nm thin copper films under cyclic loading[J]. Journal of Materials research, 2005, 20(1):201—207.
- [71] GLUSHKO O, KIENER D. Initiation of fatigue damage in ultrafine grained metal films[J]. Acta Materialia, 2021, 206:116599.
- [72] PAN Q, ZHOU H, LU Q, et al. History-independent cyclic response of nanotwinned metals[J]. Nature, 2017, 551(7679):214—217.
- [73] SHUTE C J, MYERS B D, XIE S, et al. Detwinning, damage and crack initiation during cyclic loading of Cu samples containing aligned nanotwins[J]. Acta Materialia, 2011, 59(11):4569—4577.
- [74] ZHOU X, LI X, CHEN C. Atomistic mechanisms of fatigue in nanotwinned metals[J]. Acta Materialia, 2015, 99:77—86.
- [75] LEI Y B, WANG Z B, XU J L, et al. Simultaneous enhancement of stress-and strain-controlled fatigue properties in 316L stainless steel with gradient nanostructure[J]. Acta Materialia, 2019, 168:133—142.
- [76] YANG L, TAO N R, LU K, et al. Enhanced fatigue resistance of Cu with a gradient nanograined surface layer [J]. Scripta Materialia, 2013, 68(10):801—804.
- [77] LONG J, PAN Q, TAO N, et al. Improved fatigue resistance of gradient nanograined Cu[J]. Acta Materialia, 2019, 166:56—66.
- [78] JING L, PAN Q, LONG J, et al. Effect of volume fraction of gradient nanograined layer on high-cycle fatigue behavior of Cu[J]. Scripta Materialia, 2019, 161:74—77.
- [79] BOYCE B L, PADILLA H A. Anomalous fatigue behavior and fatigue-induced grain growth in nanocrystalline nickel alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(7):1793—1804.

- [80] MEIROM R A, ALSEM D H, ROMASCO A L, et al. Fatigue-induced grain coarsening in nanocrystalline platinum films[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(3):1141—1149.
- [81] SHAMS S A A, JANG G, WON J W, et al. Low-cycle fatigue properties of CoCrFeMnNi high-entropy alloy compared with its conventional counterparts[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 792:139661.
- [82] SAJADIFAR S V, WEGENER T, YAPICI G G, et al. Effect of grain size on the very high cycle fatigue behavior and notch sensitivity of titanium[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019, 104:102362.
- [83] PAN J, PENG L, FU P, et al. The effects of grain size and heat treatment on the deformation heterogeneities and fatigue behaviors of GW83K magnesium alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 754:246—257.
- [84] HANLON T, KWON Y N, SURESH S. Grain size effects on the fatigue response of nanocrystalline metals[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 49(7):675—680.
- [85] CHLUBA C, GE W, DANJWORT T, et al. Effect of crystallographic compatibility and grain size on the functional fatigue of sputtered TiNiCuCo thin films[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2016, 374(2074):20150311.
- [86] DENG G J, TU S T, ZHANG X C, et al. Grain size effect on the small fatigue crack initiation and growth mechanisms of nickel-based superalloy GH4169[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 134:433—450.
- [87] SCHINO A D, KENNY J M. Grain size dependence of the fatigue behaviour of a ultrafine-grained AISI 304 stainless steel[J]. *Materials Letters*, 2003, 57(21):3182—3185.
- [88] DU B, YANG J, CUI C, et al. Effects of grain size on the high-cycle fatigue behavior of IN792 superalloy[J]. *Materials and Design*, 2015, 65:57—64.
- [89] LI L, ZHANG Z, SHEN G. The effect of grain size on fatigue crack propagation in commercial pure titanium investigated by acoustic emission[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(7):2720—2729.
- [90] OU C Y, VOOTHALURU R, LIU C R. A methodology for incorporating the effect of grain size on the energy efficiency coefficient for fatigue crack initiation estimation in polycrystalline metal[J]. *Metals*, 2020, 10(3):355.
- [91] BUFFORD D C, STAUFFER D, MOOK W M, et al. High cycle fatigue in the transmission electron microscope [J]. *Nano letters*, 2016, 16(8):4946—4953.
- [92] CHENG A S, LAIRD C. The high cycle fatigue life of copper single crystals tested under plastic-strain-controlled conditions[J]. *Materials Science and Engineering*, 1981, 51(1):55—60.
- [93] HAYAKAWA N, TSUCHIYA K, KAKIUCHI T. Development of micro-scale tensile fatigue test system[C]// 2016 IEEE 11th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2016:289—293.
- [94] HOSSEINIAN E, PIERRON O N. Correction; quantitative in situ TEM tensile fatigue testing on nanocrystalline metallic ultrathin films[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(26):11468—11470.
- [95] ZHANG H, JIANG C, LU Y. Low-cycle fatigue testing of Ni nanowires based on a micro-mechanical device[J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 57(3):495—500.
- [96] YAO M, WANG H, ZHAO Y, et al. Tension-tension fatigue behaviours of notched freestanding pure Ti foils with different thicknesses[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 114:65—73.
- [97] SCHWAIGER R, DEHM G, KRAFT O. Cyclic deformation of polycrystalline Cu films [J]. *Philosophical Magazine*, 2003, 83(6):693—710.
- [98] ZHANG Q, HUANG R, ZHANG X, et al. Deformation mechanisms and remarkable strain hardening in single-crystalline high-entropy-alloy micropillars/nanopillars[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(8):3671—3679.
- [99] KELES M H, CHAKI T K. The effect of various atmospheres on the threshold fatigue crack growth behavior of AISI 304 stainless steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(2):169—174.
- [100] KRAFT O, SCHWAIGER R, WELLNER P. Fatigue in thin films: lifetime and damage formation[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 319:919—923.
- [101] TAKASHIMA K, HIGO Y. Fatigue and fracture of a Ni-P amorphous alloy thin film on the micrometer scale [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2005, 28(8):703—710.
- [102] KLEIN M, HADRBOLLETZ A, WEISS B, et al. The “size effect” on the stress-strain, fatigue and fracture

- properties of thin metallic foils[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 319:924—928.
- [103] DAI C Y, ZHANG B, XU J, et al. On size effects on fatigue properties of metal foils at micrometer scales[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 575:217—222.
- [104] HEINZ W, PIPPAN R, DEHM G. Investigation of the fatigue behavior of Al thin films with different microstructure[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527:7757—7763.
- [105] WIMMER A, LEITNER A, DETZEL T, et al. Damage evolution during cyclic tension-tension loading of micron-sized Cu lines[J]. *Acta materialia*, 2014, 67:297—307.
- [106] SUMIGAWA T, MATSUMOTO K, TSUCHIYA T, et al. Fatigue of 1 μ m-scale gold by vibration with reduced resonant frequency[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 556:429—436.
- [107] GUPTA S, BARRIOS A, ENGLAND N, et al. Improved very high cycle bending fatigue behavior of Ni microbeams with Au coatings[J]. *Acta Materialia*, 2018, 161:444—455.
- [108] FANG H, SHIOHARA R, SUMIGAWA T, et al. Size dependence of fatigue damage in sub-micrometer single crystal gold[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 618:416—423.
- [109] KIENER D, MOTZ C, GROSINGER W, et al. Cyclic response of copper single crystal micro-beams[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 63(5):500—503.
- [110] KAKIUCHI T, UEMATSU Y, TAMANO S, et al. Effect of grain orientation on fatigue behavior in micro cantilever of magnesium alloy AZ31[J]. *Procedia Materials Science*, 2014, 3:967—972.
- [111] MIZUNO S, KAKIUCHI T, UEMATSU Y. Fatigue test of small sized AZ31 magnesium alloy using micropillar specimen[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 526:165—168.
- [112] BOYCE B L, MICHAEL J R, KOTULA P G. Fatigue of metallic microdevices and the role of fatigue-induced surface oxides[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(6):1609—1619.
- [113] WIMMER A, HEINZ W, DETZEL T, et al. Cyclic bending experiments on free-standing Cu micron lines observed by electron backscatter diffraction[J]. *Acta Materialia*, 2015, 83:460—469.
- [114] DAI C Y, ZHANG G P, YAN C. Size effects on tensile and fatigue behaviour of polycrystalline metal foils at the micrometer scale[J]. *Philosophical Magazine*, 2011, 91(6):932—945.
- [115] GAO Z, DING Y, LIN S, et al. Dynamic fatigue studies of ZnO nanowires by in-situ transmission electron microscopy[J]. *Physica Status Solidi-Rapid Research Letters*, 2009, 3:260—262.
- [116] LI P, LIAO Q, YANG S, et al. In situ transmission electron microscopy investigation on fatigue behavior of single ZnO wires under high-cycle strain[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(2):480—485.
- [117] 苏飞, 张铮, 熊吉, 等. 电镀铜薄膜力学性能的实验研究[J]. *实验力学*, 2012, 27(5):565—569 (SU Fei, ZHANG Zheng, XIONG Ji, et al. Experimental study of mechanical properties for electroplated copper film [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(5):565—569 (in Chinese))
- [118] WEI S, ZHAO Z, ZHENG S, et al. Fatigue-induced interface damage in Cu/V nanoscale metallic multilayers [J]. *Scripta Materialia*, 2021, 190:103—107.
- [119] GUO L, KITAMURA T, YAN Y, et al. Fracture mechanics investigation on crack propagation in the nano-multilayered materials[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 64:208—220.
- [120] WANG X, YAN Y, WAN Q, et al. A nano-cantilever method for crack initiation at the free edge of the Cu/Si interface in nanoscale components[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2016, 29(4):416—428.
- [121] SUMIGAWA T, MURAKAMI T, SHISHIDO T, et al. Cu/Si interface fracture due to fatigue of copper film in nanometer scale[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527:6518—6523.
- [122] YAN Y, SUMIGAWA T, KITAMURA T. Effect of environment on fatigue strength of Cu/Si interface in nanoscale components[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 556:147—154.
- [123] 汪国睿, 刘璐琪, 张忠. 二维材料实验力学综述[J]. *实验力学*, 2017, 32(5):664—676 (WANG Guorui, LIU Luqi, ZHANG Zhong. Experimental mechanics of two-dimensional materials: a review [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(5):664—676 (in Chinese))
- [124] 严刚, 汤剑飞. 基于粒子滤波的疲劳裂纹扩展和剩余寿命预测实验研究[J]. *实验力学*, 2019, 34(5):775—782 (YAN Gang, TANG Jianfei. Experimental study on prediction of fatigue crack growth and residual life by using particle filter[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2019, 34(5):775—782 (in Chinese))

- [125] 程根梧. 短裂纹的疲劳性能探讨[J]. 实验力学, 1988, 3(1):49—54 (CHENG Genwu. Fatigue performance of short cracks[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1988, 3(1):49—54 (in Chinese))
- [126] 李健康, 黄义仿. 弯曲疲劳短裂纹扩展规律研究[J]. 实验力学, 1996, 11(2):222—227 (LI Jiankang, HUANG Yifang. Investigation on the growth law of short crack in under repeated bending load [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1996, 11(2):222—227 (in Chinese))
- [127] ZHANG W, LIU Y. Investigation of incremental fatigue crack growth mechanisms using in situ SEM testing[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 42:14—23.
- [128] 郭隽, 郭成璧. 疲劳短裂纹评定方法新进展[J]. 机械强度, 2001(1):38—42 (GUO Jun, GUO Chengbi. Development on evaluating method of short fatigue cracks [J]. Journal of Mechanical Strength, 2001(1):38—42 (in Chinese))
- [129] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85:528—534.
- [130] 倪向贵, 李新亮, 王秀喜. 疲劳裂纹扩展规律 Paris 公式的一般修正及应用[J]. 压力容器, 2006, 23(12):8—15, 19 (NI Xianggui, LI Xinliang, WANG Xiuxi. General modification and application of Paris formula for fatigue crack growth [J]. Journal of Pressure Vessel, 2006, 23(12):8—15, 19 (in Chinese))
- [131] DAVIDSON D L, LANKFORD J. Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanisms and micromechanics [J]. International Materials Reviews, 1992, 37(1):45—76.
- [132] 刘智慧, 张泉灵. 大数据技术研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(6):957—972 (LIU Zhihui, ZHANG Quanling. Research overview of big data technology [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(6):957—972 (in Chinese))
- [133] 程学旗, 靳小龙, 王元卓, 等. 大数据系统和分析技术综述[J]. 软件学报, 2014, 25(9):1889—1908 (CHENG Xueqi, JIN Xiaolong, WANG Yuanzhuo, et al. Survey on big data system and analytic technology[J]. Journal of Software, 2014, 25(9):1889—1908 (in Chinese))

Research progress in in-situ fatigue experiment and performance of micro- and nano- scale materials and structures: a review

LI Zhenkai, YAN Yabin, XUAN Fuzhen

(Shanghai Key Laboratory for Intelligent Sensing and Detection Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: With the development towards integration and miniaturization of micromechanical devices such as integrated circuit chips, sensors, flexible circuit systems, and micro-/nano- electromechanical systems, accurate prediction on the mechanical property and reliability of their internal micro- /nano- scale materials has become one of the key issues restricting the further application of the above-mentioned micromechanical devices. During the long-term service, the fatigue properties of micro-/nano- scale materials have become a critical issue in recent years. Firstly, the literature related to the in-situ fatigue experimental methods and fatigue properties of micro-/nano- scale materials was investigated. And then, the current research status of micro-/nano- scale fatigue experimental technology and the research status of in situ fatigue of micro-/nano- scale materials are summarized, including the study of fatigue properties of metals containing twin structure, gradient structure or coarse and fine crystal metals, and uniaxial and multiaxial stress conditions, and the research work on interface fatigue damage is also summarized. Finally, the fatigue properties of micro-/nano- scale materials are prospected, and the future development direction is proposed.

Keywords: micro/nano- scale; in-situ fatigue experiments; fatigue performance; fatigue prospect