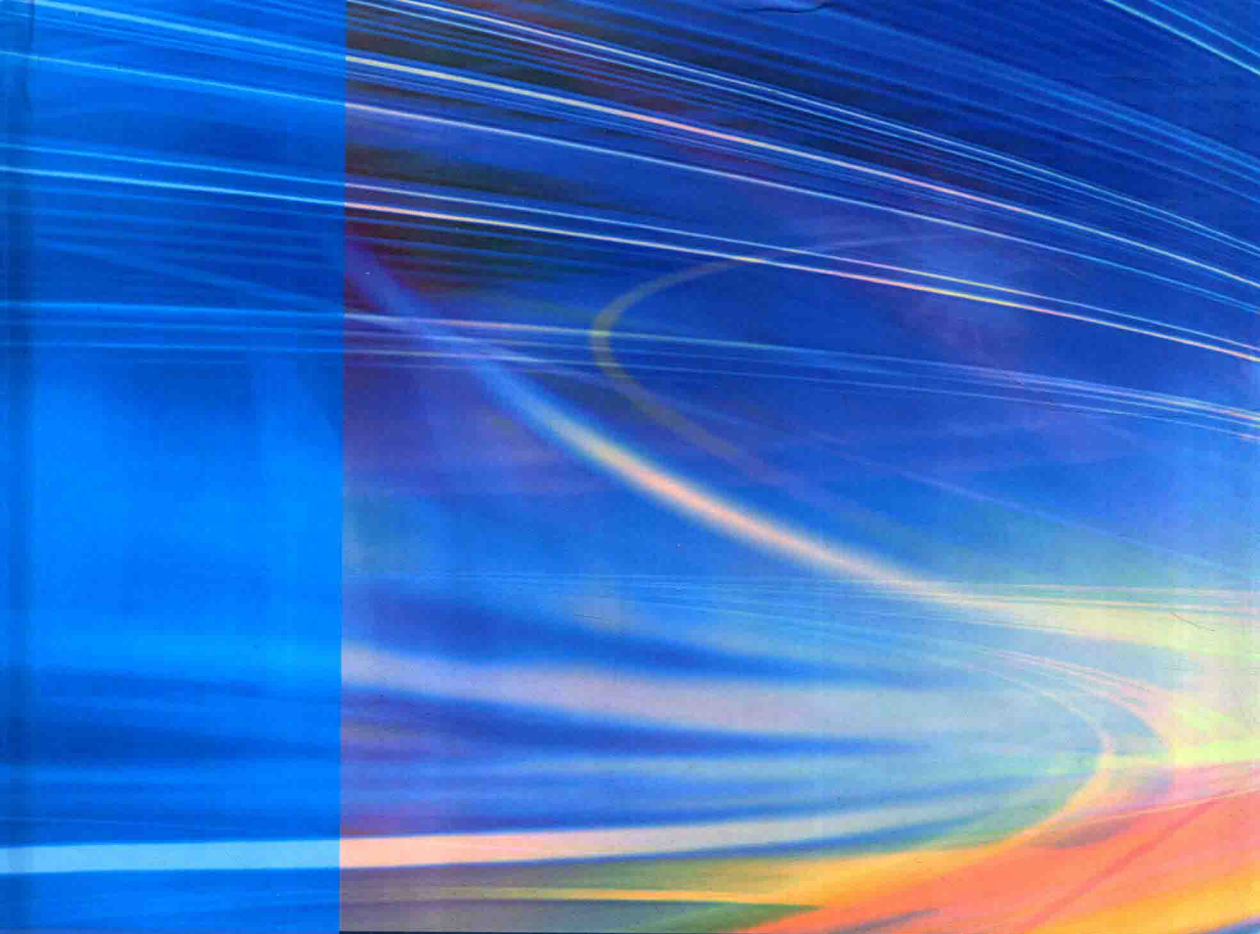




材料疲劳损伤行为的 先进光源表征技术

—— 吴圣川 胡雅楠 康国政/著

Characterization of Material Fatigue Damage
via Advanced Light Source Tomography



科学出版社

材料疲劳损伤行为的 先进光源表征技术

**Characterization of Material Fatigue Damage
via Advanced Light Source Tomography**

吴圣川 胡雅楠 康国政 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

为充分利用先进光源实现材料缺陷演化及损伤行为的准定量表征,兼容于先进光源成像线站的原位加载机构的研制为力学工作者和材料科学家提供了前所未有的机遇,进而能够建立基于材料表面/亚表面和内部微观结构特征的更加准确的服役寿命模型和更为完善的强度评价方法。本书是在总结了著者近年来基于同步辐射成像技术研究铝合金熔焊接头和钛合金增材制件缺陷行为成果的基础上完成的,也是著者团队围绕“实验方法+仿真模拟+理论模型”等三个科学目标的初步系统性总结。

本书适合材料研发、结构设计及可靠性评价等专业的研究生、科研院所教师及工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

材料疲劳损伤行为的先进光源表征技术/吴圣川,胡雅楠,康国政著.
—北京:科学出版社,2018.12

ISBN 978-7-03-060299-2

I. ①材… II. ①吴… ②胡… ③康… III. ①同步辐射-放射线发光-应用-金属材料-无损检验 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 297751 号

责任编辑:刘信力/责任校对:邹慧卿
责任印制:肖 兴/封面设计:无极书装

科学出版社 出版
北京 海淀区城子街16号
邮政编码:100717
http://www.sciencep.com
三河市春园印刷有限公司 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

2018年12月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年12月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:307 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

金属材料在循环载荷作用下的力学响应和裂纹萌生与扩展特性,对于工程结构抗疲劳设计及服役性能评价至关重要。长期以来,科学家通过表征表面裂纹长度和辨识疲劳断口来揭示小试样的破坏机理,依此预测大块金属材料的损伤行为,进而建立工程部件的设计及评价模型。随着对材料损伤机制的认识不断深入,人们迫切希望透过“自由表面”看清“内部世界”,从而建立基于材料表面/亚表面/内部微观结构特征的更加准确的服役寿命模型和更为完善的强度评价方法。近十年来,以第三代同步辐射光源为代表的先进光源成像技术为研究材料内部损伤行为提供了全新的研究手段。同步辐射光源是真空中接近光速运动的带电粒子(如电子)在轨道切线上发射出的电磁波,具有高亮度、高精度、宽频谱、窄脉冲、强穿透和无损伤等优异特性,是开展各种物质微结构原位、动态、无损和可视化研究的超级显微镜和精密探针。为实现材料缺陷演化及损伤机制的准定量观测,科学家研制出兼容于先进光源成像的多种原位加载机构,为基于成像大数据的含缺陷部件损伤行为的研究提供了前所未有的机遇。

本书从实验技术开发、理论模型建立和仿真模拟预测等三大方面对材料疲劳损伤行为的同步辐射表征技术进行了全面、详细的阐述。全书共六章:第1章为引言,简要分析了基于同步辐射成像技术研究材料疲劳损伤行为的意义和背景;第2章阐述了辐射源的产生、特点、应用及成像技术,并简要介绍了X射线自由电子激光和散裂中子源;第3章回顾了国内外原位加载试验装置的研制和应用,重点介绍了著者近年来在同步辐射成像原位加载机构的最新成果;第4章论述了著者在工程材料疲劳损伤建模方面取得的主要进展;第5章为利用三维图像处理软件对同步辐射成像获得的缺陷和裂纹重构和表征方法,从定性角度分析熔焊接头、增材制件和复合材料的疲劳损伤行为;第6章为基于同步辐射成像获得的海量图像数据,借助商业仿真软件模拟真实工况下材料损伤累积和演化规律,同时基于细观损伤力学,研究以气孔率为损伤变量的失效机制。鉴于这一领域的研究方兴未艾,本书仅为抛砖引玉,共同推进工程材料服役行为研究。

著者感谢国家自然科学基金面上项目(资助号:11572267)和重点项目(资助号:11532010)、四川省科学技术计划项目(资助号:2017JY0216)、牵引动力国家重点实验室自主研究项目(资助号:2018TP L-T03)、机械结构强度与振动国家重点实验室开放项目(资助号:SV2016-KF-21)的资助。感谢法国 INSA Lyon 大学的 Buffière J Y 教授、英国皇家工程院院士 Withers P J 教授和欧洲同步辐射光源的

Helfen L 博士的愉快合作, 以及中国科学院上海同步辐射光源的肖体乔研究员、谢红兰研究员、付亚楠副研究员和张丽丽副研究员, 中国科学院高能物理研究所的袁清习副研究员和黄万霞副研究员在同步辐射 X 射线成像合作研究中的大力支持。中国科学院高能物理研究所的朱佩平教授在百忙中认真审阅了全部书稿, 并提出了宝贵建议和细致补正, 使我们少犯常识性错误; 东北大学谢里阳教授对改进的样本信息聚集方法进行了认真审阅, 点出了诸多不准确之处, 一并表示感谢。还要特别感谢浙江大学的蒋建中教授、中国科学院高能物理研究所的董宇辉教授、合肥同步辐射装置的高琛教授、大连理工大学的王同敏教授、上海同步辐射光源的邵仁忠教授、北京科技大学的王沿东教授和王连庆教授、中国航空制造技术研究院的陈俐研究员和张杰副研究员、上海交通大学的焦汇胜教授、中山大学的孙冬柏教授、中国科技大学的胡小方教授和许峰教授等给予的指导和愉快的交流。感谢参与相关课题研究的余啸、喻程、张思齐、宋哲、李存海、吴正凯、谢成、段浩、鲍泓翊玺和罗艳等。

本书是在总结了课题组八年来在基于同步辐射光源研究金属材料疲劳损伤行为相关成果的基础上完成的, 较为全面地阐述了同步辐射成像技术特点、原位成像加载装置研发、疲劳损伤评价模型建立、材料损伤的成像表征方法以及基于成像数据的损伤评价等核心研究内容。围绕同步辐射 X 射线成像技术, 著者力图在“实验方法 + 仿真模拟 + 理论模型”等三方面形成一个研究链路。但是, 以同步辐射光源为代表的光子科学的蓬勃发展给研究人员带来的全新的研究思路和机遇愈加广阔, 相关成果推陈出新, 加之著者知识水平与认识能力有限, 书中难免有疏漏甚至错误之处, 恳请大家批评指正。

吴圣川 胡雅楠 康国政

2018 年 10 月 20 日

目 录

第 1 章	引言	1
第 2 章	同步辐射成像技术	4
2.1	同步辐射光源	4
2.1.1	同步辐射光源的产生	4
2.1.2	同步辐射光的特性	5
2.1.3	同步辐射装置	6
2.2	同步辐射成像技术	8
2.2.1	同步辐射成像线站	8
2.2.2	同步辐射探测器	9
2.2.3	基于衬度的成像技术	10
2.2.4	图像伪影的形成	14
2.2.5	伪影消除方法	15
2.3	X 射线自由电子激光	19
2.3.1	自由电子激光技术	19
2.3.2	自由电子激光的特性	20
2.3.3	自由电子激光的应用	20
2.4	散裂脉冲中子源	21
2.4.1	中子的产生及特点	21
2.4.2	织构及残余应力测量	22
2.5	本章小结	27
	参考文献	27
第 3 章	原位成像加载装置	29
3.1	加载机构的发展	30
3.2	原位拉伸试验机	35
3.2.1	主功能设计	36
3.2.2	拉伸试验方法	37
3.3	原位疲劳试验机	38
3.3.1	主功能设计	38
3.3.2	作动机构设计	40
3.3.3	夹持结构设计	46

3.3.4	信号采集模块	49
3.3.5	系统集成及调试	53
3.3.6	疲劳试验方法	54
3.4	环境控制模块	55
3.4.1	低温疲劳行为	55
3.4.2	高温疲劳行为	57
3.4.3	温控装置设计	58
3.4.4	温控疲劳试验机	62
3.5	旋转变曲加载机构	64
3.5.1	加载模式	64
3.5.2	主功能设计	66
3.5.3	作动单元设计	67
3.5.4	夹持单元设计	68
3.5.5	载荷单元设计	68
3.6	本章小结	69
	参考文献	69
第 4 章	疲劳损伤评价模型	72
4.1	样本信息聚集原理	72
4.1.1	疲劳数据建模方法	72
4.1.2	(X-x-x-x) 型数据	76
4.1.3	(x-x-x-x) 型数据	78
4.2	改进的样本集聚方法	79
4.2.1	数据建模的改进方法	79
4.2.2	两种数据的建模改进	80
4.2.3	疲劳曲线拟合的改进	82
4.2.4	车轴疲劳寿命估算	84
4.2.5	车辆焊接结构材料	96
4.3	疲劳裂纹扩展模型	102
4.3.1	裂纹扩展的唯象模型	102
4.3.2	裂纹扩展的理论模型	104
4.3.3	概率疲劳裂纹扩展模型	125
4.4	本章小结	130
	参考文献	130
第 5 章	材料损伤的成像表征	137
5.1	损伤提取与重构	137

5.2 缺陷信息统计	149
5.3 网格模型优化	153
5.4 铝合金的损伤行为	156
5.4.1 熔焊铝合金	156
5.4.2 非焊铝合金	168
5.5 增材材料的损伤行为	173
5.5.1 增材制造技术	174
5.5.2 钛合金材料	175
5.5.3 铝合金材料	179
5.5.4 其他结构材料	181
5.6 复合材料的损伤行为	183
5.6.1 树脂基复合材料	183
5.6.2 陶瓷基复合材料	185
5.6.3 金属基复合材料	187
5.7 本章小结	189
参考文献	189
第 6 章 基于成像数据的损伤评价	201
6.1 缺陷行为预测方法	201
6.1.1 临界缺陷的定义	201
6.1.2 应力集中效应	204
6.1.3 缺陷扩展区	211
6.2 缺陷致开裂行为	215
6.2.1 增材制造缺陷	216
6.2.2 铝合金焊接缺陷	219
6.3 细观损伤力学行为	222
6.3.1 损伤力学概念	223
6.3.2 细观损伤力学模型	224
6.3.3 熔焊接头的损伤机制	227
6.4 本章小结	233
参考文献	234
附录 I	238
附录 II	240
附录 III	242

第 1 章 引 言

预计至 2020 年,中国高铁运营里程达到 3 万公里,运营速度和总里程双居世界第一,超长寿命、极低成本、安全高效已成为轨道交通关键部件设计与运行的重要方向和目标。最近,国家宣布启动川藏铁路建设,标志着轨道交通在中国经济社会发展中的引领作用进一步得到加强。加之已设计、建造和运营在各种环境下的铁路车辆,例如极寒条件下的哈大高铁、高温条件下的京港高铁、大风沙漠中的兰新高铁,高速铁路必将挺进艰难山区和生命禁区。这些极端复杂服役环境对于车辆部件及结构的疲劳可靠性提出了更高要求。因此,传统的、基于材料表面(二维区间)损伤测量和基于材料平均响应(三维同质化)来构建的疲劳损伤模型的适用限界引起了学术界和工程界的重点关注,尤其在当前情况下是否应该关注表面以内的局部损伤响应及其对材料服役行为的影响。

工程构件在交变载荷作用下,因局部应力集中引起的不可逆损伤和裂纹萌生并导致其失效破坏的现象称为疲劳。可见,这一概念本身就包含了对材料进行全要素的或者非选择性的研究。然而,长期以来,科学家只能通过破坏性切片和疲劳断口来揭示简单形状小试件的破坏机理,依此预测大块材料的损伤行为,进而推证和应用至任意环境下的复杂结构。近十年来,以第三代同步辐射光源为代表的先进光源为全面表征材料服役行为提供了前所未有的机遇。作为先进光源的代表,同步辐射光源在应用于工程材料时,实现了从看得更深、更远到看得更准、更快的伟大飞跃。同步辐射光源的应用几乎遍及当今所有学科领域,强劲地推动着一个国家基础科学研究的整体水平和创新能力,并使得对各种工程结构材料进行宏观-细观-微观等跨时空尺度定量表征、力学响应特征建模及服役性能的准确预测成为可能。正因为大科学装置对一个国家技术核心竞争力和综合国力的巨大推动作用,中国已经建设完成东莞散裂中子源和上海 X 射线自由电子激光,以及在建设的各项技术指标位居世界三代光源前列的北京高能同步辐射光源。

为实现材料内部缺陷及损伤演化行为的原位、实时、动态观测,基于高亮度、高精度、宽频谱和窄脉冲的先进光源,各国学者研制出兼容于相应光束线配置的原位成像加载装置。除了大型商用材料试验机的基本功能外,这类原位加载设备应具备以下主要特点:体积小、重量轻、不遮光,同时平台兼容性强,维护简单,携带方便。从加载类型上看,分为原位拉伸加载、轴向疲劳加载和旋转弯曲加载;从环境气氛上看,可分为常温、低温和高温;从研究对象上看,轻质高强度的金属结构材

料及各种复合材料是主流。目前同步辐射成像技术受到了材料、物理、力学等领域内学者的极大重视,结合世界各地著名的同步辐射装置,竞相研制高温、极寒、大载荷、高频率、多加载模式及复合物理和化学耦合环境作用下工程结构材料微缺陷和损伤演变的高精度专用原位加载机构,一定程度上提升了同步辐射装置的使用效能,并推动着材料疲劳研究领域的发展。这一领域的研究中,欧洲、美国和日本等的科学家做出了贡献,尤其以欧洲同步辐射光源 (ESRF) 相关光束线站的研究成果较为全面、深入和系统。在中国,著者从 2010 年即开始应用上海同步辐射光源 (SSRF) 成像线站开展高强度激光焊缝的软化机制,逐步深入到缺陷与疲劳损伤行为方面。2014 年,与基于先进光源开展材料损伤行为领域的顶尖科学家 Buffière JY 教授合作,在 ESRF-ID19 成像线站率先开展铝合金焊缝的原位疲劳损伤行为研究,取得了丰硕成果。

回顾近八年研究历程,总体上来说,基于各自领域的科学技术问题来设计高通量实验,使用好同步辐射光源这一大科学设施并不容易。这是因为,与常规的扫描电子显微镜 (SEM)、光学显微镜 (OM)、透射电子显微镜 (TEM) 及电子背散射衍射技术 (EBSD) 等相比,先进光源成像产生的数据可能需要专业软件辅助并经过长达数月的处理才能获得理想结果。比如,对于同步辐射 X 射线成像,在短时间内就可能产生数百 TB 或者更多的海量科学数据。其中,基于三维图像处理软件将试验数据可视化自然是精确表征缺陷与疲劳损伤行为的重要环节。Mimics、Amira、ImageJ、Avizo 等三维可视化软件基于阈值设置、图像分割及三维重构等功能,能够准确解析出缺陷和裂纹几何特征,从定性和定量角度辅助分析材料的疲劳损伤行为。如果不能熟练掌握和应用这些数据处理工具,自然无法深入同步辐射成像的精妙世界。因此,本书也将在第 5 章中详细介绍相关软件及应用技巧。

近年来,一个值得注意的发展趋势是借助于同步辐射 X 射线成像获得的海量图像数据,在商业仿真软件 (如 SolidWorks、HyperMesh、ANSYS、ABAQUS 等) 中重建出部件几何特征以及缺陷的尺寸、数量、形貌、位置及分布,采用的材料多尺度力学行为模型及疲劳损伤演化表征方法,模拟真实加载工况下工程结构材料损伤累积及演化全过程,进而将科学家对材料服役性能劣化的认识从定性推向半定量和定量。这一思路是当前国际上材料与结构缺陷致疲劳损伤研究的先进分析方法,并使得仿真结果真正服务于结构设计及性能评价。

同步辐射 X 射线成像能够获得材料表面以下的损伤演化,但如何把这些新结果与既有工程材料评价的理论和方法相结合,是检验新结果、新理论和新方法的重要途径,也是同步辐射走向工程应用的关键步骤。为此,已经有一些学者尝试将传统材料损伤表征手段如数字图像相关技术、数字体积相关技术、声发射技术与数值模拟 (如有限元方法) 和先进的同步辐射成像技术相结合,从理论、实验和仿真等

三个方面对材料疲劳损伤演化行为进行多角度评价。这一先进的研究方法是当前实验力学和工程材料领域发展的新趋势、新方向和新目标。

尽管如此,基于同步辐射 X 射线成像的材料缺陷与疲劳损伤行为这一研究领域总体上仍处于一种定性或者半定量阶段。随着先进光源的不断发展,吸引更多领域的学者关注和投入这一领域,实现与公认的疲劳损伤和寿命评价模型相互印证和支撑,是材料、力学和机械等学科学者的重要任务与机遇。

第2章 同步辐射成像技术

长期以来,科学家们迫切希望能够透过材料的“自由表面”看清楚整个材料的“微观世界”,从而建立一种多尺度力学响应的关联模型来定量评估材料及部件的服役行为。20世纪70年代,医学CT(Computed Tomography)首先用于生物活体的健康诊断,立即展现出X射线成像方法的巨大魅力,然而,CT技术在工程科学技术领域中的广泛运用则得益于90年代以来建造的第三代同步辐射装置(Synchrotron Radiation Facility)。这种装置产生的先进光源覆盖了从红外到硬X射线的连续电磁波谱,经过光学元件筛选后生成高亮度、高准直、高偏振、高纯净、窄脉冲的单色X射线,进而作为探针用于实时动态成像物体的各种信息。同步辐射光与物质的相互作用清晰揭示了更微观、更深层次的复杂结构,已成为当今众多基础学科(材料、生命、物理、化学、医药等)尤其是材料疲劳损伤研究的一种最先进又不可替代的科学工具^[1-4]。

2.1 同步辐射光源

人造光源是文明进步的象征,是人类改造自然的重要工具。电光源、X射线和激光光源的相继出现,不仅把人类视野引入至肉眼不可见的微观世界,而且作为一种先进的探测手段用于认识一个全新的物质世界。作为第四次光源革命的代表,同步辐射光源实现了从看得更深、更远到看得更准、更快的伟大飞跃。因此,高性能同步辐射光源已成为反映一个国家科技核心竞争力的大科学装置。

2.1.1 同步辐射光源的产生

作为一种人工光源,同步辐射光源是真空中接近光速运动的带电粒子(如电子)在轨道切线方向释放出的电磁波。由于最早发现于美国通用电气的电子同步加速器上,因此被称为“同步辐射(Synchrotron Radiation, SR)”光源。同步辐射光源的出现及应用给工程科学研究提供了前所未有的高端实验平台,强劲地推动着科学技术各个领域的飞速发展,已成为当今最重要的光源之一。

产生同步辐射谱的专用装置一般有三种:即电子储存环(Storage rings)中的弯转磁铁(Bending magnet)、扭摆器(Wigglers)和波荡器(Undulators),如图2.1所示。弯转磁铁顾名思义就是使相对论电子的运动轨道发生圆弧偏转,从而连续稳定地产生电磁辐射,它是第一代和第二代同步辐射光源的重要部件。扭摆器和波荡器

称为插入件，放置于储存环弯转磁铁间的直线段中。扭摆器由较宽、较强的磁铁周期性直线排列，电子在扭摆器中做幅度较大且近似正弦曲线的扭摆运动，从而显著增强了辐射能量和光子通量，保证了频谱连续分布。波荡器由若干组沿电子轨道周期排列的磁铁组成，电子在轨道平面内做幅度较小的正弦运动，从而得到准单色和相干的近似平行光。上述插入件连续释放出的电磁辐射不断叠加，最终获得亮度增加上万倍的、稳定的同步辐射光 [2-4]。

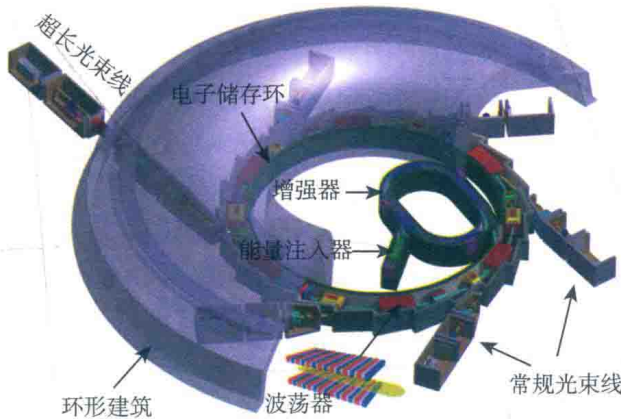


图 2.1 同步辐射装置的基本结构组成

从产生同步辐射光的能量、亮度及其应用需求上来看，1965~1975 年发展了第一代同步辐射光源（基于加速器的共生型），1975~1990 年发展出第二代同步辐射光源（基于储存环的专用型），1994 年至今则属于第三代同步辐射光源（基于插入件的专用型）。在中国大陆，于 1991 年建成的北京同步辐射装置（Beijing Synchrotron Radiation Facility, BSRF）、于 1992 年建成的合肥同步辐射装置（National Synchrotron Radiation Laboratory, NSRL）以及于 2009 年建成的上海光源（Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF）分别属于第一、第二和第三代同步辐射光源 [5]。

2.1.2 同步辐射光的特性

与日常接触的可见光和 X 光一样，同步辐射光本质上也是一种电磁波。英国数学家 Shortt G A 第一次用数学模型精确计算了电磁辐射导致被加速转向电子的能量损失 [4]。有趣的是，早期同步辐射被认为是高能加速器运行中的一种寄生虫，并给理论物理学家和加速器设计及防护人员带来无穷无尽的烦恼。然而，1947 年以后近 20 年穷尽各种手段避免的电磁辐射却被发现是一种性能远比传统 X 光更为优越的高品质光源，于是人们对同步辐射光源的兴趣迅速增加。为了更深入地研究物质的基本结构，发达国家争先建造高能同步辐射装置，涌现出一大批高水平研

究成果,从而造就了20世纪科学技术的春天。

同步辐射光源的主要特性包括(见图2.2^[2-4]):(1)宽频谱(Wide spectrum),从红外线一直到X射线,这为科学家提供了各领域所需的、特定波长的研究光源,尤其适合开展高通量实验;(2)高亮度(High brightness),例如第三代同步辐射光源产生的X射线亮度是普通X光机的千亿倍或者更高,几乎可以穿透任何金属;(3)高准直(High collimation),同步辐射光可以获得微米到纳米量级的聚焦光斑,尤其适合开展高空间分辨率的动态实验;(4)高纯净(High purity),同步辐射光产生于超高真空环境中,不存在任何杂质源,保证了实验结果的科学性与准确性;(5)高偏振(High polarization),同步辐射光具有天然的偏振性,尤其适合开展具有明显各向异性的材料实验;(6)窄脉冲(Narrow pulse),同步辐射光具有优良的脉冲时间结构,间隔为几十纳秒至微秒量级,这对于开展材料损伤机制、化学反应过程、生命行为及环境污染微观过程的研究至关重要;(7)可计算性(Accurate calculability),同步辐射光源的光谱分布、偏振特性和角分布等都可以通过理论公式精确计算,从而能够作为其他光源和探测器的标定器^[2-4]。

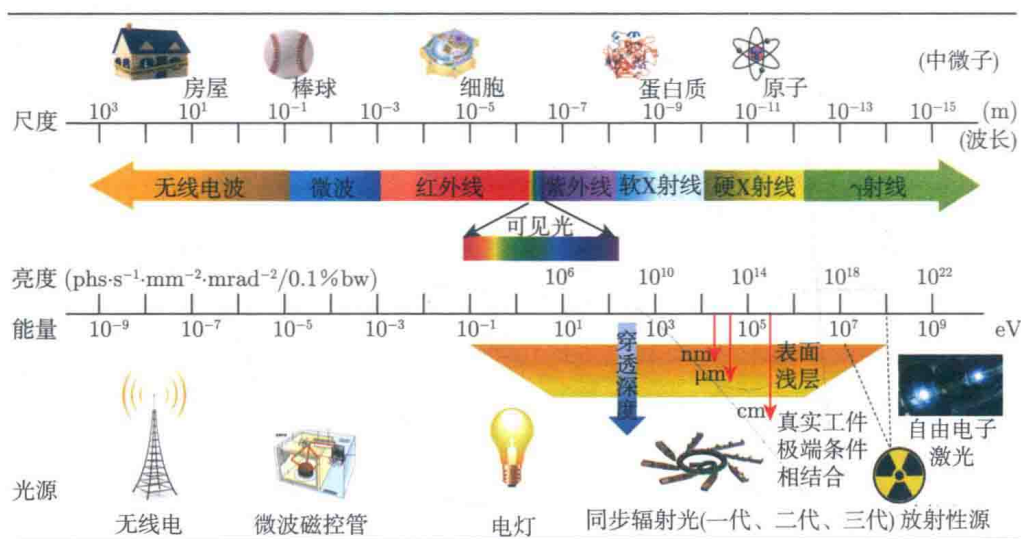


图 2.2 电磁波种类、特性及穿透材料深度关系

由此可见,同步辐射光源基本上涵盖了目前所有科学实验用光需求,这就为当代科学家和工程师提供了前所未有的实验手段和机会,尤其针对常规光源难以揭示的现象进行高水平、高通量的交叉前沿研究。

2.1.3 同步辐射装置

同步辐射光源的应用几乎遍及所有学科领域,它不仅能够提高一个国家基础科学研究的整体水平,层出不穷地产生新成果,而且能强劲地推动技术科学的革

新,是世界各主要发达国家优选建设的战略性大科学装置。目前,全世界正在运行的同步辐射装置多达 50 余台,规划建设约 20 台。不包括规划建造的在内,美国有 10 台,日本 8 台,德国 7 台,俄罗斯 4 台,瑞典 3 台,中国 3 台,法国 2 台,意大利 2 台,而巴西、加拿大、英国、瑞士、丹麦、西班牙、韩国、印度、新加坡、泰国、约旦及澳大利亚各有 1 台。由此可见,同步辐射装置多为工业发达国家所拥有,也在一定程度上反映了一个国家的科技实力。

同步辐射装置的主体由全能量注入器(直线加速器和环形增强器)、电子储存环、光束线和实验站等组成。最为典型的四个第三代高能同步辐射光源有位于日本兵庫县的 SPring-8 (Super Photon ring, 8GeV)、美国阿贡国家实验室的 APS (Advanced Photon Source, 7GeV)、法国格勒诺布尔市的 ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, 6GeV) 及德国汉堡的 PETRA III (6GeV), 分别如图 2.3 所示。一般把电子能量为 2.4~3.5 GeV 的第三代同步辐射光源称为中能光源,其中我国的 SSRF 能量最高,各项性能指标位居世界前列。



图 2.3 典型的第三代高能同步辐射装置 (图片来自网络)

鉴于同步辐射光源在前沿基础科学、工程物理和工程材料等战略高技术研究不可替代的作用,目前北京正规划建设高能同步辐射光源 (High Energy Photon Source, HEPS)。HEPS 的能量范围为 5~6 GeV,束流发射度为 0.05~0.1 nm·rad,建成后不仅将有效弥补我国在第三代高能区段光源的空白,而且将大大缩小与国际先进光源的差距,为国家安全和工业核心创新提供强大的技术支撑 [6]。

2.2 同步辐射成像技术

肉眼可见是人类对物质世界的直接感官。如何借助先进的技术手段观测到肉眼不可见的未知世界则是人类改造自然的前提与基础。同步辐射 X 射线的亮度比普通 X 光高出数十个数量级, 是开展物质微结构原位、动态、无损、可视化研究的首选精密探针^[7,8]。2003 年期刊 *Science* 第一次报道了昆虫呼吸全过程的清晰图像, 时间分辨率达到了毫秒级。这一划时代的高分辨率成像技术为科学家开展工程材料“制备—加工—服役”全寿命周期的原位观测和定量表征提供了无限可能, 为发展新型高性能结构材料指明了方向。鉴于高分辨三维成像的广阔发展前景, 科学家开发出了多种成像技术用于工程材料疲劳损伤研究。

2.2.1 同步辐射成像线站

目前材料科学研究中常用的三维成像技术主要有原子探针、二次离子谱、透射电镜、聚焦离子束和 X 射线技术。其中唯有 X 射线成像属于非破坏性方法, 适用的尺度范围也最广, 尤其实现了深入到材料内部开展定量观测。根据 X 射线与物质的相互作用可分为基于透射 (Transmission) 的形貌成像术、基于荧光 (Fluorescence) 的元素成像术、基于衍射 (Diffraction) 的晶体成像术和基于散射 (Scattering) 的组织成像术^[1,9-11]。传统 X 射线透射成像集成到商用同步辐射装置后, 最终使实时动态研究方法和定量表征大密度金属材料加载过程中的内部疲劳损伤行为成为可能。这种先进的三维成像技术称为同步辐射 X 射线显微断层成像 (Synchrotron Radiation micro Computed Tomography, SR- μ CT), 其空间精度和时间精度分别可达亚微米级和微秒级。SR- μ CT 是第三代高能同步辐射装置上的主流技术, 因此国内外重要同步辐射装置都建有专门用于工程材料研究的 SR- μ CT 实验站。

插入件磁铁辐射是第三代 SR- μ CT 的理想光源, 它不仅有助于消除伪影, 而且显著降低了辐射剂量。将同步辐射 X 射线经过准直、单色和聚焦, 引入实验站供用户开展各种科学实验的全套装置, 称为光束线 (Beam line)。例如, 将上海同步辐射装置扭摆器生成的同步辐射 X 射线, 经过准直、单色和聚焦, 引入 X 射线成像及生物医学应用光束线站的是 BL13W1 光束线。通常将光束线和所属的实验站合称为光束线站。上海光源 BL13W1 光束线站可提供光子能量范围为 8~72.5 keV 的单色 X 射线, 可用于多种衬度 (吸收、相位、荧光等) 的无损、动态、定量、三维高分辨率成像, 其中动态 μ CT 的时间分辨率达到 2 Hz @ 6.5 μ m/像素, 是目前国内开展工程材料疲劳损伤实验的最佳光源。北京同步辐射装置的 X 射线成像光束线站 (4W1A) 是国内最先开展工程材料形变与损伤研究的光束线站, 主要进行晶体形貌学、微米及纳米分辨成像等研究。4W1A 的白光模式为晶体形貌学和微米分辨

成像提供较高平行度的光束，而单色光模式为基于波带片放大的纳米分辨成像提供聚焦照明的单色光束。早期合肥同步辐射装置也可以开展 X 射线成像研究，但软 X 射线成像光束线站 (BL07W) 的光源亮度和强度较弱，不适用于金属材料疲劳损伤研究。

综上所述, 金属材料的疲劳损伤研究往往需要更高能量和更小发射度, 这就只能由 40 keV 以上的硬 X 射线来承担。目前世界四大高能光源 (Spring-8、APS、ESRF、PETRA III) 的 X 射线能区均可扩展到 100 keV 以上, 中国在建 HEPS 的设计能量将达到 300 keV, 具备穿透厘米级金属的强大能力, 使得对工程结构材料原位动态和极端工况下的高分辨研究成为可能, 其成像能力如图 2.4 所示 [12]。为了增强和支撑国家重大装备的核心创新能力, 尽快把我国光源的发展和应用研究提升至国际先进水平, HEPS 专门建设了工程材料实验线站, 最终能够实现复杂多场耦合环境下材料服役性能演变的原位观测和材料—环境相互作用的动态过程光谱—电化学原位测量和表征。

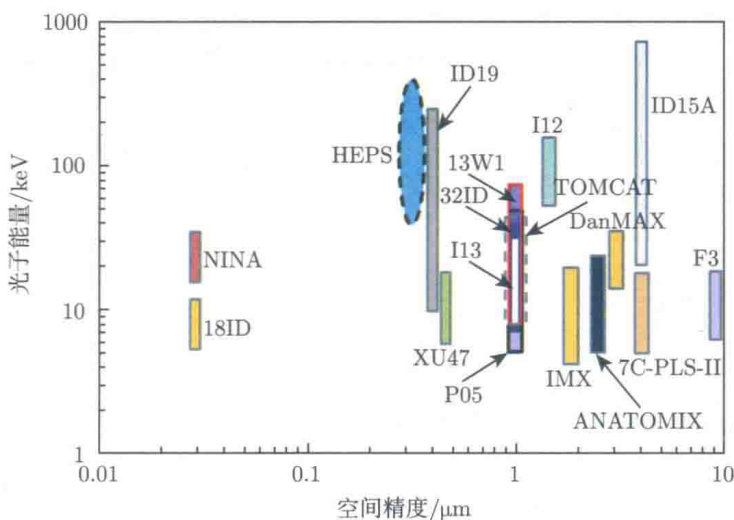


图 2.4 在建 HEPS 的同步辐射成像能力 [12]

公开发表文献表明,世界四大高能光源皆建设了专门的高分辨 X 射线三维成像线站用于工程材料的疲劳损伤行为研究。例如日本 SPring-8 的 XU47 线站、美国 APS 的 8.3.2 线站、法国 ESRF 的 ID19 线站以及德国 PETRA III 的 P05 线站。而我国 SSRF 的 BL13W1 线站和同属于中能第三代光源的英国 Diamond 的 I12 线站也设计有加载机构供用户开展工程材料疲劳损伤成像研究。

2.2.2 同步辐射探测器

同步辐射光照射到样品上时,会产生衍射、散射、折射、透射、吸收等物理现