

· 科学论坛 ·

材料内部全场力学参数精细测量技术与表征评价方法关键科学问题*

亢一澜¹ 裴永茂² 许峰³ 毛圣成⁴
仇巍¹ 詹世革⁵ 雷天刚⁵ 白坤朝^{5**}

- (1. 天津大学力学系现代工程力学重点实验室, 300354; 2. 北京大学工学院力学与工程科学系, 100871;
3. 中国科学技术大学近代力学系, 230027; 4. 北京工业大学固体微结构与性能研究所, 100124;
5. 国家自然科学基金委员会数理科学部, 100085)

[摘要] 第200期双清论坛“材料内部全场力学参量精细测量技术与表征评价方法”围绕材料内部的力学测量新挑战、先进测量手段、微结构演化的测量与力学表征开了深入研讨,与会专家一致认为内部全场力学量测量是困扰力学家的世纪难题,开展内部全场力学量测量与表征方法研究不但能推动实验力学发展,也会服务于国家重大工程与高端装备制造。论坛主要从以下4个方面凝练了材料内部全场力学量测量与表征方法的关键科学问题:(1) 基于先进光源的内部力学行为三维原位实验;(2) 多场环境下材料内部微结构演化精细测量与实验表征;(3) 复合结构界面力学性能的光谱测量方法与性能评价;(4) 极端服役环境下材料内部力学参量的评价方法。我国材料内部力学另实验测量与表征相对薄弱,开展了内部全场测量关键技术与表征方法的研讨,凝练出核心科学问题与技术问题,规划好未来5~10年的发展蓝图,有助于取得符合新时代要求的创新成果。

[关键词] 材料内部全场力学参量;测量技术;表征评价方法

内部全场力学量测量是困扰力学家的世纪难题,随着国家重大工程与高端装备制造的快速发展,对其核心材料与部件内部力学性能检测新方法的需求日益迫切,现有固体力学测量已不能满足需求,开展该领域的研讨、进行提前布局具有重大意义。

2018年5月12~13日,国家自然科学基金委员会第200期双清论坛“材料内部全场力学参数精细测量技术与表征评价方法”在天津召开,会议由天津大学承办,来自全国28个单位的近50位力学、材料、能源和航天航空领域的专家学者应邀出席。与会专家围绕基于先进光源的三维全场力学参量测量与反演及识别方法、多场载荷下材料内部变形及损伤演化的精细测量与表征、复合结构界面力学性能光谱测量方法与多尺度性能评价和极端服役环境下材料内部力学参量的评价方法等领域进行了充分深

入的研讨,凝练了该领域的重大关键科学问题,探讨了前沿研究趋势和方向,形成了以下共识。

1 材料内部全场力学参量测量与表征研究的重要意义

内部全场力学参量精细测量技术与表征方法始终是制约重大工程材料与结构研发及安全服役的一个共性的“卡脖子”问题,传统力学实验对结构表面力学行为的测量方法较多,但对内部力学参量的测量与表征始终缺乏合适手段,是固体力学领域的薄弱环节之一,也是固体力学家亟需解决的世纪难题^[1],*Science* (《科学》)杂志2005年公布了125个最具挑战性的科学问题,其中至少两个问题与材料内部力学参量测量与表征相关^[2]。

近年来,我国载人航天工程、大型飞机和先进战

收稿日期:2019-04-19;修回日期:2019-06-20

* 本文根据第200期“双清论坛”的研讨整理。

** 通信作者,Email:baikc@nsfc.gov.cn

机、航空发动机和燃气轮机、航空母舰及海洋工程装备、高速铁路等国家重大工程领域快速发展,其关键部件寿命设计与可靠性评价都迫切需要发展内部全场力学参量精细测量与表征方法。例如:航天飞行器核心部件内部损伤与失效破坏,航发机热障涂层叶片层间界面裂纹扩展与可靠性,增材制造中的内部缺陷与多尺度力学性能表征,柔性电子器件中应力检测与管控,复合膜基结构界面应力与结构优化,页岩内部裂纹网络演化与油气输运,能源装置中力-电化学多场耦合问题与结构设计,微纳米功能器件中的应力与变形调控等等。解决这些问题的基础在于掌握内部力学场的准确信息、获得关键力学量演化规律。内部力学测量问题近年来受到欧美政府及学界的重视,2011年6月,美国国家科学技术委员会(NSTC)和总统办公室提出《具有全球竞争力的材料基因组计划》,其中在“实验工具平台”提出了“数字化三维微观结构的表征与分析”研究内容,拟通过发展实验测量技术以获取材料多尺度的数据信息。三维内部测量与表征水平是国家基础科学研究硬实力和软实力的重要体现,对推动科学发展和解决国家应用需求方面都具有重要作用。

我国以李敏华院士、黄克智院士为代表的一批固体力学家在材料内部力学行为研究上取得了丰硕的研究成果,并结合工程实践需求在裂纹尖端奇异场、结构缺陷评定等方面得到了成功应用^[3]。十几年来,力学家们在材料力学行为与失效理论研究领域取得了长足的进展,但仍不能满足科技领域快速发展的应用需求,尤其是多尺度力学实验检测领域。例如:极端服役环境下结构内部损伤与力学参量在线测量,先进材料内部力学参数测量与跨尺度力学性能表征、膜基结构界面工艺应力与服役应力在线测量与调控等等,始终是测量领域的技术难题,制约了力学在解决国家重大需求方面的能力提升,并一定程度限制了一批前沿交叉科学技术的快速发展。《国家中长期科学和技术发展规划纲 2006—2020》将“结构、性能表征新原理”列为“对国家经济社会发展和国家安全具有战略性、全局性和长远性意义的研究重点之一^[4]”;《国家重大科技基础设施建设中长期规划 2012—2030》中亦将“材料表征”列为研究重点,提出了“不同尺度及跨尺度的结构性能评价”等内容^[5]。2012年出版的《未来10年中国学科发展战略—力学》将“多尺度力学及跨尺度关联”列为重点发展方向和优先发展领域^[6];2017年出版的《国家自然科学基金数理科学“十三五”规划战略研究报

告》(力学篇)中亦将“结构内部应力分析和材料参数测量理论与方法”列为“力学与其他科学部学科交叉的优先领域”^[7]。这都表明材料内部力学参量测量研究在前沿科学与国家重大工程中的重要作用。

近年来,固体力学实验测试技术受到了相关学科领域学者们的特别关注,将谱线、图像、声学等方法用于材料内部力学性能测量的研究已取得部分预研成果。此外,中国散裂中子源与第三代同步辐射等一批国家大科学装置陆续建成,这些都为开展材料内部实时、原位测量研究提供了新工具。因此,有必要通过学科交叉,突破现有技术瓶颈,推动内部测量新原理、新技术和新应用跨越式发展,在解决国家重大战略需求和支撑学科前沿问题研究中做出贡献。

2 研究面临的挑战

2.1 基于先进光源的内部力学行为三维原位实验

基于加速器中子源、同步辐射光源等先进光源的实验方法,为内部力学行为的三维原位实验带来了可能。然而,想要准确全面地实现材料制备与服役过程中的内部微观力学复杂演化的实验表征,要求实验方法与相关装备必须同时具备原位在线、内部全场、高分辨率表征的能力。目前基于加速器中子源和同步辐射光源的实验方法和技术,尚面临以下难题和挑战:

(1) 同步辐射高精度原位实验方法在穿透深度和内部全场表征能力方面的挑战。同步辐射力学实验表征方法,可以实现微缺陷、微损伤萌生扩展过程的精细表征。由于物质对X射线的吸收截面由核外电子数目决定,因此材料对X射线的吸收能力随原子序数的增大而单调递增。而重大工程领域常用的高温合金、结构陶瓷等关键材料由于其原子序数较高,对于工程中实际应用的大尺寸构件级,由于穿透能力的局限,难以实现其深层内部的全场表征。因此,同步辐射高精度原位实验方法在穿透深度方面存在挑战。

(2) 中子成像原位实验方法空间分辨能力的挑战。中子具有很强的穿透能力,可以实现厘米尺度甚至更大试样的内部全场表征,在直接反映构件内部力学行为方面更具前景。中子的德布罗意波长和X射线相当,理论上最高也可实现纳米尺度的精细空间分辨能力。然而,目前中子实验大多直接沿用X射线现有的成像方法,缺乏围绕中子源特性并针对高分辨成像开展的新原理基础研究与新装置、新技术的研发研制与优化改进。

(3) 内部全场力学信息识别的挑战。由于材料内部的全场力学信息是制约材料宏观力学性能的核心因素,通过建立内部结构参量到力学参量之间的桥梁,实现对应力应变等关键力学参量的提取和识别,是利用内部力学行为实验解决重大工程材料与结构安全服役问题的重要基础。然而,目前基于先进光源的三维在线实验技术往往只能得到材料结构信息,在全场力学信息识别提取理论和方法研究方面尚需实现方法学、计量术方面的突破。

2.2 材料内部微结构演化精细测量与实验表征

开展多场环境下材料内部微结构演化的精细测量与实验表征是材料科学、力学以及科学仪器等领域交叉研究的热点和共性难点。目前,能够实现多场耦合环境的施加以及模拟复杂的服役环境,同时实现微结构演化观察的商业化仪器较为少见或为空白。实现多场环境下材料内部微结构演化测量与表征,不仅要在微结构在线测量平台下解决各个环境场的施加、计量、标定、校准、反馈和控制等系列难点,解决两场间的相互干扰、破坏及测不准问题等挑战,还要在在线观测微结构演化的同时实现多个关键力学/物理量的协同表征,其主要难点和挑战如下:

(1) 在环境场施加方面,不同载荷场存在不同的技术难点。例如,高温场的施加需解决高、均、准、快、小等系列难点和挑战,即温度场的极限温度应高于研究对象的服役环境,并在所探测三维空间区域内均匀分布,微区温度能够准确计量,且迅速、低功耗地升/降温,以确保对材料高温条件下弹塑性变形、断裂失效机理准确认知的同时,避免高温场对其他部件的损伤,以及热电子辐射对成像质量的影响。这就对测试系统中功能部件选材、结构空间布局、反馈与控制模式等诸多方面提出了挑战。

(2) 在多场耦合方面,不同场的耦合会产生不同的挑战。高温场与应力场耦合的挑战在于,热噪声导致应力、应变传感器灵敏度和分辨率降低,极端高温破坏传感器,热辐射干扰甚至淹没图像与光谱信号;电场与热场耦合的挑战在于,电场所产生的焦耳热影响温度场的精细控制与反馈,而极端高温干扰甚至会破坏电场加载及其控制模式,相互干扰导致难以构建电场与温度场参量各自与微结构演化现象、规律的精准关联等等。

(3) 原位或信号分析方面,在解决耦合场精准加载的基础上,在计量中如何不断逼近原位控制与信号分析的时间、空间、物理/化学理论分辨率,如何

在多场环境下的研究材料内部微纳尺度三维弹塑性变形机理以及力学/物理/化学信息演化,如何建立材料力学性能与内部微观组织结构间的关联关系,以科学指导材料的设计、加工和优化,是该领域的瓶颈性问题。

2.3 复合结构界面力学性能光谱测量方法与多尺度性能评价

以显微拉曼、显微荧光、THz波时域光谱为代表的光谱力学手段对于复合结构界面问题的力学测试表征具有独特的优势,已有研究取得了初步研究成果,将其发展成为准确有效的实验力学方法,尚面临“表征理论”、“测量关键技术”以及“技术体系与评价标准”三个方面的难题。

(1) 测量表征理论方面,现有的光谱力学应用研究成果大多采用经典的基于单一材料体系、各向同性或简单晶向、简单应力状态简化的理论模型,忽略了晶相/晶向等物化属性以及复杂应力状态对光谱信息的影响,难以适用于复合结构界面局部的应力状态的定量实验测量。在测量方法与关键技术方面,现有的光谱测量通常采用法向背散射或透射的几何构型、简单正交切换的偏振控制、阈值式的光谱计量模式,难以针对材料体系中的界面应力定量表征获取特征参量,无法满足针对结构内部异质、异构材料界面的定量分析与精细表征。

(2) 界面力学多尺度性能评价,光谱类方法在材料体系、空间分辨、应力灵敏、探测深度等方面各有特点也各有局限,可以进一步通过原位测量实现互补、协同表征。综合多光谱的实验手段实现协同耦联、同时共位测量,需要在方法学与仪器学研究的基础上,完善多光谱的界面力学行为的综合表征实验技术以及面向多尺度力学性能的评价标准。

2.4 极端服役环境下材料内部力学参量的评价方法和仪器

航空航天和轨道交通装备等国家重大战略需求对材料与结构在极端环境下的内部力学测量提出了新挑战。一方面,高速飞行器、高超速/重运载装备中的材料与结构,其正常工作条件多为高低温、热冲击、高热流、高过载、高应变率、强辐照、超高压、强磁场、极高真空、强腐蚀或化学环境、超重力等极端环境,表征其在这些极端环境下的力学性能是相关装备设计的基本需求。另一方面,材料在极端环境下内部多尺度组织结构与力学行为,从根本上决定其工作状态下的机、光、电、磁、热等核心物化性能,与其服役性能和安全寿命息息相关。因此,国家重大

战略需求中对于极端环境下材料内部力学测量,在构建加载和测量的一体化集成化技术、探测材料内部全场结构与力学参量、实现微结构三维全场可视化和关键参量提取、建立内部微观结构与服役性能多尺度关联理论与失效评估方法的研究中,面临的难题和挑战如下:

(1) 面向极端环境下开展材料内部力学测量,要营造与材料服役状态相当如高温、高速、高压、高磁、强化学腐蚀等载荷场,同时准确探测材料内部不同尺度的结构信息与力学参量,以量化分析在特定的极端环境下力学行为与结构演化的物-化-力耦合关联。然而,现有的研究工作大多是采用极端环境加载与力学参量探测(而且往往限于表面测量)相分离的非原位式实验体系,无法提供过程信息,难以获得极端环境下材料内部的多尺度结构演化和力学性能变化的全景式图像。因此,亟需发展可精准调控的极端环境加载和内部力学参量原位精细测量的一体化集成化技术。

(2) 极端环境往往同时产生高压高温高应变率,并且涉及不同时间历程的非平衡多物理/化学过程耦合。特别是超高速冲击的时间历程很短,微结构演化和相变等物理过程的信息量很大,而现有的冻结诊断方法获取的信息有限,这需要发展超快时、高分辨的多时空尺度材料内部力学参量的三维全场演化的冻结与原位表征方法,以揭示高压高温高应变率等极端环境下材料的失效机理。

3 研究现状、发展趋势和关键科学问题

3.1 基于先进光源的内部力学行为三维原位实验

内部力学行为的三维原位实验是揭示失效破坏机理、优化材料性能和预防材料破坏的关键前提。造成材料宏观失效破坏的起因,通常源于其制备或循环服役过程中内部应力应变分布等力学行为的非均匀演化,局部的应力集中导致所在微区材料性能劣化。随外力外场加载进行,应力应变分布进一步失稳演化最终导致失效破坏。目前已有的实验技术(如表面实验表征与离线切片实验)均具有局限性,不具备真实反映材料在制备或服役条件之下内部损伤应力应变演化过程的原位全场精细表征能力。具体而言,光电声测实验力学方法和扫描电镜、透射电镜等拥有较高的空间分辨率,可以对组织结构进行精细表征。例如,利用应变片、云纹、散斑、图像相关等方法对样品表面变形进行测量;电镜平台能够实现材料表面或切片样品的微结构表征或加载下原位

形貌演化跟踪。然而这些均受限于光源的穿透性,无法用于内部力学过程的三维全场原位测量。基于实验室 X 射线的成像方法开展内部全场检测,在金属材料、复合材料、生物材料研究中获得应用^[8-10],然而其光源本身单色性和亮度的矛盾决定了探测深度与空间分辨均限于微米/亚微米量级,无法实现更高深度、更高分辨的原位表征。因此,面向材料制备与服役过程中内部应力、应变演化的复杂力学过程,以实现内部全场三维精细原位表征为目标,探索新光源、构建新原理、发展新方法、研制新仪器,是实验力学领域的迫切需求与前沿方向。

基于先进光源的三维原位表征可能独辟蹊径,成为分析材料内部力学行为的新手段。基于先进光源的三维原位表征是指,在材料的制备或服役过程中,利用同步辐射和加速器中子源等先进光源,对其内部微观力学特征的演化进行三维全场、原位全程的表征和测量^[11, 12]。近年来不断涌现的先进光源(第三、第四代同步辐射光源和散裂中子源等),具有高纯净、高亮度、高准直和窄脉冲等优秀的光源品质,已成为各科技大国为服务其前沿研究、彰显其科研底蕴而竞相建设的重要大科学平台。以先进光源为基础,构建内部力学表征理论、发展测量与传感方法并研制专用仪器装置,将为实现材料乃至结构的内部力学行为三维原位精细表征的提供有效的手段与装备。近年来,基于先进光源的实验技术在内部力学行为研究中得到了关注,并初步取得了以传统方法难以实现的研究进展。基于先进光源的三维原位实验研究其主要发展趋势包括:

(1) 利用中高能先进光源的强穿透能力,对大尺寸结构件内部的结构变形与力学参量三维空间分布演化进行表征识别,揭示制备服役过程中发生在样品深部的力学行为。

(2) 基于同步辐射或散裂中子源等先进光源的全场透射、散射信息,通过层析、反演等方法实时获得材料及构件内部的三维应变分布特征,实现样品内部力学信息分布的全局表征。

(3) 借助先进光源非接触、高能量、强穿透、高分辨的技术优势,发展可实现极端复杂多场和多尺度力学载荷的先进光源原位实验环境,对材料制备服役全过程进行在线动态跟踪。

为了满足本领域未来发展趋势的要求,其主要研究方向和关键科学问题包括:基于加速器中子源等强穿透先进光源的内部全场力学信息测量理论;变形损伤失效过程的原位三维可视化表征关键技

术;内部应变演化的在线识别与全场反演方法;材料制备或服役过程内部力学演化的核心调控机制。

3.2 多场环境下材料内部微结构演化精细测量与实验表征

对材料内部微结构演化规律开展测量与表征,探索其对材料力学行为的影响机制,是实验力学与材料显微学、固体物理学等多学科前沿领域交叉融通的重要节点,是先进材料服役环境下力学性能基础研究共性需求。诸如高温高强韧合金、热障/环境障涂层、有机柔性电子材料等先进材料,其在服役环境下表现出的各种超凡力学性能,通常是由材料内部的微结构及其演化规律所决定。因此,研究材料的强韧化机理、界面反应机理、界面应力/应变传递机理、断裂失效机理等,需要系统地开展材料内部微结构演化的精细测量与实验表征,以此建立材料性能与微结构间的映射关系,跨尺度揭示关键部件失效模式和机理,从而搭建宏观、细观、微观以及纳观多尺度间力学行为的桥梁。

材料内部微结构演化规律实验表征的重点在于服役环境。关键部件的服役环境大多为多场耦合的载荷环境。例如:发动机涡轮叶片、涡轮盘的高温应力环境,月球车悬臂梁铝基复合材料的低温应力环境,超超临界发电材料的高温压力液体环境等。多场环境下材料的氧化、脆化、腐蚀、蠕变、疲劳、元素扩散、新相形成与演化等都会影响材料的力学参量与服役寿命,其断裂失效行为及机理等也明显不同于常温常压条件。开展多场环境下材料内部微结构精细测量与实验表征,全程实时记录服役条件下材料中缺陷、晶粒组织、界面等多尺度微结构的演化过程,探究多场耦合条件下纳微观材料内部裂纹扩展机理,不仅能够为重大装备核心部件的可靠性设计提供基础性实验数据,也能为高强韧新材料研发提供科学依据和设计理念。多场环境下材料内部微结构演化精细测量与实验表征,集多场环境施加、纳微观尺度结构观察、物化属性表征及力学参量精确测量技术于一体。其基本思想是,在高分辨X射线衍射、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、显微拉曼光谱(MRS)等现代分析仪器设备的基础上,配合能谱(EDS)、X射线荧光谱(XRF)、电子背散射衍射(EBSD)等结构与物化分析模块,并集成应力场、电场、热场、磁场、环境气氛等加载装置,获得材料的微结构信息和力学(以及、谱学、光学、磁性等)性能参量。

近年来,材料、力学、物理等学科领域的学者们

围绕多场环境下材料内部微结构演化表征及相关的力学参量测量开展研究工作,有力地推动了相关领域的研究进展,但仍然存在若干共性的瓶颈问题亟待突破。例如,如何在服役条件下对材料内部微区的结构与应力的演化进行精细测量仍是实验力学领域国际难题之一。实现在高温、高应力条件下表征纳米和原子尺度下的材料微结构演化规律测量,并同时获得材料微区应力演化及所对应的宏观应力-应变信息,在国际上仍少有研究进展。围绕多场环境下材料内部微结构演化精细测量与表征研究呈现出以下发展趋势:

(1) 通过多场环境集成,模拟服役环境下测量内部微结构演化,同步获得微结构信息及力学、谱学、光学、磁性等性能参量,揭示材料的强韧化与失效机理,验证在服役环境下超材料、微结构设计的有效性。

(2) 发展具有较高空间和时间分辨的微结构演化测量技术,实时记录微、纳观尺度下演化过程,为材料微结构设计、为多相/涂层/薄膜的选材、工艺设计、技术发展提供科学依据。

(3) 发展降噪及微弱信号提取、解析技术,研究多场环境下精细测量中存在的力学/物理信号弱、信号间相互干扰、物性参量信号与结构特征信息辨识等测量技术。

为了满足本领域未来发展趋势的要求,其主要研究方向和关键科学问题包括:材料内部变形及损伤演化的高空间分辨原位/实时测量与表征关键技术;缺陷结构的高空间分辨三维可视化表征;多场耦合环境下材料内部变形的高空间分辨测量方法;复合薄膜结构内部力学参量的精细测量。

3.3 复合结构界面力学性能的光谱测量方法与性能评价

复合结构界面力学性能表征与评价是固体力学与高端芯片、柔性器件、新能源材料、精密机械等先进工程领域交叉的前沿研究方向。复合结构是由不同体系和显微织构的材料通过多种工艺时序加工而成,其往往具有超出单一材料的力/磁/电/光/机/化/生及综合性能,是当今新材料研究的热点。异质、异构的复合结构通过界面实现相互结合形成整体,其多场环境下的界面力学性能是决定其服役性能的关键指标;同时,在工艺过程受到非均匀环境载荷作用以及自身构形与边界因素的影响,在内部界面呈现出应力集中、缺陷或脱粘与断裂等界面问题。例如,在半导体异质结中的界面应力影响应变-带隙

调控的能力,发动机叶片热障涂层在极端高温循环载荷下的界面强度与缺陷关乎叶片使用寿命,等等。

评价界面力学性能的关键在于定量测量与表征分析。复合结构的界面应力属于典型的内部应力,受到复合结构几何构形、异质材料间模量错配、载荷边界约束、工艺/服役环境等多重因素影响,结构内部的界面应力往往数值较大,但相应的结构整体变形则较小。材料成分与织构非均匀分布、热膨胀系数等材料参数非线性、层间界面粗糙度、边缘效应、力电热载荷耦合等因素都会导致应力在界面附近分布复杂。此外,存在本征应力、多种工艺应力、约束与局部外载等效果叠加,随时序工艺过程引入工艺应力叠加,以及在多场服役环境下动态演化。因此,对复合结构界面应力测量手段提出了较为苛刻的需求:无损非接触、在线原位与定量测量,兼备空间分辨、应力灵敏、探测深度。为此,发展面向复合结构内部界面问题的力学测量实验方法,实现异质异构的复合结构内部应力、缺陷、脱粘等界面问题的原位、定量测量与多尺度评价是先进制造领域对实验力学测量提出的新需求。

源于多学科交叉的光谱力学方法,可能成为突破复合结构界面实验表征方法学瓶颈的有效手段。以拉曼、荧光、太赫兹波等为代表的光谱技术已逐渐发展成为实验力学测量新手段之一。光谱力学通过测量材料固有的特征参量(晶格/分子振动、电子跃迁或者应力双折射等)因微结构变形而发生变化^[17, 18],兼备测量的时-空分辨率与材料微结构变形。同时,利用不同波长的光波穿透能力和特征峰位的差异性实现材料的表面与浅表内部不同材料探测。近年来,基于光谱技术的测量方法在复合结构界面问题的实验研究中受到关注,并在半导体异质结构的应变工程控制、热障涂层结构中 TGO 层热氧化应力测量、低维纳米复合材料的界面行为分析等多种复合结构的界面力学问题中得到了初步研究进展^[19-21]。复合结构界面力学性能的光谱测量方法与性能评价的主要发展趋势包括:

(1) 将光谱技术与弹性理论相结合,研究典型材料的光谱力学材料理论与表征模型;

(2) 发展基于光谱的力学-物化参量的原位/实时/协同表征技术,以及力学场信息识别与可视化方法;

(3) 建立典型复合结构内部界面力学性能的多光谱测量关键技术与评价方法。

为了满足本领域未来发展趋势的要求,其主要

研究方向和关键科学问题包括:极端服役环境下材料内部力学参量的评价方法,内容包括:基于拉曼/荧光/THz 等光谱类测量技术的力学测量理论,力学-物化参量及其演化的在线测量关键技术、力学信息识别与可视化方法、复合结构界面力学性能表征与多尺度性能评价。

3.4 极端服役环境下材料内部力学参量的评价方法

航空航天和轨道交通重大装备是国际竞争的战略制高点,也是国家整体制造实力和科学技术水平的重要体现。大型/重型运载火箭、大型变结构空间飞行器、天地往返可重复使用航天器以及临近空间飞行器等新型航天器面临更为苛刻的服役环境,要求更高的可靠性和结构效率、更强的抗极端能力,同时要满足长寿命和低成本等需求。新型航天器的大型化和复杂化、服役环境的超常化、使用性能的高要求化等对实验力学测试方法带来了严峻挑战。其中传统的地面实验方法在模拟真实服役环境上存在很大的局限性,需要发展新原理、新方法、新手段。

首先,极端高温属于重大战略装备最具有典型性的服役环境,开展极端高温下的材料内部力学实验是当今亟须突破的关键瓶颈。以近空间飞行器为例,其发展涉及国家安全与和平利用空间,是目前国际竞相争夺空间技术的焦点之一。随着高超声速近空间飞行器的快速发展,对材料在超高温极端环境下的服役要求提出了挑战。例如,高超声速飞行器再入时,由于与大气发生剧烈摩擦,鼻锥和翼前缘可达 2 000 °C 以上。传统航天器热防护系统或高温结构,主要通过加大安全裕度来保证结构完整性,但也出现过多次热致结构失效的问题,至今未能得到彻底解决。由于缺乏高温实验手段和理论指导,许多高温下的失效问题通常借助于常温下的研究结果或规律来分析和判断,难以满足新型航天器高结构效率和高可靠性的要求^[22]。为了揭示材料超高温的变形和失效机理,美国已经开展了大量的仪器探索与工程测试工作,例如,开发了基于同步辐射和红外卤素灯加热技术的超高温环境下材料力学性能在线 μ -CT 实验评价平台^[23]。目前大多数相关成果仍处于高度保密状态。我国国家自然科学基金委员会分别在 2002 年和 2007 年启动的“空天飞行器的若干重大基础问题”和“近空间飞行器的关键基础科学问题”两个重大研究计划中,重点支持了极端环境下材料的力学行为、本构关系与强度理论的基础科学问题研究,并在材料高温强度和表面变形场等参

量的测量等核心点上取得了突破,在一定程度上为我国超高温先进材料与结构的设计和可靠性评价提供了重要手段^[24, 25]。但为了深入揭示材料在超高温下的失效机理,还需要进一步发展极端环境下材料内部性能演化的在线测量技术与表征方法。

另一方面,在航空航天、轨道交通和国防安全等领域,材料常常会受到高速、超碰撞甚至爆炸等极端动高压载荷的作用,内部出现高压高温高应变率等极端情况。例如,在太空环境中至少有1.7亿件太空垃圾正高速绕地飞行,空间碎片与航天器的平均碰撞速度达到10 km/s左右,一旦碰撞必将引发“灾难性”事故,危及人造卫星、宇宙飞船乃至国际空间站。在高/低温高压高应变等极端工况下,材料内部微介宏观组织结构与其力学性能之间的关联关系往往是时间、空间以及温度等参量的耦合函数,是常温常压常速下的理论与经验难以描述的^[26]。因此,为了满足国家安全和基础学科发展需求,美中均将极端条件材料内部物性与复杂流动特性研究上升为国家战略。其中,美国能源部基础能源十大科学领域七项与极端条件材料特性研究密切相关,MaRIE计划标志着极端条件材料特性研究进入快速发展阶段。依托大型技术平台,美国正处于以三大能力提升为核心的体系化发展关键期,宏介微观相结合的多尺度诊断能力是其中之一。我国“材料基因工程关键技术与支撑平台”重点专项,也将材料高应变率下的组织结构—力学性能关联关系作为重点科学问题,2016年国家启动实施的“国防基础科研核科学挑战专题”,也将高压高温高应变率等极端条件下材料内部力学参量演化作为重点研究方向。目前,主要通过冻结等方法获取材料内部变形损伤过程,不能获得实时的形核、长大到层裂的过程,失效机理不清楚。因此,迫切需要发展高温高压高应变率下的原位测试技术、表征方法和理论模型。

综上所述,上述国家重大战略需求对极端环境下的材料内部全场力学参量的实验测试表征提出了新需求,其发展趋势总结如下:

(1) 极端环境下的内部力学参量的原位表征方法,包括:高可靠性传感技术与在线测量、高信噪比数据提取、加载与测量的一体化集成;

(2) 强加载条件下材料与结构的微尺度结构演化与宏观响应同步原位测试技术,极端环境下先进材料性能测试标准和数据库;

(3) 极端环境下材料的失效机理和多尺度评价方法,考虑内部微损伤演化与宏观性能关联的多尺

度评价表征方法。

为了满足本领域未来发展趋势的要求,其主要研究方向和关键科学问题包括:基于极端环境下原位加载与高精度成像一体化集成方法;材料内部力学参量的高通量表征仪器及其关键技术;材料内部微结构演化与宏观性能多尺度关联的评价方法;典型工程材料的失效机理与寿命预测理论。

参 考 文 献

- [1] 刘俊丽,刘曰武. 院士谈力学. 科学出版社, 2016.
- [2] Kennedy D, Norman C. What don't we know?. *Science*, 2005, 309(5731): 75.
- [3] Li XD, Xie HM, Kang YL, et al. A brief review and prospect of experimental solid mechanics in china. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, 23(6): 498—548.
- [4] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年). 2006: 16—17.
- [5] 中华人民共和国国务院. 国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030年). 2013: 5—6.
- [6] 国家自然科学基金委员会. 未来10年中国学科发展战略—力学. 科学出版社, 2012: 132—140.
- [7] 国家自然科学基金委员会 数学物理科学部. 国家自然科学基金数理科学“十三五”规划战略研究报告. 科学出版社, 2017.
- [8] Huo HH, Shen XD, Wang CY, et al. Asymmetric photoredox transition-metal catalysis activated by visible light. *Nature*, 2014, 515(7525): 100—103.
- [9] Kim Y, Zhu J, Yeom B, et al. Stretchable nanoparticle conductors with self-organized conductive pathways. *Nature*, 2013, 500(7460): 59—63.
- [10] Cui YJ, Niziolek PJ, MacDonald BT, et al. Lrp5 functions in bone to regulate bone mass. *Nature Medicine*, 2011, 17(6): 684—691.
- [11] Pyzalla A, Camin B, Buslaps T, et al. Simultaneous tomography and diffraction analysis of creep damage. *Science*, 2005, 308(5718): 92—95.
- [12] Kaira CS, De Andrade V, Singh SS, et al. Probing novel microstructural evolution mechanisms in aluminum alloys using 4D nanoscale characterization. *Advanced Materials*, 2017, 29(41): 1703482.
- [13] Sabol GP, Stickler R. Microstructure of nickel-based superalloys. *Physica Status Solidi*, 1969, 35(1): 11—52.
- [14] Vassen R, Jarligo MO, Steinke T, et al. Overview on advanced thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205(4): 938—942.
- [15] Lohmiller J, Woo NC, Spolenak R. Microstructure—property relationship in highly ductile Au—Cu thin films for flexible electronics. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(29—30): 7731—7740.
- [16] Kreitzberg A, Brailovski V, Turenne S. Elevated temperature mechanical behavior of IN625 alloy processed by laser powder-bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 700: 540—553.

- [17] Qiu W, Ma LL, Li Q, et al. A general metrology of stress on crystalline silicon with random crystal plane by using micro-Raman spectroscopy. *Acta Mechanica Sinica*, 2018, 34(6): 1095—1107.
- [18] Wang ZY, Kang K, Wang SB, et al. Determination of plane stress state using terahertz time-domain spectroscopy. *Scientific Reports*, 2016, 6: 36308.
- [19] De Wolf I, Maes HE, Jones SK. Stress measurements in silicon devices through Raman spectroscopy; bridging the gap between theory and experiment. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79(9): 7148—7156.
- [20] Qiu W, Kang YL. Mechanical behavior study of microdevice and nanomaterials by Raman spectroscopy; a review. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(23): 2811—2824.
- [21] Srikar VT, Spearing SM. A critical review of microscale mechanical testing methods used in the design of microelectromechanical systems. *Experimental Mechanics*, 2003, 43(3): 238—247.
- [22] 中国科学院. 新型飞行器中的关键力学问题. 科学出版社, 2018.
- [23] Bale HA, Haboub A, MacDowell AA, et al. Real-time quantitative imaging of failure events in materials under load at temperatures above 1600°C. *Nature Materials*, 2013, 12(1): 40—46.
- [24] Cheng XM, Qu ZL, He RJ, et al. An ultra-high temperature testing instrument under oxidation environment up to 1800°C. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(4): 045108.
- [25] Fang XF, Jia JM, Feng X. Three-point bending test at extremely high temperature enhanced by real-time observation and measurement. *Measurement*, 2015, 59: 171—176.
- [26] Parab ND, Roberts ZA, Harr MH, et al. High speed X-ray phase contrast imaging of energetic composites under dynamic compression. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(13): 131903.

Key scientific issues in the measurement technology and evaluation method of full-field mechanical parameters inside materials

Kang Yilan¹ Pei Yongmao² Xu Feng³ Mao Shengcheng⁴
 Qiu Wei¹ Zhan Shige⁵ Lei Tiangang⁵ Bai Kunchao⁵

- (1. *Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300354;*
2. *Department of Mechanics and Engineering Science, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871;*
3. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027;*
4. *Institute of Microstructure and Properties of Advanced Materials, Beijing University of Technology, Beijing 100124;*
5. *Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*)

Abstract The 200th Shuangqing Forum sponsored by National Natural Science Foundation of China, entitled “Measurement Technology and Evaluation Method of Full-field Mechanical Parameters inside Materials”, was held for the intensive discussion for the new challenges of mechanical measurements inside materials, advanced measuring methods, and mechanical characterization of microstructural evolution. The participating experts agreed that the mechanical measurement inside material was a century-problem haunting the researchers of mechanics. The investigation of measuring and characterizing methods for the measurement of full-field mechanical parameters inside materials may not only promote the development of experimental mechanics, but also serve the national major projects and high-end equipment manufacture. The forum focused on the following four key scientific issues: (1) three-dimensional in-situ experiment of internal mechanical behavior based on advanced light sources; (2) accurate measurement and characterization of microstructural evolution inside materials in multi-field environments; (3) spectral measurement and performance evaluation of interfacial mechanical properties of composite structures; (4) evaluation method of internal mechanical parameters in extreme service environments. The experimental measurement and characterization of internal mechanics of materials in our country are still thin and weak relatively. The discussion for key technologies and characterization methods of internal full-field measurement, condensed the core scientific and technical problems and planned the blueprint of development for the next 5~10 years, will help to achieve innovative results in line with the requirements of the new era.

Key words full-field mechanical parameters inside materials; measurement technology; evaluation method