

关于极端力学¹⁾

郑晓静²⁾

(西安电子科技大学, 西安 710071)

摘要 随着前沿科学和新技术不断发展, 工程材料与结构的超常规尺度、密度、硬度、刚度等性能以及在超常规温度、速度、场强和恶劣天气等极端服役环境中的力学响应规律, 需要力学提供更为有效的理论和方法. 本报告从极端力学的基本定义和科学内涵出发, 结合重大工程问题和大科学问题, 从极端性能、极端载荷、学科发展等三个方面系统介绍了极端力学的研究现状, 并总结了极端力学的特点及其对力学理论、计算方法和实验技术的挑战, 最后对极端力学未来的发展进行了展望.

关键词 极端力学, 极端性能, 极端载荷, 学科发展

中图分类号: O3 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-19-189

EXTREME MECHANICS¹⁾

Zheng Xiaojing²⁾

(Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract With the continuous development of cutting-edge science and new technologies, the studies on the ultra-conventional scale, density, hardness, stiffness and other properties of engineering materials and structures, as well as their mechanical behavior in extreme environments, such as ultra-conventional temperature, speed, physical and chemical fields, and severe weather, requires more effective theories and methods of mechanics. This presentation starts from the fundamental definition and scientific connotation of extreme mechanics, introduces the research status of extreme mechanics from three aspects: extreme properties, extreme loads, and discipline development, in combination of grand engineering and scientific challenges. The characteristics of extreme mechanics and major challenges in the aspects of mechanical theory, computational methods and experimental techniques are concluded. Prospects for the future development of extreme mechanics are proposed.

Key words extreme mechanics, extreme properties, extreme loads, discipline development

郭永怀先生是力学界非常著名的学者, 他无论是在做学问还是在做人做事方面都是我们永远的榜样. 我自己也一直特别崇敬郭永怀先生, 在与李家春先生的交谈时, 他多次深情地给我讲郭永怀先生的事迹, 更加深了我对郭永怀的钦佩. 在不断以郭先生

的事迹鞭策自己的同时, 我也在一些场合讲郭先生的故事, 希望一起传承好郭先生的精神和未竟事业. 能够被邀请在“郭永怀力学进展讲座”作报告也是非常荣幸.

今天报告的题目是“关于极端力学”, 有关的内

2019-07-16 收稿, 2019-07-17 录用, 2019-07-17 网络版发表.

1) 本文为根据郑晓静院士于 2019 年 6 月 21 日在中国科学院力学研究所“郭永怀力学进展讲座”报告录音整理而成, 部分内容略有删改.

2) E-mail: xjzheng@lzu.edu.cn

引用格式: 郑晓静. 关于极端力学. 力学学报, 2019, 51(4): 1266-1272

Zheng Xiaojing. Extreme mechanics. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(4): 1266-1272

容是为今年 5 月 25 日西北工业大学的极端力学高端论坛专门准备的, 得到与会学者的赞同和支持, 今天也借此机会, 就这个话题与在座各位交流, 希望得到各位的指教和共同推动。

报告分 4 个部分, 先谈谈我自己对极端力学的理解, 以此作为本报告的前言; 然后介绍一下极端力学研究的现状和所面临的挑战; 最后谈谈我自己对极端力学的思考, 以此作为本报告的结束语。

先看一下什么是“极端”。百度百科对此有 4 种解释: 一是“事物发展所达顶点”, 这个好像不是我们想表达的那个意思; 二是“达到极点的”; 三是“事物发展的端点状态”; 这两个好像也不太符合。第四是“非常”, 这个可能比较贴切一点, 对应的英文用“extreme”。所谓“非常”就是不是常规, 非常规。那么什么是常规呢? 按照力学在十九世纪与物理学在研究对象尺度划分的说法, 这里的“常规”是指尺度大致以人的尺度相当、基本物理量是人类可直接观测的程度。那么“非常规”就可能是基本物理量接近或超出人类可直接观测的程度。就我们力学来讲, 主要面对的是物质和运动。对于物质, 我们可用质量来衡量, 有极大极小; 从运动来看, 对应时间极长极短。运动是广义的, 除了速度还有加速度。再来看一下什么是“力学”。经典的说法是“力学是研究物质机械运动规律的科学”, 之所以取这一段是因为它比较简短。这里的物质可能是自然的, 如空气和水, 也可能是人工的, 如工程界的材料和结构等等, 这里的机械运动延伸到包括变形, 当然也有材料和结构的振动、损伤和破坏等等。因此, 比较全面的说法是新一版的《大百科全书》的表述: “力学是关于力、运动及其关系的科学。力学研究介质运动、变形、流动的宏观行为, 揭示力学过程及其与物理、化学、生物学过程的相互作用。”把“极端”和“力学”简单相加, 我们把“极端力学”就暂且定义为“研究物质在极端服役条件下的极端性能和响应规律”。不一定对, 也不一定全面和准确, 但也还没看到有其他的表述。

按照这个说法, 我们来看看极端力学的研究范畴, 仍然以力学最为关心的“物质”和“运动”这两个量为例。我们用与“物质”非常密切的“密度”和“温度”来对物质进行分类。经典力学涉及的人类居住生活常规环境其温度大致是 $10 \sim 1000 \text{ K}$, 而密度大致是 $10^{-4} \sim 100 \text{ g/cm}^3$ 。在这个范围之外, 有极端低温和极端高温, 有极端真空和极端高密物质, 以及等离子体和温稠密物质等等, 有的可能超出经典牛顿力

学适用的范围, 是以前力学研究关注较少的, 但现在成为需要关注的。再来看“运动”, 我们用“质量”和“时间”来对运动分类。经典的常规力学所对应的质量大致 $10^{-4} \sim 10^4 \text{ kg}$ 、对应的时间大致 $10^{-2} \sim 10^4 \text{ s}$ 范围, 而随着力学研究的发展和深入, 力学研究所涉及的对象已拓展到生命体、自然灾害、爆炸冲击以及工业界最近提出的极端制造等等, 其质量和时间尺度已经超出这个范围, 都提出一些新的力学问题。这些问题应该属于“极端力学”研究范畴。

为什么要提出极端力学? 至少有 3 个方面的理由。

首先是需求引领。这个需求概括地说, 就是人类对未知世界的好奇和对物质世界的更高、更远、更深、更快、更智能、更安全、更健康、更清洁的追求。例如: 高至数十公里的浮空器、远至数光年的星际旅行、深至数千米的深海潜水器、快至十几马赫数的飞行器、以及软体机器人、液体防弹衣等等。这些需求驱动科学和技术的发展, 而这些需求的实现必须解决其中的力学问题。例如, 与清洁能源相关的热核聚变反应堆, 其中的超导磁体最大载流 68 kA , 形成的约束磁场近 14 T , 反应区域的温度高达上亿摄氏度, 随之而来的超导磁体常温下装配极低温环境下运行带来的热失配应力, 结合超导材料承受的巨大电磁力, 导致磁体结构发生变形的同时, 引起超导材料临界电流的退化和失超, 导致超导磁体的功能性和安全性设计难以达到预期。如 2008 年欧洲强子中心巨型超导磁体的爆炸事故就是源于超导材料变形引起的临界电流退化引起失超所致, 爆炸导致停机 18 个月, 维修费用超过数千万美金。因此, 力学研究的范畴在不断扩大, 有的已突破经典连续介质的界定。

其次是科技推动。具体来说, 就是科学的新发现和技术不断进步, 在拓宽力学研究对象的同时, 提升了力学研究的能力。例如, 物理学家发现的超导现象和随之而来的低温和高温超导材料, 为力学家们提供了新的研究对象; 再如实验测量技术的不断进步和计算机能力的不断提升, 使得以前观测不到的或者难以实现的超量计算都成为现实, 进而也为力学家们提供了新的研究疆域。以高速摄像机为例, 它能清晰拍摄到材料剪切绝热带的形成和沙粒在近壁面处的运动情况, 这使得对微观过程的研究成为可能; 以高性能计算机使为例, 模拟天宫一号完成任务

后的解体陨落过程,原来模拟一次需要12个月的计算时间,如今可在20天完成,这就使得定量预测更为便捷.还有借助直径0.129 m,长26 m,使用压缩空气得到的最高 $Re_\tau = 5.0 \times 10^5$ 的普林斯顿大学超级管和探头尺寸,在纳米量级的热线风速仪以及兰州大学青土湖野外观测站使用的超声风速仪等,捕捉到的高雷诺数壁湍流中的流向尺度长达数公里的超大尺度结构,揭示出一些与低雷诺数流动不同的现象.而在“天河”机上对近壁高雷诺数颗粒两相壁湍流模拟的结果揭示出颗粒沿展向分布的不均匀性,进而提示力学界研究者对风沙流输沙率的测量不能忽视其展向效应.

最后是使命担当.力学在促进人类文明和众多学科发展中一直发挥重要作用,过去如此,现在和将来也应该如此.例如,古罗马时期利用杠杆原理发明的投石机被用于防御城墙进攻、现代建筑业的发展得益于结构力学等力学理论的支撑.力学学科还有效地促进了船舶工程、航空航天、水利工程、地球科学等的发展.除了这些传统学科,还包括如电子信息这些新兴学科.例如测控领域的传感器,很多就是基于材料和结构的力学响应规律设计的.再如临近可见飞行器在返回大气层时出现的“黑障”,也就是无线信号中断,其原因就是飞行器附近气体电离形成等离子体鞘套对通讯信号造成的屏蔽,无论其机理还是问题的解决都需要力学.因此,在一些前沿科学和技术的发展中需要力学工作者继续努力发挥支撑作用,同时继续发展力学的新理论和新方法促进新兴学科的发展.所以,极端力学是应运而生,这个“运”是人类文明和科学技术进步之运,这个“生”意味着极端力学还处于成长过程之中.

下面讲报告的第二部分:极端力学面临的挑战.我们主要从研究对象的极端性和服役条件的极端性两个方面展开.在研究对象的极端性方面,首先谈一下材料的超硬、超软、超延展性.超硬材料广泛应用于机械加工、地质勘探、石油和天然气开采等相关行业,是国民经济发展的重要基础性工具材料.商用多晶氮化硼维氏硬度为33~45 GPa,德国多特蒙德理工大学的学者2013年在*Nature*杂志上发文报道了维氏硬度超过100 GPa的材料,我国燕山大学田永君院士团队制备出来的材料硬度甚至超过400 GPa.其挑战在于如何在提高硬度的同时保证其韧性,如何基于硬化、强化、韧化的机理实现切削性能的提高?实际切削速度可达 10^4 m/min,材料在高速切削过程

中温度急剧升高,如何表征和描述超硬材料在高速率、高温载荷下的本构、损伤和破坏行为,这是典型的力学问题;再看超软材料,例如水凝胶,在生物医用、电子皮肤、柔性机器人等现代科技领域中具有潜在的应用价值,其模量低达几百千帕,在极小的外力作用下就可变形,常规水凝胶拉伸性一般为其原始长度的几倍,并且断裂能量 < 100 J/m²,但仍无法满足生物材料、软体机器人和可穿戴设备的要求($\lambda > 10$).软物质与硬物质界面力学问题,连续介质力学是否适用于固液耦合界面;水凝胶的溶胀行为会导致性能的退化,应该怎样发展合适的本构模型来准确全面地描述它的这些特性?是否可以在传统的连续介质力学中耦合化学场、电场等外场作用,以及将应力与扩散、化学反应结合,以描述材料对于多种刺激的响应,如光照、温度、pH值、电场、磁场等引起的大变形以及如何预测这类材料的拉压弯扭的大变形行为、耦合变形和扩散行为以及失稳行为.还有一种像人类的皮肤一样自行愈合的其弹性变形能力($\lambda > 10$)和变形可恢复性弹性体,具有恢复其原有的结构和功能,可以大大延长材料的使用寿命、提高材料的使用安全性、降低材料的维护成本.主要研究挑战在于提高弹性变形能力,在保障弹性变形能力的同时提高模量和强度,循环寿命能力.需要揭示材料力学性能与组分的相关性以实现性能的调控,建立超大变形超非线性本构模型和多场耦合模型分析结构的宏观响应,对于实际应用必须能保障循环寿命达到几千甚至几万次,因此,材料的延展能力的可持续性及其力学机理也是需要进一步研究.

研究对象的极端性也包括超大和超小尺度以及材料和结构的超敏感性.超大尺度的结构,例如,空间太阳能电站的尺寸可以长达15 km,超大的空间力矩,会引起系统的姿-轨-柔-控-环境耦合响应,超出了常规控制方法的能力,还要保障长期在轨高姿态精度,因此,需要发展高维非线性系统长时间、高精度、保结构的数值方法,复杂桁架的等效连续体方法等动力学理论与控制方法;超小尺度的结构的极端力学问题主要挑战在于建立微纳物质结构特性与宏观力学性能的相关性,代表性的例子包括微管道表面稳定液膜实现防污功能、通过具有高度可调结构梯度的梯度纳米孪晶结构实现金属强度和硬度的同步提升等.而材料的超敏感性的例子很多,如*Scientific Report* 2016年报道了细胞对微重力的敏感

性,发现在失重 24h 后细胞硬度和黏度显著下降;超导材料对应变也是敏感的.由于超导态是在特定的临界温度、临界磁场强度和临界载流密度以下才得以实现的,而这三个临界值都会随着超导材料的应变而下降,也就是说超导态会由于材料的应变而失去,即“失超”,因此,当超导材料走出实验室走向应用时,一系列力学问题伴随而来,甚至成为能否有效应用的关键.而研究的挑战就是如何描述和表征这些敏感性.研究对象的极端性还包括:超密、超稀、超常规.例如超密材料的密度可达通常固体密度的 1 万倍,从常态到温稠密态,在数千亿大气压下粒子间的强耦合、高激发、部分离化、部分简并,其状态方程、输运性质、辐射性质等如何定量表征?还有 *Progress in Aerospace Sciences* 在 2015 年报道的随海拔增加马赫数达 10 的飞行器球锥后体涡逐渐消失,并进入稀薄流态空气将显著影响流动的分离特性.另外还有一些与常规状态有很大的差别,如材料的刚度可调、负刚度等超材料结构,在实际工程中得到了越来越多的关注,越来越迅速地走向应用.而在这个过程当中,需要力学专家们针对相关力学问题开展研究,揭示其力学规律,为工程师们提供理论指导.

再来谈一下关于服役条件或者载荷的极端性.我们首先看超高温、超低温和超温差.航空发动机高温段运行温度环境可达 1600°C ,超导材料需在超低温下运行,太空结构运行温度环境的温度范围为正负两百摄氏度.例如,太阳系外行星探测中望远镜的支撑系统在高空要长期的、高稳定的运行,这些结构在温差正负两百摄氏度环境下的变形、运动、振动等力学行为极为复杂.其研究的挑战包括极端温度环境下的材料力学行为的测量和长时间服役环境下的疲劳变形行为分析等.还有超强场、超载流和超速率.浙江大学陈云敏院士团队正在研制一种可形成 1500 个重力加速度的离心机以模拟深地等环境的超重力状态.医用核磁共振中超导磁体如果能形成数十特斯拉的强磁场则对肿瘤的检测会更准确.除此之外,还有爆炸、高应变率、高超声速等超速率载荷工况等,热核聚变和电磁炮等超强场载荷环境.再有就是超高周期的疲劳加载.针对这些极端载荷情况,如何测量和表征材料或结构的力学响应和失效机制,从试验和测量技术上来说尚有待突破.例如,材料在强磁场中磁化所产生的力,还没有合适的物理模型可以进行描述,因此,亟需发展强

电磁场耦合力学试验技术,先从现象上有所拓展认识,再促进理论模型的发展.另一个主要的极端载荷环境是极端天气环境,包括台风、沙尘暴和冰雨等.这些极端的天气环境对飞行器、风电等工程装备的安全是极大的威胁,亟需发展有效的理论、试验和计算技术,形成对极端天气力学问题的全面认识,并建立系统的安全防护体系.

通过以上各类极端力学问题的分析,我们可以系统地总结极端力学的特点、困难与挑战.从研究对象来讲是多物质形态、多相、相变和远离平衡态的甚至相互交织的;从研究对象的运动来讲是多运动形态包括变形、流动、失稳、损伤和破坏等且甚至是多态并存的;研究对象所处的场也不一样,有温度场、电磁场、引力场、辐照场等且场场耦合.从时间空间来讲,具有多尺度、复杂特性.极端力学的本构关系的复杂性体现在:多场强耦合、多重非线性、高速率、高应变率等多样化关系及其相互影响.极端力学的初始条件具有随机性和初始敏感性等特点,边界条件往往涉及复杂多场边界交互作用等,都需要在理论上有所突破.

针对这些挑战,需要在实验技术和测量技术上有所突破,以发现新原理、新现象,形成新方法、新判据和特有装置.在理论和计算方面,需要有新理论、新模型、新算法,进而发现新规律,同时还要提出新方案,并且形成新的有效软件.其中极端力学的理论,包括多物理场耦合力学理论模型、多尺度损伤和失效理论等;在算法方面,包括多尺度计算分析方法、流固耦合等.此处给的例子是超导磁体,其结构尺寸高度相当于一个成人,将其截面切开,里面有很多小方格,而每个方格里面都是由一股股线束组成,其中中间空心管是降温的,而外面有六股超导线束,每一个线束里有很多根超导线,每一个超导线里面又有很多很多的超导丝,是一个典型的跨尺度结构.其尺度跨越是从纳米到米的多量级变化,对其的仿真计算极为复杂.即便利用高性能计算机能够进行计算了,也很难有效的考虑这种结构里面涉及的摩擦、挤压、电磁、低温场等耦合力学行为.总得来说,极端力学具有比较鲜明的特点,并且有力支撑着各类重大工程装备的发展,需要力学专家们给予高度关注.

下面讲报告的第三部分:极端力学的研究现状.现在国际上很多学者都在做极端力学相关的工作,

也是各个国家的竞争所在,投入了很多的人力物力.在耐高温性能方面,美国陆军实验室通过纳米调控技术将金属材料的高温蠕变性能提高了 6~8 个数量级,将镍基高温合金的应变失效耐高温温度提高了 100°C(但是强度有丢失);美国 and 意大利学者还研究了三维碳纳米管的高温力学行为以及陶瓷材料在 2100°C 的强度.我们国家北京理工大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学等单位在材料和结构的高温力学行为方面也做了很多工作.方岱宁团队研究超高温陶瓷断裂时最高温度可达到 2300°C.超材料是目前国际研究的热点,早期的超材料主要是电磁超材料,后来发展到声学、弹性超材料,一直到最近比较热门的力学/机械超材料.通过对微结构的调控,可实现对声学、超声到热频率范围(Hz 到 THz)的多物理场控制.两个代表性的例子是北京理工大学胡更开团队设计实现了弹性波的负折射现象并且进行了实验验证,NASA 通过超材料与智能结构的结合,实现了结构的主动自适应性变形,并应用于可变形机翼.最近,物理学科的专家们正在探索将光子和电子结合起来制造新材料.这些新材料出来后,都需要把力学性能和行为研究清楚后才能应用.

针对极端性能调控,国内外开展了大量探索性研究.例如,NASA 研发的基于形状记忆合金的变形机翼,香港城市大学吕坚团队基于双相纳米结构调控制备的高强高韧镁合金,以及西南交通大学翟婉明团队研发的高铁车轨耦合动力系统.爆炸和冲击等极端载荷下的力学问题也一直受到国内外研究者的重点关注,在这方面,国内主要从事相关工作的单位有中国科学院力学研究所、西北工业大学、中国科学技术大学、北京理工大学、宁波大学和中国工程物理研究院等.相关的研究难点包括裂纹扩展速度的测量、动态断裂和金属绝热剪切机理等,以及各类原位动态测试平台和测量技术的开发.冲击防护技术和装备的开发一直是世界各国激烈竞争的领域,例如基于液体缓释技术的防弹衣、仿生抗冲击防弹衣以及各类单兵作战和防护系统.

辐照会对材料的力学行为造成明显的影响,导致材料脆化、肿胀和生长,进而出现了一些与传统力学不太相同的新现象,但是对核聚变堆的安全性至关重要,北京大学段慧玲团队、浙江大学、中国工程物理研究院、华中科技大学等在这一方向开展了大量的研究.再看极端天气,前面在挑战部分提到的问题都有一些相关研究.比如说冰雨,为了防止

飞行器出现结冰,首先是研究冰形成的机理,然后针对相关问题寻找解决手段,超疏水涂层就是一种代表性防结冰方法.沙尘对直升机发动机的寿命影响非常大,如果遇到沙尘暴或在海滩起飞,沙子会进到发动机里,进而会影响发动机的使用.进口直升机发动机的防沙过滤网是被卸掉的,大大降低了直升机的使用寿命.高超声速是近几年的热点问题,以复杂流场相关问题作为例子,相关的研究包括俄罗斯科学院开展的跨尺度仿真模拟,从平均自由程 10^{-8} m(海平面)到 0.1 m(100 km 高);美国俄亥俄州立大学提出的多场耦合架构和数据传递方法体系;中国空气动力学研究所李志辉团队开展的高温多场耦合分析,返回舱绕流的最高温度超过 10^4 K,表面温度超过 3000 K;西安电子科技大学针对高超声速飞行中等离子体信号屏蔽问题,通过施加电场可以让等离子体的电子密度下降,实现信号的传递.

在学术交流方面,国内外举办了一些极端力学相关的会议或会议专题,例如,美国物理学会每年举办的 Materials in Extremes 和 Extreme Mechanics 分会,美国土木工程师学会 ASCE Earth and Space 会议将主题定为极端环境中的工程问题.除此之外,欧洲力学学会也多次组织极端力学相关的研讨会和会议专题.国际理论与应用力学学会(IUTAM)也对极端力学非常重视,曾举办多个相关的专题研讨会,其中 2013 年我们曾举办一个气候变化下的极端动力学会议.国内力学会议和固体力学会议也多次举办相关的研讨会.极端力学相关的研究也极具显示度,多次成为国际期刊封面文章.美国哈佛大学锁志刚教授在 2014 年创办的《极端力学快报》(Extreme Mechanics Letters) 期刊,主要聚焦两个方面,一个是性能的极端(超硬、超软等),一个是载荷环境的极端(高温、高应变率等).Nature 也曾对柔性可折叠材料的极端力学行为进行专题报道,另外也有一些综述文章,主要聚焦是柔性可折叠的材料,对自折叠折纸结构的发展、主要科学问题 and 研究思路进行了总结,提出了很多新的力学问题.另外,国内外还成立了一些极端力学相关研究机构,包括以极端温度环境、极端结构材料、极端工程环境、极端材料、极端环境力学等为研究方向的实验室,中国建材检验认证集团成立的极端环境材料力学实验室,以及约翰霍普金斯大学成立的极端材料中心.但是,目前现有的研究机构,大多都侧重于极端力学的某个方面开展针对性的研究,缺乏系统的、全面的研究平台.

第四部分想讲讲我个人对极端力学发展的几点初步思考来作为本报告的结束语。

思考一是极端力学在力学理论体系中处于什么位置? 我们知道连续介质力学的体系中有刚体力学、弹性力学、流体力学、塑性力学等不同分支, 这些不同分支其理论的基本前提与连续介质力学的前提是一致的, 是在统一框架下的。那么, 极端力学是否是处于这个体系中的某一个已有分支中的新方向, 还是处于这个体系中的一个新分支? 或者是部分有别于连续介质力学体系的一个新体系? 如果是前者, 问题可能相对容易一点; 如果是后者, 极端力学的任务就比较艰巨了。我个人认为应该是兼而有之。对于后者, 我们来看一下连续介质力学框架建立的基本假设和基本公理。基本假设主要有两条。第一条是连续性假设, 即变形和运动是不同的物质点变成不同的空间位置。这在数学上的要求就是研究对象的材料是一一对应、连续可导的。然而当材料破碎或传递冲击或出现其他不连续形式时就会违背该假设。第二条是对物质点, 要求宏观上足够小、微观上足够大, 采样点粒子需处于热力学平衡状态。但是在稀薄气体、激波或高频声波环境下, 这些对物质点的要求可能都不一定能满足了。再来看连续介质力学框架建立的基本公理, 它包括因果性公理、决定性公理、等存性公理、客观性公理、物质不变性公理、邻域公理、记忆公理和相容性公理。举例来看, 例如决定性公理, 即: 在时刻 t , 物体中物质点 X 处, 热力学本构函数的值由物体中所有物质点的运动和温度的历史决定。这实际上排除了 X 处物质性能对于物质外部任何点以及任何未来事件的依赖性, 意味着只要物体过去的运动已知, 那么涉及物体性能的未来现象就是完全被决定的和可测的。显然, 实际情况往往很难是确定性的。再有等存性公理要求所有的本构泛函在一开始都应该用同样的独立本构变量来表示, 直到推导出相反的结果; 邻域公理要求离 X 较远距离物质点的独立本构变量的值不会显著影响相关本构变量在 X 处的值; 记忆公理要求本构变量在距离现在较远的过去时刻的值不会显著影响本构函数的值, 然而, 新材料的出现以及极端服役环境下材料极端性能研究的复杂性, 可能导致无法找到满足等存性公理要求的一组独立本构变量。同时, 材料性能也可能不再满足邻域公理和记忆公理中本构泛函对较远物质点的运动和温度及其历史不敏感。同样的疑问还有, 热力学第二定律能否适用? 远离平衡

态本构关系如何描述? 在连续介质力学基本框架建立的基本假设和基本公理不能完全满足的情况下, 连续介质力学的理论和方法是否还适用? 如果强行使用会出现什么偏差、导致什么问题? 是否需要修正? 如何修正? 如何建立新的体系? 等等, 这些是极端力学研究需要想清楚的基本问题。

思考二是极端力学研究对力学研究范式会有哪些影响? 目前力学研究的基本范式是将自然界和工程界, 可能也包括社会学界的实际问题, 通过简化抽象为力学模型, 然后或者建立对应的数学定解问题进行求解, 或者进行实验观测和测量等, 实现对问题的定量分析, 揭示出规律进而预测和提出解决方案。极端力学是不是还沿用这套研究范式? 我估计大部分问题还是要用这个范式, 但是可能会出现新的环节。比如说我们在实验观测的时候, 会遇到很难观测的、很难观测全, 导致数据缺失, 这个时候能可能需要借助一些类脑学习和类脑计算, 去把未观测到的数据补全? 类似这样新的环节在力学整个范式里面处于什么位置, 也是希望大家能考虑的。

思考三是极端力学对力学学科、专业、人才培养有哪些影响? 传统的力学形成了一系列的理论、方法和软件、工具等, 帮助了相关行业工作的开展, 也逐渐让工程师们不同程度地弱化了对力学的需求。但在极端服役条件下材料和结构的极端性能和响应在很多情况下不能由现有理论和方法简单外推得到, 因此极端力学的提出是力学学科发展的新机遇, 迫切需要力学工作者为其他行业的学者和工程师们提供准确有效的新理论和新方法, 解决新问题。同时, 极端力学需要解决的问题既涉及科学发展前沿又与重大工程问题直接相关, 这对力学人才的培养也提出新挑战。

思考四是如何促进极端力学的发展? 在极端力学现状分析里我们列举了一些工作进展, 都总体上看还只是聚焦在某一个“点”或者某一条“线”上, 能够形成一个“面”的工作不多, 形成“体系”的更为缺乏。这里的“点”、“线”、“面”是什么意思呢? 以辐照问题为例, “点”是指针对某一种辐射源对某一种材料的某一个性能的研究; 这里的“线”可能就是某一种辐射源对某一种材料的各性能、或者某一种辐射源对某一类材料的某一个性能、或者以此类推的相对全面的研究; 这里的“面”可能就需要涉及辐射源对材料的各性能更为全面的研究, 可能需要覆

盖现象、影响要素和规律的揭示、理论模型和实验以及计算方法的建立、解决问题的方案和相应标准的形成等等. 以超导材料的力学研究为例, 兰州大学在基金委重大科研仪器研制专项的支持下, 研制出国际上首台极低温-电-磁极端多场环境可调全测控装置, 能够对超导带材、线材的力学性质开展全背景场下的测试与实验研究; 提出了基于应变的检测超导失超新的测量原理、解决了超导电缆接头等一系列工程实际问题、建立了预测超导磁通跳跃以及超导材料损伤和断裂的模型等等, 涵盖了仪器和原理、现象和要素、本构和模型、方法和规律、预测和方案, 可以说搭建起超导材料结构力学的研究框架. 而这也只能是极端力学研究的一个侧面. 现在的问题是: 极端力学体系是否是由各个研究方向的“面”构成的“组合体”, 还是类似于连续介质力学体系有自己一整套的基本假设和基本公理以及特有的定理和范式的“有机体”? 组合体相对来说只是是“量变”而“有机体”则是一种质变, 需要突破和创立, 需要针对远离平衡态或者非平衡态问题建立新的力学体系. 极端力学的问题不能单纯地通过传统的力学方法体系简单外推, 为此, 既需要通过更多的有关极

端力学“点”、“线”、“面”的研究告诉其他学科和工程界: 极端力学的问题使用现有方法和软件算不出来, 没法测, 测不准, 控不住, 防不了的, 也需要从极端力学理论体系的高度开展包括理论、方法和技术在内的架构性研究. 极端力学未来的发展, 可通过一些专题研讨, 在重点、重大项目、重大研究计划中的体现, 有效地支撑国家的需求和科学技术水平的发展. 再有就是主动引领、创建需求. 力学工作者既要主动地服务需求, 也要主动地提出新的设想, 并把设想变成需求, 然后再来服务需求. 换句话说, 就是通过“供给侧”的源头来推动力学学科的发展.

最后, 我们希望通过“极端力学”这一抓手, 在国家面向 2035 年的基础科学发展战略中有力学学科的一席之地, 在极端服役条件下材料与结构力学、极端性能材料和多功能结构的设计与表征、非常规时空尺度下的结构特性与物质运输、极端力学的基础理论和方法、多物理场耦合作用的流动机理及控制等主要方向上开展研究, 使得力学能够在科技发展新的阶段通过自身更加完备的发展来更好地服务国家战略需求和促进其他学科的发展.

郑晓静, 浙江乐清人, 力学家, 中国科学院院士, 发展中国家科学院院士, 国务院“政府特殊津贴”, “教育部跨世纪人才基金”和“国家杰出青年科学基金”获得者, 入选国家“百千万人才工程”第一、二层次人选. 现兼任中国科协副主席、中国科协女科技工作者委员会主任、国际理论与应用力学联合会(IUTAM)理事、北京大学“湍流与复杂系统国家重点实验室”和甘肃省“荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室”学术委员会主任等. 郑晓静主要从事高雷诺数两相壁湍流、电磁固体力学、板壳非线性固体力学等方向的研究. 在 JFM, IJMF, JGR, PRE, APL, Nanotechnology 等发表 SCI 论文 180 余篇, 在 Springer-Verlag 和科学出版社等出版学术著作 4 部. 研究成果获 2 项国家自然科学二等奖、1 项国家科技进步二等奖、2 项国家教学成果二等奖、获何梁何利基金“科学技术进步奖”(数学力学)和“周培源力学奖”等. 1988 年获首届“中国青年科技奖”, 1991 年获“做出有突出贡献的中国博士学位获得者”等.