

·成果简介·

如家温暖 相互激发 跨越宏微

——记清华大学“微/纳米尺度力学与智能材料的力学”创新研究群体

孟庆国 詹世革

(国家自然科学基金委员会数理科学部,北京 100085)

以杨卫和郑泉水为学术带头人的清华大学破坏力学研究组“微/纳米尺度力学与智能材料的力学”研究群体,获得了力学学科第一个国家自然科学基金创新研究群体的资助。这是一个始终活跃在不断演化中的力学最前沿研究领域的群体,是成员间长期密切合作、团结互助、相互激发,并在科研以及高水平创新人才培养方面做出突出成绩的群体。

1 如家温暖、高手博弈

古有训:“一山难容两虎”、“文人相轻”;今流传:“国内一只虫、国外一条龙”。这些古今教训,谈的是中国文人之间难相容、难合作的现象。而近代科技发展史则表明,最具创造性的一些科学大事件,往往与优秀学者群体紧密关联。最典型的例子是哥本哈根学派与20世纪前几十年德国作为世界科学中心的关联。

“微/纳米尺度力学与智能材料的力学”研究群体是以清华大学破坏力学研究组核心成员黄克智、余寿文、杨卫、郑泉水、方岱宁、冯西桥、庄茁、方菲为主体形成的。在这个长期仅有十余人的研究组里,汇集了两位院士(黄克智、杨卫)、三位“长江学者”特聘教授(杨卫、郑泉水、方岱宁)。两年一度颁发的中国青年科学家奖至今力学学科只有三位学者获得,而该研究组就拥有其中两位(杨卫1994年获奖;郑泉水1996年获奖)。这说明该研究组具有与众不同的人文和学术文化氛围,这就是家庭般温暖的人际关系;浓厚、自由、活跃的学术气氛;同事间互相尊敬、求同存异、相互激励、密切合作、良性竞争、共同提高。

该研究群体由黄克智和余寿文创建于1977年。其优秀人文和学术文化氛围的形成、稳固和发展,首先得益于黄克智、余寿文等老一辈带头人的率先垂

范;其次是杨卫、郑泉水等年轻一代带头人的不断努力、发扬光大。更根本、内在的原因是,在建立国际一流研究群体的过程中,在从事国际力学前沿研究的共同事业中,形成了密切合作,发挥各自优势、扬长避短、相互帮助的高度共识。彼此之间都很清楚各自所做的研究工作,大家经常在一起合作,尤其在指导研究生方面。一个博士生有好几个教授共同指导是常有的事,每个导师发挥各自的长处,使学生能不断开拓新的领域,做出很好的研究工作。

2 大师风范、优秀传承

力学是自然科学和技术科学的先导学科之一。牛顿力学作为一门精密的科学,推动了近代自然科学的发展。19世纪初建立的弹性力学和流体力学,使描述连续介质的力学部分从物理学中脱颖而出。近代力学研究主要针对具有复杂形式或结构的可变形固体、各种复杂流动现象、复杂动力学系统,在严密的数学、物理和力学原理基础上建立起定量分析模型,并最终完成对复杂工程问题的定量描述。因此,力学既是基础科学,也是应用极为广泛、与复杂性密切相关的技术科学。力学对于众多工程学科和国防技术从定性到定量研究的发展起到了重要作用。

近代力学的上述特点决定了它的前沿研究的动态性,与其他学科,尤其是与数学、物理和众多工程学科的发展前沿密切相关。早年黄克智师从张维院士,主要从事板壳力学的研究。“文革”后,黄克智和余寿文将研究重点放在当时力学的关键前沿研究领域——断裂力学。据西方国家统计,由于固体破坏所造成的经济损失高达国民生产总值的8%—11%,固体破坏已成为力学界公认的难题之一。他们带领研究组取得了重要的、在国际上有影响的成

本文于2005年10月27日收到。

果。从20世纪80年代中后期开始,黄克智相继进入非线性连续介质力学、相变力学、塑性应变梯度理论;余寿文相继进入细观力学、损伤力学、智能材料的力学等新的研究领域,并做出了一系列在国内外有重要影响的学术成果。

20多年来他们坚持做到:(1)十分重视队伍的建设,培养并引进优秀年轻俊才,鼓励和帮助他们担大纲,负责任,使得一批批年轻的学者迅速成长起来;(2)进行密切的国际学术交流与合作,实施雷打不动的每周一次学术讨论班,使群体的研究与国际前沿问题紧密接轨,大大拓宽了研究视野;(3)十分重视高水平研究生的培养,取得了突出成就,1993年获得四年一度、理工科惟一的全国教学特等奖。

3 力学精英、代有新人

该群体学术带头人杨卫1984年从国际力学中心之一的美国Brown大学获得博士学位后,立即回到了清华大学任教。他曾是余寿文和黄克智教授的硕士生,在Brown大学师从国际著名力学家L. B. Freund教授。杨卫的加盟,对推动群体从宏观到细观、再到纳米尺度的力学研究,从单一力场到多场耦合、再到智能材料的力学研究,起到了关键作用。杨卫学术思想活跃、视野宽阔。如他早在10年前就进入了纳米尺度力学的研究,提出了跨尺度研究新方法。作为群体年轻一代的领头人,杨卫严以律己,公正客观,具有宽阔的胸怀。他海纳百川、广聚英贤,开创了群体的新局面。1994年他获得中国青年科学家奖和国家杰出青年科学基金的资助,2003年当选为中国科学院院士,成为我国力学新一代学科带头人。

该群体另一位学术带头人郑泉水,1989年在清华大学获得博士学位后,到英、法、德等国作了三年半的合作研究,1993年回清华大学任教。以郑泉水为核心创造的研究成果,为现代张量函数表示理论并应用于本构不变性研究,做出了关键性的贡献。这也为他在国际力学理论界带来了声誉,赢得国际工程科学联合会首届杰出论文奖(1994)、国家杰出青年科学基金(1995)、中国青年科学家奖(1996)等一系列中外学术荣誉。回国后,郑泉水首先转向了与群体其他成员研究方向更为密切的损伤力学、非均匀和各向异性材料的力学研究领域。近五年来,他又进一步深入到细观力学的研究,并与合作者提出了多壁碳纳米管作为吉赫兹振荡器的理论构想,对纳米器件的实验技术和理论研究提出了多个

具有挑战性的问题,在国际纳米科技界产生了影响。

方岱宁于1995年结束以色列和美国的留学回国工作。10年来,经过与黄克智和杨卫的合作,共同指导研究生,方岱宁迅速进入到智能材料的力学、电磁固体力学等领域。他在实验、计算和理论兼长的独到优势得到很好的发挥,尤其近几年在功能材料力-电-磁-热耦合场下变形与断裂行为的实验与理论相结合研究中取得显著的成绩,所提出的铁电材料本构关系成为国际上认可的三种代表性本构关系之一,产生了较大的学术影响。他于2000年获得国家杰出青年科学基金。

更年轻的冯西桥教授,1995年在清华大学获得博士学位,获得首届全国优秀博士论文奖。1997—1999年期间,他获得德国洪堡奖学金,在德国和荷兰任洪堡研究员。1999年冯西桥回到清华大学,成为该群体中最年轻的骨干之一。他在细观损伤力学、微/纳米力学等领域取得了多项有创新性的研究成果,从而获得了2005年度国家杰出青年科学基金资助。

4 微/纳突破、智能增辉

自2002年获得创新研究群体科学基金资助以来,该群体在微/纳米尺度力学和智能材料的力学方面取得了系统性的进展。

4.1 微/纳米尺度力学

在纳米晶体的变形模拟方面,杨卫等利用9晶粒簇模型和微结构演化计算,定量地解释了卢柯研究组2000年发表在*Science*上关于块状纳米铜在室温下的蠕变行为,为纳米晶体塑性变形提供了一个分析和计算的基础,并进一步提出了纳米晶体在插入-转动联合机制下的单轴、平面应变和三维本构关系,系列论文于2004年刊登在固体力学领域影响力最高的期刊*JMPS*上。群体提出了一种高效率、具有 $O(N)$ 计算性能的并行分子动力学数值模拟方案,采用该方法对纳米结构进行了并行分子动力学数值模拟,已经实现对100万个原子的系统进行数百万步的分子动力学模拟。杨卫等还利用这一方法研究了纳米晶体在纳米压痕下的堆垛层错的进发和终止,研究了在高速多方向喷丸下的表面纳米化过程。其中一个重要步骤在于利用分子动力学研究位错群通过弛豫而形成纳米晶粒的过程。关于超高速撞击的分子动力学模拟表明,当以10 km/s的高速用铜纳米颗粒撞击铜基体时,会形成以超音速传播的激波。

2002年群体提出的多壁碳纳米管作为1 GHz机械振荡器的构想和理论预测,对理论和实验提出了大量挑战性问题,在国际上引起了广泛研究。多壁碳纳米管作为1 GHz振荡器能否最终实现,取决于多方面的因素。在理论上,需要寻求一个稳定的或能量耗散尽可能低的振荡模式。郑泉水等采用原子模型和分子动力学方法研究了双壁碳纳米管作为振荡器的滑移阻力和能量耗散,首次发现跨声子现象表明跨声子效应是一种内在的耗散机制;揭示了内外管的螺旋角是否共度,对能量耗散率有显著的影响;较系统地提出了极高速纳米器件的基本降耗策略。群体2002年的另一项研究是郑泉水等提出了纳米石墨片1 GHz振荡台的构想和预测。由于这项工作实验的难度比多壁碳纳米管振荡器实验的难度小,有可能较快制备出振荡器。经过一年的努力(与中国科学院物理研究所、清华大学材料研究院、北京大学电子系等学者合作),目前纳米石墨片振荡台、操控和观测系统都已经完成,并成功完成了初试工作。郑泉水的研究组发表在物理界最具影响的期刊*PRL*上的4篇论文,还解释了多篇*Science*论文所报道的碳纳米管奇异物力学现象,提出了弯曲起皱机制,解决了引起长期广泛争议的Yakobsen悖论。

通常学术界都认为由于原子的离散性质,连续介质力学的理论不能用于纳米尺度。群体成员黄永刚、黄克智等根据原子势建立纳米结构材料的一个纳米连续介质力学,通过令连续介质固体能量与原子键中储存的键能等效,把原子势计入连续介质本构模型之中,于是根据熟知的Tersoff-Brenner原子势建立了碳的纳米连续介质理论,并用此理论研究了碳纳米管的裂纹萌生应变、缺陷萌生等机械变形行为。黄克智等还研究了含孔塑性介质的尺寸效应,把著名的Rice与Tracey关于无限大介质中单个孔的增长率公式和Gurson的含孔介质本构模型推广到具有尺度效应的情况,并用于计算单拉情况的剪切带问题。黄克智等建立了MSG塑性应变梯度流动增量理论,并用大变形理论研究了扭转与裂纹尖端场;证明当有几何必需位错存在时 J 积分不守恒,把基于Taylor关系的非局部(TNT)塑性理论推广到有限变形情况,建立了一个考虑塑性应变梯度效应的新的常规(CMSG)理论,便于应用于工程实际。

冯西桥等对碳纳米管增强的复合材料进行了细观力学和纳米力学研究,提出了一种基于原子势的方法来研究碳纳米管的变形和破坏问题,可以模拟

孤立的或位于复合材料之中的碳纳米管的变形与破坏问题,分析了碳纳米管中缺陷的形核过程、强度与直径和螺旋角之间的关系,结果与分子动力学模拟以及实验结果吻合得很好。在微/纳米云纹技术及微/纳米尺度效应研究上,谢惠民等提出了扫描隧道显微镜云纹法的测量原理并应用于纳米尺度的单晶材料的变形测量,提出了新型聚焦离子束微米云纹法并成功应用于MEMS微梁结构的工艺残余变形研究。

4.2 智能材料的力学

在铁电陶瓷的力电耦合失效研究方面,群体在铁电材料的本构关系与断裂方面取得了系统进展。杨卫等在国际上首次阐明了电畴翻转引致的电致疲劳裂纹扩展机理,提出了电致疲劳的定量理论;首次报道了铁电陶瓷裂尖发生的非常规畴变带结构和亚矫顽电场下的电致断裂行为。由杨卫、方菲、方岱宁所著长篇综述“铁电材料的失效”在Elsevier的“结构完整性大全”上发表。方岱宁等建立了一个新的断裂参量——电致断裂COD,并建立了一个新的COD电致断裂判据,在国际上首次完成了中心裂纹板试件在力-电耦合载荷下的断裂实验,获得了断裂载荷与力-电耦合载荷之间的实验数据,实验结果表明该新判据能够很好地描述电场对断裂载荷的影响。群体完成了铁电陶瓷的单边自然穿透裂纹的电疲劳裂纹扩展的实验,揭示了两类不同的电致疲劳裂纹扩展机理和疲劳裂纹闭合效应等一些新的电疲劳损伤现象;建立了一个新的畴变判据,与已经存在的判据进行了对比,发现该判据能够比其他判据更好地描述实验结果。

群体自行设计并研制出了具有自主知识产权的国内首台多轴多功能力磁耦合加载与自动测量实验仪器,不仅可以进行多轴本构力磁耦合本构实验,还可以进行力磁耦合断裂实验。该仪器已被美国最大的磁性材料生产商阿诺德(ARNOLD)磁材公司、香港大学、西安交通大学、兰州大学、中国科技大学等单位购置使用。应用该仪器分别对金属软磁材料——Ni6和电解镍、超磁致伸缩材料——TbDyFe合金多晶体,以及铁磁相变材料——NiMnGa,进行了全面的力磁耦合实验,得到不同应力状态下磁滞回线、磁致伸缩曲线、不同磁场强度下应力应变曲线等特征曲线,并在国际上首先发现高应力高磁场状态下超磁致伸缩材料Terfenol-D的“伪弹性”现象。

在压电材料的损伤与热效应研究方面,余寿文等对压电介质弹性波的散射问题,求解了压电介质

层与半无限大弹性介质间的界面裂纹对平面波的散射问题,同时求解了对 Love 波的散射问题,表明不同的材料组合导致动态应力强度因子的峰值和共振频率存在差异,选择适当的材料组合可以阻止裂纹的扩展;提出了高电冲击载荷作用下,压电介质中裂纹尖端的热效应问题,结果表明,当电冲击载荷较高时,裂纹尖端产生小区域的高温场,并将提高压电材料的断裂韧性。对压电高分子材料,方菲研究了未经电子辐射和经过电子辐射 P(CDF-TrFE)聚合物铁电薄膜的结构和拉伸破坏机理,表明经过电子辐照后,铁电畴尺寸下降,原来极性排列的分子链结构转变成非极性结构。

在科学基金长期持续资助及创新研究群体基金的资助下,群体主要成员郑泉水和黄克智的合作成果获得了 2004 年度国家自然科学基金二等奖;杨卫、方岱宁、方菲和黄克智的合作成果获得了 2005 年度国家自然科学基金二等奖。

5 承上启下、再攀高峰

不懈的努力,丰硕的果实,使得该群体在 2004

年底的考核评估中得到了较高的评价,并获得了第二期的资助。为此,该群体定出了更高的研究目标。

着力于对微/纳米力学和智能材料的力学的前沿领域进行更为深入的研究,并顺势扩展至有密切相关的一些关键问题,如微/纳米生物、仿生和软物质的力学、智能材料力学应用于国防科技等,力求做出更多原创性的成果,发展系统性理论,以进一步扩大该群体在上述两个重要方向上的国际影响。

在微/纳米力学方面,开展纳米器件和材料的多学科交叉研究,发展微/纳米力学的理论、计算方法与实验技术,以及微/纳米生物力学和软物质力学问题的研究;在智能材料的力学方面,开展铁电和铁磁材料的断裂和损伤及微观机理、智能材料多场耦合的基本理论、多场耦合的实验设备研制与测量方法和技术、隐身材料的电磁波隐身机理等问题的研究。

我们相信,清华大学“微/纳米尺度力学与智能材料的力学”创新研究群体的成员们,以他们活跃的学术思想、敏锐的学术判断力、密切合作的精神和相互激发的氛围,必将在科研和高水平创新人才培养方面再创辉煌。

HOMELIKE COZINESS, MUTUAL INSPIRATION AND TRAVERSE BETWEEN MACRO AND MICRO — INTRODUCTION OF THE INNOVATIVE RESEARCH GROUP ON MICRO/NANO MECHANICS AND MECHANICS OF SMART MATERIALS IN TSINGHUA UNIVERSITY

Meng Qingguo Zhan shige

(Department of Mathematical and Physical Sciences, NSFC, Beijing 100085)