



## 吕坚 LÜ Jian

法国国家技术科学院院士

Academician, the National Academy of Technologies of France

香港城市大学(研究与科技)副校长

Vice-President (Research and Technology) of City University of Hong Kong


香港城市大学研究生院院长, 先进结构材料研究中心主任。研究范畴主要包括航空航天材料与结构预应力工程、先进纳米材料的制备与力学性能、生物与仿生材料(多稳态结构和柔性机器人)力学和先进材料与产品集成设计。曾任空客、EADS、SNECMA、ABB、FIAT 等 18 家公司、研究所和大学参加的欧盟项目首席科学家。在 *Nature*、*Science*、*Nature Materials*、*Advanced Materials*、*Materials Today*、*Nature Communications*、*PRL*、*JMPS*、*Acta Materials* 等 SCI 杂志上发表研究论文 320 篇。2006 年、2017 年分别获法国政府授予法国国家荣誉骑士勋章和法国国家荣誉军团骑士勋章。2011 年被法国国家技术科学院选为院士, 成为该院近 300 名院士中的首位华人院士。

# 先进结构材料, 创造航空未来

——访先进结构材料与机械系统并行工程专家, 香港城市大学吕坚教授

Advanced Structural Materials, Create the Future of Aviation

本刊记者 李丹

: 请为我们简要介绍一下香港城市大学及其优势学科。


**吕坚:** 香港城市大学(简称: 城大)虽然建立时间比较短, 但现在是全球发展最快的大学之一, 根据英国 QS 全球大学排名, 城大位居全球第 55 位, 亚洲第 7 位。在最近发布的

泰晤士亚洲大学排名中, 目前位居第 12 位。对于一所年龄仅有 33 岁的大学来说, 发展是比较快的。

从优势学科来讲, 理工科和商科实力较强, 其中数学是非常有竞争力的学科。根据上海交大世界大学学术排名, 数学位居全球第 22 位, 在大

中华区名列第 1 位, 第 2 位是香港中文大学, 第 3 位是北京大学。工程位居全球第 24 位, 香港第一。根据美国 *US News & World Report* 最新发布的信息, 我们的计算机位居全球第 9 位, 工程专业排名全球第 11 位。如果把香港所有大学的所有学科在

US News & World Report 排名,这两个学科的位置是头两名。根据美国 UT Dallas 世界大学商学院学术排名,城大位居亚洲第 2 名,全球第 28 名,第 26 名是香港科技大学。在近七八年的时间里,我们上升了约 40 位。希望在不久的将来,商科也能成为香港最好的学科。

: 在材料科学方面,城大有哪些优势? 取得了哪些研究成果? 目前受到广泛关注的高温材料有哪些?

**吕坚:** 我校是香港唯一开设材料科学系的院校,我们团队领导的先进结构材料研究中心取得了很多成果。去年在高温材料方面,刘锦川院士作为共同通讯作者与南京理工大学陈光教授在 *Nature Materials* 发表了高温 PST TiAl 单晶的论文。在微纳尺度硅材料方面,陆洋博士与 MIT 合作发表的一篇文章被 *DeepTech* 作为例子与大家分享。

如何使材料的强度接近理论值一直是一个研究热点,然而,其制备方法的苛刻与复杂性往往限制了其实际应用。在材料研究领域,人们通常使用阻止位错运动的缺陷控制来提高强度。但是,这种强化效应不能被无限扩大。引入过多的缺陷会使材料的主导变形机制由位错相关过程向缺陷软化行为转变。例如,纳米晶/纳米孪晶材料的强度通常位于  $\sigma = E/85$  区域(其中  $\sigma$  为强度, $E$  为杨氏模量)。非晶化是另一种提高材料强度的有效途径,这是由于非晶结构中不含有晶界和位错等缺陷。材料非晶化后,其变形模式由位错活动向剪切变形转变。金属玻璃(MG)的强度位于  $\sigma = E/50$  区域,通常高于其晶体形态。然而,由于在形变过程中的剪切应力集中所导致的剪切带的软化效应使得 MG 所能承受的最大应力只能被限制在 2% 的应变处。因此,非晶材料的强度也不能达到理论值。我们研究组一直致力于 MG

材料及高强高韧纳米晶组织结构及其性能的研究,在 *Physical Review Letters* 上报导了在原子尺度上实现 MG 双相结构来讨论类二十面体短程有序结构对 MG 热稳定性的重要作用;在 *Nature Materials* 及 *Nature Communications* 上报导了 MG 原子尺度的非均匀性;并于 *Advanced Materials* 中预见到了若 MG 材料中两相(两非晶相或纳米晶相-非晶相)的体积比为 1:1 时,材料将会出现优异的力学性能。最近又取得重大突破,首次发现并实现大体积的超纳双相材料。这种结构使得镁合金具备 3.3GPa 的超高强度,达到了近理论值  $E/20$ 。这种尖端新型材料的强度比现有超强镁合金晶体材料高出 10 倍,变形能力较镁基金属玻璃高 2 倍。相关论文于北京时间 2017 年 4 月 6 日在 *Nature* 线上发表。在文章中第一致谢资助单位是国家自然科学基金委重大项目,是北京航空航天大学徐惠彬校长的航空发动机热障涂层项目。此项目的基础研究刚开始受到很多人的质疑,然而事实证明了我们不仅能做基础研究,还能做到世界一流。

目前我们还在研发一种添加了预应力的自适应多稳态结构材料,可从一个稳定形态转换至另一个稳定形态,保持稳定形态不需要任何外部输入能量或持续的应力支持,这种具有保持多个形态的结构在需要形态变化的工业应用中具有显著优势,例如,制备可变机翼能满足其在使用过程中对特定形态的需要,可大幅度提升飞机的升力。此材料我们已经申请了发明专利。

高温材料目前受到重点关注的有两种:

(1) 金属间化合物。高温是大多数金属的大敌,金属在高温下会失去它原有的高强度,而对金属间化合物来说,却不存在这样的问题。在 700~800℃ 的高温下,大多数金属间

化合物只会更硬。这就使金属间化合物材料在高温结构应用方面具有极大的潜在优势。然而事物的优劣总是一把双刃剑。伴随着金属间化合物的高温强度而来的,是它本质上难以克服的室温脆性。我中心的刘锦川院士在揭示金属间化合物的脆性本质方面做出了开创性的工作。1992 年,在他的倡导与组织下,举办了第一届金属间化合物国际研讨会,此会议每 3 年举办一次,连续至今,会议学术水平之高、学界影响力之大,成为我国科学界国际交流与合作的典范。目前已有约 300 种金属间化合物可用,除了作为高温结构材料以外,金属间化合物的其他功能也被相继开发,稀土化合物永磁材料、储氢材料、超磁致伸缩材料、功能敏感材料等相继汹涌而来。金属间化合物材料的应用极大地促进了当代高新技术的进步与发展,促进了结构与元器件的微型化、轻量化、集成化与智能化,促进了新一代元器件的出现。金属间化合物这一“高温英雄”最大的用武之地将会在航空航天领域,如密度小、熔点高、高温性能好的钛铝化合物等具有极诱人的应用前景。

(2) 高熵合金。高熵合金概念由中国台湾科学家叶均蔚教授于 1995 年提出,并于 2004 年发表混合五六种以上等比例金属、性能更佳的高熵合金,自此开创了全新的材料研究及应用领域。美国也投入了大量的人力、物力、财力来研究,目前我们中心也是全球做得最好的之一,被 *Materials Today* 邀请撰写综述文章(*High-entropy alloy: challenges and prospects*)。高熵合金具有一些传统合金所无法比拟的优异性能,如高强度、高硬度、高耐磨耐腐蚀性、高热阻、高电阻等,因而成为在材料科学和凝聚态物理领域中继大块非晶之后一个新的研究热点。

: 您访问过内地很多高校,

如北航、哈工大、浙大等,香港与内地高校之间的联系也越加紧密,您有哪些体会?

**吕坚:** 香港的高校与内地高校在中央政府特殊政策的大力支持下,合作与联系非常紧密,允许我们参与许多国家的重大项目。这些政策也是在摸索中前行,难免会遇到某些困难,大家也在积极探讨这种模式的优缺点,实施持续的改进计划。香港各高校的科研实力是非常强的,汇集了大量优秀的资源,也希望得到香港政府的大力支持,让香港更多地参与到国家项目中,使这些优势资源发挥巨大的作用力。在香港,科研的人均投入是 0.7%GDP,而深圳是 4.1%GDP,这个差距还是挺大的,我有信心这种情况将来会得到改善。

香港和内地合作实现优势互补可体现在以下 3 个方面:(1)内地有较好的应用背景。香港本身是没有工业的,即使研发出成果,也没有实际应用。(2)内地学科全,人才比较多,而我们更多的是专,有利于相互借鉴,在某一领域进行合作和深入交流。(3)国家的各种需求比较迫切,正好给合作提供契机,让我们参与到项目中。

**☞:** 您在法国生活和工作多年,请您在人才培养模式上谈谈个人体会。法国也是航空大国,公司在保持创新力方面有哪些措施?

**吕坚:** 在人才培养方面:首先,法国教育非常重视基础教育,课程和内容非常多。在法国,如果你读一流预科的物理化学班,也要上很多数学课,课程量和清华大学钱学森班接近。在法国时与上海大学建立了中欧工程技术学院,该学院在课程、内容和课时上都做了一些调整。其次,动手能力训练较多。法国贡比涅技术大学采用的是 MIT 的模式,所以我在一年级就进入实验室,还有一项关键的课程设置是学生一般需要在公司实习 8~14 个月。

在保持创新力方面:学生毕业后进入公司保持持续的创新能力主要在于有良好的进修机制,国家对员工征收工资一定百分比的税来让员工接受继续学习和培训,费用从所征收的税中支付,如果不让员工学习,这笔费用国家可挪给大学或研究机构作为学习费用,因此迫使雇主来考虑员工的继续学习问题。

另外,国外的公司在基础研究方面投入较多,有很多平台,还有专门做预研的机构。比如一些航空公司自己开发专用的设计软件,据我了解,国内的公司还不具备这样的条件。做得比较好的就是 Dassault System 开发的 CAD/CAE/CAM 一体化软件 CATIA,其领导地位得到世界范围内的认可。

**☞:** 国外在鼓励科研成果转化方面采取了哪些措施?

**吕坚:** 国外鼓励大学教授科技成果转化措施有以下两点:(1)大学里鼓励教授将发明创造成果转化,法国将除去各种费用以后收入的 50% 给发明者,另外 50% 给学校。(2)产业化过程可能花较多的时间,法国允许教授停薪留职,这项措施在某些领域起到了很好的作用,当然,航空领域稍有不同,这个领域研究内容非常广,一个人的投入也不能生产出一架飞机。

研究所的性质与公司差不多,属于职务内发明,成果是属于研究所或公司的,但是公司内部有很多奖励制度,很自然地走向产业化道路。法国教授的升职主要是看对学科领域的贡献,不是只看发表的论文。

**☞:** 您领导的团队在科研成果上取得很多重大突破,你们是如何做到的?从您个人观点来看,在基础研究和应用研究上,有哪些好的方法是值得借鉴的?

**吕坚:** 我们中心取得很多成果关键在于:(1)良好的心态,我所在的团队人均每年发表的论文是比较

少的,我们将最有价值的成果发表在最好的期刊上,宁缺毋滥;(2)我们对自己的要求就是不希望做任何“Me too”的工作,从我们的工作来看,一般都是创新性研究,不介入别人在做或者我们不如别人做得好的研究。这个习惯可能受法国的影响比较大,由于国家资源不够,法国会将资源都投入到最具有优势和领导地位的这两三个研究团队中。虽然有很好的想法,但是如果不在这前几名中,是拿不到任何经费的,这就迫使很多教授去开发新的研究领域。这与中国和美国是不一样的,中国和美国可能从事这个方向研究的团队有几十或者上百个,会有很多重复工作,造成精力和财力的浪费。

从我个人观点来看,基础研究应自由探索,按照产出来考核可能是比项目引导更有效的方法。科学家可根据自己的兴趣爱好来选择题目,提出一个方案,若觉得可行就分配一定的经费,根据其产出来评估投入经费的额度和时间。真正的科学发现和原始创新是无法预料的,也是不能做计划的。中国目前只在万人计划的顶尖人才和大学引进人才的科研启动中采取这样的方法,如果变成常态化效果可能会更好。

应用研究应以指标为导向,充分发挥私有企业的积极性。例如对某一新产品,由国家来撰写和发布任务书,谁先做出满足性能要求或更佳的产品就采购谁的。私有企业想做,但是得不到国家的资助,而国家的企业没有好的激励制度不一定能做出来。国外很多行业领先的大公司是私有企业,公司一旦有利可图,就会鼓励工程师们发明创造新的产品来满足其性能要求。满足要求就付费采购,如果不能那么对不起。在优势互补下,贯彻落实军民融合发展之路,相信在很多领域可取得突破性进展。

(责编 铃兰)