

# 汇智聚力 加强全国科技创新中心建设

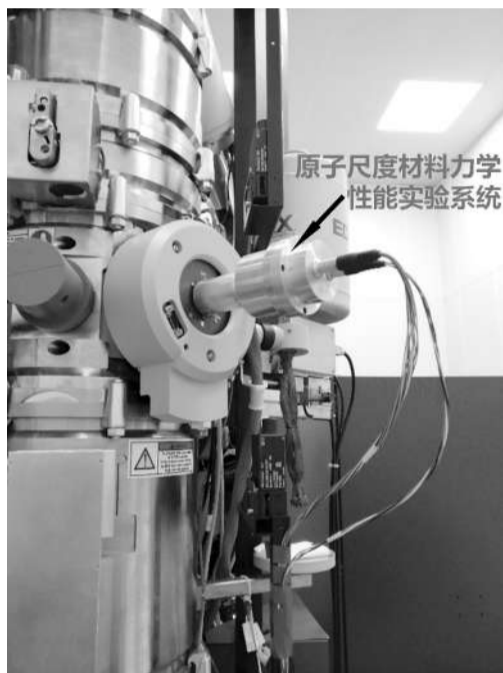
## ——“2016年北京市科学技术奖”获奖项目巡礼(三)

编者按 基础科学研究是新技术、新发明的先导和源泉,是科技与经济可持续发展的坚实基础。放眼全球,新一轮科技革命和产业变革加速演进,基础研究到产业化的周期越来越短,界限日趋模糊,创新链与产业链的衔接越来越紧密。加强基础研究和原始创新,提升国家科技整体实力和核心竞争力,是北京全面服务国家创新驱动战略的重大历史责任。

在2016年度的北京市科学技术奖获奖成果中,就涌现出了一批具有影响力的前沿性基础研究成果,涵盖信息科学、基础材料、生命科学、生物医学、量子物理、农业生物遗传等诸多领域,体现了北京基础研究的雄厚实力和创新能力。这些成果推动了新兴学科和交叉学科的进步,为解决首都经济社会可持续发展和改善民生的若干瓶颈问题奠定了可靠的科学基础,为产业发展储备了原创性成果,对提高自主创新能力、持续创新能力发挥着越来越重要的作用,培养了一批引领国际科学前沿的领军人才和世界一流水平的科学家。本期我们将为您推荐其中的两个优秀获奖项目。

# 在原子尺度揭开结构材料超高强度与超高韧性的面纱

禾斗

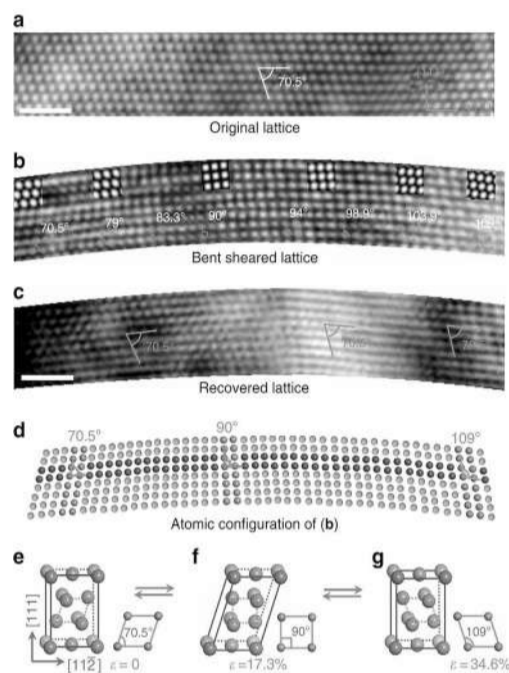


原子尺度材料力学性能实验系统

大飞机、高铁、发动机、桥梁等的力学承载结构材料,都是由材料的不同性能而发挥着关键作用。众所周知,材料的微观结构决定了材料的宏观物性及其功能;而材料的微观结构则是由组成原子之间空间排列的晶体结构所决定。如何了解调控原子之间的晶体结构,是材料微观结构研究的重要课题和科学前沿。

由于原子间的排列距离大约为2-3埃(0.2-0.3纳米),相当于头发丝的十万分之一,因此如何从物理上能够看到原子,探索原子或其团簇在外力作用下的演化规律,并在亚埃尺度精确操控由原子组成的结构材料一直是研究者追求的目标。

由北京工业大学和浙江大学组成的“材料弹性微



观机制研究团队”经过13年不懈的努力,发明了国际上该领域独有的“原子尺度材料力学性能实验系统”和相关技术,为解决这一世界难题提供了新的研究途径。

该实验平台的“力学微驱动器”可以在电子显微镜下精确施加外力,驱动微纳米结构材料变形,并在原子尺度观察原子及其团簇的演化规律。该技术填补了多项国际领域空白,部分实验成果验证并发展了百年的理论预测,实现了技术与理论上的双突破。该项研究大幅度拓展了材料性能的提升空间,为提高国家重大基础材料与先进材料的研究搭建了新的科学实验测量调控系统,该研究取得国家发明专利24项,国际专利4项,在2016年度北京市科学技术奖评选中,荣获一等奖。

### “原子眼”与“力学智能手”的完美结合

原子是组成固体物质的基本单元,它的组成、排列方式决定了材料的宏观性能。材料的力学性能是许多关键结构材料应用的基础,例如:大飞机、高铁、桥梁、汽车结构件,也在许多功能性器件中起关键作用。如果能够精确认知原子在外力下的运动和演化规律,就可以优化乃至创新材料设计,大幅度提高材料的性能。

自1803年道尔顿提出原子基本粒子理论至今已经过去200余年,人们试图观察、认知并操控原子的愿望与实践持续至今。透射电子显微镜是利用电子与原子相互作用,将被观察的物体放大100万倍以上,直接看到组成材料的原子排布及组成。

经过百年的不断发展,电子显微镜的“视力(空间分辨率)”逐步提高,可以达到亚埃尺度(千亿分之一米)。然而,这种显微镜虽然有好的“视力”,却缺乏可以操控原子的“力学智能手(微驱动器)”。

一直以来,国际上许多科学家都在尝试给这种显微镜安装“力学智能手”,但以现有的商业化技术,一旦给显微镜安装“力学智能手”后,会导致显微镜的“视力”严重下降,难以实现精准观察。因此,实现原子的精准操控和观察,认知外力作用下原子的演化规律是一个世界性的实验瓶颈技术。

### 纳米材料超常力学性能的“面纱”被揭开

纳米材料是材料世界的后起之秀,它是指在三维空间中至少有一维是纳米尺寸(0.1-100nm)的材料或由它们作为基本单元构成的材料,被誉为21世纪最具潜力的新型材料,纳米材料的力学性能有可能达到材料的性能极限,并拥有材料不具备的特殊优异物理化学性质。纳米多晶材料中原子的运动和演化规律,在过去仅能通过计算机模拟进行分析,模拟的准确性依赖于原子间作用势的准确程度等。“原子尺度材料力学性能实验系统”的成功研制帮助研究团队逐一揭开纳米材料超常力学性能的“面纱”。

团队首次揭示了多晶纳米材料力学变形过程中原子的错排有律可循,实验发现纳米晶内部原子错排排列的极限尺寸小于理论预测的0.4%-0.6倍。这一发现说明多晶材料的极限强度可再度提高30%-50%,将推动更高强度结构材料的设计和发展。

### 让材料研究如虎添翼

半导体材料是信息材料世界中的“当家花旦”,硅则是那颗最耀眼的明珠,它支撑着半导体工业的发展。我们日常生活中的电子产品无一例外的与硅紧密相关。然而,硅材料像玻璃一样非常容易破碎。如何使得硅像金属一样柔韧并在纳米尺度进行精确加工是持续了近60年的重大科学问题。它直接决定了我们的电子产品的寿命、容量、运算速度以及是否可以突破摩尔定律的制约。

利用“原子眼”与“力学智能手”揭示其原子排列规律的奥秘:发现硅在小尺度下及外界辅助条件下,具有大应变能力,可以像金属材料一样柔韧,具备塑性变形能力,其应变能为大体积硅材料应变的1000倍,具有潜在的机械加工特性。这种神奇的现象,在纳米氧化硅玻璃、碳化硅中得以发现。

课题组对这类问题加以总结,揭示了一系列半导体材料的原子错排机理。为脆性材料的加工和应用提供了新思路,为受摩尔定律控制的半导体工业及器件的机械加工开辟了新途径。

### 让晶体材料展现类似橡皮行为的超大弹性应变

在晶体材料领域,科学家们一直有一个问题,晶体材料的最大弹性变形量是多少,这直接决定人类可以在多大程度上调控材料的性能。在近100年前,理论学家们就预测材料单轴拉伸变形量能达到10%左右,复杂领域条件下晶格应变可达17%。

然而,这个理论从未被实验证实。100年来探索从未停止,直到2014年,课题组开发并利用“原子眼”与“力学智能手”在国际首次实现了金属铜纳米线拉伸变形的原子操控,发现铜纳米线的弹性变形量可达7.2%。国际著名期刊Science撰文评价“这是金属材料中迄今能够实现的最大单轴拉伸弹性应变”。

随后,团队发现这种类似的原子弹性切应变在镍李晶纳米线中可达34%,是金属材料晶格应变极限的10倍,该实验验证并解决了近百年前的理论预言难题。这些发现发展了晶体材料弹性变形及强度理论,将应变工程的应变极限提高了10倍。

通过对材料原子结构的应变调控,金属材料外在的物理性能(如强度、韧性、能带结构等)都会随之变化和提。航天飞机、轮船、高速列车将有更持久和更安全的服役性能,也会大幅度节约能源。

### 为国家重大需求的基础材料和先进材料研发保驾护航

在过去的十几年里,团队利用独特的设计理念,在国际领域原创性地发展了材料变形行为的原子操控技术,为人类进一步揭开材料世界里原子尺度演化规律的面纱提供了技术支撑。随着这项关键技术的应用和新材料的研制成功,不仅可以打破国际上少数国家在关键材料出口方面的垄断,同时为中国高端材料的研发和智能制造的进步,跻身世界材料研发强国,作出应有的贡献。

原子尺度材料力学性能实验测量调控系统为发展高强度轻质材料,甚至在复杂极端环境下更多五彩缤纷的优异特性的材料奠定了国际领域独有的先进实验平台基础。

# 破解果实衰老腐败的秘密

本报记者 申明

“离本枝一日而色变,二日而香变,三日而味变。”唐朝时杨贵妃想吃上一口新鲜的荔枝,需要官方驿站快马加鞭。而如今荔枝、香蕉、猕猴桃,这些容易“烂”的水果经过科学的保鲜方式,从千里之外可以活色生香地出现在我们的餐桌上。

当你在大快朵颐鲜美的水果时,有没有想过为什么有的水果采摘之后,很快会变质呢?为什么有些水果采摘后越早吃味道越好?而有些水果却要放一放,才好吃呢?水果衰老与品质变化的秘密到底是什么?我们能否延长水果保鲜时间呢?

这些生活的常识问题,看似有些“钻牛角尖”,但背后却蕴藏着巨大的科学意义和经济价值。

据了解,我国是世界水果生产和销售的第一大国,水果产值达到5000亿元/年,占种植业的20%,在农业中具有举足轻重的作用。但是,我国每年有20%-40%新鲜水果因采后品质劣变而失去商品价值,直接经济损失超过1000亿元。

果实品质保持受制于自身成熟衰老的调控,也与病原菌引起的腐烂密切相关。因此,深入系统研究果实成熟衰老调控机理与病原菌致病机制,不仅对丰富果实采后生物学知识具有重要意义,而且为研制防病

保鲜新技术、减少果实采后损失和确保果实优质安全品质奠定了理论基础。

对此,中国科学院植物研究所田世平研究组通过二十年的不懈研究,终于破解了果实成熟的节点基因RIN的作用机制,阐明了RIN通过直接控制果实芳香物质代谢及泛素/蛋白酶体途径调控果实成熟,为认识RIN调控果实成熟与品质的分子网络提供了新证据。这对于揭示果实成熟调控网络,研制新型果实贮藏保鲜技术具有重要意义。在2016年北京市科学技术奖评选中,该项目荣获二等奖。

### 采摘下来的水果依然有呼吸

想了解水果为何会腐败,首先得知道,与人一样,水果也会“呼吸”。

其实水果被采摘下来后并没有死,它内部的生理活动并不会马上停止,它们还有呼吸,还“活着”。研究发现,不同种类的水果,其呼吸具有不同的特点。根据呼吸模式的不同,可以将果实分为“跃变型”和“非跃变型”两类。

“跃变型”的果实,从成熟到衰老的过程中,有一个呼吸强度快速增加、内源乙烯大量产生的阶段,称为呼吸高峰,经过呼吸高峰后,果实就会很快衰老。”中国科学院植物研究所研究员田世平告诉记者,呼吸跃变是指某些肉质果实从成熟到衰老的一种生理过程,之后果实将进入衰老。

苹果、香蕉、芒果、猕猴桃、西红柿等,都属于跃变型果实。跃变型果实有一个“后熟”的过程。当内源乙烯大量产生时,由于乙烯是一个调控果实成熟启动的重要因子,果实内部就会发生一系列变化:淀粉转变成糖,有机酸分解,果实酸度下降,果胶酶活性提高使果胶软化,果肉变软,这样果实就变得很好吃了。

“我们都知道,从树上采下的柿子要放一段时间再吃就没有涩味了,就是这个道理。”田世平说。

与跃变型果实不同,另一类果实在其发育过程中没有呼吸高峰的出现,呼吸强度在其成熟过程中缓慢下降或基本保持不变,此类果实称为非跃变型果实,贮藏这类果实时,采收成熟度可适当晚些。“葡萄、柑橘和草莓就是非跃变型果实。”田世平说。

在呼吸跃变期间,果实体内的生理代谢发生了根本性的转变,是果实由成熟向衰老转化的转折点,所以,跃变型果实贮藏时,一定要在呼吸跃变出现以前进行采收。

果实成熟调控机制研究对提高果实品质、优化贮藏保鲜技术具有很大的指导意义。近年来,有关果实成熟的转录调控已有较多报道,鉴定到多个重要的转录因子,对它们的作用机制也进行了较多研究。然而,人们对果实成熟的转录调控知之甚少。

首次阐释控制果实成熟的机制

“以前大家都认为果实衰老与乙烯相关,但其中的调控机制并不完全清楚,可谓知其然,不知其所以然。”田世平告诉记者。

近年来,随着调控果实成熟的多个转录因子的鉴定,成熟转录调控已成为国际研究热点。其中RIN是MADS-box转录因子家族成员之一,位于乙烯信号的上游。RIN突变后,果实不能正常成熟,说明RIN是调控果实成熟的节点基因。然而关于RIN调控的分子网络和作用机制并不完全清楚。

课题组通过比较野生型和RIN突变体中差异表达的蛋白,鉴定到126个潜在的RIN作用靶标。利用染色质免疫共沉淀技术(ChIP)和凝胶阻滞(EMSA)实验揭示其中6个基因的启动子区与RIN发生特异性结合,其中3个芳香物质代谢(LOX)途径的关键酶基因是首次报道。

“这个研究结果首次阐明了RIN通过直接调控多个下游靶基因来控制果实芳香物质的形成和控制果实

成熟。”田世平说。

RIN既然作为果实成熟的节点基因,必然也能调控众多靶基因和相关的代谢途径。课题组再接再厉,在前期研究的基础上,进一步通过细胞核定量蛋白质组学技术分析了受RIN调控的其他靶标基因,在差异表达的127个蛋白中,证明了泛素/蛋白酶体途径中2个重要的泛素结合酶基因是RIN的直接靶标。

“这两个基因沉默后,果实不能着色,成熟延迟。”田世平说,在植物中,泛素介导的蛋白质降解途径已被证明参与多个重要的细胞过程,包括激素信号途径、生长发育和抗病反应等,而本研究首次报道泛素/蛋白酶体途径中的重要成员E2s参与了果实成熟调控。

### 探明诱发果实衰老的诱因

衰老是继成熟之后果实生命过程的重要阶段,直接影响果实采后品质保持。因此,探明诱发果实衰老的诱因对研制有效的保鲜技术至关重要。

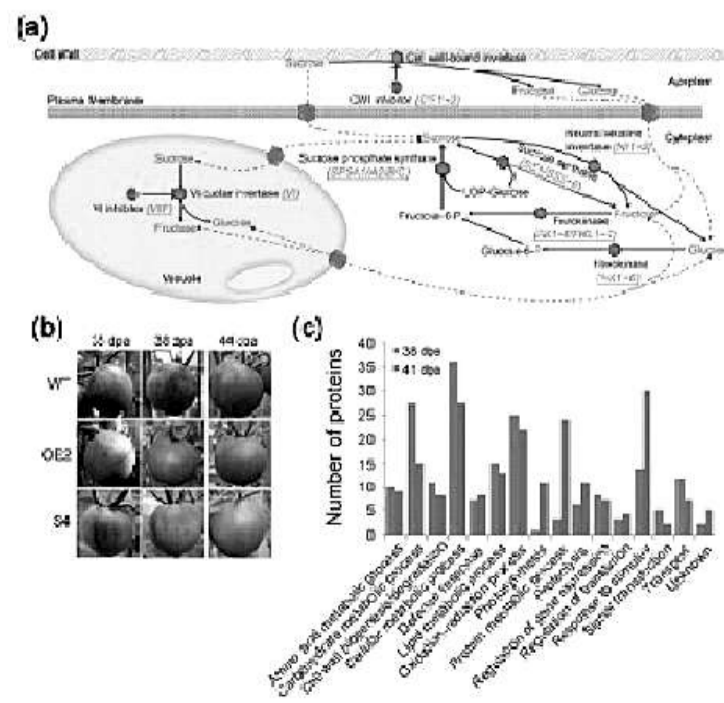
“我们从人体衰老机制的研究中得到了启发。”田世平告诉记者,“许多研究证明了活性氧(ROS)是诱发生物体衰老的重要因子,ROS易攻击蛋白质等生物大分子,使其发生降解或失去生物学活性,而ROS的作用机制一直是亟待探明的科学问题。”

课题组系统研究了果实衰老过程中线粒体蛋白的表达变化,发现在促发ROS产生的氧化胁迫下,许多重要的线粒体蛋白(线粒体外膜蛋白、三羧酸循环相关蛋白以及抗氧化酶蛋白等)将出现氧化损伤,特别是外膜通道蛋白porin的异常变化导致线粒体膜电位改变、外膜破损,破坏线粒体功能,加速果实衰老进程。

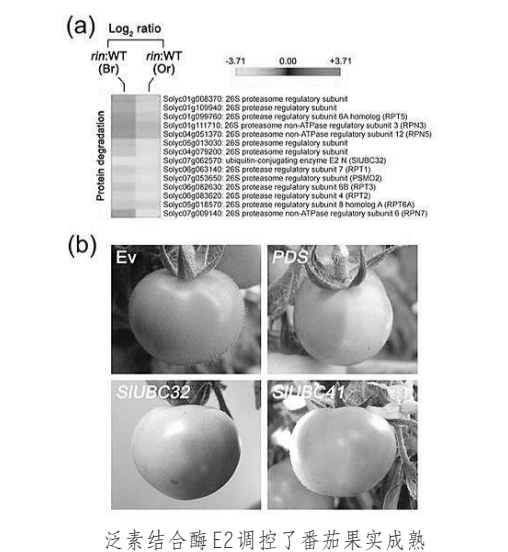
课题组首次揭示了线粒体外膜蛋白porin是ROS攻击的靶标,并明确了参与果实衰老的线粒体蛋白种类、功能及其在线粒体上的分布。

这些结果说明线粒体蛋白的氧化损伤改变了蛋白质原有的生物学功能是促发果实衰老的重要诱因,ROS是通过氧化修饰特定线粒体蛋白,诱发氧化损伤来促发果实衰老。

此外,衰老也降低果实自身的免疫力,使果实容易感染各种病害。为了提高果实自身抗病性和抵御病原菌侵染,课题组还系统研究了水杨酸、茉莉酸甲酯、草酸等外源信号分子对果实衰老抑制和抗病性诱导的效果及其作用机制,发现这些信号分子是通过抑制乙烯合成途径的关键酶活性降低乙烯释放量和呼吸速率,抑制叶绿素的降解,从而延缓衰老;此外,还通过诱发PR和抗氧化化酶和抗相关基因的表达,提高果实的免疫力,抵御病原菌侵染。



番茄液泡转化酶抑制子调控果实成熟。(a)番茄中蔗糖代谢相关基因示意图。(b)沉默或超表达番茄液泡转化酶抑制子SIVIF影响果实成熟。(c)沉默SIVIF影响果实中相关基因的表达。



泛素结合酶E2调控了番茄果实成熟