DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2010.02.005

·学科进展与展望·

重大研究计划"纳米制造的基础研究"综述

王国彪[1] 黎 明[1] 丁玉成[2] 卢秉恒*[2]

(1 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部，北京 100085；
2 西安交通大学机械工程学院，西安 710049)

[摘 要] 纳米技术与生物技术、信息技术并列为21世纪的三大科技，是21世纪高技术竞争的制高点，而纳米制造则是支撑它们走向应用的基础。为提高我国制造业应对未来科技发展的需要，国家自然科学基金委员会于2008年启动实施了"纳米制造的基础研究"重大研究计划。本文介绍了该重大研究计划的立项意义，国内外研究现状、趋势与挑战，科学目标、关键科学问题与重点研究领域，组织与管理措施，以及2009年度项目资助情况，便于公众更好地了解和参与该重大研究计划，促进我国纳米制造及其相关领域基础研究深入开展。

[关键词] 重大研究计划，纳米制造，基础研究，综述

为落实国家自然科学基金委员会(以下简称"自然科学基金委")"十一五"规划制定的13个综合交叉的优先发展领域之一——"现代制造理论与技术基础"的资助方案，加快机械学科前沿性研究领域的发展，自然科学基金委工程与材料科学部于2006年4月启动了重大研究计划的前期立项论证工作，期间召开了几十次的研讨会，重大研究计划的题目也从最初的"先进制造技术中的科学问题"，发展到"45 nm以下特征尺寸电子制造装备的基础科学研究"、"微纳制造的基础研究"等直至"纳米制造的基础研究"。近百位不同领域的专家学者参与其中，他们为"纳米制造的基础研究"重大研究计划最终通过立项作出了重要贡献。通过两年多的前期论证，一方面，认清了机械工程领域基础研究当前所面临的机遇与挑战；另一方面，对纳米制造基础研究的内涵有了明确的认识，厘清了"纳米制造的基础研究"重大研究计划的目标定位[1]。

"纳米制造的基础研究"已通过自然科学基金委"十一五"重大研究计划的立项论证，并于2009年1月21日发布了2009年度项目指南，7月3—6日在长沙召开了项目评审会，9月24—25日在西安召开了2009年度资助项目启动会。这标志着该重大研究计划研究工作的正式展开。在未来6—8年时间内，拟资助1.5亿元左右，用于开展纳米制造及其相关领域的基础研究。

1 纳米制造研究的前瞻性和重大意义

1.1 纳米制造的前瞻性与重要性

(1) 纳米制造是当代科技发展的前沿研究领域

纳米技术与生物技术、信息技术并列为21世纪的三大科技，是21世纪高技术竞争的制高点，而纳米制造则是支撑它们走向应用的基础。据美国国家科学基金会(NSF)预测[2]，未来15—20年，全球纳米技术市场规模将达到每年10 000亿美元左右。美国于1998年推出"国家纳米技术计划(NNI)"，从2005年起3年内联邦政府对纳米科技给予37亿美元的资助，并将纳米制造列为重要研究领域之一。英国、法国和德国等欧洲国家每年对纳米技术的研究投入为5—10亿欧元[3]，其中纳米制造也被列为重要研究领域。日本对纳米制造领域也给予了很大的投入。纳米科学是现代科学的前沿，而纳米制造就是将纳米科学的新发现转变为前沿制造技术。物理、化学等基础科学的研究成果以及信息技术的进步带动了纳米制造技术的发展，而纳米制造技术反过来也推动了相关学科的进一步深入发展。

一个国家的制造技术水平是其综合国力强弱的

* 中国工程院院士.

本文于2010年1月20日收到.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

重要标志之一。纳米制造在信息、材料、环境、能源、生物、医学和国防安全等领域有重要的研究价值和广阔的应用前景，也是我国制造技术发展的重要方向。一些具有国家战略意义的重大工程也对纳米精度制造提出了越来越高的需求。例如，1 kg 重的制导系统陀螺转子，如果其质量中心偏离对称轴 100 nm，则会造成 10 km 的落点误差；空间飞行器对地观测装置的大尺寸高精度光学镜头要求面型制造精度达 3—5 nm。此外，随着纳米制造技术的发展，集成电路(IC)制造集成度和信息存储密度将提高 2 个数量级；新型纳米结构的采用可望大幅度提升太阳能电池的光电转换效率；纳米制造还可为表面电子发射平板显示器(SED)10 nm 以下电子隧穿缝隙结构的实现提供关键的制造方法。因此，随着纳米制造技术的发展，将不断产生更多的新产品和新技术。

(2) 纳米制造是实现纳米结构、器件、系统批量化生产的基础

在 21 世纪内，纳米制造将成为世界发达国家高技术竞争的制高点。生物分子马达、纳米电动机[4]、纳米机器人、分子光电器件、纳米电路、纳米传感器、纳米智能器件和系统不断在实验室出现，展示了诱人的应用前景。纳米制造技术是这些纳米器件走向宏观世界并得以应用的桥梁。从微电子工业的发展对其制造装备的高度依赖性，可以得出的结论是：纳米制造和检测装备是实现纳米产品工业化生产的先决条件，是纳米科技走向纳米制造及批量化应用的关键和基础。

回顾历史，亚毫米级制造精度使蒸汽机革命在英国成功，并使英国一度成为日不落帝国；微米级制造精度适应了电气和电子产品的制造，造就了美国、欧洲、日本的经济快速发展；如今，纳米科技已开启了一个崭新的高科技时代，而纳米级精度制造技术将成为纳米科技走向产业化应用的重要手段。中国现在已经成为一个制造大国，但并非制造强国。纳米制造为我国提供了一个重要的历史机遇，可望促使我们实现向制造强国的转变。因此，抓住机遇，在纳米制造研究领域形成优势，就有可能为我国在纳米制造时代的国际战略竞争中赢得优势提供支撑。

1.2　纳米制造的特征

纳米制造已远远超出了常规制造的理论和技术范畴，相关技术的发展将依赖于新的科学原理和理论基础，依赖于多学科交叉融合。纳米制造将从牛顿力学、宏观统计分析和工程经验为主要特征的传统制造技术，走向基于现代多学科综合交叉集成的先进制造科学与技术。其主要特征如下：

(1) 制造对象与过程涉及跨(纳/微/宏)尺度

纳米制造的跨尺度不仅表现在器件的纳/微/宏互连上，同时制造的工艺过程与装备也具有显著的跨尺度特点。如在微系统上制造纳结构及在纳米精度表面制造中，产品的几何尺寸是宏观的，但却要在纳/微/宏观尺度上实现制造体的粗糙度、波纹度和轮廓精度达到纳米乃至亚纳米级，均涉及到跨尺度科学问题。

(2) 制造过程中界面/表面效应占主导作用

纳米制造中，界面/表面效占居主导地位，纳米级的材料去除加工、纳结构生长中的化学反应、纳米空间约束成形中的液体流变特性变化等一系列过程均发生在固/液/气的作用界面上。

(3) 制造过程中原子/分子行为及量子效应影响显著

随着制造对象尺度和精度趋向纳米量级，制造过程中材料的原子、分子行为和量子效应已经影响到制造的方法与工艺，直至制造的结果。制造科学的研究由宏观实验统计转向了微观粒子的作用机制研究，新的研究方法和手段也就越来越重要。

(4) 制造装备中微扰动的影响显著

纳米制造技术对制造装备提出了更高的要求，制造装备要实现纳米级定位、对准、套准及其操作，在扰动量级与工作参数量级相当的情况下，时滞、畸变和非线性等因素的影响将会变得十分突出，纳米制造装备需要新的设计和制造原理。

1.3　纳米制造对制造科学和制造技术发展的推动作用

纳米制造技术的发展使制造对象由宏观进入到微观，这不仅大大拓宽了制造技术的尺度范围，开辟了新的领域，大幅度提升制造的精度和质量，同时也将发展新的制造理论和方法，对促进学科交叉起到积极的推动作用，使制造科学的研究更为深入和完善。从面向传统的"块体制造"模式的基础理论及关键技术、工艺与装备原理的研究，逐步转向基于物理、化学、生物等效应的原子、分子尺度的微/纳制造科学的研究。

总之，纳米制造是微观机理研究和宏观系统设计与控制相结合的多学科交叉融合的前沿研究领域，对国家战略产业的发展有重要支撑和引领作用。

2　国内外研究现状、趋势与挑战

制造技术不断向精细化、信息化方向发展，纳米

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

制造基础研究更是引起了国际上的高度关注，已成为发达国家战略高技术竞争的制高点，并对该领域投入了巨大的人力和财力，开展相关的基础研究。

2.1 研究现状、发展趋势与挑战

(1) 制造理论由宏观走向微观

在纳米制造中，界面/表面效应、尺度效应以及微观现象与工艺参数间的关系已经成为研究重点，一些新的制造原理和制造方法相继出现，如电化学机械平坦化(ECMP)[5]、高能束去除加工[6]和电场诱导成形[7]等，其作用机理涉及到分子/原子的相互作用。因此，支撑传统制造切削与成形技术的晶粒变形和晶界滑移理论已无法适用于原子尺度下的材料形变和去除规律。目前，许多纳米加工技术的机理还不完全清楚，加工的理论体系很不完善。在制造对象的尺度从宏观走向微观时，原有的以牛顿力学和统计力学为基础的宏观制造理论已开始走向以分子物理、量子力学和界面/表面科学为基础的纳米制造科学。只有揭示出纳米制造中的微观加工机理，才能引领制造科学和制造技术从宏观到微观的发展。

因此，挑战之一是：制造理论由宏观走向微观时，需要揭示纳米制造中原子迁移机制与纳米尺度下物质结构的演变规律。

(2) 制造技术(精度、尺度)由微米走向纳米

全频谱纳米精度的超精密光学镜[8]、纳米器件等加工精度或特征尺度已经达到了纳米量级，制造的精度和尺度由微米发展到纳米，这是制造理论和技术的一个飞跃，它将赋予产品更多、更新的性能，而且可使产品运行能耗大幅度降低。纳米制造技术的关键是将能量聚焦在纳米空间，物质运动控制在纳米精度，形成功能特殊、性能优异的产品，并且制造过程具有准确的再现性。因此，需要创新和发展一系列新的制造原理、方法、技术和装备，同时也对制造装备提出了更高和更苛刻的要求。在纳米尺度下，当外界微扰动与制造过程中的某些参数处于同数量级时，微扰动(温度和空气波动、环境振动等)引起的制造误差将变得十分突出。如在扫描电子束干涉光刻方法加工中，微小扰动引起的误差占总误差的45%左右。同时，对环境的精确控制要求也接近当今技术的极限水平。

纳米制造的制造误差对器件和结构的物理性能有显著影响。当器件结构的尺度达到了纳米量级时，一些新的物理量或几何量公差(如尺寸公差、线边缘粗糙度等)需要重新定义[9]；现有的公差理论来自机器装配的互换性概念，已不适合对纳米器件的形状、表面形貌和相应性能进行分析与评定。纳米制造的精度理论和体系、纳米结构的物理性能和机械性能的表征、以及纳米器件可制造性和可检测性的评价，都是当前尚未解决的难题或研究的热点问题。

因此，挑战之二是：当制造技术从微米走向纳米时，必须建立新的制造原理和方法，并实现纳米尺度下结构和性能的精确测量和制造装备的高精度控制。

(3) 纳米器件由实验室走向产业应用

纳米技术已展现出巨大的工程价值和广阔的应用前景，但绝大多数纳米结构和纳米器件仍停留在实验室原型(prototype)阶段。一些在国民经济和国防安全中有重要影响的新型纳米结构产品，如效率高达30%以上的新型纳结构太阳能电池、下一代平板显示器和生化传感器等，由于缺乏批量化、低成本和质量一致性的纳米制造技术的支持而难以面市。

目前，已被广泛认同的批量化的纳米制造技术主要有纳米压印技术[10]、LIGA技术[11]和自组装技术[12]等。例如，随着纳米压印结构趋向大深宽比的发展，界面物理效应成为重要的影响因素，尺度效应明显增强[13]，纳米尺度的约束成形规律尚有待进一步探索。在SED制造中，由于利用了6—8 nm缝隙的电子隧穿效应，其阳极电压显著降低，功耗过高和发热现象得以改善，并使画面保持清晰。此纳米缝隙可望利用纳米压印技术制造，但纳米空间约束流变问题一直是纳米缝隙批量化制造中的瓶颈问题。

因此，挑战三是：如何建立批量化纳米制造新原理与新方法，发展纳米批量化制造新工艺与新装备，使纳米器件从实验室原型走向产业化应用。

综上所述，纳米制造既面临机遇，更面临挑战。如何使纳米科技的科学设想成为造福人类社会的工程产品？如何使实验室内纳米结构与器件的制备技艺成为可进行批量化生产的制造技术？如何使纳米尺度下的现象和规律发展成为纳米制造的新原理和新方法？这些正是纳米制造科学与技术必须面对和需要解决的重大问题。

2.2 国家其他重大研究计划

从国家各部委的研究计划来看，“973”计划设立了纳米材料和器件相关的项目，如“纳电子运算器材料的表征与性能基础研究”项目，以发展新一代纳电子运算器为主要目标，重点围绕纳电子运算器的物理基础、基本单元结构、以及基本加工组装技术等相

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

关科学问题开展研究；“纳米尺度下材料性能(原位/外场下)的表征及科学问题的研究”项目，旨在发展新的纳米材料、功能、器件直至技术；“纳米材料和纳米结构的性能与应用基础”项目，目标是发展出若干种具有实用价值的纳米材料与纳米结构，为纳米材料的性能研究和纳米器件应用提供基础。“高性能电子产品设计制造精微化、数字化新原理和新方法”项目，旨在为我国高性能电子产品的制造实现源头创新、关键技术突破和跨越发展提供基础。这些“973”项目的研究基本不含该重大研究计划定义的纳米制造内容。国家“863”计划先进制造技术领域设立了“极限制造”专题，则着眼于 MEMS 技术的应用开发。国家中长期科学技术发展规划中设立了 IC 制造装备技术的重大专项，“十一五”期间的研究目标是研发 90 nm、65 nm 装备的样机及 45 nm 装备的探索。自然科学基金委部署了“纳米科技基础研究”重大研究计划，偏重材料研究及纳米器件与系统的设计。

近 10 年来，国家自然科学基金面上和重点项目对于纳米制造相关研究领域一直保持着相当力度的资助，并且积累了较丰厚的研究基础。据不完全统计，在表面科学和摩擦学、超精表面加工、磁记录系统和磁头飞行动力学、高频响机械系统精密定位和复杂机电系统耦合理论等研究方向，共资助面上项目 60 余项，重点项目 10 项，国家杰出青年科学基金项目 12 项，创新研究群体 4 个。主要研究成果包括：单质材料超光滑表面制造，实现了亚纳米精度；去除法成形，实现了面型精度 5 nm 以下的制造；沉积制造，制备了 2 nm 的 DLC 保护膜；纳米成形，完成 30 nm 线宽的结构；运动平台 10—12 g，2 μm 定位精度，支持 10 ms 的快速键合。

3　科学目标、关键科学问题与重点研究领域

3.1　科学目标

美国国家科学基金会将纳米制造定义为：纳米制造是构建适用于跨尺度(micro/meso/macro)集成的、可提供具有特定功能的产品和服务的纳米尺度(包括 1 维、2 维和 3 维)的结构、特征、器件和系统的制造过程。它包括自上而下和自下而上两种制造过程。

该重大研究计划通过机械学、物理学、化学、生物学、材料科学、信息科学等相关学科的交叉与融合，探索基于物理/化学/生物等原理的纳米制造新方法与新工艺，揭示纳米尺度与纳米精度下加工、成形、改性和跨尺度制造中的尺度效应、表面/界面效应等，阐明物质结构演变机理与器件的功能形成规律，建立纳米制造过程的精确表征与计量方法，发展若干原创性的纳米制造工艺与装备原理，为实现纳米制造的一致性与批量化提供理论基础。

3.2　关键科学问题

针对国内外纳米制造科学与技术的发展现状和进一步发展所面临的挑战，需要开展以下 4 个关键科学问题的研究：

(1) 科学问题：纳米制造中原子/分子的迁移机制

随着高密度信息存储、超精密光学工程和新能源利用等领域的发展，提出了全频谱(面型、波纹度和粗糙度)和异质表面的纳米制造精度的要求，亟需探索新的制造原理、方法和技术。需要从物质的电子、原子和分子与能量束(光子、离子和粒子)之间的作用机制出发，揭示原子迁移和原子尺度下材料去除加工的规律，以建立新的制造原理及工艺路线；需要解决超低应力的精确实现和超低应力下材料的高效去除问题；需要探索表面制造过程分子与外电场的作用机制、被加工材料表层原子迁移机制、表层原子结合力的弱化机制以及极性分子与氧化分子的择优占位等问题。这些科学问题的解决是技术突破的关键所在。例如，高能束加工在纳米制造(辐射电池、军用高分辨率镜头、光刻机镜头等的制造)中占有非常重要的地位，其中飞秒激光就是实现纳米加工的一种重要手段。由于飞秒激光能量在飞秒时间(10^{-15} s)内高度集中($>10^{13}$ W/cm^2)，光子可使被加工物质电子的瞬间温度上升到上万度，并引起晶格振动，量子效应非常明显。目前，飞秒激光加工中材料剥离过程的相变机制尚不清楚，缺乏准确的模型来描述激光与物质的作用过程，激光的聚焦和能量域值无法确定，严重地制约了飞秒激光加工的分辨率、精度、效率和工艺稳定性的提高。

(2) 科学问题：纳米结构的外场诱导成形原理

纳米结构特征的成形是纳米制造的重要任务。现有的制造技术(如纳米压印、LIGA 技术等)，随着纳米制造结构特征尺寸的减小，界面的物理、化学性能对材料表面产生很强的约束作用，材料的流变特性显示出明显的尺度效应，严重制约了纳米结构制造质量和精度的提高，外场诱导可望成为纳米结构成形批量化制造的重要途经。

纳结构的自组装、模板法诱导生长及在微结构上制造纳特征是纳米器件和具有纳特征的微系统制

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

造的重要方法，但纳结构的生长成形中，生长界面的微环境(化学气氛、温度和压力等)将影响纳米结构生长的方向和速率。因此，研究微环境对纳结构生长的影响机理，实现微环境的精确控制，是控制纳米结构定域、定向和定尺度生长的关键因素。

(3) 科学问题：纳米制造系统的微扰动与响应

纳米制造过程对其制造装备提出了苛刻的性能要求，如大行程与高精度、高加速度与复杂运动轨迹、近零摩擦驱动与稳定性等。在纳米制造装备中，关键技术包括纳米定位技术、纳米探针技术以及纳米制造的环境控制技术。要达到纳米制造装备对制造工艺的精确要求，需要探索近零摩擦运动副设计原理，以及制造装备驱动机构、传感和振动主动控制的新原理与新方法。

(4) 科学问题：纳米制造误差与精度理论

纳米制造误差和纳米精度理论是纳米制造科学的重要研究内容。建立适合纳米制造的公差理论是纳米制造产品物理性能一致性、工艺经济性、过程高效率的保障。常规的公差理论是基于互换性概念建立在宏观尺度和传统加工工艺的基础上，纳米制造的误差控制是基于对器件性能的保证，所以传统制造的精度设计方法无法延伸到纳米制造尺度。如能量核聚变装置中光学器件的型面精度要求达 3—5 nm，光刻机的光学镜头型面精度要求达 0.25—0.15 nm。此时，测量的不确定性凸现出来，测量方法对测量结果有显著影响，对精度标准的溯源提出了前所未有的挑战。目前，长度的溯源标准为光波波长，已无法胜任 pm 级的精度溯源，需要探索新的测量基准。此外，如要进一步提高制造精度，不仅将大幅度提高制造成本，甚至目前现有的加工方法无法达到预期的制造精度要求，而器件性能的增益与制造精度并非线性相关。如何在可制造性与纳米器件的工作性能之间选优，制定批量化纳米制造的质量标准，是纳米制造必须解决的基础问题。

3.3 重点研究领域

围绕科学目标及关键科学问题，该重大研究计划将在以下 5 大领域开展基础研究工作，即(1) 基于物理/化学/生物等原理的纳米尺度制造——主要研究纳米结构生长、加工、改性、组装等纳米制造新方法与新工艺，纳米尺度制造过程中结构与器件的性能演变规律。(2) 宏观结构的纳米精度制造——主要研究宏观结构的纳米精度制造的新原理、新方法与新工艺，纳米精度制造中原子/分子的迁移机制、表面/界面效应，纳米精度表面加工理论。(3) 纳/微/宏(跨尺度)制造——主要研究跨尺度制造新原理与新方法，跨尺度制造中的界面行为与多场调控机制，跨尺度结构与器件的排列、操纵与集成。(4) 纳米制造精度与测量——主要研究纳米尺度的计量溯源与误差评价，纳米制造精度设计理论，纳米结构的几何参数、机械/力学等物理性能的测量与表征。(5) 纳米制造装备新原理——主要研究纳米制造装备的微扰动作用机制、非线性动力学行为、与响应畸变特性、能量转化方式与工艺过程控制，纳米精度运动的驱动与控制新方法。

4 组织与管理措施

4.1 工作方针

工作方针："需求做牵引、基础为基点；思路要新颖、探索是根本；储备于未来、跨越再提升"，即该重大研究计划立足于基础研究，注意处理好与国家重大专项、"863"、"973"等计划的区别与衔接。

跨越发展理念：进一步夯实我国纳米制造技术科学研究的支持基础。对选定的关系到纳米制造未来发展的若干关键基础研究领域，集中力量，明确有限目标，重点突破，使纳米制造关键科学问题的基础研究在国际上占有一席之地，并产生重要影响。

集成升华：通过项目群和适度提高资助强度等方式，聚集不同领域的专家队伍，围绕纳米制造所涉及的重大科学问题开展研究，为在不同领域的科技人员提供基础研究的平台和学科交叉研究与交流的环境，以实现计划项目成果的不断提炼和升华，促进源头创新，达到集成升华的目的。

4.2 项目的设计方案

该重大研究计划针对纳米制造的关键基础问题组织前瞻性、交叉性的研究，发布项目指南，并按年度计划分批立项。根据"以科学问题为先导"和"择优支持"的原则，对具有比较好的创新性研究思路或比较好的苗头，但尚需一段时间探索研究的申请项目将以"培育项目"方式予以资助，研究年限为 3 年，资助强度不低于 50 万元/项；对具有较好研究基础和积累，有明确的重要科学问题需要进一步深入系统研究，同时体现学科交叉特征的申请项目将以"重点支持项目"的方式予以资助，研究年限为 4 年，资助强度约为 200—300 万元/项。进展优秀或成果突出的项目，经项目负责人申请和评审专家组讨论，可延续资助。在"培育项目"和"重点支持项目"资助的基础上，瞄准 2—3 个有限的载体目标，本着"有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展"原则，拟资助

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2—3 个重大集成项目。

4.3 指导及管理组织

计划的组织实施要充分体现“依靠专家”、“科学管理”的宗旨，实施以专家组指导与管理专家相结合的管理模式。设立指导专家组，负责重大研究计划的科学规划、顶层设计和学术指导；设立顾问组，加强研究计划的顶层设计以及统筹该研究计划与国家其他计划的联系、衔接和区别；设立管理工作组，在分管委主任的领导下，负责重大研究计划的组织及项目管理工作；在指导专家组组长单位设立重大研究计划秘书处，建立“纳米制造的基础研究”重大研究计划的网站，向公众及时公布本研究计划的立项情况、具体研究进展及相关事宜。

4.4 实施原则

(1) 把握基础性、前瞻性和交叉性的研究特征，体现国家重大需求和科学前沿的有限目标；(2) 实行专家学术指导与项目资助管理相结合的管理模式；(3) 顶层设计的目标导向与科学家自由探索相结合，遴选新项目与集成升华的项目相结合。

研究计划的每一资助项目都应本着有限目标的原则，以科学问题为先导，集中力量，重点突破。各项目应充分考虑其在整个研究计划中的作用，为研究计划整体科学目标的实现做出贡献。鼓励项目在实施过程中开拓新理论、新方法、原创技术。项目实行滚动管理，对进展状态差的项目，经专家委员会讨论后可建议终止执行。

4.5 学术交流

为加强研究计划不同项目负责人及研究人员之间的联系和学术思想、信息的及时交流，促进新的科学研究群体的形成及多学科交叉、融合与集成，将举办如下学术活动：

一年一次的学术交流会和工作会议。指导专家组(包括秘书处)、顾问组、管理工作组和全体研究计划项目负责人参加。交流研究成果与心得，研讨项目执行过程中出现的有关问题，以保证项目的顺利进行。

专题研讨会。以项目群为活动重点或邀请有关项目负责人、产业部门、制造领域和交叉领域的有关专家参加，目的是进一步增强基础研究与应用技术问题的结合，进一步促进项目组之间的实质性交流。

加强与纳米制造相关的国家其他计划的交流与研讨，使在本研究计划的实施过程中，处理好与国家重大科技专项、“863”、“973”等计划的区别与侧重，加强协调和互补，做好衔接、统筹规划、联合攻关，发挥整体优势，实现重点突破。

组织指导专家组和管理工作组对相关优势科研单位进行学术考察，特别是对承担重点项目的单位进行学术考察与评估，确保项目的集成升华。

4.6 国际合作与交流

强调国际学术合作与竞争，鼓励项目组在国际高水平杂志上发表学术论文，组织召开国际学术会议，以扩大本计划的研究成果在国际学术界的影响。本研究计划在强调广泛的国际合作的同时，贯彻“以我为主”的原则，以突出我国科学家在重大科学问题上的学术地位。该重大研究计划将组织对欧洲、美国、日本的学术访问和考察，加强与这些国家同行的学术合作工作，聘请相关专家参加学术研究，积极推动与这些国家的学术交流与合作。如组织开展 NSFC-NSF“纳米制造”双边研讨会，目前已成功举办过两届(2008 年 9 月，天津；2009 年 10 月，Nebraska Linclon)，进一步加强了“中-美”两国国家科学基金会在纳米制造领域基础研究工作的交流与合作。

4.7 建立“联合实验室”

纳米制造相关的研究工作涉及领域广泛，需要价格昂贵的各类实验设备、软件及专业技能。国内相关的研究机构在纳米制造相关领域建立的实验室软硬件资源上已各有特色。但各单位仅依靠独自的软硬件资源升级、增购方式来支持不断更新的纳米制造研究任务，并不是一条有效而经济的途径。因此，围绕本计划的实施，联合国内纳米制造研究相关的特色实验室资源、形成制度性的开放运行机制，可以有效支援本计划各类资助项目的研究工作，达到各实验室软硬件设施、实验技能、实验发现和知识的共享。

联合实验室拟由国外内约 10 家成员实验室组成，形成一定约束力的虚拟式组织方式和实质性联合开放运行效果。成员实验室必须拥有纳米制造相关的较完备的实验室软硬件资源、良好的管理机制，并已经初步具备了制度性的开放式运行机制。成员单位将签署具有适当约束力的实验室联合和开放管理章程，并制定细化的运行管理条例。

5 2009 年度项目综述

5.1 申请与资助情况

2009 年共收到来自 86 家单位的 233 份申请，分别涉及数理科学部、化学科学部、生命科学部、工程与材料科学部和信息科学部。其中，43 份为重点项目，190 份为培育项目。项目遴选的基本原则是面向国家发展重大战略需求，体现纳米制造的前沿

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

基础，突出纳米制造的批量化、低成本、一致性等特点；围绕纳米制造中的科学问题与关键技术基础，鼓励多学科交叉联合；鼓励开展原创性的探索研究；鼓励开展实质性的国际合作研究。经过一系列评审程序，最终资助6项重点项目（平均资助经费为263.33万元/项），培育项目36项（平均资助经费为50.44万元/项）。此外，还批准了1项按重大研究计划实施管理办法设立的本计划实施管理费项目。总资助经费3596万元。

5.2 项目评审

该重大研究计划申请项目的评审过程严格遵行国家自然科学基金委员会有关重大研究计划项目的管理规定与评审流程。其中，评审过程由同行专家函评与专家会评两个主要环节构成。

各类项目由该重大研究计划所涉及的自然科学基金委相关学科负责人根据项目内容推荐函评专家，最后由自然科学基金委机械学科统一分组指派进行同行专家评议，并将评议结果反馈给相关学科负责人，据此推荐会评项目，最后经过重大研究计划管理组专家会商，并报分管委主任批准，确定最终的会评项目。

会评专家组成员包括了本计划指导专家组的全体成员、本计划部分顾问专家组成员和若干特聘专家。

(1) 重点支持项目

对受理的43份重点支持项目申请，根据指南中的5个不同领域与方向分别分组打包送同行专家评议。全部同行专家返回了评议结果。

根据同行专家的评议结果，推荐了12个项目到会答辩，最后6个项目通过会评专家组的投票，获得资助。此外，1个会评项目经会评专家组建议转为“培育项目”给予资助。

(2) 培育项目

对受理的190份培育项目申请，根据学科类别及指南要求，分17个小组“打包”送同行专家进行同行评议。根据函评结果及相关程序，推荐62个项目进行了会评。经会评专家组评审、投票，其中的35个项目获得资助）。表1为获得批准的培育项目在各科学部的分布情况。可以看出：(i) 化学科学部的上会率最高（41.33%，高于平均上会率近10%），但批准率最低（13.79%，低于平均批准率近5%）。(ii) 工程与材料科学部、信息科学部的上会率及批准率均接近平均值。(iii) 生命科学部仅有3个培育项目，最后批准1项，批准率最高（33.33%）。(iv) 数理科学部有1/3的项目上会，批准率仅次于生命科学部，为26.67%，超过平均批准率8%。

表1 各科学部培育项目的评审和批准情况

科学部名称（代码）	申请项数	初筛		上会		批准	
		项数	初筛率（%）	项数	上会率（%）	项数	批准率（%）
数理(A)	15	1	6.67	5	33.33	4	26.67
化学(B)	29	0	0.00	12	41.38	4	13.79
生命(C)	3	0	0.00	1	33.33	1	33.33
工程与材料(E)	114	9	7.89	35	30.70	21	18.42
信息(F)	29	1	3.45	9	31.03	5	17.24
合计	190	11	5.79	62	32.63	35	18.42

5.3 项目遴选原则[14]

(1) 侧重前沿探索，突出创新。应以纳米制造学科发展前沿和增强国家在制造领域竞争力发展的需求为立论背景，着重论述项目研究立论依据、主要研究内容、科学问题和研究目标，突出特色，强调前瞻性、基础性、探索性和创新性。

(2) 鼓励交叉，突出制造。围绕纳米制造中的科学问题与关键技术基础，鼓励多学科交叉联合申请。申报“重点支持项目”，尤其应体现机械、物理、化学、生物和信息等相关学科的交叉与联合，针对纳米制造中的新原理、新方法、新技术与新工艺等开展合作研究。研究重点必须立足“纳米制造（nanomanufacturing）”，而非“纳米材料制备（nanomaterials fabrication）”，或“纳米合成（nanocomposites）”；研究内容应体现纳米制造中批量化、低成本、一致性等制造特征。

(3) 加强国际合作，突出优势互补，鼓励开展实质性的国际合作研究。

5 结束语

随着人们认识世界物体尺度的极小化，制造领域面临着极大与极小双重尺度的挑战，其基础研究正在经历着由传统的“块体制造”向基于分子、原子的纳米制造的过渡。“纳米制造的基础研究”重大研究计划的立项与实施，为这种过渡提供了难得的发展机遇，其意义重大而深刻，且涉及的各方负有不可推卸的责任。正如自然科学基金委副主任姚建年院士在该重大研究计划2009年度资助项目启动会上所指出的那样：该重大研究计划意义重大，通过原始创新性的研究，旨在推动机械工程学科在基础性、前沿性等方面不断进展，在国际上取得重要地位，在某一领域形成中国学派；他认为专家组责任重大，要充分发挥不同领域专家的学术优势，在促成多学科深

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

入交叉研究方面发挥重要作用，要赋予专家组一定的特殊政策，确保瞄准重大研究计划的目标，遴选好项目，组织好队伍，他强调了纳米制造研究内容的创新性、学科交叉性、项目实施的计划性等，要求进一步做好重大研究计划的集成与升华工作，期望在基础研究方面有重大突破；期望项目负责人认真开展研究工作，以期资助项目取得重大成果。

参 考 文 献

[1] 王国彪主编. 纳米制造前沿综述. 北京：科学出版社，2009.

[2] National Nanotechnology Initiative: Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry. Supplement to the President's FY 2008 Budget, July 31, 2007. http:// www. nano. gov.

[3] 世界主要国家纳米发展的规划和政策. http://www.cscbbs. com/ omp/read, 2006-07-01.

[4] 纳米发电机的发明和纳米压电电子学的创立——专访美国佐治亚理工学院王中林教授. 中国科学基金，2009，23(6)：203—208.

[5] Liu F Q, Du T B, Duboust A et al. Cu planarization in electrochemical mechanical planarization. J Electrochem Soc, 153(6), 2006, C377—C381.

[6] Kubota A, Shinbayashi Y, Mimura H et al. Investigation of the surface removal process of silicon carbide in elastic emission machining. Journal of Electronic Materials, 2007, 36 (1): 92—97.

[7] Erik S, Thomas T A, Thomas P R et al. Electrically induced structure formation and pattern transfer. Nature, 2000, 403: 874—877.

[8] Taylor J S, Sommargren G E, Sweeney D W et al. The fabrication and testing of optics for EUV projection lithography. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1998, 3331: 580—590.

[9] Hong Y S, Chang T C. A comprehensive review of tolerance research. International Journal of Production Research, 2002, 40(11): 2425—2459.

[10] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Nanoimprint lithography. Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 1996, 14(6): 4129—4133.

[11] Kupka R K, Bouamrane F, Cremers C et al. Microfabrication: LIGA-X and applications. Applied Surface Science, 2000, 164(1—4): 97—110.

[12] Gates B D, Xu Q, Stewart M et al. New approaches to nanofabrication: Molding, printing, and other techniques. Chemical Reviews, 2005, 105(4): 1171—1196.

[13] Volz S G, Chen G. Molecular dynamics simulation of thermal conductivity of silicon nanowires. Applied Physics Letters, 1999, 75(14): 2056—2058.

[14] 国家自然科学基金委员会编著. 2010 年度国家自然科学基金项目指南. 北京：科学出版社，2009.

BACKGROUND, IMPLEMENTATION, AND MANAGEMENT MEASURE OF THE MAJOR RESEARCH PLAN "FUNDAMENTAL STUDY ON NANOMANUFACTURING"

Wang Guobiao[1]　Li Ming[1]　Ding Yucheng[2]　Lu Bingheng[2]

(1 *Department of Engineering and Materials Sciences, NSFC, Beijing* 100085;
2 *School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xian*, 710049)

Abstract As hi-tech dominant competitive position in the 21st century, nanotechnology, bio-technology, and information technology are deemed to the three technologies. However, nanomanufacturing is only the foundation to support them into application. In order to enhance Chinese manufacturing industry to copy with the need of the future technology development, the NSFC launched the Major Research Plan titled with "Fundamental Study on Nanomanufacturing" in 2008. This paper introduces the science background, current situation, development direction and challenge, scientific objectives, key issues and fields of the MRP. The operation and implementation measures and the proposals in 2009 of the MRP are also discussed. The aim of the paper is to help the relative scholars and the public get to better know the MRP, as well as more participation in it, and consequently make the fundamental research on nanomanufacturing and the relevant areas.

Key words major research plan (MRP), nanomanufacturing (NM), fundamental study

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net