

· 专题二:双清论坛“原子级制造的基础科学问题” ·

制造发展的三个范式:制造发展规律的研究*

房丰洲^{1,2,*} 赖 敏¹ 王金石¹ 吕 鹏¹ 于 楠³
罗熙淳⁴ 胡春光¹ 陈远流⁵ 陈 磊⁶ 邓 辉⁷
徐 涛⁸ 康城玮⁹ 韩 伟¹⁰ 冯俊元¹¹

1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院,天津 300072
2. 都柏林大学 机械与材料工程学院,爱尔兰,都柏林 D04 V1W8
3. 爱丁堡大学 机械工程学院,英国,爱丁堡 EH9 3BF
4. 思克莱德大学 精密制造中心,英国,格拉斯哥 G1 1XJ
5. 浙江大学 机械工程学院,杭州 310013
6. 西南交通大学 机械工程学院,成都 611756
7. 南方科技大学 机械与能源工程系,深圳 518055
8. 东南大学 集成电路学院,南京 210096
9. 西安交通大学 机械工程学院,西安 710049
10. 复旦大学 信息科学与工程学院,上海 200438
11. 杭州电子科技大学 机械工程学院,杭州 310018

[摘 要] 基于对人类社会历史发展和科学技术发展内在规律的认识,本文详细分析了制造发展的三个范式,论证了原子及近原子尺度制造是制造范式 III 的核心使能技术。文章回顾了国内外各机构对原子级制造研发规划现状,指出我国目前处于原子级制造技术发展的重要战略机遇期,并从设计、材料、加工和检测等角度分析了原子级制造的技术体系内涵;梳理了原子级表面制造、原子级结构制造、原子级测量与表征等领域的研究进展,呈现了当前具有原子级制造能力的部分代表性技术,包括原子级切削、原子级抛光、电化学加工、等离子体原子级加工技术、原子精准操控以及原子分辨测量与表征技术,并对原子级制造战略规划提出发展建议。

[关键词] 制造技术发展趋势;制造范式;原子及近原子尺度制造;原子精度制造;原子级制造

纵观人类历史,每一次时代的变革都离不开制造技术的发展,如石器时代、青铜时代、铁器时代、蒸汽时代、电气时代以及信息时代等;而制造技术的创新为解放生产力、提升产品质量与性能、创造新产品进而变革社会生活方式等方面提供了坚实的支撑。近现代每一个大国的崛起都离不开工业技术的变革,而在工业生产过程中,“制造”是核心。所谓“制造”,是基于物理、化学或生物途径来改变给定原材料在其形式、形状、尺寸、物理性能等方面的特性,从



房丰洲 天津大学教授,“长江学者”特聘教授,国家 973 计划项目及国家重点研发计划项目首席科学家。主要研究领域包括超精密加工与测量、光学设计制造与检测、原子及近原子尺度制造。国际纳米制造学会首任主席、国际生产工程院主席(2023—2024)、*Nanomanufacturing and Metrology* 期刊主编。先后被选为国际纳米制造学会、国际生产工程科学院、国际工程与技术科学院、美国制造工程师学会及爱尔兰皇家科学院院士或院士。

收稿日期:2023-10-11;修回日期:2024-01-12

* 本文根据第 330 期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: fzfang@tju.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(52035009)的资助。

而形成满足最终功能和性能要求的产品的生产过程^[1, 2]。在产品被制造之前,首先需要确定的是产品的功能;而产品的最终性能往往由制造的精度和功能结构特征尺寸来决定,取决于核心器件材料去除、转移或增加的尺度,并受制造过程带来的不同程度材料损伤影响。基于以上关键特征,结合人类社会的发展历史,制造技术的发展主要有以下三种范式^[3, 4],如图1所示。

制造范式 I:以经验和技艺为基础的手工成型过程,如在石器、青铜以及铁器时代,制造精度处于毫米及亚毫米级。此时人类主要以手工的形式生产制造工具及各种用品,在重复制造各种劳动工具的过程中,逐渐产生工具定型化倾向,开始了简单的分工作业,制造的产品精度和质量极大依赖于手工从业者的经验和技能水平。这是作为一种艺术而存在和发展的制造技术第一阶段,即“制造范式 I”。此时的制造更多是只有少数人能够从事的艺术创作,无法实现批量、重复地可控生产。

制造范式 II:基于机器的精度实现可控制造,制造精度从亚毫米级提高至微米级甚至纳米级。随着工业化的开始,制造技术不断发展,基于经典力学的制造基础理论逐步形成并日趋完善,传统加工中材料的去除已从毫米、微米发展到纳米尺度。从18世纪末开始,以改良蒸汽机及工具机为标志的产业革命让基于机器的制造逐步取代了手工劳动(工业1.0)^[5];而后电气化流水线式的生产模式引领了生产工业变革(工业2.0)^[6];到了20世纪后期,以信息技术自动化控制为特点的机械设备在工业生产中尽显身手(工业3.0)。进入21世纪,德国率先提出了信息物理系统(Cyber Physical System)概念:使用传感网络紧密联接现实世界并采集分析所有与设计、开发、生产有关的数据,实现产品、生产设施的全生命周期的智能管理和生产(工业4.0)。虽然经历了数次工业革命,但制造的主流底层理论都是基于经典力学,加工模型的建立依然是基于介质连续这

一前提,这一时期的制造均属于“制造范式 II”。

制造范式 III:制造对象与过程直接作用于原子,材料以原子量级去除、转移或增加,其核心使能技术为原子及近原子尺度制造(或称为“原子级制造”)。制造的主要环节之一是加工,随着加工技术在精度和特征尺寸控制等方面的进步与发展,原子尺度下的材料去除、迁移或增加等现象无法通过基于连续介质的经典加工理论解释。制造技术将从以经典力学、宏观统计分析和工程经验为主要特征的现代制造技术,走向基于量子理论的多学科综合交叉集成的下一代制造技术,即“制造范式 III”(简称“制造 III”)^[7, 8]。制造范式 III区别于制造范式 II的本质属性是基础理论的不同,即以量子理论为核心基础。

制造业是国民经济的支柱性产业,直接体现了一个国家的生产力水平,是区别发达国家和发展中国家的重要指标之一,它为社会提供满足物质和精神需求的产品,也为维护国家主权、维持国家繁荣昌盛提供核心技术保障。2019年9月,中华人民共和国工业和信息化部宣布我国已形成了独立完整的现代工业体系,是全世界唯一拥有联合国产业分类中全部工业门类的国家,我国已跃升为世界第一制造业大国。然而,在芯片、高端传感器、航空发动机等高端制造领域仍受限于发达国家,被以美国为代表的发达国家在相应的高端技术层面“卡脖子”。我国已对相关高端制造技术加大科学研究与技术开发的力度,以彻底摆脱“卡脖子”的局面。随着制造精度要求的进一步提升以及功能结构特征尺寸减小到纳米级甚至原子量级,针对多种核心器件和重大需求的传统制造技术、装备以及基础支撑理论发展等面临“瓶颈”。将加工对象视为连续介质的经典理论也面临着严峻的挑战和无法逾越的鸿沟,相关制造基础必将发展为基于原子间内在作用规律的量子理论。由此可见,“制造范式 III”时代的到来是制造发展的内在规律使然,是历史的必然选择。因此,在大力布局解决当前“卡脖子”问题的同时,提前布局下

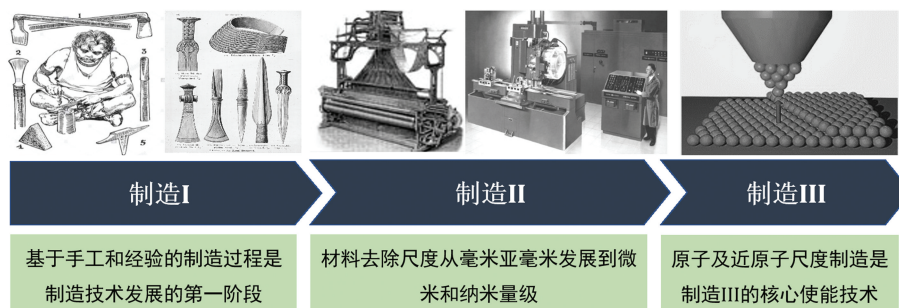


图1 制造发展的三个范式

一代前沿制造技术的研究与探索,把握未来制造技术“至高点”,是实现中国从“制造大国—制造强国—未来制造”转型的战略抉择。

本文根据第 330 期“双清论坛”上通讯作者的主题报告内容整理,旨在研讨制造技术的发展规律,分析未来制造技术的发展趋势,为推进我国在新一轮的全方位大国科技竞争中取得先发优势奠定基础。在此背景下,2023 年 3 月 23—25 日,国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)工程与材料科学部、数学物理科学部、化学科学部、信息科学部及计划与政策局共同主办了主题为“原子级制造的基础科学问题”的第 330 期“双清论坛”,来自机械、材料、化学、物理、信息研究领域 60 余位院士及专家代表应邀参加了本期论坛。与会专家围绕“原子层制造”“原子/分子团簇与器件制造”“原子精度制造新原理新方法”“原子制造中光子—电子—声子相互作用观测和调控”四大主要研究方向和重大科学问题进行了热烈研讨。会议达成了布局原子级制造重点发展方向、实现多学科交叉融合、突破传统制造水平极限并创造出具有颠覆性功能的新器件和新装备的共识,同时提出了国家自然科学基金在相关领域发展战略布局的建议。

1 制造的三个范式

本文将制造发展分为三个阶段,并从人类文明的历史进程和自然科学的发展规律两个角度分别进行阐述,如图 2 所示。由于这三个发展阶段的基础截然不同,并长期共存,因此形成制造发展的三个范式。

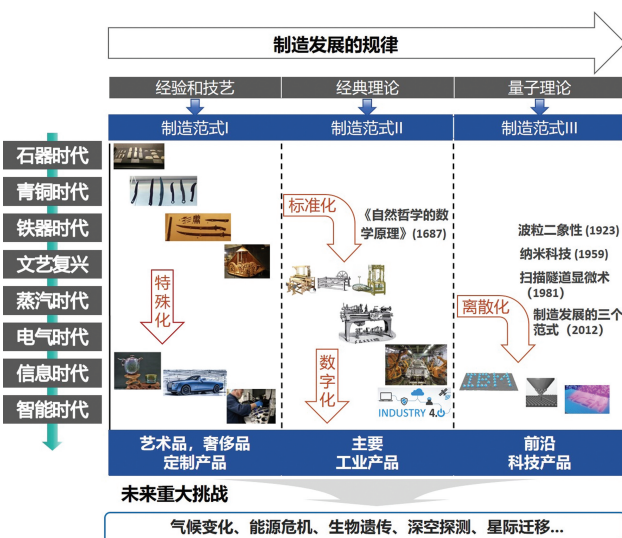


图 2 人类社会发展与制造三个范式

1.1 制造范式 I

在西方文明中,制造的英语“manufacture”源自两个拉丁单词 manu(手工)和 facere(制造),这个组合的意思就是“手工制作”^[1]。制造技术的发展历史可以追溯到人类文明的早期阶段—石器时代,在这个时期人们使用打制或者磨制的石器作为劳动工具,例如石斧、石刀,一般采用敲击的方式产生平滑的锋利端口,其制造精度取决于石材的自然形状和裂纹纹理^[9]。针对石针、石饰品等具有圆滑面或孔状结构的制品,则主要采用刮、磨、钻等方式^[10],其制造精度取决于手工者的经验和技艺,这些可以被看作是切削、磨削、抛光、钻削等机械加工方式的雏形。

从 4 000 多年前的夏代晚期开始到战国后期,我国经历了辉煌的青铜时代。古代劳动人民探索并总结出了先进的采矿技术、铜合金冶炼技术以及高超的铸造技术:司母戊鼎、战国编钟、四羊方尊等精美的青铜器不仅是象征王权贵族的礼器,更是高规格的古董艺术品。随着青铜冶炼技术的发展,人们发现青铜的特性会随着铜、锡、铅的比例改变而变化。春秋战国时期的《周礼·考工记》有载:六分其金而锡居一,谓之钟鼎之齐(青铜合金分为六等份,铜占五,锡占一时,适合铸造钟鼎等礼乐器);五分其金而锡居一,谓之斧斤之齐(青铜合金分为五等份,铜占四,锡占一时,适合铸造斧头等器物)。使用现代测试方法对现存于上海博物馆的战国圆鼎测量获得其铜含量为 82.71%,锡含量为 14.29%,铅含量 2.10%,与记载配比相符。这说明当时的匠人们已经懂得通过改变合金的配比来调节青铜的硬度、韧性和声学性能等,进而制作不同用途的青铜器^[11]。我国古代的青铜器主要采用范铸法和失蜡法铸造而成,通过制作“模”“范”并将熔融的金属溶液注入,最后通过打磨修整获得精美的青铜器物。这些器件的制造精度依然取决于制模、制范以及打磨等匠人们的技艺和经验。

地球上铁矿的分布比铜矿更广泛和丰富,且铁器锋利易打磨,因此冶铁技术和铁器制造技术被迅速推广进入了铁器时代。古代冶铁技术主要是使用木材、木炭、煤炭等加热铁矿石还原获得生铁,此时生铁依然含有很多杂质,其性质脆而硬,不适合直接使用。可进一步通过反复加热、锻打和冷却等方式来去除杂质并细化铁晶粒形成钢铁,大幅提高材料的纯度并改善其性能,其反复加工次数可达上百次,称为“百炼钢”。成语“千锤百炼”“百炼成钢”由此而

来^[12]。相应地,铁器诸如兵器、农具等常见制造工艺包括铸造、锻造、切削、磨抛等,其制造的精度仍然取决于铁器匠人的技艺。战国时期鲁班被中国古代手工工匠奉为鼻祖,他发明了刨子、锯子、石磨等工具,也做出了会飞的木鸢、锁钥、九州图雕刻等精美的器物,其制造复杂度和精度均达到了手工艺的顶尖水平。达芬奇是15世纪享誉世界的艺术家和发明家,设计了机器人、飞行器、直升机等多个超时代发明,其制作的达芬奇机器狮子可以移动,并且在停下来后胸部会打开绽放出鸢尾花,说明他的设计和制造精巧度已经达到了相当高的水平。然而,这些器物均依靠手工技艺获得,其精度和灵巧度依靠制作者的天赋和悟性,并需要长期的摸索和经验的积累。

总而言之,在工业革命到来之前,人类已经有意或者无意地利用物理和化学过程进行制造,并且出现了切、磨、抛、钻、锻造、热处理等多种制造工艺,但制造过程基本都是凭借匠人们的经验,其制造精度取决于手工匠人的技艺水平,尚未形成完备的制造科学技术体系,可重复性及可控性较差。

1.2 制造范式 II

随着制造技术的不断发展,基于经典力学的制造基础理论开始形成和发展并日趋完善,这就是制造的第二个范式。牛顿^[13]发表的最为重要的物理学哲学著作《自然哲学的数学原理》(1687年)掀起了第一次科学革命,其中所阐明的三大运动定律成为经典力学之基础。从人类文明发展的角度,这是人类第一个完整的科学理论体系,人们从通过观察与计算寻找经验规律来指导生产活动,跃升至以科学理论为依据来提升生产技术,这便成就了一次次的工业革命。人类目前为止所经历的四次工业革命,分别将制造技术从机械化、电气化、自动化、数字化的主要方向不断升级并向智能化方向进化,使得制造的精度不断提升、产品的性能日益进步且生产的效率一次次提高并满足人类活动的增长需求。

1784年,瓦特对蒸汽机的改良,标志着第一次工业革命的开始。纺织机的动力逐渐由人力演变为蒸汽,极大提升了生产效率并逐步辐射推动了现代工业和机械制造的发展进程。以英国为代表的欧洲各国和美国纷纷完成了工业转型,综合国力极大提升^[13, 14]。第一次工业革命时期,制造业的生产过程主要依靠人力和简单的机械设备。这导致了产品的精度相对较低,处于亚毫米量级,无法满足高精度需求的钟表制造等行业。第二次工业革命时期,随着

电力和内燃机的发明和应用,制造业进一步迈向了自动化和大规模生产,这对产品的精度提出了更高的要求^[6]。在这个阶段,战争提升了对武器的产量需求,巨大的武器生产量和机床的更新催生了“互换性”这一概念,即保证每个零部件在制造过程中的一致性。1876年,美国的布朗发明了世界上第一台万能磨床,现代机床的出现使得产品的精度得到了显著提高。第三次工业革命以原子能、电子计算机等方向的发展为标志,开始了自动化和数字化生产。1952年,美国麻省理工学院研制了全球首台数控铣床,自动化和数字化生产使产品的性能实现了量变到质变的提升。1984年,美国利弗莫尔国家实验室研制出一台大型光学金刚石车床,代表了超精密加工设备的最高水平。随着技术的发展,超精密机床具有了更高的加工精度和稳定性,其精度甚至可以达到纳米级,使得产品的质量和性能大幅提升,满足了制造业对于精密产品的需求。超精密机床的出现对于航空航天、汽车制造、医疗设备等行业具有重要意义。同一时期,集成电路的发明使得芯片技术得以实现。芯片的出现大大提高了电子产品的精度和性能,并推动了电子行业的发展。第四次工业革命以智能化工业生产为标志,于2011年由德国率先提出,旨在实现网络与现实世界的深度交融,数字孪生等相关技术迅速发展。人工智能、大数据、物联网也进一步推动了超精密机床的发展。人工智能的应用加强了机床的自动化程度和智能化水平,大数据和物联网的应用实现了运行状态的实时监测和优化,提高了稳定性和可靠性。以上四次工业革命的主流制造技术均属于制造范式 II 阶段。

从机床和芯片两个关键技术的发展历程中可以窥得制造范式 II 的基本规律:制造技术实现的载体—机床在数次工业革命中发生演化,无论是动力驱动的提升(工业 1.0—2.0),还是大规模刚性自动化到数控、群控与柔性自动化的提升(工业 2.0—3.0),抑或是如今由信息技术、物联网技术等加持的工业 4.0 中机床高度智能,其加工本质并未发生改变。就满足制造产品最核心的加工精度而言,传统机床加工的材料去除已经从毫米、微米发展到纳米尺度。而这里的精度概念,不仅仅是工件的几何误差,也包括结构特征尺寸和材料表面完整性。然而无论精度如何,指导制造的基础理论都是经典理论,如连续介质力学、光学、(电)化学等。尽管在很多超精密制造与微纳制造的前沿探索中,量子效应已经被提及,但指导实践的制造理论并未触及更底层、更

细致以及更复杂的原子之间内在作用规律,而是通过经典力学、热力学、电磁学与化学反应方程等实现基于机器精度的可控制造。

作为工业产品的典型案例,人们对芯片的发展以及“摩尔定律”并不陌生:单个集成电路芯片上可容纳的晶体管数目,约两年便会增加一倍。从制造工艺的角度出发,这意味着加工精度及可实现的结构特征尺寸从毫米到微米甚至纳米尺度的跃升。在当今最为前沿的芯片制程中,尽管在几个纳米的尺寸下,量子隧穿效应已经逐步显现,但是制造这些结构特征的光刻机依旧是在经典理论指导下运行的。随着人类需求的进一步提升,当在产品特征结构加工过程中量子效应占主导地位时,将不再能通过连续力学等经典理论指导实际生产制造,人们必将在新的制造范式下重新找到解决问题的途径^[15]。

1.3 制造范式 III

制造在人类需求的驱动下不断发展,更高精度和更小尺度是其发展的必然趋势之一,在经历了以手工艺成型为代表的“制造范式 I”和以标准化、工业化、互换性为特征的“制造范式 II”,正在向“制造范式 III”迈进^[15]。纵观人类的发展历史,手工制成的工具主导跨越了从石器时代至文艺复兴时期几千年,见证了人类文明从萌芽到发展;伴随着四次工业革命的兴起,机器的大量应用促使制造完成了从工匠活动到技术的转变,从蒸汽时代逐渐过渡至电气时代和当今的信息化、智能化时代^[16]。如今,原子级制造在多个重大领域可跨时代促进人类文明发展:芯片的技术节点已达到 3 纳米,正在逼近其物理极限,必将进入原子尺度,从而实现计算速度、存储量、能耗等性能飞跃^[17];原子级形状精度与表面质量对微电子、精密导航等尖端领域核心元件性能提升起决定性作用^①;能否将制造对材料的影响控制在原子级低损伤或者无损伤的状态,对提高强激光系统性能等重大需求至关重要^[18]。因此,制造精度与功能结构将突破纳米量级,进入原子尺度,亦即迈向“制造范式 III”时代。

在原子尺度下,物质是离散的。当制造的对象从微米、纳米进入原子尺度时,制造的核心基础发生了根本变化,基于连续介质的经典理论将不再适用,这种核心基础的改变将是制造技术发展革命性变化的开始,也是制造范式 III 的本质特征^[19, 20]。其中,原子级制造是将能量直接作用于原子,通过去除、增加或迁移等不同途径形成原子、分子、原子团簇、原

子层级等精度、特征结构、材料物性变化的制造过程。因此,原子级制造是制造技术发展新范式(制造范式 III)的核心使能技术^[3]。

同时,原子级制造将与制造范式 I 和制造范式 II 的制造技术长期共存,在各自领域发挥不可替代的作用。以精密导轨的制造为例,目前世界上最精密的导轨仍为手工打磨制备,无法通过机器实现手工技艺的精度;当今世界工业体系是制造范式 II 中多种制造概念与技术发展的硕果,也将长期起到主导作用;聚焦前沿的高性能需求,制造范式 III 从原子离散的全新视角审视制造体系的逻辑,会发挥更大的作用。在制造范式 III 中,满足制造产品原子级表面精度、结构、损伤层控制的原子级制造充当核心使能技术的角色,保证了完备制造过程的可实现性。在此基础上进行增益考量的其他制造手段(如数字化和智能化)则可实现制造效率的提升。

原子级制造贯穿原子到产品的完整生产过程,实现了传统制造与材料制备的高度融合。无论是去除、增加或迁移的多种制造手段还是从原子出发的材料制备过程,在原子级制造中均可以抽象为离散原子行为的控制过程,原子间的成键和断裂是其本质。因此在原子级制造中,材料制备不再局限于化学方程式的基本过程,而是以量子理论为基础实现原子新结构、新材料、新物性的可控制备。数字制造、智能制造、可持续制造等多种制造技术也将在制造范式 III 中增添新的“原子”内涵,这些技术将继续在制造范式 III 中发挥重要作用。

以制造范式 III 的核心使能技术(原子级制造)为牵引形成在新的范式下的加工与制备、表征与测量、设备及仪器、数字与智能、环境友好与可持续发展等相关辅助技术及体系等,是未来制造发展的具有重要战略意义的全新领域。

2 原子级制造

2.1 重要战略机遇

原子级制造的出现是制造发展内在规律的必然结果,目前已有国家将其作为战略层面问题进行规划布局。美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)于 2015 年提出了“从原子到产品”计划(Atoms to Products, A2P),旨在将原子、分子或微纳米器件组装为毫米尺度以上的宏观组件或系统,同时保持原

① 房丰洲. 原子及近原子尺度制造. 北京: 国家自然科学基金委“双清论坛”, 2023.

子或纳米尺度下物质的独特特性,从而实现前所未有的功能^[21]。2018年,美国能源部先进制造办公室提出了“原子精度制造”计划(Atomically Precise Manufacturing, APM),致力于通过物理、化学和生物方法将原子精确地放置并结合成理想的分子或结构,并开发可编程催化剂、量子器件和高性能材料。2022年10月,美国白宫发布了《先进制造业国家战略》,确定了未来11项战略目标^[22],在微电子与半导体制造创新、新材料和创新加工技术、先进制造业支持生物经济等方向中,原子级制造均大有可为。此外,国际生产工程院(The International Academy for Production Engineering, CIRP)已组织各国专家就原子尺度制造开展论证,其有望成为制造科学与技术的一个全新领域,而更多研究力量的投入也将推动原子级制造技术进入快速发展期。

我国研究人员及相关单位一直关注原子级制造的发展。2012年,天津大学提出了制造发展的三个范式;2018年,中国科学院启动了“功能导向的原子制造前沿科学问题”战略性先导科技专项(B类),围绕低维材料、异质结构及器件的原子尺度精准制造与性能调控设立了三个研究方向;华为战略研究院于2019年将原子制造、光计算、DNA存储等列入探索方向;2020年,原子尺度材料可控去除机制被中国机械工程学会列为5个重大科学问题之一;2021年,中国科学技术协会(以下简称“中国科协”)举办了原子及近原子尺度制造青年科学家沙龙;同年,原子及近原子尺度制造天津市重点实验室成立,这是我国第一个省部级原子级制造研究平台;2022年,中国科协将“如何实现原子尺度精准制备和结构调控构建未来信息功能器件”和“能否实现材料表面原子尺度可控去除”列入十大前沿科学问题;2023年3月,自然科学基金委召开“原子级制造的基础科学问题”双清论坛,针对“原子层制造”“原子/分子团簇与器件制造”“原子精度制造新原理新方法”以及“原子制造中光子—电子—声子相互作

用观测和调控”四个议题展开了详细研讨^①;2023年,原子级制造入选“高端制造前沿进展”雁栖湖会议重大科学问题,而原子精准制造在同年8月举办的中国国际纳米科学技术会议上被列为十大重要前沿科学技术难题。近年来,原子级制造作为国内学界关注的热点持续升温。

如上所述,我国与发达国家在原子级制造方面的布局与探索几乎同时起步,这是与纳米制造发展历史的一个重要区别,也为摆脱技术落后与被动追赶的局面提供了充分的可能性。从市场角度看,原子级制造势必带来产品现有性能的跃升甚至全新功能,抢先突破核心技术、形成自主知识产权将在未来高端产品全球价值链条中拥有主导权。原子级制造既是新一轮大国科技竞争焦点,也是我国发展为制造强国的重要机遇。

2.2 技术体系内涵

从产品生产流程角度看,制造可分为设计、材料、加工、检测和组装等多个环节,其中加工涉及精度、结构以及对材料造成的损伤三个方面,这些内容共同组成制造技术体系,且对于原子级制造将呈现出新的涵义(见图3)。

目前生产工程领域的产品设计主要针对机械结构、光学系统、电路系统等,原子级制造将增加新的设计理念,即通过构造特定的原子种类与空间排布来获得独特功能。这种设计需要基于量子理论的高效计算和原子数据库,也将会形成不同于“经典设计”的方法论体系。和经典力学理论不同,量子理论认为所有粒子都同时具有粒子和波的性质,观察者的测量可以改变量子系统的状态,并且无法同时精确确定某些物理量,如位置和动量,测量结果的概率可以用波函数来描述。典型的量子理论包括电子等微观粒子有概率穿过高度大于粒子总能量的势垒的量子隧穿效应以及代表电子与晶格振动之间作用的电子—声子相互作用等。

材料的涵义在原子级制造中发生了深刻变化:

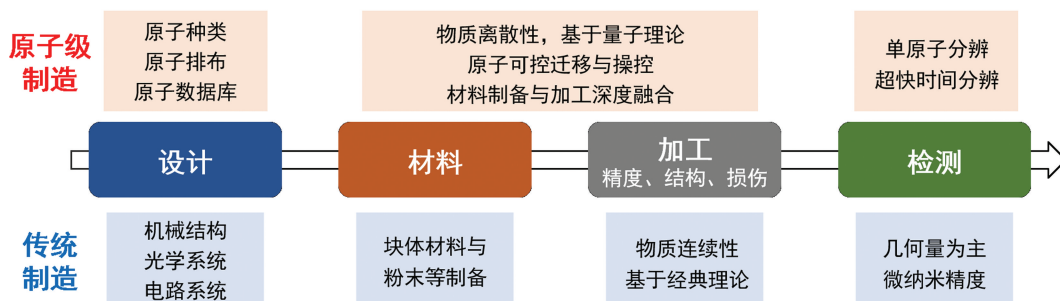


图3 原子级制造的技术体系内涵

对于自上而下过程,材料与加工可以认为是相对独立的两个环节,然而这种划分对于原子尺度制造的自下而上过程不再成立。例如,通过物理、化学等方法获得原子团簇、分子器件等,是将基本单元(即原子)直接组装成产品的过程,而并非先得到块体材料或粉末、再赋予其特定形状或结构。在这种极小尺度下,用“物质”代替“材料”更加合适,这种底层物质创制能力使得原子级制造的内涵与体系相比于传统制造获得了极大延伸,也使得制造科学与物质科学深度融合。

加工的精度与结构分别从几何角度描述了形状/尺寸误差以及特征尺寸本身的大小。在原子级制造中,连续性几何概念仍然具有价值,如面形精度、中频误差、粗糙度,其数值可连续变化且处于埃米量级甚至更小;另一方面,原子尺度下物质的离散特性与几何概念的连续性出现了矛盾,对精度与结构的诠释需要包含物质自身属性,如以原子层数目、键长键角、多原子构型等作为一系列基本单位进行描述。加工损伤可以认为是加工过程对原子排列、种类等带来的额外影响,使得产品性能下降甚至失效,原子级制造需要在至少一个空间维度上将损伤范围控制在纳米尺度以下。随着精度、结构与损伤三个指标共同逼近原子极限,加工过程可统一理解为对特定原子空间坐标的精准控制。

原子级制造中,测量对制造过程与产品质量控制的重要性比纳米制造更加突出,不仅要求能够准确获得原子量级的全频段几何量,还需要实现单原子分辨力(即“看到原子”),而原位动态在线监控进一步要求超高时间分辨力。原子级制造中的测量不仅面临现有超精密测量走向极致的技术挑战,还更大程度地受到微观尺度物质与能场的相互作用甚至不确定性原理的影响。

2.3 代表性技术

目前已陆续出现具有原子级制造能力的相关技术,本小节仅针对部分代表性技术进行简要论述。

(1) 原子尺度切削

原子尺度切削是切削加工技术从宏观尺度发展到微米再到纳米尺度的下一阶段,其目的在于对材料去除量进行原子量级的精确控制,可用于实现原子级表面、原子尺度结构和器件加工。理论分析指出,原子半径导致切削过程出现新的尺寸效应,材料去除以剪切应力驱动的位错运动方式出现,同时也受到刃口半径与刀具最底部原子的影响^[23]。对于单晶铜,10.6~16.6 纳米的刃口半径可实现 1 纳米

的材料去除厚度,而单原子层去除则需要将刃口半径进一步减小至 2.7~4.2 纳米^[24]。由于原子级切削对工具的锋利度与运动精度都提出了极高要求,近年来出现了采用探针代替传统金刚石刀具并利用原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)进行切削机理的实验研究^[25, 26]。AFM 探针相比于商用金刚石刀具拥有更加锋利的尖端,能够加工出更小尺度结构,利用载荷控制改变法向力、重复切削次数、切削速度等参数能够有效调控结构的深度与宽度,通过控制探针运动轨迹也可方便地实现复杂图案化加工。另一方面,虽然采用这种直接机械加工的方式能够得到原子尺度结构,但由于探针与样品之间存在较大法向力,探针面临严重的磨损问题,影响表面质量与结构尺寸稳定性。因此,研究人员尝试利用激光、离子束、声场、电场等能场辅助手段弥补单一机械力控制方式的不足。切削技术未来将向原子尺度加工测量一体化、跨尺度以及智能化发展。开发多功能加工工具,实现原子尺度切削过程中各物理量的超高精度在线检测与控制,并实现自动化与智能化加工,最终形成兼具原子尺度结构或表面精度与宏观尺度结构的跨尺度零件,将极大支撑航空航天、半导体等领域的发展。

(2) 原子级抛光

抛光是获得原子级表面的关键技术,目前已经能够实现原子量级的表面粗糙度,而如何进一步做到原子层可控去除是抛光在原子级制造中面临的重大问题。该方面早期的研究集中在云母、石墨等具有完整层状解理面的材料^[27, 28],近年来的研究进一步拓展到集成电路和微机电系统中广泛应用的材料。例如,对单晶硅抛光的理论模拟研究发现,随着二氧化硅微球的压入深度逐渐减小,单晶硅的微观磨损将从非晶化转变为单层原子剥离^[29]。通过解耦单晶硅原子级去除过程中机械和化学交互作用,揭示了力、温度和化学等多因素耦合作用下的材料去除机制并实现了单层原子去除^[30, 31],在此基础上结合摩擦化学能量复合驱动理论提出了化学机械抛光优化措施^[32, 33]。化学机械抛光不仅能够实现粗糙度仅为~0.5 埃米的硅晶圆表面,还可用于异质材料的原子尺度去除,如针对异质硅通孔开发的新型多选择性抛光液可实现二氧化硅、氮化硅和铜薄膜 1:1:1 的材料去除速率,且抛光后表面粗糙度小于 2.5 埃米^[34]。弹性发射抛光也是原子精度表面加工的常用技术,通过聚氨酯轮高速旋转带动抛光液冲击工件表面,当抛光颗粒与工件表层原子的

结合能超过表层原子与第二层原子的结合能时发生原子尺度去除。采用二氧化硅颗粒和超纯水制备的抛光液能够获得粗糙度 RMS 1 埃米的单晶硅表面,且具备规则的表层原子排列^[35];改进流场控制后,粗糙度可进一步降低至 0.5 埃米^[36]。调控抛光颗粒与工件的接触状态是提高抛光质量的另一途径,利用二维纳米材料原子层间弱范德华力带来的润滑效应,能够有效降低划痕与亚表面损伤等缺陷^[37]。二维纳米材料由于具有高比表面积,很容易吸附在抛光颗粒与工件的接触表面上产生润滑涂层,从而降低法向作用力。在二维材料层状结构与适当载荷作用下,材料去除可以被精准地控制在若干个原子层量级。将二维六方氮化硼用于熔融石英化学机械抛光,能够在获得粗糙度 Sa 1.24 埃米的超光滑表面同时兼具厚度仅为 27 埃米的超低亚表面损伤层,大幅提升表面完整性^[38]。

(3) 电化学加工

基于 AFM 扫描探针的电解加工方法是使用探针作为工具电极,将阳极溶解区域限制在纳米尺度范围,相比较于传统微细电解加工过程微米尺度范围的加工区域,显著减小阳极溶解区域大小、提高电解加工精度,近年来在单晶硅、石墨等材料的纳米尺度加工方面取得重要进展。工件阳极、电解液、探针阴极在实际加工过程构成电解加工单元,并通常搭建在 AFM 的测量平台上,工件电极的移动通过 AFM 测量平台控制完成;电解液可通过高湿度环境中毛细吸附作用下,两电极狭窄间隙内形成的弯月形水桥提供,也可将配置电解液通过移液器直接加载到加工区域;加工电源可将外部电源直接与探针、工件物理连接^[39]。同时,该方法还具备传统电解加工的各项优势,诸如无工具电极损耗、适用材料范围广、加工表面质量好、材料去除率高以及可加工三维复杂形状等特点^[40]。20 世纪 80 年代后期,研究人员报道了基于扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope, STM)探针的纳米结构电解加工研究,加工的微纳结构应用于探索诸如库仑阻塞、量子电导等量子现象^[41]。该电解加工方法被首次用于硅材料表面改性^[42],并进一步通过基于 AFM 探针的电解加工方法在单晶硅表面实现了氧化改性^[43]。近期,研究人员通过使用尖端直径 40 纳米的镀膜探针作为工具电极,在高定向热解石墨(Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG)材料和单晶硅表面进行了原子尺度电解加工研究,并在 HOPG 表面实现了复杂结构的单原子层稳定、可控材料去

除^[44],以及单晶硅表面原子尺度材料去除^[45]。

(4) 等离子体原子级加工技术

除了切削、抛光等加工方法,等离子体也是实现原子级制造的一种有效技术手段,主要包括等离子体改性辅助抛光、原子选择刻蚀以及原子迁移与重构。等离子体被广泛称为物质的第四态,具有丰富的物理和化学特性。等离子体改性辅助抛光充分利用了等离子体的化学反应活性,改性降低表面硬度,进而结合软磨粒抛光去除改性层并获得超光滑表面。该方法已应用于碳化硅、氮化镓等第三代半导体材料,成功获得了原子层台阶结构规则排列的原子级表面^[46]。等离子体改性辅助抛光的进一步发展是等离子体原子层抛光技术,该方法将等离子体羟基改性尺度约束至最表层原子,在抛光界面发生羟基脱水缩合反应并形成共价键,抛光界面的相对运动对表层原子形成剪切作用,并实现表层原子的逐渐去除,该技术应用于单晶金刚石获得了近无损伤的原子级表面^[47]。以上等离子体原子选择刻蚀的基础是表面不同成键状态原子的差异化刻蚀去除,该差异化刻蚀行为最终将粗糙表面演化为所有原子规则排列的理想表面,该方法已成功应用于单晶硅、碳化硅等多种单晶材料,获得了粗糙度极低的原子级表面^[48]。同样,等离子体辅助刻蚀加工方法通过等离子体改性提升表面的化学活性,例如将氧化物转变为氢氧化物,再通过氢氧化物的酸碱中和反应显著提升湿法刻蚀的反应速率。利用此方法已实现了典型氧化物原子级表面粗糙度、无亚表面损伤晶体表面加工^[49]。等离子体诱发的原子迁移与重构充分利用了等离子体的高能量密度特性,高能量馈入诱发表面原子重新排列,其应用于非晶材料可实现表面高位点原子向低位点迁移,从而显著降低表面粗糙度^[50];应用于单晶材料则可实现表面原子层台阶的有序化重构^[51]。采用等离子体的核心优势是每一个参与制造过程的原子都与等离子体直接发生作用,未来需要研究如何对等离子体的微观物理化学作用过程进行精确控制,并由微观发展到宏观的跨尺度原子级制造。

(5) 原子精准操控

通过精准且高效地操控原子并按需形成新物质/材料、功能结构及器件不仅是原子级制造的重要方向,还赋予原子级制造强大的底层创制能力^[52]。众所周知,STM 是单原子操控的代表,从 1989 年 IBM 的首次验证以来,STM 已成为量子现象研究、量子结构与器件制备的重要手段^[53]。利用 STM 实

现的单原子晶体管和单原子存储结构^[54]可以使集成度、开关速度、存储密度等指标呈数量级提升,而氢去钝化光刻技术(Hydrogen Depassivation Lithography, HDL)已经实现埃米特征、原子级掺杂并用于制造多位量子比特^[55]。近年来,得益于微机电系统的高吞吐量并行技术^[56]与机器学习探针质量自动检测调节技术^[57],STM 原子操纵效率与稳定性正在提升,目前已经实现了基于 STM 的典型超导材料铌的原子级表面结构重构^[58]、人工表面原子和分子自选阵列纠缠^[59]以及亚单层薄膜催化剂表面结构作用机制^[60]等在超导、生物、化工催化多领域的广泛应用。单原子操控还可以通过 AFM 实现,包括横向模式和纵向模式^[61],与 STM 相比其优点在于室温下可用于非导电材料,具有巨大应用潜力。上述采用探针的操控方式需要精准定位与运动控制。另一种原子精准操控途径则是通过原子自发凝聚配合精细筛选获得目标物质,其代表是原子团簇束流技术^[52]。由于可以灵活地调控原子种类与个数,且伴随束流强度的不断增加,团簇束流有望实现超高自由度原子精准物质的创制。采用该方法制备的 Gd-C82 结构在电场控制下可实现 Gd 单原子的高可控性点位切换,获得单原子存储功能^[62]。除了单原子与原子团簇,面向原子层的精准操控也存在诸多技术。例如,化学气相沉积是精确制备二维材料异质结构的主要方式^[63],其配合高效无损转移技术^[64]已成为后摩尔时代芯片制造的重要候选方案之一;对于常规固体材料,分子束外延、原子层沉积/刻蚀用于获得高质量薄膜且已大量用于半导体产业,其中选择性原子层沉积技术^[65]可实现介电层的自对准生长,有效提高芯片制程效率与精度。

(6) 原子分辨测量与表征

目前,单原子分辨主要通过透射/扫描透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope/Scanning Transmission Electron Microscopy, TEM/STEM)、STM、AFM 实现。TEM/STEM 结合计算成像技术可实现深亚埃(0.2 Å)分辨成像^[66],STEM 结合能量色散 X 射线谱或电子能量损失谱可以获得原子分辨的元素分布图像^[67]、实现具有化学键合灵敏度的单原子振动谱学测量^[68];结合全息成像技术^[69]、四维扫描电子衍射技术^[70]可实现表面电荷密度分布的实空间成像。STM 可进行表面结构的原子分辨表征,结合针尖增强拉曼光谱(Tip-enhanced Raman Spectroscopy, TERS)、针尖增强光致荧光可实现具有埃级分辨率的全拉曼振动模式成像及亚纳

米级分辨率的光致荧光成像^[71],可在纳米尺度精准解析化学成分并揭示光与物质的相互作用机制;融合 STM、AFM、TERS 发展的联立技术可实现对电子态、化学键结构和振动态、化学反应等内禀参量的精密测量^[72];将扫描隧道显微镜的超高空间分辨率与具有皮秒级时间分辨率的泵浦—探测技术和太赫兹技术相结合,可进行具有飞秒时间分辨率和埃米空间分辨率的时空成像,解析单原子尺度非平衡动力学过程^[73]。AFM 方面,采用自感应探针型高品质因子力传感器可以获得原子级甚至单个化学键级的超高时空分辨率,通过测量局域接触势差可实现单个原子和分子内部电荷分布的成像^[74];与纳秒电脉冲结合可对单分子在不同带电状态下的电子转移概率分布进行成像^[75];结合泵浦—探测技术可用于分子自旋激发态的探测^[76];与机器学习融合可用于对离子水合物的原子结构进行识别^[77]。除了极限时空分辨力,发展跨尺度、多维参数解耦、大动态范围的高分辨、高灵敏、高准确、高通量测量技术是实现原子级制造由实验室走向产业的又一关键问题。以原子层薄膜为例,研究人员提出了掠射式偏振差分测量技术,实现亚单层灵敏度原位在线实时监测,用于晶圆级单原子厚度新型层状二维材料的高质量制备^[78];采用微变布鲁斯特角偏光测量方法^[79],使厚度测量灵敏度较传统椭圆偏光测量方法提升一个数量级,实现过渡金属硫族化合物、黑磷等二维材料 1~5 个原子层厚度的快速精确测量。

3 发展建议

近年来,我国在芯片制造、高端装备以及高性能传感器等方面受到美西方国家封锁制约,亟需加强原子级制造技术攻关,突破技术壁垒,保证我国产业发展及国家安全,具体发展建议如下。

(1) 促进制造科学与物质科学的深度交叉融合

在原子级制造中,能量直接作用于原子,制造的对象从连续介质材料变为离散的原子。可以通过物质科学指导制造科学前进的方向,明确原子级制造基本单元形成宏观性能器件的底层逻辑,揭示原子级结构的形成规律,提升原子级产品使用性能;同时,物质科学的理论证明、规律归纳需要制造科学的实施验证,通过制造科学支撑物质科学的发展,有望孕育出重大原始创新和技术突破,占领原子级制造的国际领导地位。

(2) 技术与需求相互促进式发展

高精尖产品需求是制造技术发展的强大驱动

力,科学与技术的革新亦可先行于制造发展的现状。因此,可以首先聚焦数个关乎国家安全、敏感材料、关键器件的原子级制造发展方向,以点突破美西方技术壁垒,通过迫切需求牵引原子级制造技术发展,形成原子级制造战略优势点。同时,从技术的发展趋势出发,全面布局原子级制造技术战略,以战略优势点拉动形成原子级制造技术体系面,进而反催生原子级器件产业需求,形成完善的原子级制造产业链条。

(3) 基础研究、技术攻关与装备开发一体化发展

建立“政府职能部门—高校—科研院所—企业”一体式发展新模式,确保原子级制造产业的快速发展。原子级制造打破了原子、材料与产品之间的壁垒,需要基础研究、技术创新、装备开发平台建设以及应用推广的同步发展。可通过国家层面制定相应政策促成产业链条的形成;以高校、研究所为基础研究研发平台,实现原子级制造基础研究及关键技术攻关;与企业紧密对接,实现原子级制造新技术的装备开发与成果转化,逐步建立并完善我国原子级制造产业体系。

(4) 注重原子级制造平台及人才队伍建设

建立原子级制造平台,保证原子级制造人才队伍培育。原子级制造属于多学科融合发展的前沿研究领域,可建立原子级制造发展平台,吸纳基础理论、制造科学、物质科学、表征检测等方面的专家,集中实现原子级制造机理、技术、方法的关键问题突破。同时,注重原子级制造青年人才培养,形成一批具有国际视野的高水平、强素质、年龄构架合理的原子级制造研发队伍。

(5) 灵活项目机制

重点专项、创新人才探索性项目并举,保证我国原子级制造的创新活力。通过重点专项布局保证我国原子级制造技术全球领先地位;设立原创性、探索性项目,鼓励青年科学家进行原子级制造新方法、新原理的原始创新;建立灵活的项目评价机制,促进潜心研究的学术氛围形成。

4 结 语

基于制造技术发展的内在规律,本文系统分析了制造发展的三个范式,并从人类文明的历史进程和制造技术的发展规律说明了制造范式 III 的重要性和出现的必然性。探讨了制造范式 III 的核心使能技术(原子级制造)的基本内涵与技术发展现状,

并凝练了原子级制造未来发展建议。随着研究的深入,亟需进一步对制造范式 III 的具体内涵进行丰富和充实,突出原子级制造的原始创新性和技术引领性,以在重大战略需求中发挥重要作用。在现有经济环境与技术条件下通过针对性地设置阶段目标,逐步提升我国的先进制造综合水平,实现相关行业细分及产业升级。

制造技术是人类进步、改造世界的核心和基础,制造范式的革新是我国发展关键时期的重大历史机遇。原子级制造从底层逻辑实现了技术作用机制、发展方式以及工业体系的革新,充满机遇和挑战。系统地开展原子级制造的论证与规划,有利于迅速打通从原子到产品的全链条制造流程,促进制造范式 III 时代的到来。我国在原子级制造方面与国外同时起步,需抓住当下时机,从国家层面布局原子级制造技术全面发展体系,培养原子级制造领军人才及青年技术人才储备,推广原子级制造产业应用,进而掌握全球前沿制造技术领域的主动权和话语权。

致谢 感谢双清论坛的全体专家及组委会提供的机会和交流平台。感谢钟掘、金东寒、姚建年、赵继、郭东明、雒建斌、杨华勇、赵纪军、孙立涛、居冰峰、宋凤麒、钱林茂、张广宇、张振宇、王麟琨、杜晓辉等专家的建议和讨论。

参 考 文 献

- [1] Tiziana S, Roberto T. Manufacturing. In: the international academy for produ// Laperrière L, Reinhart G, eds. CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] 房丰洲. 原子及近原子尺度制造——制造技术发展趋势. 中国机械工程, 2020, 31(9): 1009—1021.
- [3] Fang FZ. On the three paradigms of manufacturing advancement. Nanomanufacturing and Metrology, 2023, 6(1): 35.
- [4] Fang FZ. Manufacturing III. Guangzhou: Precision Machining Workshop across the Taiwan Straits, 2014.
- [5] Pounds NJG. The culture of the English people: Iron Age to the Industrial Revolution. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [6] de Vries J. The industrial revolution and the industrious revolution. The Journal of Economic History, 1994, 54(2): 249—270.
- [7] 房丰洲. 工业转型升级如何突破:把握新一代制造技术发展方向. 人民日报, 2015-06-30(07).
- [8] 金东寒. 制造发展的新时代:制造范式 III. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(10): 999.

- [9] 王幼平, 张松林, 顾万发, 等. 李家沟遗址的石器工业. 人类学学报, 2013, 32(4): 411—420.
- [10] 杨宽. 辽西史前磨制石器研究. 长春: 吉林大学, 2016.
- [11] 周明. 古青铜器制作工艺的数字化再现研究. 西安: 陕西科技大学, 2012.
- [12] 毛卫民, 王开平. 铁器时代演变与工业革命. 金属世界, 2019(2): 17—20, 23.
- [13] 高超. 从《自然哲学的数学原理》与《自然哲学》看科学与哲学的分野. 自然辩证法研究, 2017, 33(12): 60—64.
- [14] Theilmann JM. The culture of the English people: iron age to the industrial revolution. History: Reviews of New Books, 1995, 23(3): 103—104.
- [15] Fang FZ. Atomic and close-to-atomic scale manufacturing: perspectives and measures. International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 2(3): 030201.
- [16] Zhang JF, Ducrée J. Proposition of atomic and close-to-atomic scale manufacturing. Advances in Manufacturing, 2023, 1—5.
- [17] Gao J, Luo XC, Fang FZ, et al. Fundamentals of atomic and close-to-atomic scale manufacturing: a review. International Journal of Extreme Manufacturing, 2022, 4(1): 012001.
- [18] Mathew PT, Rodriguez BJ, Fang FZ. Atomic and close-to-atomic scale manufacturing: a review on atomic layer removal methods using atomic force microscopy. Nanomanufacturing and Metrology, 2020, 3(3): 167—186.
- [19] Fang FZ, Zhang XD, Gao W, et al. Nanomanufacturing: Perspective and applications. CIRP Annals, 2017, 66(2): 683—705.
- [20] Fang FZ. On the three paradigms of manufacturing advancement. Nanomanufacturing and Metrology, 2023, 6(1): 35.
- [21] 李沫, 李倩, 张健. 原子制造与原子微系统: A2P与强约束集成微系统技术的结合. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(5): 793—799.
- [22] 张丽娟. 美国发布《国家先进制造业战略》. 科技中国, 2023(3): 91—94.
- [23] Xie WK, Fang FZ. Cutting-based single atomic layer removal mechanism of monocrystalline copper: atomic sizing effect. Nanomanufacturing and Metrology, 2019, 2(4): 241—252.
- [24] Xie WK, Fang FZ. On the mechanism of dislocation-dominated chip formation in cutting-based single atomic layer removal of monocrystalline copper. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(5): 1587—1599.
- [25] Yan YD, Geng YQ, Hu ZJ. Recent advances in AFM tip-based nanomechanical machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 99: 1—18.
- [26] Geng YQ, Yan YD, Wang JQ, et al. Fabrication of periodic nanostructures using AFM tip-based nanomachining: combining groove and material pile-up topographies. Engineering, 2018, 4(6): 787—795.
- [27] Hu J, Xiao XD, Ogletree DF, et al. Atomic scale friction and wear of mica. Surface Science, 1995, 327(3): 358—370.
- [28] Dimiev A, Kosynkin DV, Sinitskii A, et al. Layer-by-layer removal of graphene for device patterning. Science, 2011, 331(6021): 1168—1172.
- [29] Si LN, Guo D, Luo JB, et al. Monoatomic layer removal mechanism in chemical mechanical polishing process: a molecular dynamics study. Journal of Applied Physics, 2010, 107(6): 64310—64310—7.
- [30] Zhang P, Xiao C, Chen C, et al. Effect of abrasive particle degradation on tribochemical wear of monocrystalline silicon. Wear, 2019, 426/427: 1240—1245.
- [31] Chen L, Wen JL, Zhang P, et al. Nanomanufacturing of silicon surface with a single atomic layer precision via mechanochemical reactions. Nature Communications, 2018, 9: 1542.
- [32] Liu ZH, Gong J, Xiao C, et al. Temperature-dependent mechanochemical wear of silicon in water: the role of Si-OH surficial groups. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2019, 35(24): 7735—7743.
- [33] Guo J, Gong J, Shi PF, et al. Study on the polishing mechanism of pH-dependent tribochemical removal in CMP of CaF₂ crystal. Tribology International, 2020, 150: 106370.
- [34] Kim E, Choi S, Jeon S, et al. Development of novel multi-selective slurry with mechanically driven etching for through silicon via chemical mechanical polishing. Materials Science in Semiconductor Processing, 2022, 152: 107025.
- [35] ARIMA K, Kubota A, Mimura H, et al. Highly resolved scanning tunneling microscopy study of Si(0 0 1) surfaces flattened in aqueous environment. Surface Science, 2006, 600(15): 185—188.
- [36] Kanaoka M, Nomura K, Yamauchi K, et al. Efficiency-enhanced elastic emission machining on the basis of processing mechanism// Proceedings of the 12th Euspen International Conference. Stockholm: Euspen, 2012: 193—196.
- [37] Wakamatsu K, Kurokawa S, Toyama T, et al. CMP characteristics of quartz glass substrate by aggregated colloidal ceria slurry. Precision Engineering, 2019, 60: 458—464.
- [38] Liu J, Zhang ZY, Shi CJ, et al. Novel green chemical mechanical polishing of fused silica through designing synergistic CeO₂/h-BN abrasives with lubricity. Applied Surface Science, 2023, 637: 157978.
- [39] Pires D, Hedrick JL, De Silva A, et al. Nanoscale three-dimensional patterning of molecular resists by scanning probes. Science, 2010, 328(5979): 732—735.
- [40] Xu ZY, Wang YD. Electrochemical machining of complex components of aero-engines: developments, trends, and technological advances. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 28—53.
- [41] Ringger M, Hidber HR, Schlögl R, et al. Nanometer lithography with the scanning tunneling microscope. Applied Physics Letters, 1985, 46(9): 832—834.
- [42] Dagata JA, Schneir J, Harary HH, et al. Modification of hydrogen-passivated silicon by a scanning tunneling microscope operating in air. Applied Physics Letters, 1990, 56(20): 2001—2003.

- [43] Day HC, Allee DR. Selective area oxidation of silicon with a scanning force microscope. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(21): 2691—2693.
- [44] Han W, Mathew PT, Kolagatla S, et al. Toward single-atomic-layer lithography on highly oriented pyrolytic graphite surfaces using AFM-based electrochemical etching. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2022, 5(1): 32—38.
- [45] Mathew PT, Han W, Rodriguez BJ, et al. Structure fabrication on silicon at atomic and close-to-atomic scale using atomic force microscopy: implications for nanopatterning and nanodevice fabrication. *Micromachines*, 2022, 13(4): 524.
- [46] Deng H, Endo K, Yamamura K. Plasma-assisted polishing of gallium nitride to obtain a pit-free and atomically flat surface. *CIRP Annals*, 2015, 64(1): 531—534.
- [47] Luo H, Ajmal KM, Liu W, et al. Atomic-scale and damage-free polishing of single crystal diamond enhanced by atmospheric pressure inductively coupled plasma. *Carbon*, 2021, 182: 175—184.
- [48] 张翊, 吴兵, 张临风, 等. 面向原子级表面制造的等离子体诱导原子选择刻蚀技术. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(6): 882—892.
- [49] Lyu P, Lai M, Liu Z, et al. Atomic and close-to-atomic scale polishing of Lu_2O_3 by plasma-assisted etching. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 252: 108374.
- [50] Liang SX, He Y, Ding PB, et al. Smoothing of fused silica with less damage by a hybrid plasma process combining isotropic etching and atom-migration. *Surfaces and Interfaces*, 2023, 41: 103191.
- [51] Deng H, Zhang YJ, Liang JW, et al. Surface reconstruction of sapphire at the atomic scale via chemical-physical tuning of atmospheric plasma. *CIRP Annals*, 2023, 72(1): 489—492.
- [52] 宋凤麒, 戴庆. 原子制造: 物质科学的未来技术. *物理*, 2023, 52(6): 371—380.
- [53] Willke P, Paul W, Natterer FD, et al. Probing quantum coherence in single-atom electron spin resonance. *Science Advances*, 2018, 4(2): 1543.
- [54] Natterer FD, Yang K, Paul W, et al. Reading and writing single-atom magnets. *Nature*, 2017, 543: 226—228.
- [55] Kiczynski M, Gorman SK, Geng H, et al. Engineering topological states in atom-based semiconductor quantum dots. *Nature*, 2022, 606: 694—699.
- [56] Bertana V, Potrich C, Scordo G, et al. 3D-printed microfluidics on thin poly(methyl methacrylate) substrates for genetic applications. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2018, 36(1): 01A106.
- [57] Rashidi M, Wolkow RA. Autonomous scanning probe microscopy *in situ* tip conditioning through machine learning. *ACS Nano*, 2018, 12(6): 5185—5189.
- [58] Goedecke JJ, Bazarnik M, Wiesendanger R. STM study of Nb(111) prepared by different methods. *Physical Review Materials*, 2023, 7(8): 084803.
- [59] del Castillo Y, Fernández-Rossier J. Certifying entanglement of spins on surfaces using ESR-STM. *Physical Review B*, 2023, 108(11): 115413.
- [60] Zhang JF, Wen ZL, Wang WY, et al. Submonolayer Cu/Pt film as bifunctional catalyst for CO oxidation: an STM study. *Journal of Catalysis*, 2023, 425: 1—7.
- [61] Sugimoto Y, Abe M, Hirayama S, et al. Atom inlays performed at room temperature using atomic force microscopy. *Nature Materials*, 2005, 4: 156—159.
- [62] Zhang KK, Wang C, Zhang MH, et al. A Gd@C82 single-molecule electret. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15: 1019—1024.
- [63] Liao MZ, Nicolini P, Du LJ, et al. Ultra-low friction and edge-pinning effect in large-lattice-mismatch van der Waals heterostructures. *Nature Materials*, 2022, 21(1): 47—53.
- [64] 廖俊懿, 吴娟霞, 党春鹤, 等. 二维材料的转移方法. *物理学报*, 2021, 70(2): 227—243.
- [65] Li YC, Qi ZL, Lan YX, et al. Self-aligned patterning of tantalum oxide on Cu/SiO₂ through redox-coupled inherently selective atomic layer deposition. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 4493.
- [66] Chen Z, Liu Y, Zhang H, et al. Electric field control of superconductivity at the $\text{LaAlO}_3/\text{KTaO}_3$ (111) interface. *Science*, 2021, 372(6543): 721—724.
- [67] Goodge BH, Li DF, Lee K, et al. Doping evolution of the Mott-Hubbard landscape in infinite-layer nickelates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(2): e2007683118.
- [68] Xu MQ, Bao DL, Li AW, et al. Single-atom vibrational spectroscopy with chemical bonding sensitivity. *Microscopy and Microanalysis*, 2023, 29(1): 616—617.
- [69] Boureau V, Sklenard B, McLeod R, et al. Quantitative mapping of the charge density in a monolayer of MoS₂ at atomic resolution by off-axis electron holography. *ACS Nano*, 2020, 14(1): 524—530.
- [70] Gao WP, Addiego C, Wang H, et al. Real-space charge-density imaging with sub-ångström resolution by four-dimensional electron microscopy. *Nature*, 2019, 575: 480—484.
- [71] Yang B, Chen G, Ghafoor A, et al. Sub-nanometre resolution in single-molecule photoluminescence imaging. *Nature Photonics*, 2020, 14: 693—699.
- [72] Xu JY, Zhu X, Tan SJ, et al. Determining structural and chemical heterogeneities of surface species at the single-bond limit. *Science*, 2021, 371(6531): 818—822.
- [73] Jelic V, Iwaszczuk K, Nguyen PH, et al. Ultrafast terahertz control of extreme tunnel currents through single atoms on a silicon surface. *Nature Physics*, 2017, 13: 591—598.
- [74] Mallada B, Gallardo A, Lamanec M, et al. Real-space imaging of anisotropic charge of σ -hole by means of Kelvin probe force microscopy. *Science*, 2021, 374(6569): 863—867.
- [75] Patera LL, Queck F, Scheuerer P, et al. Mapping orbital changes upon electron transfer with tunnelling microscopy on insulators. *Nature*, 2019, 566: 245—248.
- [76] Peng JB, Sokolov S, Hernangómez-Pérez D, et al. Atomically resolved single-molecule triplet quenching. *Science*, 2021, 373(6553): 452—456.

- [77] Tang BZ, Song YZ, Qin M, et al. Machine learning-aided atomic structure identification of interfacial ionic hydrates from AFM images. *National Science Review*, 2023, 10(7): nwac282.
- [78] Ma GT, Shen WF, Daniel Sanchez S, et al. Ultrasensitive in-plane excitons-dominated pseudo-Brewster angle of transition metal dichalcogenides monolayers. *Applied Surface Science*, 2023, 630: 157493.
- [79] Yuan YC, Yao CY, Shen WF, et al. Polarization measurement method based on liquid crystal variable retarder (LCVR) for atomic thin-film thickness. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2022, 5(2): 159—166.

The Three Paradigms of Manufacturing Advancement: Law of Manufacturing Development

Fengzhou Fang^{1,2*} Min Lai¹ Jinshi Wang¹ Peng Lyu¹ Nan Yu³
 Xichun Luo⁴ Chunguang Hu¹ Yuanliu Chen⁵ Lei Chen⁶ Hui Deng⁷
 Tao Xu⁸ Chengwei Kang⁹ Wei Han¹⁰ Junyuan Feng¹¹

1. *School of Precision Instruments and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072*

2. *School of Mechanical and Materials Engineering, University College Dublin, Dublin D04 V1W8, Ireland*

3. *Mechanical Engineering, University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3BF, Ireland*

4. *Center for Precision Manufacturing, University of Stratford, Glasgow G1 1XJ, England*

5. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310013*

6. *School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756*

7. *Department of Mechanical and Energy Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055*

8. *School of Integrated Circuits, Southeast University, Nanjing 210096*

9. *School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*

10. *School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200438*

11. *School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018*

Abstract This article comprehensively discusses three paradigms of manufacturing advancement based on the inherent laws of scientific and technological development. It highlights that atomic- and close-to-atomic-scale manufacturing (ACSM) is the fundamental technology of Manufacturing Paradigm III. Furthermore, the article introduces the current status of the development of ACSM, indicating that this technology is currently in a critical strategic opportunity period for development. Moreover, the connotation of the technical system of ACSM is analyzed from the perspectives of design, materials, processing, and measurement. The article summarizes the current research progress in the fields of atomically smooth surface manufacturing, atomic-scale feature manufacturing, and atomic-scale measurement and characterization; further, it reviews potential ACSM technologies, including atomic cutting, atomic polishing, atomic electrochemical machining, atomic plasma processing, atomic manipulation, and atomic-scale measurement and characterization. In addition, the article provides guidance for ACSM development in the future.

Keywords development trend of manufacturing technology; manufacturing paradigm; atomic and close-to-atomic scale manufacturing; atomic precision manufacturing; atomic-level manufacturing.

(责任编辑 刘敏 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: fzfang@tju.edu.cn