DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2004.06.006

·学科进展与展望·

极端制造——制造创新的前沿与基础

钟 掘*

(中南大学,长沙 410083)

[摘 要] 在各种极端环境下,制造极端尺度或极高功能的器件和功能系统,是当代极端制造的重要特征。现代制造科学的重要前沿是在物质结构与运动的多层次、多尺度发现与创造极端制造规律,探索全新概念的产品及其制造模式,这将成为制造业发展的科学先导,也是我国建立具有国际核心竞争力的工业体系和国防体系的基础。本文给出了极端制造的基本概念、内涵、科学目标和基本科学问题,指出极端制造是当今制造技术发展的总体趋势和国家的需要。

[关键词] 极端制造,高能量密度,微纳制造

引 言

极端制造泛指当代科学技术难以逾越的制造前端,其内涵随着人类科技的发展不断被突破与变革。

在各种极端环境下,制造极端尺度或极高功能的器件和功能系统,是当代极端制造的重要特征,集中表现在微制造、巨系统制造和强场制造,如制造微纳电子器件、微纳光机电系统、分子器件、量子器件等极小尺度和极高精度产品;制造空天飞行器、超大功率能源动力装备、超大型冶金石油化工装备等极大尺寸、系统极为复杂和功能极强的重大装备。极端制造置物质于各类极端强化的能场与运动环境,实现几何与物性的多尺度演变,并按精确的物理规律集成为极强功能的使能系统。可以认为现代制造科学的重要前沿是在物质结构与运动的多层次、多尺度发现与创造极端制造规律,探索全新概念的产品及其制造模式,这将成为制造业发展的科学先导,也是我国建立具有国际核心竞争力的工业体系和国防体系的基础。

1 极端制造是当今制造技术发展的总体趋势和国家的需要

自20世纪下半叶以来,制造科学与技术在现代科技的前端快速发展,已成为国家发展与国力竞争的重要基础。

1.1 当代制造的核心技术创新于科学认识的前端

20世纪以来的重大科学发现正在迅速创造出全新概念的当代极端制造,同时萌生出种种制造新过程和功能全新的产品,如量子力学与激光器引发的微纳制造和信息产品;极端凝固科学推动的超常性能材料与零件瞬态制造;在数万吨级压力场下获得亚微米等轴晶演变的飞机大件强流变制造;用10^9W/cm^{2}强激光实现大型构件的连接与裁剪;制造过程运动速度已高达10^5 r/min和10^2m/s以上量级;制造尺度可从数千米长的材料、数百米的舰艇到纳米线宽的集成电路;微米尺度制造精度已达$10^{-2}\mu$m量级,纳米尺度制造精度达0.1 nm量级。

未来的科学技术必将在各种高能量密度环境、物质的深微尺度、各类复杂巨系统中不断有新发现、新发明。21世纪科学与社会对制造的挑战将产生全新的极端制造。新一代极端制造也必然制造出更为完美的物质产品。

1.2 极端制造是国力强盛的重要因素

提供物质产品的强大的现代基础经济、军工产业、空天运载、信息产业都渗透着极端制造,它们都需要高能量密度的材料成型制造、超大或超细的高

---

* 中国工程院院士.

"极端制造"概念曾在国家中长期规划有关专题进行研讨,在国家自然科学基金委员会组织的多次学术会议上交流,众多机械科学专家、物理学家、材料科学家、信息科学家对这一概念的内涵作了多方面的充实。本文简要地阐述了相关内容。

本文于2004年8月30日收到.

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

精度零件制造、超精密器件的微纳制造、仿生高智能巨系统的集成制造等等,我国发展中的空天运载工程、GW以上的超级动力装备、数百万吨级的石化装备、数万吨级的模锻装备、新一代高效节能冶金流程装备、已创造我国最大产值的电子产品制造等,它们最核心的制造技术都是当代的极端制造。

以大型金属构件流变成形制造能力为例,二战以后,美、俄、法等国总结德国二战中空中优势的来源之一为超大型金属构件锻造能力,迅速建造巨型水压机。美国建造两台4.5万吨水压机、俄国建造两台7.5万吨水压机、法国建造一台6.5万吨水压机,以此为基础,迅速发展空中作战能力和洲际运载能力。

美国1991年"国家关键技术"报告中向政府提出:在制造设备方面领先的国家有可能主宰半导体器件的世界市场,建议将"微米级和纳米级制造"列为国家关键技术。据统计,当今发达国家国民生产总值增长部分的65%与微纳制造有关,依赖微纳制造的电子工业增长速率一般为GDP增长速率的3倍。本世纪的电子工业将成为全球第一大产业,预计2010年我国电子工业将达6万亿元人民币。

1.3　极端制造的基础研究是各国21世纪的强国战略

极端制造的科学基础几乎涉及所有的基础学科的前沿,如新一代智能制造融入的生物学与仿生学、排除复杂巨系统灾难性变异的突变论研究、为实现高精度成形成性制造开展的高密度强能束与物质交互的研究等等。其中发展最为活跃的微纳制造基础是21世纪极端制造的制高点。2004年美国联邦政府投入微制造、纳米技术领域的研究预算已达8.5亿美元,加上美国各州政府和工业界的投入,预计2004年美国在该领域的资金投入将超过21亿美元。

据《国际半导体技术指南》预测:2010年前后当特征线宽减小到0.05μm后,微电子器件将达到物理极限,纳电子器件将进入产业化。目前国际上已对纳电子器件提出两种解决思路:一种是现有集成电路的微细化,工艺设计思想基本不变,但在材料、光刻、掺杂等制造要素的原理与工艺方面将会有较大变化,如材料可能使用有机物或聚合物,成为有机纳米电子器件;另一种与现有微电子原理和工艺完全不同,利用量子效应构成全新的量子结构系统。国内外有关实验室已在试验研究各种可能的器件模式,如量子点、量子线、量子阱、单电子晶体管、单原子开关、自旋电子器件、共振隧道器件等,特别是从量子态波函数出发来设计新一代量子器件,开辟了量子相干的电子、光电子新领域。这些研究目前尚处在基本效应发现、基本原理探索、基本结构实验的阶段,但是进展很快。如由美国国防部资助的自旋电子学重大项目,制成了16kB和1MB的芯片;美国哈佛大学、荷兰代尔福特大学等用碳纳米管、纳米导线做成二极管和场效应晶体管;伯克利分校和贝尔实验室已尝试用几百个原子的晶体作量子岛;加州洛杉矶分校和惠普实验室运用共振隧道效应使有机分子实现"通"、"断"状态的转换等实验研究,这些基础研究已显示了下一代微纳器件与系统发展的新方向和进入量子化的未来新阶段。美国半导体工业协会预计:"目前这场采用纳米量子结构的信息技术硬件革命,完全可以与30年前用微电子集成芯片取代晶体管所引发的那场革命相提并论"。

微制造会遇到一系列基本科学问题的挑战。具有器件功能的纳米结构,由于量子效应、微尺度效应等,其形成器件功能的原理、材料的性能与结构的制造将会与现有硅基微电子器件有很大差异。一个重要的问题是纳米电路、分子电路等结构如何与外部宏观世界的连接,如何解决成为器件需要的高密度的可靠连接、快速组装、自动调试、分子级精度的检测,以及完成所有制造过程的纳米操纵和运动载体的纳米与分子尺度精确运动的调控等都是微制造中极具挑战性的基本问题。

2　极端制造发展的科学基础

2.1　科学目标与基本科学问题

基于上述分析,当前极端制造基础研究的科学目标可以概述为:探索下一代制造尺度与制造外场的新极端、新概念产品及其制造过程的科学依据,构造未来制造科学体系基础,形成新世纪主流制造的先导技术原理,建立具有超前研究能力的研究平台和队伍,形成我国在这一战略必争领域的科学技术优势。

极端制造的基础科学问题集中在:在物质的深层次发掘新功能产品的制造原理;在极小、极大尺度、极端制造外场中,探索物质演变为超常功能单元与复杂功能系统的过程规律;发现与创成极端制造环境与极端尺度制造受体间的交互机制。

2.2　需要研究与突破的几个重要问题

(1)强场制造的多维、多尺度演变

强场制造对能量的应用不断突破极限。激光、电磁能、微波、化学能等多种超越传统领域的能量形

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

式被引入强场制造，所有强能场在制造界面上聚集、传递、吸收与发散。研究超强加工能场与巨大被加工件或巨大物流系统之间能量的传递与转化、物质的输运过程，探求超强能场诱导下物质的多尺度演变机理，寻求制造界面上超常物理场的形成与实现制造过程的新原理。

(2)微结构精密成形与选择性性能演变

微成形指微结构三维几何特征的构成制造；微改性指微制造过程中多能域(如能束、热、力、化学、真空、超声波、电磁场等)对材料的改性作用。研究微去除、微生长、微成形、微改性等制造界面处的物理化学作用、高密度能量与微尺度物质的输运规律，探索微结构体积与界面的量子效应、尺度效应以及不同能量形态对材料选择成性的作用机制与演变规律，寻求微结构几何与拓扑转移、性能演变的新原理，及微结构几何形态的精确表达与计量。

(3)微系统的组装与功能生成

微集成使微结构成为具有特定功能的微系统。研究微集成中微驱动、微操纵、微连接、微装配等过程中的量子力学、动力学、热力学、微摩擦学中的未知效应和行为规律，研究微系统中微通道、微间隙、微界面的介质转移和能量输运，探索微系统功能新原理和微纳精度的动态形成规律，建立微结构精密制造、微纳尺度工程计量学的基础。

(4)复杂功能系统创成与功能状态的确定性

研究由功能单元创成为复杂功能系统中能量的形态演变、运动的状态演变与功能的模式演变，研究巨系统中非确定性因素、非线性传递对功能确定性的相关机制，研究微系统中各种微效应对系统功能的相关与干扰，研究新型巨、微系统功能创成的系统规律。

(5)极端制造环境的多场耦合、随机扰动与过程稳定

极端制造系统是光、机、电、液、磁、热等多强场聚集系统，其多场耦合和随机干扰可能突变为运动畸变、过程失稳和功能丧失。研究极端制造系统的复杂耦合行为、能量传递的聚集与发散、随机涨落扰动在制造载体与受体间的传输与演化规律，研究调节性快变过程与主导性慢变过程的交互、高稳定、高精度制造过程的形成与控制。

3 极端制造的基础研究需要国家规划与投入

目前国内对未来主流制造科学聚集的研究力量、目标与规划尚未有效协同，力量分散单薄，在国力有限的情况下，需要国家将极端制造列入国家重大基础研究规划、国家自然科学基金等各项重大国家计划，明确战略目标与战略重点，凝聚国内优势学科力量，建议组建全国巨系统、微系统、超强制造研究基地，明确以下一代重大装备产业和电子信息产业为主要背景，建立材料体系、器件与系统、制造工艺、制造装备、精密检测、精良控制等科学基础研究平台，瞄准几个核心方向，突破几个重大问题，真正为我国本世纪先进制造领域的发展形成先导性制造科学基础。

EXTREME MANUFACTURING
——NEW TERRITORY AND BASE OF MANUFACTURING INNOVATION

Zhong Jue
(*Central South University*, *Changsha* 410083)

Abstract It is an important feature & connotation for current extreme manufacturing to manufacture macro/ micro scales, high strength/size frame components and functional systems under the diverse extreme-manufacturing circumstances. The modern science & technology grows toward the opposite extremes of macro/ micro scales. New substances/ effects/ technologies/systems are to be born in extreme environments. New progress/ products/industries are waiting for us. This paper introduces the basis concept, connotation, scientific target and fundamental scientific issues.

Key words extreme manufacturing, ultra-high energy density, micro-/nano-manufacturing

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