



2010-2011

*Report on Advances in
Mechanical Engineering*

中国科学技术协会 主编
中国机械工程学会 编著

中国科学技术协会
中国机械工程学会
机械工程学科发展报告

机械工程学科发展报告
(成形制造)

中国科学技术出版社





2010-2011

机械工程学科发展报告

(成形制造)

REPORT ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING

中国科学技术协会 主编

中国机械工程学会 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

2010—2011 机械工程学科发展报告(成形制造)/中国科学技术协会主编;
中国机械工程学会编著. —北京:中国科学技术出版社,2011. 4
(中国科协学科发展研究系列报告)
ISBN 978-7-5046-5829-6

I. ①2… II. ①中…②中… III. ①机械工程-研究
报告-中国-2010—2011 IV. ①TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 036810 号

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62173865 传真:010-62179148

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京凯鑫彩色印刷有限公司印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:12 字数:300 千字

2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:36.00 元

ISBN 978-7-5046-5829-6/TH·54

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

2010—2011 机械工程学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING

首席科学家 徐滨士

评审专家组 (按姓氏笔画排序)

王海斗	王麟书	吕东显	任广升	刘世参
孙国雄	李克锐	李晓延	宋天虎	张 伟
张倩生	胡正寰	徐跃明	徐滨士	郭景杰
雷源忠	魏世丞			

撰写专家组 (按姓氏笔画排序)

丁宏升	马世宁	王 铀	王国彪	王锦程
叶升平	史佩京	朱 胜	任广升	多树旺
刘 敏	刘建生	刘宣勇	闫牧夫	许庆彦
孙志超	苏仕方	苏彦庆	李午申	李长久
李文亚	李庆鑫	李克锐	李宏伟	李明哲
李晓延	李 辉	杨 合	吴 昆	宋宝韞
张文忠	张忠仇	陈建敏	陈善本	武传松
苑世剑	范多旺	林 安	金泉林	单忠德
夏琴香	郭景杰	董世运	董汉山	蒋百灵
曾 攀	曾艺成	谢 谈	甄 良	蔡启舟
谭 俊				

学术秘书组 陈超志 左晓卫 于宏丽

序

当前,诸多学科发展迅速,学科分化、交叉和融合愈加明显,新的学科不断涌现。开展学科发展研究,探索和总结学科发展规律,明确学科发展方向,有利于促进学科内部、学科之间的交叉和融合,汇聚优势学术资源,推动学科交叉创新平台的建立。

开拓和持续推进学科发展研究,促进学术发展,是中国科协作为科学共同体的优势所在。中国科协自 2006 年开始启动学科发展研究及发布活动,至今已经编辑出版“学科发展研究系列报告”108 卷,并且每年定期发布。从初创到形成规模和特色,“学科发展研究系列报告”逐渐显现出重要的社会影响力,越来越受到科技界、学术团体和政府部门的重视以及国外主要学术机构和团体的关注。

2010 年,中国科协继续组织了中国化学会等 22 个全国学会分别对化学、心理学、机械工程、农业工程、制冷及低温工程、控制科学与工程、航空科学技术、兵器科学技术、纺织科学与技术、制浆造纸科学技术、食品科学技术、粮油科学与技术、照明科学与技术、动力机械工程、农业科学、土壤学、植物保护、药学、生理学、药理学、麻风病学、毒理学 22 个学科进行学科发展研究,完成了近 800 万字、22 卷学科发展研究系列报告以及《2010—2011 学科发展报告综合卷》。

本次出版的学科发展研究系列报告,汇集了有关学科最新的重要研究成果、发展动态,包括基础理论方面的新观点、新学说,应用技术方面的新创造、新突破,科技成果产业化转移的新实践、新推进等。一些学科发展报告还提出了学科建设的对策和建议。从这些学科发展报告中可以看出,近年来,学科研究课题更加重视服务国家战略,更加重视与民生关系密切的社会需求,更加重视成果的产业化转移;学科间的交叉融合更加明显,理论创新与技术突破的联系结合更加紧密。

参与本次学科发展研究和报告编写的专家学者有 1000 余人。他们认真探索,深入研究,披沙拣金,凝练文字,在较短的时间里完成了研究课题。这些工作亦是对学科建设不可忽略的贡献。

在本次“学科发展研究系列报告”付梓之际,我由衷地希望中国科协及其所属全国学会不断创新思路,坚持不懈地推进学科建设和学术交流,以学科发展研究以及相应的发布活动带动各个学科整体水平的提升,在增强国家自主创新能力中发挥强有力的作用,以推进我国经济持续增长和加快转变经济发展方式。

A stylized, handwritten signature in black ink, likely belonging to Chen Yong, the Vice President of the Chinese Academy of Sciences.

2011 年 3 月

前 言

《2010—2011 机械工程学科发展报告(成形制造)》(以下简称《报告》)是根据《中国科协学科发展研究项目管理实施办法(试行)》的精神和要求,组织机械工程学科的专家学者对成形制造领域开展调研,对其科技发展情况进行研究总结后编写而成的。

中国机械工程学会组织了以中国工程院院士、本会特邀理事徐滨士院士为首席科学家的专家撰写组,下设6个专题小组,在收集资料、调查研究和充分掌握信息的基础上,通过多次研讨会讨论和修改,并征求了国内多位知名专家学者的意见,形成了本《报告》。

《报告》共设综合报告及塑性成形、铸造成形、焊接制造、再制造成形、材料改性与控制工程、表面工程等6个专题,涵盖了机械成形制造的主要领域。共有50多位专家学者参与了《报告》的研讨及撰写工作,撰稿者都是工作在我国机械成形制造学科学研究第一线的知名中青年学者及专家。国家自然科学基金委员会机械学科主任王国彪与西北工业大学的杨合教授一起负责组织并撰写了《报告》中的综合报告。

《报告》重点针对可实现环境友好的绿色制造和有利于制造业节能减排、降低资源消耗的材料成形制造新技术,特别是功能材料的开发、近净铸造成形、精确塑性成形、精确连接、精密热处理改性、表面改性、高精度模具等领域的研究和技术发展,通过各种信息的分析总结,科学评价最近两年机械工程学科中成形技术的新进展、新成果、新见解、新观点、新方法和新技术等;研究分析发展现状、动态和趋势,以及国际比较、战略需求,提出研究方向;展望发展目标和前景,提出成形制造技术的发展对策和建议。因此,《报告》可为国家相关部门及从事机械工程学科研究的专家学者提供参考。

由于时间、信息和撰写水平的局限,《报告》中难免存在疏漏之处,欢迎读者指正。

中国机械工程学会
2011年1月

目 录

序	韩启德
前言	中国机械工程学会

综合报告

机械工程发展研究(成形制造)	(3)
一、引言	(3)
二、本学科近年的最新研究进展	(4)
三、本学科国内外研究进展比较	(19)
四、本学科发展趋势及展望	(26)

专题报告

塑性成形领域科学技术发展研究	(37)
铸造成形领域科学技术发展研究	(68)
焊接制造领域科学技术发展研究	(87)
再制造成形领域科学技术发展研究	(105)
材料改性与控制工程领域科学技术发展研究	(123)
表面工程领域科学技术发展研究	(142)

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report

Mechanical Engineering (Forming Manufacturing)	(165)
--	-------

Reports on Special Topics

Research on the Development of Plastic Forming Science	(173)
Report on Development of Casting Technology	(174)
Progress in Welding Science and Technology	(175)
Development in Remanufacture Forming Science and Technology	(178)
Research on the Development of Materials Modification and Control Engineering Field	(179)
Summary of the Developments of Surface Engineering	(180)

综合报告

机械工程发展研究(成形制造)

一、引言

成形制造技术,主要包括铸造成形、塑性成形、焊接成形、材料改性与控制工程、材料表面工程以及再制造成形。主要是在力场或温度场,或二者耦合作用下,或者在力、热及其他能场的耦合作用下,不仅能使得材料的形状与尺寸改变,而且控制甚至改善零件的最终使用特性。

成形制造是材料质量不变或增加的成形过程,更是零构件成形性一体化,涉及多学科交叉融合、高度非线性的物理过程。通过创造合适的成形方式与成形条件,成形制造技术不仅能赋予零构件近净的甚至精确的复杂形状与尺寸,而且能赋予高性能,从而发展成为高性能精确成形制造技术。高性能精确成形制造,能通过成形过程使得零构件的宏观性能在坯料性能的基础上得到提高(或者使原有微观组织也得到改善),这不仅可使零构件更好地发挥效能并延长寿命,而且还可以减少材料用量以达到轻量化的目的,因此,是少无废料产生、绿色、节约型的轻量化零构件制造技术,也是技术密集、知识密集和高增值的制造技术,在实现节能减排、发展低碳经济、建设创新型国家等方面都将发挥关键的不可替代作用。高性能精确成形制造技术是先进制造技术发展的重要方向,是支撑国民经济可持续发展与国防建设的主要技术之一,其能力、技术水平和技术经济指标已经成为衡量国家的制造技术与工业发展水平以及重大、核心关键技术装备自主创新能力的主要标志之一。其发展已成为体现国家工业综合实力、竞争力和科技水平的重要标志之一,对推动我国国民经济、国防建设和社会发展具有重大意义。航空航天装备制造是最具前沿引领性与产业带动性的国家战略性新兴产业,是国家综合实力的重要体现;汽车制造涉及的技术密集、产业关联度高、规模效益明显。未来20年是我国航空航天、汽车、能源装备等高端制造业发展的战略机遇期,需要成形制造科技的全面提升与支撑。我国正在实施的国家与国防中长期科技发展规划以及“大型飞机”、“载人航天与探月工程”与“高档数控机床与基础制造装备”等一系列科技重大专项与重大工程对成形制造技术科技都有迫切而重大的需求,迫切要求先进成形制造零件朝着高性能、轻量化、高精度、低成本、高效率、能源高效利用与资源节约型、环境友好的方向发展。上述客观作用、重大需求与学科发展前沿使得先进成形制造研究总体发展趋势汇聚在高性能精确成形制造这个焦点上。发展高性能精确成形制造技术依赖于高性能精确成形制造科学发展的强有力支撑。其主要代表性内容包括以下方面。

(一) 铸造成形

以发展高性能凝固精确成形技术为主要目标,包括钢铁材料、轻合金(铝、镁、钛)等大型/复杂件凝固成形过程中组织及性能、尺寸精度与表面质量的演化机理与控制技术,包

括多能场作用下凝固成形、基于数字化驱动的快速铸型无模化制造技术、高性能致密金属零件激光成形、定向与单晶精确凝固成形、压力下凝固精确成形等。

(二) 塑性成形

以发展高性能大型/复杂件高效节约型精确成形性一体化制造技术为主要目标,包括轻质高强钢、铝合金、钛合金等板材刚性模具整体冲压成形、柔性增量成形与基于管坯的内高压成形和多约束成形,体积坯料整体加载成形与局部加载成形形状变化、微观组织与宏观性能变化的关系,大型高性能构件省力成形性一体化制造,低成本批量微成形,多场耦合成形性过程全过程多尺度的建模、仿真与优化。

(三) 焊接成形

以发展优质高效焊接与超常条件下焊接技术为主要目标,包括高效焊接新方法、新材料及异种材料的连接机理,特种环境下焊接,大型复杂结构焊接,微细结构焊接,以及焊接过程传感与质量控制理论与方法等。

(四) 材料改性与控制工程

以发展各种整体及表面处理技术与装备来实现对材料及成形零部件成分、组织结构和性能与变形的精确调控为主要目标,包括材料组织结构设计与精密热处理改性技术、虚拟热处理技术、材料纳米改性科学技术,以及基础材料构件组织结构、性能与可靠性评价与表征。

(五) 表面工程

以发展高性能、低能耗、绿色的表面工程技术为主要目标,包括装备维修与再制造中的表面工程、极端环境条件下的材料表面工程、新能源中的材料表面工程、面向绿色制造和节能降耗的材料表面工程等。

(六) 再制造成形

以发展智能化、复合化、专业化和柔性化等适合批量的再制造成形技术为主要目标,包括研究发展以产品全寿命周期理论、废旧零件和再制造零件的寿命评估预测理论等为代表的再制造成形理论,并创新再制造的关键技术。

二、本学科近年的最新研究进展

目前,90%以上的各种零部件在其制造过程中都经历了凝固过程,全世界钢材的75%要进行塑性加工,65%的钢材要用焊接才得以成形。我国2008年的钢产量已超过了5亿吨,2009年汽车的产量已超过1300万辆,2010年突破1800万辆,均稳居世界第一,我国已成为成形制造业第一大国。成形制造技术为我国航空航天工业、汽车工业、重大装备制造工业、兵器工业、能源工业、造船工业、信息工业的发展作出了重大贡献。未来20年是我国高端制造业发展的战略机遇期,迫切需要先进成形制造技术与科学的全面提升与支撑。

推动我国制造业发展的主要驱动力是国家的重大需求、国民经济的发展和市场的需要。成形制造业的强大依赖于成形制造技术的创新,而成形制造技术的创新来源于成形制造的基础研究。发达国家的实践证明,成形技术特别是国防领域的成形技术与科学不仅是先进制造领域的前沿,而且是国防和国家制造业的基础支撑,同时能为国家大型工程(如探月、大型飞机等)提供核心关键成形技术支撑。大多数先进成形技术及其科学基础首先产生并服务于国防需求,然后拓展到其他领域,促进和带动国家整体科技进步和经济发展,并向世界一流水平迈进。

我国对该领域的科学研究与技术创新也极为重视,在凝固、焊接、塑性成形等方面建有多个国家级重点实验室,近几年来每年都有 100 多项国家自然科学基金项目获准资助,也得到了多项国家自然科学基金重点项目、国家及国防“973”、“863”、国家支撑计划的支持,已有 10 人获得了国家杰出青年科学基金的资助,取得了一批在国内外产生了重要影响的创新性成果,为我国经济发展与国防建设提供了成形新理论、先进技术和先进方法,近年的最新研究进展归纳如下。

(一)铸造成形领域

近年来,节能、环保、高效和低成本铸造成形技术获得了较快的发展,在原有几十种铸造技术和不断吸收其他领域研究成果的基础上,研发了多种新的铸造技术,例如,高真空压铸技术、半固态铸造技术、挤压铸造技术、电磁铸造技术、计算机模拟技术和快速成形技术以及无机非金属粘结剂等,对提升我国铸造技术水平,增强核心竞争力起到了重要作用。铸铁件生产技术得到了迅速提高,在一些重大、关键铸件的生产方面取得突破。我国通过凝固成形原理、技术与装备的集成创新形成了调压铸造成套技术,解决了铝、镁合金大型复杂优质薄壁铸件成形的难题。

1. 基于数字化驱动的快速铸型无模化制造技术

基于数字化驱动的快速铸型无模化制造技术,是在铸型三维 CAD 驱动下,直接切削加工砂型而获得铸造用铸型,浇注后制成金属件。其装备主要包括加工铸型用特种刀具系统、集气动辅助排砂与干式切削风冷于一体的排砂排屑系统、全密封防护的多轴联动运动系统。该技术及设备是 CAD、铸造、数控切削等技术的系统集成,是一种全新的零件快速制造技术及设备,不需要造型用模样,不需要预留拔模斜度,模型驱动数控加工铸型,减少了人工干预,铸型精度不受尺寸增大而降低,从而有利于保证铸件内在质量和尺寸精度,提高了铸件质量稳定性,实现了金属件设计、分割、加工、组装全流程的数字化、精密化、自动化、柔性化、绿色化,从而可有效缩短产品开发周期,降低开发成本,为汽车、航空航天、国防军工、机械、船舶等行业新产品开发提供有力的技术支撑。这一技术与装备近年来得到快速发展。机械科学研究总院自 2006 年起开展了该项技术研发工作,开发出国内首台铸型数字化加工机,并进行了刀具材料、砂型可加工性、加工工艺、系统软件以及设备开发等工作,研制出的铸型数字化加工成形机,能够完成水玻璃砂型、树脂砂型、覆膜砂型等多种铸造用砂型的加工制造,其单块最大可加工砂型尺寸为 1000mm×1000mm×400mm,加工精度±0.1mm。更大的铸型可以采用分型、组装的方式来完成。已将铸型数字化加工技术与激光选取烧结快速成形技术相结合,实现了汽车发动机缸体、排气管等

复杂铸件的快速制造。目前,该项技术在中国一汽、广西玉柴等单位进行了汽车发动机缸体和柴油机缸体的快速制造。

2. 基于激光的金属复杂零件直接成形技术

基于激光的金属复杂零件直接成形技术,以合金粉末为原料,将高性能材料快速凝固制备技术与复杂零件近净成形制造技术有机融为一体,通过激光熔化逐层沉积(生长制造),直接由零件 CAD 模型完成高性能金属零件的“近净成形”,使得零件具有细小、均匀、稳定的快速凝固组织和优异的综合力学性能;对大型构件成形,无需大型锻压装备、大型模具及大规格锻坯制备;柔性高并有对产品 & 结构设计变化快速响应制造能力和快速修复能力,在飞机、航空发动机、石化等重大工业装备研制中具有技术创新突破能力和广阔应用前景。目前,航空航天等领域基于激光的金属复杂零件直接成形已成为研究热点,其中,钛合金、高温合金等高性能金属构件激光快速成形技术是材料累加制造中一种最具挑战性的快速原型制造技术。近年来,北京航空航天大学与西北工业大学在钛合金大型复杂承力结构件激光快速成形和激光修复的工艺、组织和性能控制等关键技术方面取得了多项重要进展,已实现在先进飞机、航空发动机和口腔修复体等上的应用。

3. 高温合金单晶叶片定向凝固过程的三维宏/微观耦合数值模拟

清华大学和西北工业大学实现了基于相场法和元胞自动机法的凝固过程及微观组织的多尺度数值模拟,为我国单晶涡轮叶片质量控制提供了理论依据。

清华大学考虑定向凝固过程中炉壁温度的变化、加热炉几何参数、叶片排布方式等影响,基于能量守恒提出了射线追踪法处理真空封闭炉腔中多叶片条件下的复杂辐射换热过程,建立了高温合金叶片定向凝固过程温度场模拟的改进模型和高效高精度模拟方法;基于热传输、溶质传输过程及晶粒生长物理过程,建立了镍基高温合金凝固过程微观组织形核和生长的三维数学模型,采用欧拉角定义晶粒的晶体取向,并提出了改进的 CA 单元捕获规则来处理晶粒沿任意方向的生长过程,考虑晶体取向对晶粒生长过程的影响,建立了定向凝固过程中晶粒竞争生长模型。针对高温合金定向凝固叶片,采用三维宏/微观有限差分网格嵌套耦合方式,并采用分层算法模拟微观组织,在大幅度减少微观组织网格数量的情况下实现了全叶片微观组织的模拟。通过模拟研究发现,抽拉速度越高,生长界面曲率和等温线曲率越大,纵向温度梯度小,越易产生结晶缺陷;预测了选晶器内不同截面晶粒的形貌和晶体取向分布情况,发现引晶段内从底面向上晶粒的数量逐渐减少。针对具有复杂陶瓷芯内腔和薄壁曲面叶身结构的单晶涡轮叶片,预测了在不同的工艺条件下凝固结束叶片的整体三维微观组织和杂晶缺陷,揭示了抽拉工艺对单晶涡轮叶片杂晶缺陷的影响,为我国单晶涡轮叶片质量控制提供了理论依据。研究成果已在北京航空材料研究院和沈阳黎明航空发动机有限责任公司等单位应用,效果显著。

(二)塑性成形领域

1. 复杂件回转成形新技术

(1)载重汽车轻量化车轮辗—旋联合精密成形技术

北京机电研究所等单位针对载重汽车变截面无内胎钢制车轮低碳和轻量化制造要

求,采用热辗扩工艺将厚壁铸造钢筒辗环预成形,以获得无缝异型薄壁环坯,再采用强力旋压工艺对其进行多道次变薄旋压,得到高强度、变截面、无内胎、轻量化的载重汽车钢车轮,开发了辗—旋联合精密成形新技术及专用的数控三旋轮强力旋压机。该新工艺具有核心自主知识产权,具有显著的节能减排效果。

(2)非回转体轴类零件楔横轧精确成形

北京科技大学经过系统研究,提出了凸轮轴、偏心轴等非回转体轴类楔横轧精确成形方法,建立了非回转体零件楔横轧轧辊曲线的数学模型及辊型曲线普适方程,并得到了偏心轴、凸轮轴、四方轴、六方轴等典型非回转体轴类零件的楔横轧辊型曲线方程;分析了凸轮轴、偏心轴成形过程中应力应变场及坯料金属的轴向、径向和周向流动规律,揭示了楔横轧轧制凸轮轴等非回转体轴类零件精确成形机理。在此基础上,发展了非回转体轴类零件楔横轧精确成形。

2. 薄壁复杂件基于柔性模具与基于管坯的精确成形技术

(1)薄壁复杂件柔性模具增量精确成形

柔性(模具)增量成形技术,是基于产品三维 CAD 模型直接驱动,通过形状简单工具的包络面或液压力、电磁力来实现三维曲面零件的成形。时效成形、多点成形、单点增量(旋压)与液压成形是比较有代表性的薄壁复杂件柔性模具增量精确成形技术。从广义角度看,很多回转成形,如摆动碾压以及楔横轧也都是增量成形。采用柔性模具成形技术不仅可以节省大量的整体模具设计、制造及修模调试费用,还可省去保存各种大型模具所需的大型厂房等;所成形的零件尺寸越大,批量越小,其优越性越突出。这种技术可广泛用于汽车工业、航空航天、船舶制造和民用产品的小批量、多品种、轻质高强板材复杂件(难成形的金属板材件)的成形制造及相应的新品研制。而多点成形,由规则排列的系列基本体(或称冲头,其高度由计算机控制)所构成的点阵曲面代替传统整体模具的连续曲面实现成形,是一种数字化精确成形技术。单点增量成形(或称单点数控增量成形),则是由快速原型制造技术的分层制造思想启发,将三维数字模型沿高度方向离散成一系列等高线层,而成形工具在计算机控制下沿该等高线层面上的轨迹运动,使板材逐次变形代替整体成形。由于工件与工具的接触面积小,所以载荷并不大。旋压成形也可归为单点增量精确成形技术的一种。近年来,薄壁复杂件柔性模具增量精确成形研究颇受关注。吉林大学在多点成形方面取得了突出进展,发展了大型非规则空间曲面零件多点成形理论与关键技术,开发出分段成形、多道次成形、反复成形、超大曲面件与薄板零件成形等新工艺,基于柔性辊及多点调形原理,发明了连续多点成形新技术,使用轴线可弯曲的柔性辊,实现了双曲面三维曲面的连续成形,开发出了具有自主知识产权的以及闭环成形等多种多点成形工艺与具有自主知识产权 CAD/CAM 软件和多点成形装备。

(2)基于管坯的复杂件精确成形

管材可看成是一个方向有曲度的板材,是板坯的深度延伸。基于管坯的薄壁复杂件精确成形技术已经成为精确成形制造薄壁复杂件的重要先进技术。基于管坯的内高压成形是实现封闭空心截面类轻量化结构件制造的主流技术,而且有节约材料、缩短工艺流程、提高零件疲劳强度和刚度、降低生产成本等优势。哈尔滨工业大学近年来研究了轴线为弯曲型、截面为矩形、梯形和长椭圆形的三种典型截面管内高压成形过程中过渡圆角充

填充行为、壁厚分布规律、缺陷形式及防止措施,发明了利用内凹形预成形坯降低整形压力的方法,并在汽车结构件国产化中得到实际应用,成形同样尺寸的压力比国外低 50% 左右。研制的 400MPa 多台数控内高压成形装备已在工业生产中得到应用,成形出奔腾轿车副车架、克莱斯勒 300C 轿车仪表盘支架、底盘前梁和火箭接头用于实际生产。实现了难度极大的超薄三通管件和异型管件成形,其径厚比达到了 180、膨胀率达 110%。

铝合金与钛合金大口径小弯曲半径薄壁弯管大飞机、先进军机和发动机上有广泛应用价值的“血管”类及提供动力与控制保障的关键轻量化构件,多模具约束下的数控弯曲成形则是能够实现其高效、节约、稳定、数字化精确成形主流先进技术。西北工业大学针对该过程需要多种模具协同作用和严格配合,需要解决多场多因素耦合下起皱、回弹和截面畸变等难题,发展了铝合金及中强钛合金管大口径薄壁管小半径弯曲的精确数控弯曲稳健成形的成套工艺与模具技术。

3. 大型锻件成形关键技术

我国国防、核电、船舶、冶金、石化、重型机械等领域的快速发展需要特大型高性能轻合金框类件、壁板类件、核电转子、特大曲轴、特大型轧辊、大型环类件的高质量成形制造来支持。中国第一重型机械集团公司(以下简称一重)、中国第二重型机械集团公司(以下简称二重)和上海重型机器厂有限公司三大国内核电单位的大锻件研发、制造能力与水平近年来取得长足进步。清华大学、燕山大学和太原科技大学在大锻件成形数值模拟方面也取得了重要进展。

(1) 600t 级特大型钢锭的制造技术

中国一重、二重近年来研究了 600t 级钢锭锭型设计、优化与冶炼工艺,多炉钢水合浇的钢液成分、温度、浇注速度控制,特大型钢锭凝固模拟及偏析控制,耐火材料试验及优化试验,夹杂物及杂质元素控制等多项工艺,基本掌握了 600t 级特大型钢锭的制造技术。

(2) 大型构件锻造过程中材料微观组织演变规律与组织控制技术

建立了核电锻件用超低碳奥氏体不锈钢 304 钢动态和静态再结晶动力学模型及晶粒尺寸变化模型,获得了变形温度、变形量及变形分布等主要热锻工艺参数对材料晶粒尺寸的影响;揭示了多火次、多工序锻造过程中工序间歇冷却、火次间再加热及热变形等主要阶段的组织变化行为,集成材料变形过程晶粒细化机制和加热晶粒长大机制,并将材料热变形组织演变的内在行为的控制与宏观工艺参数的控制相结合,实现了大锻件锻造过程宏观工艺参数与微观组织耦合的模拟,提出了大型锻造过程微观组织演变与控制技术。

(3) 封头与管板类锻件成形技术

针对核电 RPV 整体顶盖和 SG 水室封头等形状复杂的封头类锻件,发展了旋转锻造成形工艺和整体拉伸工艺。采用特种镦粗工艺解决了钢锭心部冶金缺陷压实、镦压过程拉应力和应变均匀性的控制难题,防止了层状撕裂缺陷、厚饼件中心非金属夹杂等缺陷的堆积,避免了心部产生超标缺陷,并采用合理的热处理工艺,保证了管板锻件的组织和性能。

(4) 复杂筒形件和主管道锻造技术

开发了 RPV 接管段和 SG 锥形筒体的仿形锻造技术,优化了工装模具及锻件形状尺寸控制。针对核电主管道锻件材料 316LN 超低碳奥氏体不锈钢热锻工艺性极差,提出了优化加热温度、变形量及火次等关键参数,防止锻造裂纹和控制主管道静态再结晶细化晶

粒的技术。

(5) 特大型轴类件锻造技术

针对核电常规岛中汽轮机低压整体转子、发电机转子等所用钢锭达到近 600 吨级、其截面尺寸达到 $D_{\max} \geq 4000\text{mm}$ 特大型锻件制造问题,研究了 FM 法、WHF 法等不同砧型条件的综合作用,初步解决了超大截面钢锭心部冶金缺陷(如疏松、缩孔等)压实及铸态粗大晶粒打碎及均匀化(避免混晶)等成形工艺关键难题。

4. 重型成形装备研制

特大型构件制造的主要途径之一是利用巨型压力机强力模锻成形。我国近年已建和正在建造多台 1.5 万~1.85 万 t 的锻造液压机,正在设计制造 4 万 t 的航空模锻液压机,并投资启动了 8 万 t 巨型液压机的研制,我国重型锻压装备的能力和水平近年快速提高,其中,自由锻液压机的等级和数量已进入世界前列。大型整体薄壁复杂铝型材在大飞机、鱼雷、导弹和高速列车等领域得到广泛应用,为此,我国研发了 100MN、并正在研发 125MN 等油压双动铝挤压装备,世界上最大的 3.6 万 t 大口径钢管垂直挤压成套装备建成投入使用。

兰石集团兰州兰石重工新技术有限公司与华中科技大学等合作研究开发了 45MN 大型快速锻造液压机组,解决了机组重达数百吨的运动部件在高压、大流量、换向频繁工况下,大运动惯量快速平稳控制等难题,研制出了具有自主知识产权的我国新一代机电液一体化的自由锻造装备,其机组和实现的主要技术指标总体达到了国际先进水平,有广泛的推广应用前景。

5. 航空航天大型复杂构件局部加载近净成形技术

如何创新成形技术,发展省力关键成形技术能力,以突破装备能力的限制是特大型构件成形性一体化制造关注的焦点之一。其中,局部加载等温增量成形技术是该领域有发展前途的省力高性能精确成形技术。

(1) 钛合金大型复杂整体构件局部加载近净成形技术

高性能轻合金大型整体框类构件是大运输机与新一代战机中广泛使用的用以减重、提高飞机性能的关键构件。通过局部加载成形与等温成形的基础研究与集成创新,有望提升核心关键省力成形技术能力,突破装备能力的限制,突破装备成形这一类构件能力不足以及实现成形性一体化制造的难题。西北工业大学近年来建立了钛合金大型复杂构件多场耦合下局部加载等温成形过程宏微观变形有限元模拟仿真可靠适用的模型,局部加载成形过程中分流层、成形筋高的主应力法预测模型以及 TA15 钛合金微观组织内变量法预测模型;获得了多场耦合局部加载条件下不同变形区及过渡区的典型不均匀变形行为及主要参数影响规律;实现了钛合金大型复杂整体构件制坯与局部加载等温成形过程的组织演变预测;基于仿真优化,确定了局部加载方式、加载条件和变形区,实现了等温局部加载不同区宏微观变形控制;探明了大型复杂整体构件局部加载等温成形过程可能发生的典型成形缺陷,提出了有效的解决方法。提出并实现了大型非对称复杂坯料的局部加载省力成形方法;与宝钢等合作完成了大型组合模具优化设计,并实现了技术验证试验及应用,成功研制了目前国内最大的外形轮