



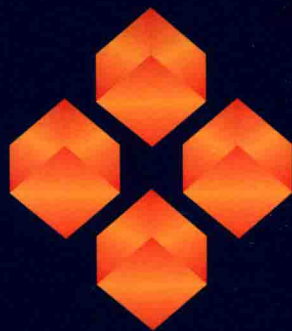
“十三五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书



总主编 丁汉 孙容磊

复杂金属零件热等静压 整体成形技术

史玉升 等◎著



FUZA JINSHU LINGJIAN REDENGJINGYA
ZHENGTI CHENGXING JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

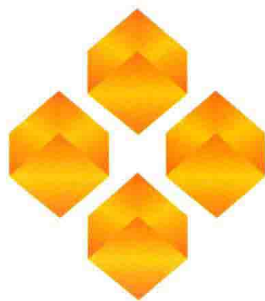


“十三五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书

总主编 丁 汉 孙容磊

复杂金属零件热等静压 整体成形技术

史玉升 魏青松 薛鹏举
宋 波 周建新 蔡 超 著
滕 庆



FUZA JINSHU LINGJIAN REDENGJINGYA
ZHENGTI CHENGXING JISHU



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

内 容 简 介

本书以华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室 10 余年的研究成果为基础,全面系统地介绍了热等静压整体成形技术方面的理论和技术。主要内容包括热等静压整体成形技术、热等静压整体成形包套的设计与制造方法、热等静压整体成形型芯的设计与优化方法、热等静压整体成形的数值模拟方法、钛合金热等静压成形工艺及其制件性能研究、镍基高温合金热等静压成形工艺及其制件的性能研究、热等静压整体成形新工艺研究、热等静压整体成形典型零件的应用案例。本书对热等静压整体成形技术的进一步研究和推广应用具有指导意义和参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

复杂金属零件热等静压整体成形技术/史玉升等著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.1
(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)

ISBN 978-7-5680-3478-4

I. ①复… II. ①史… III. ①热等静压制 IV. ①TF124.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 296967 号

复杂金属零件热等静压整体成形技术

史玉升 等著

Fuza Jinshu Lingjian Redengjingya Zhengti Chengxing Jishu

策划编辑:俞道凯

责任编辑:戴风平

封面设计:原色设计

责任校对:祝 菲

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉市金港彩印有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:15.25

字 数:262 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:128.00 元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



智能制造与机器人理论及技术研究丛书

专家委员会

主任委员 熊有伦（华中科技大学）

委 员 （按姓氏笔画排序）

卢秉恒（西安交通大学）

朱 荻（南京航空航天大学）

阮雪榆（上海交通大学）

杨华勇（浙江大学）

张建伟（德国汉堡大学）

邵新宇（华中科技大学）

林忠钦（上海交通大学）

蒋庄德（西安交通大学）

谭建荣（浙江大学）

顾问委员会

主任委员 李国民（佐治亚理工学院）

委 员 （按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）

王飞跃（中国科学院自动化研究所）

王田苗（北京航空航天大学）

尹周平（华中科技大学）

甘中学（宁波市智能制造产业研究院）

史铁林（华中科技大学）

朱向阳（上海交通大学）

刘 宏（哈尔滨工业大学）

孙立宁（苏州大学）

李 斌（华中科技大学）

杨桂林（中国科学院宁波材料技术与工程研究所）

张 丹（北京交通大学）

孟 光（上海航天技术研究院）

姜钟平（美国纽约大学）

黄 田（天津大学）

黄明辉（中南大学）

编写委员会

主任委员 丁 汉（华中科技大学） 孙容磊（华中科技大学）

委 员 （按姓氏笔画排序）

王成恩（东北大学）

方勇纯（南开大学）

史玉升（华中科技大学）

乔 红（中国科学院自动化研究所）

孙树栋（西北工业大学）

杜志江（哈尔滨工业大学）

张定华（西北工业大学）

张宪民（华南理工大学）

范大鹏（国防科技大学）

顾新建（浙江大学）

陶 波（华中科技大学）

韩建达（中国科学院沈阳自动化研究所）

蔺永诚（中南大学）

熊 刚（中国科学院自动化研究所）

熊振华（上海交通大学）

作者简介



▶ **史玉升** 华中科技大学华中学者领军岗特聘教授。现任华中科技大学材料科学与工程学院党委书记，数字化材料加工技术与装备国家地方联合工程实验室(湖北)主任，国防科技创新特区主题专家组首席科学家，中国增材制造产业联盟专家委员会委员，中国机械工程学会增材制造分会副主任委员，湖北省3D打印联盟理事长等职务。获中国十大科技进展1项、国家技术发明二等奖和科技进步二等奖各1项、省部级一等奖和二等奖各5项、国际发明专利奖2项、湖北省优秀专利奖1项、湖北高校十大科技成果转化项目1项。获中国发明创业奖特等奖暨当代发明家、中国科学十大杰出创新人物称号。获十佳全国优秀科技工作者提名奖、武汉市科技重大贡献个人奖、湖北省五一劳动奖章等殊荣。享受国家政府特殊津贴。领导的团队分别入选湖北省和教育部创新团队，指导的研究生获全国优秀博士论文提名奖1篇、湖北省优秀博士论文5篇、湖北省优秀硕士论文3篇。



总序

近年来,“智能制造+共融机器人”特别引人瞩目,呈现出“万物感知、万物互联、万物智能”的时代特征。智能制造与共融机器人产业将成为优先发展的战略性新兴产业,也是中国制造 2049 创新驱动发展的巨大引擎。值得注意的是,智能汽车与无人机、水下机器人等一起所形成的规模宏大的共融机器人产业,将是今后 30 年各国争夺的战略高地,并将对世界经济发展、社会进步、战争形态产生重大影响。与之相关的制造科学和机器人学属于综合性学科,是联系和涵盖物质科学、信息科学、生命科学的大科学。与其他工程科学、技术科学一样,它也是将认识世界和改造世界融合为一体的大科学。20 世纪中叶,《Cybernetics》与《Engineering Cybernetics》等专著的发表开创了工程科学的新纪元。21 世纪以来,制造科学、机器人学和人工智能等领域异常活跃,影响深远,是“智能制造+共融机器人”原始创新的源泉。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准智能制造和机器人的科技前沿,组织策划了本套“智能制造与机器人理论及技术研究丛书”。丛书涉及的内容十分广泛。热烈欢迎专家、教授们从不同的视野、不同的角度、不同的领域著书立说。选题要点包括但不限于:智能制造的各个环节,如研究、开发、设计、加工、成型和装配等;智能制造的各个学科领域,如智能控制、智能感知、智能装备、智能系统、智能物流和智能自动化等;各类机器人,如工业机器人、服务机器人、极端机器人、海陆空机器人、仿生/类生/拟人机器人、软体机器人和微纳机器人等的发展和应用;与机器人学有关的机构学与力学、机动性与操作性、运动规划与运动控制、智能驾驶与智能网联、人机交互与人机共融等;人工智能、认知科学、大数据、云制造、车联网、物联网和互联网等。

本套丛书将成为有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,青年科学家茁壮成长的园地,科学家展示研究成果的国际舞台。华中科技大学出版社将与



施普林格(Springer)出版集团等国际学术出版机构一起,针对本套丛书进行全球联合出版发行,同时该社也与有关国际学术会议、国际学术期刊建立了密切联系,为提升本套丛书的学术水平和实用价值,扩大丛书的国际影响营造了良好的学术生态环境。

近年来,各界人士、高校师生、各领域专家和科技工作者对智能制造和机器人的热情与日俱增。这套丛书将成为有关领域专家、学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者、编者与读者之间的联系,加快发现知识、传授知识、增长知识和更新知识的进程,为经济建设、社会进步、科技发展做出贡献。

最后,衷心感谢为本套丛书做出贡献的作者、编者和读者,感谢他们为创新驱动发展增添正能量、聚集正能量、发挥正能量。感谢华中科技大学出版社相关人员在组织、策划过程中的辛勤劳动。

华中科技大学教授
中国科学院院士

2017年9月



前言

热等静压(hot isostatic pressing, HIP)整体成形技术是一种将粉末材料置于由包套和型芯组装的模具中,抽真空,施加高温高压,使模具中的粉末材料致密化,从而获得高性能和高精度复杂零件的技术。

工业发达国家已经开始探索利用热等静压技术整体成形航空发动机等高端装备中的高性能复杂零件,以解决现有铸件存在的性能缺陷。2006 年年初,本团队与英国伯明翰大学在华中科技大学联合成立了“中英先进材料及成形技术联合实验室”,致力于难加工复杂金属零件的热等静压整体成形技术研究,在国家重大专项、自然科学基金、863 计划、教育部创新团队发展计划、国际合作计划等项目的支持下,通过持续研究,取得了系列成果。利用选区激光熔化(selective laser melting, SLM)增材制造技术成形同质包套,解决了复杂包套难加工、异质包套难去除并易污染零件表面的问题;提出涂层制备与复杂零件成形一体化的技术,解决了复杂零件涂层难制备的问题;整体成形出系列不锈钢、钛合金和镍基高温合金的复杂零件,综合性能达同质锻件水平。

为了更深入地研究热等静压整体成形技术并将其推广应用,培养这方面的科技人才,我们特总结本团队 10 余年的研究成果,形成了本书。全书共分为 8 章,第 1 章介绍了热等静压技术的基本原理及其发展现状,第 2 章介绍了热等静压整体成形包套的设计与制造方法,第 3 章介绍了热等静压整体成形型芯的设计与优化方法,第 4 章介绍了热等静压整体成形的数值模拟方法,第 5 章对钛合金的热等静压成形工艺及其制件性能进行了研究,第 6 章研究了镍基高温合金热等静压成形工艺和热处理工艺对其制件性能的影响,第 7 章介绍了热等



静压整体成形新工艺,第8章介绍了利用热等静压整体成形技术制造典型复杂零件的应用案例。

本书内容是华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室快速制造中心有关老师和历届研究生科研成果的集中体现,感谢:刘国承等博士在热等静压整体成形数值模拟方面贡献的成果,王基维等博士在镍基高温合金热等静压整体成形工艺以及性能表征方面贡献的成果,蔡超等博士在高性能钛合金材料的热等静压制备与成形一体化技术方面贡献的成果,陆恒、吴言、黄俊、周顺等硕士在钛合金热等静压整体成形及其数值模拟等方面所做的贡献。同时也衷心地感谢国家自然科学基金委、科技部、教育部等对科研项目的资助!在本书的撰写过程中,参考了相关研究成果,在此向这些研究成果的作者们表示感谢!

在本书的撰写过程中,一些研究工作还在继续,我们对该项技术的研究仍在不断深化,对一些问题的理解还不够深入。因此,本书的欠妥之处在所难免,真诚地希望读者们给予批评指正。

史玉升

2017年5月



目录

第 1 章 热等静压整体成形技术 /1

1.1 概述 /1

1.2 热等静压技术 /3

1.2.1 热等静压技术的基本原理 /3

1.2.2 热等静压设备的发展 /4

1.2.3 热等静压技术的主要应用领域 /7

1.3 热等静压整体成形技术概述 /10

1.3.1 热等静压整体成形技术及其发展 /10

1.3.2 热等静压整体成形技术致密化机理 /12

1.3.3 热等静压整体成形技术工艺研究 /14

1.3.4 热等静压包套制造技术及其发展 /16

1.3.5 热等静压模拟技术及其发展 /17

1.3.6 热等静压整体成形技术存在的问题 /21

本章参考文献 /24

第 2 章 热等静压整体成形包套的设计与制造方法 /29

2.1 概述 /29

2.2 热等静压包套设计方法 /29

2.2.1 有限元基本原理 /29

2.2.2 形状优化方法基本原理 /34

2.2.3 设计平台及实现方法 /35

2.3 热等静压包套制造方法 /37



- 2.3.1 包套材料的选用 /37
- 2.3.2 包套快速制造工艺 /38
- 2.3.3 致密化机理 /41

本章参考文献 /44

第3章 热等静压整体成形型芯的设计与优化方法 /48

- 3.1 概述 /48
- 3.2 热等静压型芯设计 /49
 - 3.2.1 型芯材料的选择 /49
 - 3.2.2 热等静压工艺 /51
- 3.3 热等静压型芯有限元模拟 /52
 - 3.3.1 型芯的控形机理 /52
 - 3.3.2 有限元模拟结果与分析 /53
- 3.4 热等静压型芯与制件组织分析 /55
 - 3.4.1 界面形貌与扩散 /55
 - 3.4.2 表面成形机理 /59

本章参考文献 /61

第4章 热等静压整体成形的数值模拟方法 /63

- 4.1 概述 /63
- 4.2 不锈钢粉末热等静压数值模拟 /63
 - 4.2.1 网格模型 /64
 - 4.2.2 材料性能参数 /64
 - 4.2.3 边界与初始条件 /67
 - 4.2.4 粉末致密化过程 /68
 - 4.2.5 温度场 /71
 - 4.2.6 等效柯西应力分布 /73
- 4.3 试验验证分析 /74
 - 4.3.1 粉末材料 /75
 - 4.3.2 热等静压试验 /76
 - 4.3.3 变形分析 /77
 - 4.3.4 显微分析 /78
 - 4.3.5 力学性能研究 /79

4.4 Ti-6Al-4V 粉末热等静压数值模拟 /81

4.4.1 模拟及试验方案设计 /81

4.4.2 几何外形设计及网格划分 /81

4.4.3 热等静压工艺条件 /82

4.4.4 材料的物理特性 /82

4.4.5 试验验证方案 /84

4.4.6 数值模拟结果分析 /85

4.5 试验验证分析 /90

4.5.1 三维测量结果分析 /90

4.5.2 相对密度测量结果分析 /92

4.5.3 残余应力测量结果分析 /94

4.5.4 微观组织分析 /97

本章参考文献 /98

第5章 钛合金热等静压成形工艺及其制件性能研究 /102

5.1 概述 /102

5.2 不同热等静压温度对钛合金组织和性能的影响 /102

5.2.1 热等静压工艺 /102

5.2.2 热等静压制件微观组织 /105

5.2.3 热等静压过程中微观组织演变 /109

5.2.4 热等静压制件室温拉伸性能与断口分析 /111

5.3 不同热等静压加载方式对钛合金微观组织与力学行为的影响 /115

5.3.1 热等静压工艺 /115

5.3.2 粉末表征 /116

5.3.3 表面质量 /119

5.3.4 微观组织 /121

5.3.5 拉伸性能 /123

5.3.6 疲劳性能 /124

5.3.7 强化机理 /125

5.4 热等静压整体成形一种近 α 新型钛合金工艺研究 /128

5.4.1 试验原材料 /128

5.4.2 相变温度 /129



5.4.3 热等静压工艺 /130

5.4.4 物相识别 /131

5.4.5 组织演变 /133

5.4.6 高温力学性能 /137

本章参考文献 /141

第6章 镍基高温合金热等静压成形工艺及其制件性能研究 /145

6.1 概述 /145

6.2 Inconel 625 合金热等静压制件组织和性能 /145

6.2.1 制件组织及形成机理 /145

6.2.2 制件力学性能 /148

6.3 Inconel 625 合金热等静压制件固溶处理工艺研究 /150

6.3.1 固溶处理工艺 /150

6.3.2 固溶保温温度对组织和性能的影响 /151

6.3.3 固溶保温时间对组织和性能的影响 /154

6.3.4 固溶处理对断裂机理的影响 /156

6.4 FGH4097 镍合金热等静压制件组织和性能 /156

6.4.1 粉末材料 /157

6.4.2 热等静压工艺 /157

6.4.3 制件显微组织 /158

6.4.4 力学性能分析 /160

6.5 FGH4097 镍合金热等静压深冷处理工艺研究 /163

6.5.1 试验方法 /163

6.5.2 显微组织分析 /165

6.5.3 力学性能分析 /166

本章参考文献 /171

第7章 热等静压整体成形新工艺研究 /176

7.1 热等静压一体化成形具有涂层的零件表面特性研究 /176

7.1.1 概述 /176

7.1.2 试验原材料 /177

7.1.3 热等静压工艺 /178

7.1.4 制件与改性层物相分析 /179

- 7.1.5 改性层微观组织 /182
- 7.1.6 改性层截面微观硬度 /183
- 7.1.7 摩擦磨损性能 /184
- 7.2 钛合金整体零件的两步热等静压近净成形工艺研究 /187
 - 7.2.1 概述 /187
 - 7.2.2 两步法成形工艺 /188
 - 7.2.3 制件性能分析 /191
 - 7.2.4 组织形貌分析 /192
 - 7.2.5 断口形貌分析 /193
- 7.3 热等静压同质包套工艺研究 /193
 - 7.3.1 复合工艺基本原理 /193
 - 7.3.2 复合工艺参数 /195
 - 7.3.3 微观组织分析 /198
 - 7.3.4 力学性能分析 /202

本章参考文献 /204

第8章 热等静压整体成形典型零件的应用案例 /208

- 8.1 概述 /208
- 8.2 叶盘零件热等静压整体成形 /208
 - 8.2.1 目标零件分析 /208
 - 8.2.2 模具设计与优化 /208
 - 8.2.3 零件尺寸分析 /210
 - 8.2.4 显微组织分析 /212
- 8.3 涡轮盘零件热等静压整体成形 /213
 - 8.3.1 目标零件分析 /213
 - 8.3.2 成形材料表征 /213
 - 8.3.3 包套优化设计与制造 /216
 - 8.3.4 热等静压工艺研究 /218
- 8.4 其他零件的热等静压整体成形 /223

本章参考文献 /224



第 1 章

热等静压整体成形技术

1.1 概述

高性能构件多服役于苛刻环境,以超高承载、极端耐热、超轻量化和高可靠性等为指标,是高超飞行器、运载火箭、轨道空间站和核聚变装置等重大装备的核心组成部分。由于其性能受多重因素的耦合影响,因而对材料特性和制造方法提出了严峻的挑战:材料需具备轻质、高强的能力,制造需实现几何尺寸精确可控的一体化整体成形。下面以为了满足目前航空航天飞行器发展趋势,而对其发动机关键零件提出的新需求为例展开说明。

2006 年 2 月,在国务院颁布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,大型飞机项目被确定为“未来 15 年力争取得的 16 个重大科技专项”之一;同时,在未来的 15 年时间内,探索外层空间将会成为中国航天计划的重要内容,发展新一代运载火箭更是被作为重中之重。研制大飞机和大推力火箭是建设创新型国家,提高我国自主创新能力和增强国家核心竞争力的重大战略举措。发动机是飞行器的“心脏”,研制大飞机和大推力火箭的前提之一是自主研发高性能发动机。随着国家和国防工业对高性能民用和军用飞行器的迫切需求,要求飞行器具备高安全性、高速、远程、大载荷、高灵活性和高持久性等性能,这对航空航天发动机提出了更高的要求,尤其是高推重比发动机。2012 年 7 月国务院以国发〔2012〕28 号印发的《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》,将航空航天装备产业列为高端装备制造产业的首位,明确提出“要突破航空发动机核心关键技术,加快推进航空发动机产业化”。其中,发动机关键零件的制造就是核心内容之一。

航空发动机的零件种类及数量多达上万个,主要采用铝合金、钛合金、高温合金、合金钢和复合材料等多种材料制造,因此其成形制造技术十分复杂与多样,包括切削加工、钣金加工、精密锻造、精密铸造(简称精铸)、焊接和高能束加



工等。为了满足结构整体化和轻量化需求,发动机的机匣、叶片和整体盘等复杂零件的制造开始由精铸件、单晶和定向凝固技术替代大余量锻坯机加工和焊接等成形制造技术。据统计,发动机零件中的锻件占比由 77% 降至 33%,铸件占比由 18% 增至 44% 以上。目前,精铸已成为现役航空发动机复杂零件的主流成形制造技术。

新型飞机的推出对新一代发动机在工作性能指标方面提出了更高的要求。例如,现役市场份额最大的 A320/B737 等机型酝酿发展第五代发动机,主要技术指标与第四代发动机(如 CFM56-5B/-7B)相比:耗油率下降 10%~15%(达到 0.54~0.55 kg/(daNh));噪声比 FAR36 第四阶段降低 15 dB; NO_x 排放减少 40%~50%;维护成本降低 15%~25%;寿命延长 25%。这些工作性能的提升导致发动机对高推重比、结构复杂化和高可靠性等的需求不断增大。例如中介机匣服役 350 °C 时的抗拉强度大于原来的指标 500 MPa,超出了现有铸件的性能极限,对制造技术提出了更高要求。而铸件由于气孔、缩松、偏析、夹杂等缺陷,已无法完全适应新一代发动机的制造需求。为此,国内外均开始研究其他先进成形制造技术,试图寻找一种可用于新一代航空发动机高性能复杂零件的新型制造技术。

航空航天发动机是飞机和火箭的“心脏”,其机匣、叶片和涡轮盘等关键零件结构复杂,对材料性能要求严苛,导致成形制造难度大。这已成为制约我国自主研发先进航空航天发动机的主要瓶颈之一,目前中美航空航天发动机发展的趋势如图 1-1 所示。新一代高推重比(五代机推重比为 12~15)发动机向轻量化、高性能和长寿命方向发展,其关键零件须采用高性能材料和整体成形技术才能达到这些要求。欧美国家和中国均采用锻造结合焊接的成形工艺制造发动机关键零件,但该工艺存在材料利用率低、焊接接头性能差和易变形等突出问题,同时存在材料制备与成形分离、流程长、灵活度低等技术瓶颈问题,导致难以满足目前发动机高可靠性和减重的要求。因此,亟需寻求一种新的一体化成形方法,既能实现高性能材料的制备,同时也能完成复杂零件的整体成形。

美国、俄罗斯和英国的研究人员将粉末热等静压技术与模具制造技术结合,提出了热等静压整体成形技术,能整体成形出与锻件性能相当的零件。该技术在钛合金、镍基高温合金航空发动机构件制造方面显示出了强大的技术优势和经济优势,是一项先进的整体成形技术,具有重要的科学价值和应用价值,英国罗-罗公司(Rolls-Royce)已将其列为未来发动机制造的战略储备技术。



图 1-1 中美航空航天发动机发展的趋势

1.2 热等静压技术

1.2.1 热等静压技术的基本原理

热等静压(hot isostatic pressing, HIP)工艺是一种以氮气或氩气等惰性气体为压力传递介质,将制件放置于密闭的容器之中,在 $900 \sim 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度和 $100 \sim 200\text{ MPa}$ 压力的共同作用下,向制件施加各向同等的压力。该工艺技术可用于使粉末直接加热加压烧结成形的粉末冶金工艺,或者将成形后的铸件(包括铝合金、钛合金、高温合金等缩松缩孔的铸件)进行热致密化处理。通过热等静压处理后,铸件可以达到 100% 致密化,从而提高铸件的整体力学性能。热等静压技术首先是由美国 Battelle 研究所为研制核反应堆材料而开展的,最开始应用于原子能反应过程中燃料元素的扩散连接,当时都将该项技术称为“气压黏结”。热等静压技术发展的最初时期,因设备整体成本高导致发展较为缓慢,应用领域也仅仅集中在军工和核反应等几个方向。近些年来,随着科学技术的不断进步,各领域对材料的使用要求也越来越严苛,而热等静压技术在