



大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

民机先进制造工艺技术系列
主编 林忠钦

民用飞机构件 先进成形技术

Advanced Forming Technology for
Civil Aircraft Components

黄卫东 陈保国 张卫红 许庆彦 杨 合
孙志超 李 恒 王 猛 娄延春 陈彦宾 等编著
柯黎明 李涤尘 林 鑫



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

民机先进制造工艺技术系列

主 编 林忠钦

民用飞机构件 先进成形技术

Advanced Forming Technology for
Civil Aircraft Components

黄卫东 陈保国 张卫红 许庆彦 杨 合
孙志超 李 恒 王 猛 娄延春 陈彦宾 等编著
柯黎明 李涤尘 林 鑫



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书凝聚了3个国家重点实验室主任、5位长江学者教授的科研团队的创新成果和实践经验,系统化介绍了民用飞机构件先进成形技术,包括已经在飞机制造过程中获得应用的先进塑性成形技术、铸造技术、焊接技术和作者认为未来可能在飞机制造中获得应用的增材制造技术等。

本书针对的阅读对象是航空领域的研究生、制造企业工艺技术人员和设计院所工程设计人员。

图书在版编目(CIP)数据

民用飞机构件先进成形技术 / 黄卫东等编著. —上海: 上海交通大学出版社, 2016
(大飞机出版工程)……ISBN 978-7-313-16293-9

I. ①民… II. ①黄… III. ①民用飞机—飞机构件
IV. ①V222

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 309779 号

民用飞机构件先进成形技术

编 著: 黄卫东 陈保国 张卫红 许庆彦 杨 合 孙志超 李 恒
王 猛 娄延春 陈彦宾 柯黎明 李涤尘 林 鑫 等

出版发行: 上海交通大学出版社 地 址: 上海市番禺路 951 号
邮政编码: 200030 电 话: 021-64071208

出 版 人: 郑益慧

印 制: 上海盛通时代印刷有限公司 经 销: 全国新华书店
开 本: 787 mm×1092 mm 1/16 印 张: 33.5

字 数: 633 千字
版 次: 2016 年 12 月第 1 版 印 次: 2016 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-313-16293-9/V
定 价: 210.00 元

版权所有 侵权必究
告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话: 021-61453770

大飞机出版工程

丛书编委会

总主编

顾诵芬（中国航空工业集团公司科技委副主任、中国科学院和中国工程院院士）

副总主编

金壮龙（中国商用飞机有限责任公司董事长）

马德秀（上海交通大学原党委书记、教授）

编委（按姓氏笔画排序）

王礼恒（中国航天科技集团公司科技委主任、中国工程院院士）

王宗光（上海交通大学原党委书记、教授）

刘洪（上海交通大学航空航天学院副院长、教授）

许金泉（上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授）

杨育中（中国航空工业集团公司原副总经理、研究员）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员）

汪海（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

沈元康（中国民用航空局原副局长、研究员）

陈刚（上海交通大学原副校长、教授）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员）

林忠钦（上海交通大学常务副校长、中国工程院院士）

金兴明（上海市政府副秘书长、研究员）

金德琨（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

崔德刚（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

敬忠良（上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授）

傅山（上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员）

民机先进制造工艺技术系列

编 委 会

主 编

林忠钦(上海交通大学常务副校长、中国工程院院士)

副主编

姜丽萍(中国商飞上海飞机制造有限公司总工程师、研究员)

编 委(按姓氏笔画排序)

习俊通(上海交通大学机械与动力学院副院长、教授)

万 敏(北京航空航天大学飞行器制造工程系主任、教授)

毛荫风(中国商飞上海飞机制造有限公司原总工程师、研究员)

孙宝德(上海交通大学材料科学与工程学院院长、教授)

刘卫平(中国商飞上海飞机制造有限公司副总工程师、研究员)

汪 海(上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员)

陈 洁(中国商飞上海飞机制造有限公司总冶金师、研究员)

来新民(上海交通大学机械与动力工程学院机械系主任、教授)

陈 磊(中国商飞上海飞机制造有限公司副总工程师、航研所所长、研究员)

张 平(成飞民机公司副总经理、技术中心主任、研究员)

张卫红(西北工业大学副校长、教授)

赵万生(上海交通大学密歇根学院副院长、教授)

倪 军(美国密歇根大学机械工程系教授、上海交通大学密歇根学院院长、教授)

黄卫东(西北工业大学凝固技术国家重点实验室主任、教授)

黄 翔(南京航空航天大学航空宇航制造工程系主任、教授)

武高辉(哈尔滨工业大学金属基复合材料与工程研究所所长、教授)

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、比重大于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和运用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索和不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 B737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有重要的现实意义和深远的历史意义。

2008 年 5 月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教 1 时,亲自撰写了《飞机性能及算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展 50 年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理 50 多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如：2009 年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力设计》), 由美国堪萨斯大学 2008 年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》) 等国外最新科技的结晶; 国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》《民用飞机气动设计》等专业细分的著作; 也有《民机设计 1 000 问》《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助, 体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命, 凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果, 具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性, 既可作为实际工作指导用书, 亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养, 有益于航空工业的发展, 有益于大飞机的成功研制。同时, 希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空, 并投身于中国航空事业做出一贡献。

顾诵芬

2009 年 12 月 15 日

序

制造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基。《中国制造 2025》提出,坚持创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展,加快从制造大国转向制造强国。航空装备,作为重点发展的十大领域之一,目前正处于产业深化变革期;加快大型飞机研制,是航空装备发展的重中之重,也是我国民机制造技术追赶腾飞的机会和挑战。

民机制造涉及新材料成形、精密特征加工、复杂结构装配等工艺,先进制造技术是保证民机安全性、经济性、舒适性、环保性的关键。我国从运-7、新支线 ARJ21-700 到正在研制的 C919、宽体飞机,开展了大量的工艺试验和技术攻关,正在探索一条符合我国民机产业发展的技术路线,逐步建立起满足适航要求的技术平台和工艺规范。伴随着 ARJ21 和 C919 的研制,正在加强铝锂合金成形加工、复合材料整体机身制造、智能自动化柔性装配等技术方面的投入,以期在宽体飞机等后续型号的有序可控生产奠定基础。但与航空技术先进国家相比,我们仍有较大差距。

民机制造技术的提升,有赖于国内五十多年民机制造的宝贵经验和重要成果的总结,也将得益于借鉴国外的优秀出版物和数据资料引进。因此有必要编著一套以“民机先进制造工艺技术”为主题的丛书,服务于在研大型飞机以及后续型号的开发,同时促进我国制造业技术的发展和紧缺人才的培养。

本系列图书筹备于 2012 年,启动于 2013 年,为了保证本系列图书的品质,先后召开三次编委会会议和图书撰写会议,进行了丛书框架的顶层设计、提纲样章的评审。在编写过程中,力求突出以下几个特点:① 注重时效性,内容上侧重在目前民机

研制过程中关键工艺;②注重前沿性,特别是与国外先进技术差距大的方面;③关注设计,注重民机结构与制造问题的系统解决;④强调复合材料制造工艺,体现民机先进材料发展的趋势。

该系列丛书内容涵盖航空复合材料结构制造技术、构件先进成形技术、自动化装配技术、热表特种工艺技术、材料和工艺检测技术等面向民机制造领域前沿的关键性技术方向,力求达到结构的系统性,内容的相对完整性,并适当结合工程应用。丛书反映了学科的近期和未来的可能发展,注意包含相对成熟的内容。

本系列图书由中国商飞上海飞机制造有限公司、中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司、沈阳飞机设计研究所、北京航空制造工程研究所、中国飞机强度研究所、沈阳铸造研究所、北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学、上海交通大学、西安交通大学、清华大学、哈尔滨工业大学和南昌航空航天大学等单位的航空制造工艺专家担任编委及主要撰写专家。他们都有很高的学术造诣,丰富的实践经验,在形成系列图书的指导思想、确定丛书的覆盖范围和内容、审定编写大纲、确保整套丛书质量中,发挥了不可替代的作用。在图书编著中,他们融入了自己长期科研、实践中获得的经验、发现和创新,构成了本系列图书最大的特色。

本系列图书得到2016年国家出版基金的资助,充分体现了国家对“大飞机工程”的高度重视,希望该套图书的出版能够真正服务到国产大飞机的制造中去。我衷心感谢每一位参与本系列图书的编著人员,以及所有直接或间接参与本系列图书审校工作的专家学者,还有上海交通大学出版社的“大飞机出版工程”项目组,正是在所有工作人员的共同努力下,这套图书终于完整地呈现在读者的面前。我衷心希望本系列图书能切实有利于我国民机制造工艺技术的提升,切实有利于民机制造行业人才的培养。



2016年3月25日

前 言

民用飞机是当今世界众所瞩目的高技术前沿,代表着一个国家或地区的核心竞争力。迄今为止,美国波音公司和欧洲空中客车公司雄霸世界,占据了民用飞机市场绝大部分份额。我国在中长期科技发展规划纲要中确立了大型飞机重大科技专项,C919 大型商用飞机将代表我国首先进入世界民用飞机市场竞争的大舞台。民用飞机构件先进成形技术是支撑大飞机设计和制造的关键技术,为了使我国的大飞机制造从业者和研究人员了解民用飞机构件先进成形技术发展前沿和我国在此领域的技术现状,以便更好地服务于我国民用飞机设计和制造事业,我们按照本丛书编委会的安排组织了本书的写作。

本书主要介绍民用飞机构件先进成形技术,包括已经在飞机制造过程中获得应用的和作者认为未来可能在飞机制造中获得应用的先进成形技术。本书针对的阅读对象是航空领域的研究生、制造企业工艺技术人员和设计院所工程设计人员。本书的主要目的,是帮助上述读者群比较全面地了解当前民用飞机制造技术的发展前沿,并对其研究和工程实践起到有效的指导作用。由于构件先进成形技术涉及面非常宽,而本书的篇幅有限,不可能包罗无遗,因此只精选了一部分先进成形技术。每一种述及的先进成形技术都力求写作精简扼要。但为了能对读者的研究和工程实践有实际的帮助,又要求每一种述及的技术的原理、效能和应用案例有足够完整和深入的介绍。

本书共分五篇 11 章:

第一篇分三章介绍了民用飞机构件先进成形技术的一些共性基础,包括第 1 章“民用飞机主要结构材料及相关的成形技术”,第 2 章“航空结构创新构型拓扑优化设计”和第 3 章“成形工艺数字化仿真技术”。

第二篇“先进塑性成形技术”,包括第 4 章“钛合金大型复杂整体构件等温局部加载近净成形”和第 5 章“高性能轻量化弯管件数控弯曲精确成形”。

第三篇“先进铸造技术”,包括第 6 章“钛合金铸造”和第 7 章“反重力铸造”。

第四篇“先进焊接技术”,包括第 8 章“激光焊接”和第 9 章“搅拌摩擦焊”。

第五篇“增材制造技术”，包括第10章“增材制造的技术原理与方法”和第11章“增材制造的航空应用”。

参与本书写作的都是我国在相关技术领域处于领先水平的研究团队，相关章节的内容包括了这些团队自己的研究成果和对世界范围内各领域技术发展的总结，可以代表我国在相关技术领域的发展水平和反映世界范围内各相关技术领域发展前沿的现状。

本书是集体著述的结晶，我国先进成形技术领域大量高水平研究人员参与了本书写作。由于封面空间有限，无法把所有参与本书写作的作者都列入封面署名，只能每一章选取一位主要作者署名在封面上，我在此对未能在封面署名的作者表示歉意！

参与本书各章节写作的作者和提供素材的人员如下：

第一篇篇首语由西北工业大学黄卫东撰写。第1章由中国商用飞机公司上海飞机制造厂陈保国撰写，成都飞机公司张平提供了素材；第2章由西北工业大学张卫红、朱继宏、高彤撰写；第3章由清华大学许庆彦，西北工业大学郭良刚、马良和魏雷撰写。

第二篇篇首语由西北工业大学詹梅撰写。第4章和由西北工业大学杨合、孙志超撰写；第5章由西北工业大学李恒撰写。

第三篇篇首语和第6章由沈阳铸造研究所集体撰写，由娄延春总负责，具体参与写作的人员与分工如下：钛部总负责赵军，检测总负责李兴捷，统稿刘时兵；各小节具体分工：6.1 概述：刘时兵；6.2 铸造钛合金：刘时兵、刘鸿羽、张有为；6.3 熔铸技术：张有为、刘时兵；6.4 造型技术：包春玲、游涛、刘宏宇、杨晓曦、闫平；6.5 清理、精整及热处理：史昆、包宪宇；6.6 质量检测：朱智、张震、刘洋、赵立文、王志明。第7章由西北工业大学王猛撰写，介万奇提供了素材。

第四篇篇首语由哈尔滨工业大学陈彦宾撰写。第8章由哈尔滨工业大学陈彦宾和陶汪撰写；第9章由南昌航空大学柯黎明和邢丽撰写，南昌航空大学陈玉华、黄春平、毛育青和中航工业北京制造工程研究所栾国红提供了素材。

第五篇篇首语由黄卫东撰写。第10章和第11章由西安交通大学李涤尘，西北工业大学林鑫和黄卫东撰写，西北工业大学杨海欧和熊江涛提供了素材。

全书由黄卫东审校修改，并与相关章节作者协商定稿。

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中存在的不当之处，敬请读者指正。

黄卫东

2016年10月

缩 略 语

ICME	integrated computing materials engineering	集成计算材料工程
CA	cellular automaton	元胞自动机
FD	finite difference	有限差分
FE	finite element	有限元
HRS	high rate solidification	高速凝固法
KMAS	king-mesh analysis system	高新金网格分析系统
CAD	computer aided design	计算机辅助设计
CAE	computer aided engineering	计算机辅助工程
CAM	computer aided manufacturing	计算机辅助制造
PDM	product data management	产品数据管理
CET	columnar to equiaxed transition	柱状晶向等轴晶转变
PF	phase field	相场
CWM	computational welding mechanics	计算焊接力学
LENS	laser engineered net shaping	激光近净成形
LSF	laser solid forming	激光立体成形
R/D	radius/diameter	相对弯曲半径
HAZ	heat affected zone	热影响区
WD	weld zone	焊缝区
FSW	friction stir welding	搅拌摩擦焊
FSSW	friction stir spot welding	搅拌摩擦点焊
SRPT FSW	self-reacting pin tool	双轴肩搅拌摩擦焊技术
FFW	friction flow welding	流动摩擦焊接
SSFSW	stationary shoulder friction stir welding	静轴肩搅拌摩擦焊接
TSW	thermal stir welding	热搅拌焊接方法
UAFSW	ultrasonic assisted friction stir welding	超声辅助搅拌摩擦焊

DC - LSND	dynamically controlled low stress no	动态控制低应力无变形
FSW	distortion friction stir welding	搅拌摩擦焊方法
UWFSW	underwater friction stir welding	水下搅拌摩擦焊
AS	advancing side	前进边
RS	retreating side	返回边

术 语

拓扑优化(topology optimization)——在给定区域内设计材料空间分布形式,满足一定载荷工况下特定性能与材料用量等指标要求、实现结构创新构型的设计方法。

设计变量(design variable)——优化设计的参数或自变量称为设计变量,拓扑优化的设计变量为描述材料空间分布的密度变量或形状变量。

柔顺度(compliance)——采用结构变形后的应变能度量,在结构优化中用于量化结构刚度,载荷一定时,柔顺度越小,则结构刚度越大,结构的整体变形越小。

固有频率(natural frequency)——物体自由振动时,其位移随时间按正弦或余弦规律变化,振动频率与初始条件无关,而仅与系统的固有特性有关(如质量、形状、材质等),称固有频率,又称自然频率。

工艺约束(manufacturing constraint)——结构优化时考虑到各种制造工艺手段的限制,如分模面、切削刀具可达性、增材制造材料堆积等,结构中材料的空间分布需要呈现一定的方向性。

热力耦合(thermal-mechanical coupling)——热力耦合过程是应力场与温度场两个物理场之间相互影响的过程,在结构优化中需要考虑热应力对结构承载性能和力学行为的影响。

热应力系数(thermal stress coefficient)——材料的基本属性,定义为材料杨氏模量与热膨胀系数的乘积,在结构优化中可以更直观地表征热应力载荷与设计变量的数学描述。

动力学响应(dynamic response)——结构在动力学激励下产生的位移、加速度等响应称为动力学响应,其中简谐激励下产生简谐响应,随机激励下产生随机响应。

钉载(joint load)——飞机结构装配采用大量螺钉、铆钉等连接件,结构受载时连接件中产生的剪切和拉伸载荷称为钉载,为避免连接失效和结构件在连接处破坏,结构优化需要考虑抑制钉载大小。

保形(shape preserving)——飞行器结构设计和装配过程中,部件间相对变形、

局部弹性变形导致结构变形不协调,发生局部翘曲变形现象,结构优化中抑制这类变形的设计方法称为保形设计。

单晶铸造高温合金(single crystal superalloys)——是指整个铸件由一个晶粒组成的铸造高温合金。单晶铸造高温合金作为新型航空发动机叶片材料得到广泛应用。

定向凝固(directional solidification)——在熔模铸造型壳中建立特定方向的温度梯度,使熔融合金沿着与热流相反的方向按照要求的结晶取向凝固的一种铸造工艺。定向凝固技术最突出的成就是在航空工业中的应用。

数值模拟(numerical simulation)——也叫计算机模拟。依靠电子计算机,结合有限元、有限差分或有限容积等方法,通过数值计算和图像显示的方法,达到对工程问题和物理问题乃至自然界各类问题研究的目的。

元胞自动机(cellular automaton)——是一类离散模型的统称。通过定义一系列作用规则反映元胞之间的短程或长程作用(对金属凝固而言,即是通过定义相邻/相近单元之间的空间关系和固、液相状态转化等一系列的熔体形核与生长规则),从而实现微观组织演化过程的模拟。

塑性成形工艺(plastic forming process)——利用材料的塑性,在工模具的外力作用下来加工制件的少切削或无切削的工艺方法。通常可分为体积成形和冲压板金成形两大类,按工艺温度又可分为冷加工、热加工和介于冷热加工的温热加工。

环件轧制(ring rolling)——又称环件辗扩或扩孔,是借助环件轧制设备(环轧机,又称辗扩机或扩孔机)使环形毛坯产生壁厚减小、直径扩大、截面轮廓成形的塑性成形工艺。

塑性成形工艺建模仿真(plastic forming process modeling and simulation)——通过对塑性成形工艺物理过程的数字化模型描述与科学计算,实现对塑性成形工艺过程的设计、开发、分析与优化的重要方法。

材料本构模型(materials constitutive model)——是对材料热力耦合作用下宏观行为特征的数学描述,比如应力-应变关系模型、晶粒尺寸模型等。材料本构模型,是保证塑性成形过程模拟仿真精度和可靠性的重要研究内容。

熔池(melting pool)——高能激光束作用在金属基板上形成的微小液态区域,熔池是高能激光束、金属基板和金属粉末相互作用形成的瞬态区域,激光束移开后,熔池立刻凝固形成熔覆道。

热应力(heat stress)——在增材制造过程中,材料在循环热载荷的作用下,由于外在约束以及内部各部分之间的相互约束,使材料各部分不能完全自由膨胀而产生的内在应力。

凝固微观组织(solidification microstructure)——凝固微观组织是指借助于显微镜观察到的合金凝固晶粒内部的结构形态,如树枝晶、胞状晶等。

等温成形(isothermal forming)——金属材料(坯料)在变形过程中和模具保持

同一温度的一种塑性成形方式。

局部加载成形(local loading)——对坯料局部施加载荷,通过变形积累实现整个构件的成形。

不均匀变形(unequal deformation)——变形体在外力作用下产生的塑性变形沿不同部位分布不均的现象。

模具(die)——工业生产上用铸造、锻压等方法得到所需产品的各种模子和工具。

预成形(preforming)——使坯料形状产生部分变化,以获得更适合于进一步塑性变形的形状。

充填不满(underfilling)——变形体在成形过程中未充满模具型腔的一种现象。

流线(Streamline folding)——金属成形后形成纤维组织,即塑性杂质延伸长方向呈纤维状分布,使金属组织呈一定的方向性,这种因成形而使金属形成的具有一定方向性的组织称为锻造流线。

开裂(cracking)——指制品受内应力、外部冲击或环境条件等的影响而在其表面或内部所产生的裂纹。

管材数控弯曲(tube numerical control bending, tube NC bending)——传统管材绕弯工艺结合机床工业和数控技术发展而产生的一种先进管材弯曲加工技术,该技术既可大幅提高生产效率,又可保证成形过程稳定性,提高零件成形精度。

弯曲半径(bending radius)——弯管几何中性面到弯曲中心的曲率半径。

弯曲角度(bending angle)——管材弯曲成形过程中,弯曲端围绕弯曲中心发生的偏转角度。

截面扁化(cross-section flattening)——管材弯曲成形过程中,弯管截面相对于初始管材截面发生扁化现象。

起皱(wrinkling)——管材弯曲成形过程中,弯管内侧受到压应力作用产生的波纹状起皱现象。

壁厚减薄/增厚(wall thinning/thickening)——管材弯曲成形过程中,弯管内外侧发生壁厚扁化,其中外侧壁厚减薄,内侧壁厚增厚。

回弹(springback)——管材弯曲成形过程中,当模具和外部载荷移除后,弯管件受弹性驱动发生的形状变化,包括弯曲角度、弯曲半径和弯管截面扁化等。

弯管成形极限(tube bending limit)——多缺陷多目标约束下管材能达到的最小弯曲半径。

数控热弯(heat rotary draw bending)——在管材室温弯曲成形基础上,部分成形模具通过一定方式加热,并通过模具与管材传热使成形管材达到成形温度,在局部热力耦合加载下实现管材弯曲成形。

反重力铸造(counter gravity casting)——金属液在外力作用下逆重力方向流