

“十一五”国家重点图书出版规划项目

AVIATION MANUFACTURING ENGINEERING HANDBOOK

航空制造工程手册

(第2版)

热处理

《航空制造工程手册》总编委会 主编

航空工业出版社

责任编辑：史晋蕾 苑 朝

封面设计：王 楠

ISBN 978-7-80243-651-0



9 787802 436510 >

定价：350.00元

“十一五”国家重点图书出版规划项目

航空制造工程手册

(第2版)

热 处 理

《航空制造工程手册》总编委会 主编

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本手册作为一本工具书,对航空金属材料热处理的基本原理、工艺方法、工艺参数和控制方法、生产过程和操作、质量控制与检验等各个方面进行了较为详细的阐述和介绍,并列举了飞机、发动机和机载设备典型零件热处理工艺要求和方法,还对相关的热处理工艺装备、仪器仪表等进行了详细的介绍。本手册再版时,注重总结我国航空工业热处理近20年来的科研与应用成果、先进经验,吸收先进技术,增加了大量新材料、新工艺、新设备的应用数据。

本手册不仅是从事航空热处理工程技术人员的实用手册,而且可作为从事产品设计、生产、检验、维修和管理人员,以及高等院校有关专业师生的参考书,还可供其他机械行业人员借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

航空制造工程手册. 热处理/《航空制造工程手册》总编委会主编. --2版. --北京:航空工业出版社, 2010.12

ISBN 978-7-80243-651-0

I. ①航… II. ①航… III. ①航空工程-制造-手册
②航空-零部件-热处理-手册 IV. ①V26-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第229883号

航空制造工程手册·热处理
Hangkong Zhizao Gongcheng Shouce · Rechuli

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话: 010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2010年12月第2版

2010年12月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 87.5

字数: 2130千字

印数: 1—2000

定价: 350.00元

再 版 说 明

我国航空工业要加速发展,跨入世界先进行列,并在全球市场竞争中赢得有效的市场份额,需要根据市场需求快速更新、快速生产出优质优价、可靠长寿的产品,这需要有先进的航空制造工程系统作为赢得市场竞争的技术基础和保障。发达国家始终以优先发展航空制造工程,提高航空工业基础能力和创新能力作为确保市场竞争优势的既定方针。没有先进的制造工程系统,难以形成核心竞争力,航空制造工程系统已成为市场竞争的重要基础和技术支撑。

1993~1998年出版的、基本覆盖航空制造工程各专业学科、由32个分册组成的《航空制造工程手册》汇集了航空工业40年来所取得的成果,对“九五”、“十五”以及“十一五”期间强化基础、提高能力,加速制造技术和航空工业的发展起到了积极的推动作用。但对于目前世界航空工业高速发展的新形势,新技术、新设备、新材料、新工艺的不断涌现,尤其是我们面临着更繁重的高新工程和新型号研制任务,要使得我国航空工业的生产能力得到长足的发展,有必要对“十一五”以来的航空制造技术进行全面的梳理和总结。

鉴于此,2007年起,在全行业对《航空制造工程手册》各分册相关技术发展、航空新产品对相应制造技术的需求等进行了全方位的调研工作,筛选出急需的分册修订,并视情对各分册分期、分批进行修订工作,以满足“十二五”以及未来航空工业对先进制造技术的需求。

《航空制造工程手册》第2版的修订工作采用以原各分册参编单位为主,同时根据目前航空工业的各类产品的分工,补充擅长该类制造技术的企事业单位作为参编单位。集全行业之力,根据各制造技术的急需程度,组织航空工业全行业的制造工程技术方面的专家,分期、分批逐步完成《航空制造工程手册》第2版的再版工作。

对于《航空制造工程手册》第2版各分册的编写体例,基本保持第1版风

格，具体内容的修订仍坚持求实、求新、求精、求是的基本原则。对于目前制造技术仍然适用的技术内容予以保留；对于已过时或会逐渐淘汰的技术予以删除；对于已基本成熟的新技术给出可实际操作技术数据、工艺；对于有借鉴作用的先进制造技术予以前瞻性描述。并对原版中的疏漏、图表的清晰度进行了修正。

目前，航空工业任务繁重，《航空制造工程手册》第2版的出版必将为航空工业的加速发展给予有力的技术支撑。

《航空制造工程手册》第2版总编委会
2010年11月

前 言

《航空制造工程手册·热处理》第1版于1993年3月出版,在航空企业航空产品热处理生产中发挥了重要的指导作用。随着我国航空工业的发展、航空热处理领域与国际先进航空制造企业交往、合作及技术接轨要求,以及国内外热处理工艺和装备技术的快速发展,《航空制造工程手册·热处理》第1版内容已经不能满足当前航空新产品热处理生产与质量控制需要,对第1版内容进行修订再版是非常必要的。

本次再版修订的原则是:总结我国航空工业热处理近20年来的科研与应用成果、先进经验,吸收先进技术,综合归纳,汲取精华;适应航空工业发展及新产品生产需要,补充完善原手册内容,使其更加充实,数据和图表准确,工艺参数具有实践意义和可操作性;去除陈旧和过时的内容,充分体现该手册的先进性、科学性、可靠性、实用性,推动航空热处理技术的进步和持续发展。

《航空制造工程手册·热处理》第2版与第1版相比,原章节安排和体例基本不变,仍分为11章和附录,对各个章节和附录的内容都进行了增补充实和修订完善,对有些不适宜的内容进行了适当删减,主要修订内容扼要说明如下:

第1章“钢的热处理”,包括合金结构钢(超高强度钢)、不锈钢、弹簧钢、工模具钢和钢铸件及焊接件。在钢的部分,结合航空用钢近20年来科研和应用成果,增加了新型高性能超高强度钢16Co14Ni10Cr2MoA等2种牌号材料的热处理工艺参数和曲线,组织和基本性能数据等;增加了奥氏体不锈钢00Cr18Ni10N等19种牌号、马氏体不锈钢1Cr12Ni3Mo2V等17种牌号、马氏体沉淀硬化不锈钢0Cr15Ni5Cu2T等4种牌号、奥氏体型沉淀硬化不锈钢1Cr11Ni20Ti2B等2种牌号和半奥氏体型、奥氏体—马氏体过渡型沉淀硬化不锈钢0Cr16Ni6等11种牌号材料的热处理分类和相关的热处理工艺参数和曲线,组织和基本性能数据等。还增加了T7A等弹簧用钢及其热处理工艺制度内容。在工模具钢部分,增加了6CrW2Si等30多种牌号材料的热处理工艺参数和相关要求等内容。在钢铸件和焊接件部分,增加了ZG3Cr13A等4种牌号材料的热处理参数和相关要求内容;还增加了有关焊接组件热处理规则等内容。

第2章“高温合金热处理”，根据航空发动机新产品发展对高温材料的推动和需求，补充完善了变形高温热处理工艺，增加了GH1139等近10种牌号的变形铁基、镍基、钴基合金的热处理工艺参数和应用条件，同时，根据材料标准对原合金牌号的命名统一为4位数字并尽量列出了相近的国外牌号对照。较大篇幅补充了K825、DZ125L、DD6和IC6等新型铸造高温合金热处理内容，重点阐述了定向高温合金和单晶高温合金主要用途、热处理工艺、组织和性能等，还增加了高温合金气氛和真空热处理的内容。

第3章“有色金属及其合金的热处理”，包括铝合金热处理、镁合金热处理、钛合金热处理及铜合金热处理。在铝合金部分，根据材料标准，将合金旧牌号转化为新牌号，把旧状态转化为新状态，并对每种新状态进行了详细解释，增加了铝合金新旧状态对照表。结合航空铝合金材料近年来的研究成果，增加了7B04等6种牌号的变形铝合金、ZL102等14种铸造铝合金的热处理工艺参数及技术要求，补充完善了变形铝合金稳定化处理工艺，铸造铝合金冷热循环处理工艺等。在钛合金部分，将钛合金分为 α 合金、近 α 合金、 $\alpha-\beta$ 合金、近 β 合金、亚稳定 β 合金和稳定 β 合金等六类，同时，将国内常用的钛合金单独列出，并增加了各国典型钛合金的对照表。在热处理工艺方面，增加TA5、TC16、TB6等24种牌号钛合金的热处理工艺以及钛合金淬透性、钛合金钼当量、铝当量和相转变温度等技术内容，增加了钛合金半成品热处理注意事项，补充修改了钛合金热处理常见缺陷及预防补救措施。重新改写了铜合金的热处理技术内容。本章的修订使有色金属热处理内容更充实、完整和更新颖。

第4章“精密合金及贵金属合金热处理”，包括软磁合金、永磁合金、磁滞合金、弹性合金、膨胀合金、贵金属合金、记忆合金等热处理。增加了NiTi基记忆合金、3J68弹性合金热处理工艺，材料牌号和热处理工艺参数按新的材料及热处理工艺标准进行了修订。记忆合金在航空航天领域可用于智能敏感构件和器件，提高飞行器性能，应用前景很好。记忆合金热处理一节从记忆合金应用及分类、热处理特点、热处理缺陷及预防补救措施等方面全面详尽介绍记忆合金热处理技术。

第5章“真空热处理”，该项技术在航空工业中迅速发展和广泛应用。根据近20年来科研成果和生产经验总结，增加了真空热处理中防止发生粘连的最高温度，各种材料允许最大压升率，以及各种材料推荐的真空度等内容。重新改写了“真空正压气淬”一节，从冷却能力影响因素、淬透性问题、真空正压气淬新技术等方面阐述了真空正压气淬现状和发展，为扩大真空正压气淬技术的应用奠定了基础。

第6章“保护热处理”，本章对基本原理进行了适当的补充完善，以便使用者能够较快理解气氛保护热处理用途及工艺方法。将氮基气氛热处理称谓改为可控氮基气氛热处理，主要为了强调氮基气氛保护热处理过程中气氛成分的可控性。重点介绍了可控氮基气氛热处

理,重写了“氨基气氛保护淬火”一节,并根据相关航空工业标准增加了氨基保护气氛成分及控制、几种常用航空钢制件可控氨基气氛保护热处理的参数控制范围介绍。从设备、气氛控制工艺到超高强度钢氨基气氛保护淬火应用,详细介绍了该项技术研究成果和生产实践应用。保护涂料热处理部分补充增加了钛合金、不锈钢保护涂料和无机涂料及其涂覆工艺。

第1版第6章关于渗碳原理和控制技术内容,由于属于化学热处理范畴,因此全部移到第2版第7章中介绍。

第7章“化学热处理”,包括渗碳、渗氮、渗金属、真空化学热处理等内容。渗碳部分,重点介绍了氧探头碳势控制应用,给出了采用氧探头作为传感器组成的先进碳势控制系统的若干种配置模式;特别地,对氧探头使用的注意事项进行了详细的介绍。本部分还对不锈钢气体渗碳去除钝化膜的方法进行了介绍,同时明确指出其中不足和使用注意事项。渗氮部分,补充增加了精密气体渗氮和深层渗氮内容,包括先进的渗氮设备、精密氮势控制技术、深层渗氮工艺技术和实际应用等。渗金属部分,在工艺方法和原理中增加了沉积—扩散两步法、化学气相沉积技术、电子束物理气相沉积等技术内容,详细介绍了真空电弧离子镀技术。真空化学热处理部分,重新编写了“真空渗碳”一节,详细介绍了真空渗碳技术的来源、特点、原理、工艺及工艺控制方法、不锈钢真空渗碳技术及真空渗碳技术的发展。对离子渗氮和离子渗碳部分也进行了补充修改,纳入了新的离子渗氮航空工业标准的有关内容,同时增加了离子渗硫技术和实际应用的内容。此外,本章还增加了13Cr4Mo4Ni4VA先进航空齿轮轴承钢及其他10多种钢材料的渗碳、渗氮热处理工艺及参数。

第8章“其他热处理方法”,包括感应加热热处理、激光热处理、电子束热处理和流态床热处理。感应加热热处理部分增加了近年来该技术的最新发展;激光热处理部分增加了较多内容,对激光的基本原理和特点作了比较详细的介绍,增加了激光表面重熔及应用的内容,还增加了激光冲击强化的内容介绍等。

第9章“航空典型制件的热处理”,包括航空制件热处理工艺制定原则与程序,飞机零件热处理、发动机零件热处理和机载设备零件热处理。本章的内容修改和增加较多,选择的典型制件从原来的24个增加至59个。并且技术内容更加充实,涉及的金属材料牌号更多,如:超高强度钢、不锈钢、钛合金和铝合金的材料牌号都有不同的增加,则相应的热处理工艺技术范围也随之扩大,如飞机起落架典型制件热处理,除原来的焊接结构起落架热处理之外,重点介绍了主流发展方向的整体锻制起落架的热处理,还介绍了钛合金斜撑杆热处理。又如压气叶片热处理,增加了钛合金TC4和TC11、高温合金GH2132等制件热处理工艺,还增加了钛合金脆化、叶片型面变形严重等热处理缺陷及防治方法等内容。涡轮叶片热处理部分增加了定向、单晶叶片热处理内容,增加了DZ22、DD3等制件的热处理,增加了叶片渗层厚度过深或过浅等缺陷与防治方法。三联齿热处理部分,首次提

出了 18Ni 奥氏体时效细化晶粒热处理工艺和精密渗氮工艺。还增加了离子注入技术与应用的内容,如柱塞泵分油盖离子注入,介绍了离子注入高能束热处理技术在航空工业热处理中的应用。这些修改补充更增加了手册的实用性。

第 10 章“热处理设备和仪表”,本章的内容同样更新较多,基本重新编写。随着航空新产品的发展,对热处理质量控制要求不断提高;同时,为适应国际上环境保护发展趋势,航空热处理节能减排任务加重,因此航空热处理装备和工艺技术改造力度加强,新型和先进的热处理设备和仪器仪表在航空产品热处理中的应用越来越广泛。可控气氛热处理炉部分新增底装料立式可控气氛多用炉及其生产线,新增了精密气体渗氮炉等。真空热处理炉部分重点阐述大型立式真空油淬炉、真空渗碳炉及其生产线、真空磁场热处理炉、真空氢气复合净化热处理炉等新设备。高能束表面改性装置部分补充增加了 EB-PVD 电子束蒸镀设备,离子注入设备等新装备。“仪表”一节改为“仪器仪表及自动控制系统”,并增加了自动控制系统内容,包括设备自动控制、仿真控制管理自动控制、热处理专家系统、智能控制、人工神经网络智能控制等。由于内容的充实与丰富,本章的篇幅也较第 1 版大为增加。

第 11 章“热处理质量控制与检验”,增加了“热处理质量控制新技术”一节,重点介绍高温测量技术和热处理质量的数据统计方法。“热处理检验”一节中各种检验方法均采用国标 GB/T 231.1—2002,该标准等效采用 ISO 6806-1:1999,重要变化是废除了用钢球压头进行试验的规定,只能用硬质合金球压头,所以布氏硬度表示方法不再有 HBS,只有 HBW,一般也可直接标注为 HB。

附录部分也增加了相关的内容。由于本手册的各个章节修订内容多而复杂,在此就不一一详述了。

《航空制造工程手册·热处理》的修订工作得到了中国航空工业集团公司、主编单位和各参编单位各级领导的大力支持,参编人员积极认真地编写稿件,各单位的有关技术人员提供了宝贵的技术资料和素材,整理校对人员和航空工业出版社的编审人员付出了大量的劳动,很多热处理设备和仪器仪表制造商也提供了相关的设备方面资料,没有所有参与者的辛勤努力和心血付出,就没有本手册的顺利如期出版,在此一并表示诚挚的感谢。

本次参与《航空制造工程手册·热处理》再版修订的单位和人员较多,本手册从编写、审定到出版的时间较紧,因此,不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

《航空制造工程手册·热处理》第 2 版分编委会

2010 年 11 月

《热处理》分编委会组成名单

主 任 戴圣龙

副 主 任 (按姓氏笔画排列)

刘大博 邵 洋 胡祥松 贺宏斌 郭 灵 润长生

委 员 (按姓氏笔画排列)

王 岩 王慈校 田 飞 权纯逸 刘松竹 杨战峰
李治帮 张庆玲 张晓艳 陈仲强 陈和潮 武振林
赵哨民 宣晓刚 高健平 常真卫 熊 华 臧 川
滕 霖

主 编 郭 灵

副 主 编 佟小军 刘大博 王广生

编 委 (按姓氏笔画排列)

王广生 王华明 王宏计 冯抗屯 刘 艳 刘大博
汤万昌 汤智慧 苏怡兴 李 志 李 雪 李凤梅
李国庆 杨 明 佟小军 汪福生 张向东 郝小龙
赵利斌 席守谋 唐定中 黄 旭 黄 敏

编写人员 (按姓氏笔画排列)

丁 飞 于寒秋 万登攀 王 虹 王广生 王华明
王庆乐 王国耀 田象军 史春玲 曲 凤 朱警雷
华 程 刘龙凯 刘红斌 刘连生 刘学侃 刘景武
孙 枫 苏怡兴 杨 明 李 伟 李 克 李国庆

吴崇周	佟小军	汪福生	张凡云	张宏伟	张雅丽
张尊礼	张鹏飞	陈邦峰	陈湘华	金军兵	郝小龙
郑苏侠	赵 松	赵宇新	钟 平	姚 兰	姚明义
姜煜霞	徐刚毅	席守谋	唐伟坚	黄可诚	曹京霞
韩 劲	樊世昆				

统稿人员 (按姓氏笔画排列)

王广生 佟小军

资料提供人员 (按姓氏笔画排列)

马振宁	王 玲	王海防	牛 静	尹克里	古力新
田世藩	伊琳娜	刘军平	刘国利	汝继钢	孙雨声
李 雪	李 彪	宋尽霞	张 华	张正义	张庆武
张红梅	张志贵	尚作义	易 光	罗 强	罗启斌
郑 亮	郑苏侠	孟丽超	孟维冬	施国梅	贺瑞军
贾新云	徐刚毅	唐 江	唐雪明	黄 浩	崔清链
谢湘礼	雍学华				

整理校对人员 (按姓氏笔画排列)

孙 枫 李 勇 张业勤 贺瑞军

序

我国航空工业已走过了四十余年的历程，从飞机的修理、仿制到自行研制，航空制造工程得到很大的发展。在航空高科技产业的大系统中，航空制造工程是重要的组成部分之一。航空工业，就其行业性来讲，属于制造业范畴。航空制造工程的技术状况，是衡量一个国家科学技术发展综合水平的重要标志。航空制造工程的发展水平，对飞机的可靠性和使用寿命的提高、综合技术性能的改善、研制和生产成本的降低、甚至总体设计思想能否得到具体实现等均起着决定性作用。

航空制造工程已成为市场竞争的重要基础，要发展航空工业、并有效地占领市场，不仅要不断地更新设计，开发新产品，更重要的是要具备一个现代化的航空制造工程系统。在发达国家中，均优先发展航空制造工程，很多新工艺、新材料、新设备、新技术都是在航空制造工程中领先使用的，因此必须从战略高度予以重视，并采取实际而有效的措施加速它的发展。编写《航空制造工程手册》，就是为实现航空制造工程现代化的战略目标，在制造工程领域进行的基础性工作。

四十年来，我国航空工业积累了大量经验，取得了丰硕的成果，特别是改革开放以来，开阔了视野并有可能汲取更多的新科技信息。但是如何将这容量浩繁、层次复杂、学科众多的科学技术和经验汇集起来，使之成为我国航空工业、乃至国家的珍贵财富，是一项具有重大实用价值和长远意义的任务，为此航空航天部决定组织全行业的力量，统一计划、统一部署完成这项极其复杂的规模巨大的系统工程。大家本着继往开来的历史责任感和紧迫感，从1989年开始组织航空工业全行业制造工程方面造诣至深的专家、教授、学者，经过几年的努力陆续编写出版了这套基本覆盖航空制造工程各专业各学科的包括三十二个分册、几千万字的《航空制造工程手册》。

编好这套手册是一项十分艰巨的工作。大家始终坚持求实、求新、求精、求是的原则，在确保鲜明航空特色的前提下，在总体内容上强调实用性、综合性、成套性；在表达形式上，以技术数据、图形表格、曲线公式为主；阐述扼要，结论严谨，力求使手册成为一部概念准确、数据可靠、文字简洁、编排合理、查阅方便，能为广大从事航空制造工程的科技人员提供有益指导和参考的工具书。

首次组织编纂大型手册，缺乏经验，还由于过去资料积累基础比较薄弱，新技术发展迅速和深度广度不断增加，使这项工作带有相当程度的探索性，因之错误与不足之处实为难免，恳切希望广大读者给予指正。对在这套手册编写过程中给予支持的单位和付出辛勤劳动，提供资料，参与编写，评审，出版的同志们表示衷心感谢。由于我国航空制造工程与世界水平尚存在较大差距，这套手册出版之后，还有不断求新、完善的必要，《航空制造工程手册》总编委会及其办公室是常设机构，将努力收集新的科技信息及这套工具书使用的情况和意见，为今后的修订提供依据，以求进一步完善和提高。

何文治

1992年8月28日

《航空制造工程手册》第1版总编委会名单

《航空制造工程手册》 总编委会、顾问及办公室组成名单

主 任 何文治

副 主 任 (按姓氏笔画排列)

马业广	王云机	王敬堂	方裕成	刘多朴	朱伯贤
任家耕	李成功	李哲浩	李章由	吴复兴	易志斌
郑作棣	杨彭基	张 彤	张士元	张钟林	周家骐
周砥中	周晓青	金德琨	姚克佩	顾元杰	徐秉铨
徐培麟	郭景山	程宝渠	屠德彰		

常 务 副 主 任 马业广

顾 问 (按姓氏笔画排列)

马世英	于 欣	于志耕	于剑辉	王英儒	冯 旭
杨 墉	杨光中	陆颂善	枉云汉	罗时大	荣 科
郦少安	董德馨	程华明	廖宗懋	颜鸣皋	戴世然

委 员 (按姓氏笔画排列)

马业广	王广生	王云机	王国成	王喜力	王敬堂
方学龄	方裕成	刘多朴	刘树桓	刘盛东	刘瑞新
关 桥	朱伯贤	孙国壁	任家耕	严世能	何文治
何恽晋	李成功	李秋娥	李哲浩	李章由	李德澄
杜昌年	沈昌治	陈于乐	陈 进	陈积懋	陈德厚
余承业	杨彭基	吴志恩	吴复兴	张 彤	张 夏
张士元	张幼桢	张灵雨	张纯正	张钟林	张增模
周家骐	周砥中	周晓青	易志斌	郑作棣	林更元

林泽宽	林敦仪	金慧根	金德琨	国 岩	赵仲英
胡四新	胡建国	姜淑芳	姚永义	姚克佩	郝命麒
顾元杰	郭景山	晏海瑞	唐荣锡	唐瑞润	徐秉铨
徐培麟	常荣福	戚道纬	崔连信	屠德彰	程宝渠
熊敦礼	戴 鼎				

常 委 (按姓氏笔画排列)

马业广	王云机	何恽晋	李成功	李哲浩	吴复兴
郑作棣	周家骐	戚道纬	崔连信	屠德彰	戴 鼎

办公室主任 戚道纬

办公室副主任 (按姓氏笔画排列)

刘树桓 姜淑芳 崔连信

办公室成员 (按姓氏笔画排列)

丁立铭	王偌鹏	刘树桓	刘瑞麟	邵 箭	陈 刚
陈振荣	宋占意	张士霖	林 森	段文斌	贺开运
姜淑芳	莫龙生	徐晓风	戚道纬	崔正山	崔连信

《热处理》分编委会组成名单

主 编 王广生

副主编 王峙南

委 员 (按姓氏笔画排列)

王广生	王峙南	刘忠秋	朱念璋	许鸿儒
苏怡兴	杜 航	张文尚	张守勇	张志方
张喜源	林韵书	贺开运	莫龙生	黄匡华
蒋维樵				

《热处理》其他编写和统稿人员名单

编写人员 (按姓氏笔画排列)

余全晞	陈惠民	范瑞麟	杨思品	赵志远
阎继霞	黄福祥	曾祥模		

统稿人员 (按姓氏笔画排列)

王广生	张喜源	张 峥
-----	-----	-----