

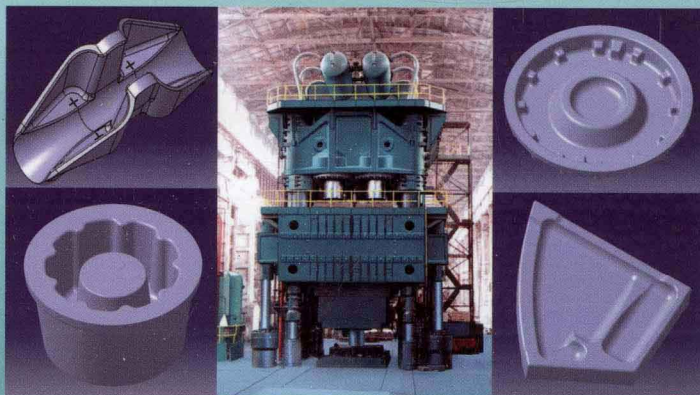
现代铝加工生产技术丛书

主编 李凤轶 周江

铝合金锻造技术

LÜHEJIN DUANZAO JISHU

刘静安 张宏伟 谢水生 编著



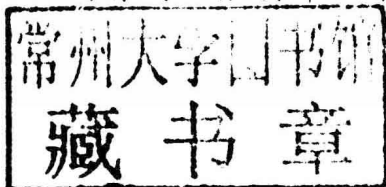
冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

现代铝加工生产技术丛书

主编 李凤秋 周 江

铝合金锻造技术

刘静安 张宏伟 谢水生 编著



冶金工业出版社

2012

内 容 简 介

本书是《现代铝加工生产技术丛书》之一,详细介绍和论述了铝合金锻压方法及工作原理,锻压生产工艺,工模具设计与制造,锻件质量控制以及常用的锻压设备等,全书共分6章,包括:概论,铝合金自由锻造技术,铝合金模锻技术,铝合金锻件热处理,常用铝合金锻压设备,铝合金锻压新技术及信息化技术等。在内容组织和结构安排上,力求理论联系实际,切合生产需要,突出实用性、先进性和行业特色,为读者提供一本实用的技术著作。

本书是铝加工生产企业工程技术人员必备的技术读物,也可供从事有色金属材料与加工的科研、设计、教学、生产和应用等方面的技术人员与管理人员使用,同时可作为大专院校有关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

铝合金锻造技术/刘静安,张宏伟,谢水生编著.—北京:
冶金工业出版社,2012.6
(现代铝加工生产技术丛书)
ISBN 978-7-5024-5847-8

I. ①铝… II. ①刘… ②张… ③谢… III. ①铝合金—锻造 IV. ①TG319

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第066919号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 张登科 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5847-8

三河市双峰印刷装订有限公司印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012年6月第1版,2012年6月第1次印刷

148mm×210mm;15.375印张;457千字;475页

48.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

《现代铝加工生产技术丛书》

编辑委员会

主 编	李凤轶	周 江		
常务副主编	谢水生	刘静安		
副 主 编	吕新宇	尹晓辉	李建荣	熊柏青
	杨焕文	吴小源	李学朝	
编 委	(按姓氏笔画排列)			
	马英义	王华春	王国军	尹晓辉
	方清万	王德满	田 树	丛福官
	米绪军	李 迅	李 响	李凤轶
	李学朝	李建荣	李念奎	李建湘
	刘 庆	刘玉珍	刘志铭	刘静安
	朱 毅	阎维刚	吕新宇	何 峰
	吴小源	陈昌云	陈思仁	杨志兵
	杨焕文	张宏伟	张登科	宋晓辉
	苏堪祥	周 江	单长智	范生艳
	武红林	周学博	钟 利	侯 绎
	侯 波	赵世庆	郭金龙	贺金宇
	段瑞芬	凌 杲	聂 波	唐 剑
	黄 凯	黄国杰	谢水生	谢延翠
	谭学余	熊柏青	樊建中	魏长传

《现代铝加工生产技术丛书》

主要参编单位

西南铝业（集团）有限责任公司

东北轻合金有限责任公司

中国铝业股份有限公司西北铝加工分公司

北京有色金属研究总院

广东凤铝铝业有限公司

广东中山市金胜铝业有限公司

上海瑞尔实业有限公司

《丛书》前言

节约资源、节省能源、改善环境越来越成为人类生活与社会可持续发展的必要条件，人们正竭力开辟新途径，寻求新的发展方向和有效的发展模式。轻量化显然是有效的发展途径之一，其中铝合金是轻量化首选的金属材料。因此，进入 21 世纪以来，世界铝及铝加工业获得了迅猛的发展，铝及铝加工技术也进入了一个崭新的发展时期，同时我国的铝及铝加工产业也掀起了第三次发展高潮。2007 年，世界原铝产量达 3880 万吨（其中：废铝产量 1700 万吨），铝消费总量达 4275 万吨，创历史新高；铝加工材年产量达 3200 万吨，仍以 5%~6% 的年增长率递增；我国原铝年产量已达 1260 万吨（其中：废铝产量 250 万吨），连续五年位居世界首位；铝加工材年产量达 1176 万吨，一举超过美国成为世界铝加工材产量最大的国家。与此同时，我国铝加工材的出口量也大幅增加，我国已真正成为世界铝业大国、铝加工业大国。但是，我们应清楚地看到，我国铝加工材在品种、质量以及综合经济技术指标等方面还相对落后，生产装备也不甚先进，与国际先进水平仍有一定差距。

为了促进我国铝及铝加工技术的发展，努力赶超世界先进水平，向铝业强国和铝加工强国迈进，还有很多工作要做：其中一项最重要的工作就是总结我国长期以来在铝加工方面的生产经验和科研成果；普及和推广先进铝加工技术；提出我国进一步发展铝加工的规划与方向。

几年前，中国有色金属学会合金加工学术委员会与冶金工业出版社合作，组织国内 20 多家主要的铝加工企业、科研院所、大专院校的百余名专家、学者和工程技术人员编写出版了大型工具书——《铝加工技术实用手册》，该书出版后受到广大读者，特别是铝加工企业工程技术人员的好评，对我国铝加工业的发展起到一定的促进作用。但由于铝加工工业及技术涉及面广，内容十分

丰富,《铝加工技术实用手册》因篇幅所限,有些具体工艺还不尽深入。因此,有读者反映,能有一套针对性和实用性更强的生产技术类《丛书》与之配套,相辅相成,互相补充,将能更好地满足读者的需要。为此,中国有色金属学会合金加工学术委员会与冶金工业出版社计划在“十一五”期间,组织国内铝加工行业的专家、学者和工程技术人员编写出版《现代铝加工生产技术丛书》(简称《丛书》),以满足读者更广泛的需求。《丛书》要求突出实用性、先进性、新颖性和可读性。

《丛书》第一次编写工作会议于2006年8月20日在北戴河召开。会议由中国有色金属学会合金加工学术委员会主任谢水生主持,参加会议的单位有:西南铝业(集团)有限责任公司、东北轻合金有限责任公司、中国铝业股份有限公司西北铝加工分公司、北京有色金属研究总院、广东凤铝铝业有限公司、华北铝业有限公司的代表。会议成立了《丛书》编写筹备委员会,并讨论了《丛书》编写和出版工作。2006年年底确定了《丛书》的编写分工。

第一次《丛书》编写工作会议以后,各有关单位领导十分重视《丛书》的编写工作,分别召开了本单位的编写工作会议,将编写工作落实到具体的作者,并都拟定了编写大纲和目录。中国有色金属学会的领导也十分重视《丛书》的编写工作,将《丛书》的编写出版工作列入学会的2007~2008年工作计划。

为了进一步促进《丛书》的编写和协调编写工作,编委会于2007年4月12日在北京召开了第二次《丛书》编写工作会议。参加会议的有来自西南铝业(集团)有限责任公司、东北轻合金有限责任公司、中国铝业股份有限公司西北铝加工分公司、北京有色金属研究总院、广东凤铝铝业有限公司、上海瑞尔实业有限公司、广东中山市金胜铝业有限公司、华北铝业有限公司和冶金工业出版社的代表21位同志。会议进一步修订了《丛书》各册的编写大纲和目录,落实和协调了各册的编写工作和进度,交流了编写经验。

为了做好《丛书》的出版工作,2008年5月5日在北京召开

了第三次《丛书》编写工作会议。参加会议的单位有：西南铝业（集团）有限责任公司、东北轻合金有限责任公司、中国铝业股份有限公司西北铝加工分公司、北京有色金属研究总院、广东凤铝铝业有限公司、广东中山市金胜铝业有限公司、上海瑞尔实业有限公司和冶金工业出版社，会议代表共 18 位同志。会议通报了编写情况，协调了编写进度，落实了各分册交稿和出版计划。

《丛书》因各分册由不同单位承担，有的分册是合作编写，编写进度有快有慢。因此，《丛书》的编写和出版工作是统一规划，分步实施，陆续尽快出版。

由于《丛书》组织和编写工作量大，作者多和时间紧，在编写和出版过程中，可能会有不妥之处，恳请广大读者批评指正，并提出宝贵意见。

另外，《丛书》编写和出版持续时间较长，在编写和出版过程中，参编人员有所变化，敬请读者见谅。

《现代铝加工生产技术丛书》编委会

2008 年 6 月

前 言

经过几十年的研发与技术改造，铝合金锻压生产与技术有了突飞猛进的发展，已成为一个门类齐全、结构完整的铝合金锻压生产体系和科研体系。产品品种和质量基本上能满足我国国民经济和国防建设的需求。但是，铝合金锻压生产及产品较之轧制材（板带条箔材）和挤压材（管棒型线材）来说，仍然规模很小，在铝材中所占比例很低（2%~3%）。铝合金锻件是航空航天、交通运输、动力能源、机械制造等部门制作关键受力部件不可或缺的材料，在国民经济和国防军工中占有重要的特殊地位。随着航空航天、现代交通运输（特别是现代汽车和高速轨道等）、新型能源等工业的发展，特别是近年来节能、环保、安全等对轻量化要求的剧增，以铝代钢、以铝代铜、以锻代铸已成为很多工业部门的发展趋势，铝合金锻件具有密度低、比强度和比刚度高、耐腐蚀、抗疲劳、加工性能和使用性能良好的特性，已得到越来越广泛的应用。

经过 60 多年，特别是近 20 年的发展，我国铝合金锻压生产与技术有了长足的进步，但与世界先进水平相比仍有很大的差距，为了缩小与国际先进水平的差距，提升我国铝合金锻压生产的水平，扩大铝合金锻件的品种和优化其质量，以满足我国国民经济持续高速的发展与国防军工现代化的需求，作者在总结、提炼本人多年来在铝合金锻压生产和科研中积累的丰富经验与科研成果的基础上，参阅、翻译、整理了大量国内外最新文献和技术资料，编写了本书，以期对我国铝合金锻压生产与技术的发展有所裨益。

本书全面介绍和论述了铝合金锻压生产的发展历史、现状与趋势，锻压方法及工作原理，锻压生产工艺，工模具设计与制造，锻件

质量控制以及常用的锻压设备等，全书共分 6 章，包括：概论，铝合金自由锻造技术，铝合金模锻技术，铝合金锻件热处理，常用铝合金锻压设备，铝合金锻压新技术、新工艺及锻压过程的信息化技术研发等。在内容组织和结构安排上，力求理论联系实际，切合生产需要，突出实用性、先进性和行业特色，并从生产和应用中精选了大量的典型实例，深入浅出地讨论了解决关键技术难题的途径和方法等，对解决生产中遇到的技术质量问题会有所帮助。

本书是铝加工生产企业工程技术人员必备的技术读物，也可供从事有色金属材料与加工的科研、设计、教学、生产和应用等方面的技术人员与管理人员使用，同时可作为大专院校有关专业师生的参考书。

本书第 1、3 章由刘静安编写，第 2、4 章由张宏伟编写，第 5、6 章由刘静安、谢水生共同编写，张宏伟还提供了第 3 章前面两节的部分资料。全书由刘静安教授和谢水生教授审定。

本书在编写过程中，参阅了国内外有关专家、学者的一些文献资料和图表数据；得到了中国有色金属学会合金加工学术委员会和冶金工业出版社的大力支持；邵莲芬、刘煜、刘鲁等同志为本书的编写做了大量具体工作，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2012 年 4 月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价（元）
铝加工技术实用手册	248.00
铝合金熔铸生产技术问答	49.00
铝合金材料的应用与技术开发	48.00
大型铝合金型材挤压技术与工模具优化设计	29.00
铝型材挤压模具设计、制造、使用及维修	43.00
镁合金制备与加工技术	128.00
半固态镁合金铸轧成形技术	26.00
铜加工技术实用手册	268.00
铜加工生产技术问答	69.00
铜水（气）管及管接件生产、使用技术	28.00
铜加工产品性能检测技术	36.00
冷凝管生产技术	29.00
铜及铜合金挤压生产技术	35.00
铜及铜合金熔炼与铸造技术	28.00
铜合金管及不锈钢管	20.00
钛冶金	69.00
特种金属材料及其加工技术	36.00
金属板材精密裁切 100 问	20.00
棒线材轧机计算机辅助孔型设计	40.00
有色金属行业职业教育培训规划教	
金属学及热处理	32.00
有色金属塑性加工原理	18.00
重有色金属及其合金熔炼与铸造	28.00
重有色金属及其合金板带材生产	30.00
重有色金属及其合金管棒型线材生产	38.00
有色金属分析化学	46.00

目 录

1 概论	1
1.1 锻压生产在国民经济中的重要地位及铝合金锻件的特点 与应用	1
1.1.1 锻压生产在国民经济与国防建设中的重要地位	1
1.1.2 铝合金锻压件的特性及应用领域	2
1.2 锻压生产发展概况及铝合金锻压技术发展水平	4
1.2.1 锻压生产的发展历史	4
1.2.2 铝合金锻压生产与技术的发展现状及水平分析	6
1.2.3 铝合金锻压生产与技术的发展趋向	12
1.3 铝合金锻压件的技术开发及应用前景分析	15
1.3.1 铝合金锻压件的生产、消费情况分析	15
1.3.2 市场需求及应用前景分析	16
1.4 锻压生产用铝合金及其锻造工艺性能与可锻压性	18
1.4.1 常用的锻造铝合金	18
1.4.2 铝合金的锻造工艺性能	26
1.4.3 铝合金的可锻性分析	40
1.5 铝合金锻压成形的基本原理、特点与分类	42
1.5.1 铝合金锻压成形的基本原理	42
1.5.2 铝合金锻压成形的特点	43
1.5.3 铝合金锻压的主要方式及分类	46
1.6 铝合金锻压生产的技术基础及主要工艺条件	52
1.6.1 金属塑性变形机理	52
1.6.2 铝合金锻压成形过程中的金属流动特征	53
1.6.3 铝合金锻压成形过程中变形区的受力状态及 力能计算	59
1.6.4 铝合金锻压成形过程中的温度、速度与变形程度	

的变化	68
1.6.5 铝合金锻压成形过程中的摩擦与润滑	75
1.6.6 铝合金锻压过程中组织与性能的变化	82
1.7 铝合金锻压生产的工艺方案、基本工序、生产工艺流程 及主要工艺参数的确定原则	88
1.7.1 铝合金锻压生产的工艺方案、基本工序及其特点	88
1.7.2 拟订工艺方案（生产工艺流程）的步骤	95
1.7.3 铝合金锻压生产的主要工艺参数及其确定原则与 举例	97
2 铝合金自由锻造技术	106
2.1 概述	106
2.1.1 铝合金自由锻造的特点	106
2.1.2 常用锻造的铝合金及其加工特性	107
2.1.3 自由锻件分类	108
2.1.4 铝合金自由锻造用原材料	109
2.2 自由锻造前的准备	110
2.2.1 铸锭均匀化退火	110
2.2.2 坯料准备	112
2.2.3 锻造用工模具的准备	114
2.2.4 坯料加热	116
2.3 自由锻造基本工序分析	118
2.3.1 自由锻造工序分类	118
2.3.2 镦粗	119
2.3.3 拔长	128
2.3.4 冲孔工序	136
2.3.5 扩孔	140
2.3.6 芯轴拔长	144
2.3.7 弯曲	146
2.3.8 修整工序	147
2.3.9 锻造比的计算	148
2.4 自由锻造的力能计算	149

2.4.1	自由锻液压机能力计算	149
2.4.2	自由锻造设备吨位计算与选择	149
2.5	自由锻工艺过程的设计与工艺卡片的编制	150
2.5.1	锻件图的设计及余量与公差标准的确定	150
2.5.2	确定原始毛坯的质量和尺寸	155
2.5.3	制定锻造变形工艺	157
2.5.4	编写工艺卡片	160
3	铝合金模锻技术	161
3.1	铝合金模锻件的分类	161
3.2	铝合金模锻件设计	163
3.2.1	铝合金模锻件设计的原则	164
3.2.2	模锻件设计的主要工艺结构要素	164
3.2.3	分模线的选择与流线特征	165
3.2.4	模锻斜度（拔模斜度）	170
3.2.5	圆角半径	176
3.2.6	冲孔连皮	179
3.2.7	腹板厚度、筋与筋间距	182
3.2.8	模锻件的余量与公差的确定	186
3.2.9	模锻件的结构分析	193
3.2.10	模锻件设计的其他技术要素的确定	194
3.3	铝合金模锻锻模的设计与制造技术	196
3.3.1	锻模设计的步骤和原则	196
3.3.2	铝合金锻模的设计	198
3.3.3	铝合金锻模的制造技术	209
3.4	铝合金模锻工艺	210
3.4.1	概述	210
3.4.2	铝合金模锻工艺及操作要点	216
3.5	铝合金典型模锻件模锻技术及工艺过程举例	225
3.5.1	大型铝合金锻件的液压机模锻技术研发与举例	225
3.5.2	铝合金小型构件的机械压力机模锻技术研发与举例	255

3.5.3 航空发动机叶片的模锻技术	256
3.5.4 小型构件的摩擦压力机模锻技术研发与举例	257
3.6 铝合金锻件的主要缺陷及锻压过程的产品质量控制	260
3.6.1 锻件的主要缺陷	260
3.6.2 锻件的质量控制	264
4 铝合金锻件热处理	266
4.1 概述	266
4.1.1 热处理的目的	266
4.1.2 热处理的分类	268
4.1.3 变形铝合金主要强化方式	269
4.1.4 热处理的加热、保温和冷却	271
4.1.5 铝合金热处理的特点	272
4.2 铝合金均匀化退火	273
4.2.1 铝合金均匀化退火的目的及作用	273
4.2.2 铝合金均匀化退火过程及组织变化	274
4.2.3 铝合金均匀化退火制度	275
4.3 铝合金锻件退火工艺制度	278
4.3.1 坯料退火	279
4.3.2 再结晶退火（中间退火）	279
4.3.3 成品退火	279
4.3.4 退火操作过程中注意事项	281
4.4 固溶处理（淬火）	281
4.4.1 铝合金固溶处理的特点与目的	281
4.4.2 淬火加热温度	281
4.4.3 铝合金过烧温度及其影响因素	285
4.4.4 固溶处理保温时间的选择	288
4.4.5 淬火冷却速度	290
4.4.6 热处理变形及其消除方法	295
4.4.7 阶段淬火	299
4.4.8 强化固溶	300

4.4.9 淬火与时效的间隔时间	301
4.4.10 淬火过程中的注意事项	302
4.5 时效	304
4.5.1 铝合金时效概述	305
4.5.2 铝合金的时效过程	306
4.5.3 过饱和固溶体的分解过程及析出相的形成序列	309
4.5.4 时效理论的应用	311
4.5.5 铝合金时效的影响因素	314
4.5.6 其他时效热处理方式	318
4.5.7 常用铝合金锻件时效工艺	322
4.6 铝合金锻件的热处理设备简述	324
4.6.1 热处理加热设备	324
4.6.2 热处理辅助设备	325
4.7 变形铝合金热处理状态代号及其表示方法	326
4.7.1 基本状态代号	326
4.7.2 细分状态代号	327
4.7.3 原状态代号与新状态代号的对照	331
5 常用铝合金锻压设备	332
5.1 概述	332
5.2 锻压设备的分类	333
5.2.1 直线往复运动的锻压设备	333
5.2.2 旋转运动的锻压设备	333
5.3 几种主要锻压设备的特性	333
5.3.1 锻锤	333
5.3.2 热模锻压力机	335
5.3.3 旋转锻压机	335
5.3.4 平锻机	336
5.3.5 液压机	338
5.3.6 螺旋压力机	341
5.3.7 曲柄压力机	342

5.3.8	辗锻机	343
5.3.9	其他锻压机	344
5.4	铝合金锻压设备的发展概况	344
5.4.1	概述	344
5.4.2	铝合金常用的锻压设备	347
6	铝合金锻压新技术及信息化技术	361
6.1	铝合金锻压新技术和新工艺的研发	361
6.1.1	铝合金的冷锻技术	361
6.1.2	铝合金半固态模锻技术	362
6.1.3	铝合金精密模锻技术	377
6.1.4	等温锻造	381
6.1.5	超塑性锻造	384
6.1.6	粉末锻造	387
6.1.7	液压模锻	394
6.1.8	高速锤锻造	400
6.1.9	多向模锻技术	402
6.1.10	旋锻	403
6.1.11	辗锻	403
6.1.12	楔横轧	404
6.1.13	旋压加工技术	405
6.2	铝合金锻压过程的信息化技术	417
6.2.1	概述	417
6.2.2	锻造工艺计算机辅助设计 (CAD)	418
6.2.3	有限元分析概述	422
6.2.4	金属塑性成形模拟	426
6.2.5	锻造工艺 CAD/CAM	428
6.2.6	锻造工艺 CAE	440
6.2.7	铝合金锻压过程的信息化技术应用实例	442
	参考文献	473