

“十一五”国家重点图书出版规划项目

# Al

# 中国有色金属丛书

中国有色金属工业协会组织编写

# 铝合金

# 锻造生产

张宏伟 吕新宇 武红林 编著

# Nonferrous Metals



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn



“十一五”国家重点图书出版规划项目



# 铝合金锻造生产

中国有色金属工业协会组织编写

张宏伟 吕新宇 武红林 编著



中南大学出版社  
[www.csupress.com.cn](http://www.csupress.com.cn)

---

图书在版编目(CIP)数据

铝合金锻造生产/张宏伟,吕新宇,武红林编著. —长沙:中南  
大学出版社,2011.9

ISBN 978 - 7 - 5487 - 0404 - 1

I. 铝... II. ①张... ②吕... ③武... III. 铝合金 - 锻造  
IV. TG319

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 194307 号

---

铝合金锻造生产

张宏伟 吕新宇 武红林 编著

---

责任编辑 刘颖维

责任印制 文桂武

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙市宏发印刷厂

---

开 本 787×1092 1/16 印张 21.25 字数 524 千字 插页

版 次 2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 0404 - 1

定 价 76.00 元

---

图书出现印装问题,请与经销商调换

# 中国有色金属丛书 CNMS 编委会

---

**主任:**

康义 中国有色金属工业协会

**常务副主任:**

黄伯云 中南大学

**副主任:**

熊维平	中国铝业公司
罗涛	中国有色矿业集团有限公司
李福利	中国五矿集团公司
李贻煌	江西铜业集团公司
杨志强	金川集团有限公司
韦江宏	铜陵有色金属集团控股有限公司
何仁春	湖南有色金属控股集团有限公司
董英	云南冶金集团总公司
孙永贵	西部矿业股份有限公司
余德辉	中国电力投资集团公司
屠海令	北京有色金属研究总院
张水鉴	中金岭南有色金属股份有限公司
张学信	信发集团有限公司
宋作文	南山集团有限公司
雷毅	云南锡业集团有限公司
黄晓平	陕西有色金属控股集团有限公司
王京彬	有色金属矿产地质调查中心
尚福山	中国有色金属工业协会
文献军	中国有色金属工业协会

**委员(以姓氏笔划排序):**

马世光	中国有色金属工业协会加工工业分会
马宝平	中国有色金属工业协会铝业分会
王再云	中铝山东分公司
王吉位	中国有色金属工业协会再生金属分会
王华俊	中国有色金属工业协会
王向东	中国有色金属工业协会钛锆铅分会
王树琪	中条山有色金属集团有限公司

王海东  
乐维宁  
许健  
刘同高  
刘良先  
刘柏禄  
刘继军  
李宁  
李凤轶  
李阳通  
李沛兴  
李旺兴  
杨超  
杨文浩  
杨安国  
杨龄益  
吴跃武  
吴锈铭  
邱冠周  
冷正旭  
汪汉臣  
宋玉芳  
张麟  
张创奇  
张洪国  
张洪恩  
张培良  
陆志方  
陈成秀  
武建强  
周江  
赵波  
赵翠青  
胡长平  
钟卫佳  
钟晓云  
段玉贤  
胥力  
黄河  
黄粮成  
蒋开喜  
傅少武  
瞿向东

中南大学出版社  
中铝国际沈阳铝镁设计研究院  
中冶葫芦岛有色金属集团有限公司  
厦门钨业集团有限公司  
中国钨业协会  
赣州有色冶金研究所  
荏平华信铝业有限公司  
兰州铝业股份有限公司  
西南铝业(集团)有限责任公司  
柳州华锡集团有限责任公司  
白银有色金属股份有限公司  
中铝郑州研究院  
云南铜业(集团)有限公司  
甘肃稀土集团有限责任公司  
河南豫光金铅集团有限责任公司  
锡矿山闪星锑业有限责任公司  
洛阳有色金属加工设计研究院  
中国有色金属工业协会镁业分会  
中南大学  
中铝山西分公司  
宝钛集团有限公司  
江西钨业集团有限公司  
大冶有色金属有限公司  
宁夏东方有色金属集团有限公司  
中国有色金属工业协会  
河南中孚实业股份有限公司  
山东丛林集团有限公司  
中国有色工程有限公司  
厦门厦顺铝箔有限公司  
中铝广西分公司  
东北轻合金有限责任公司  
中国有色金属工业协会  
中国有色金属工业协会  
中国有色金属工业协会  
中铝洛阳铜业有限公司  
江西稀有稀土金属钨业集团公司  
洛阳栾川钼业集团有限责任公司  
遵义钛厂  
中电投宁夏青铜峡能源铝业集团有限公司  
中铝国际贵阳铝镁设计研究院  
北京矿冶研究总院  
株洲冶炼集团有限责任公司  
中铝广西分公司

中国有色金属丛书  
**CNMS** 学术委员会

**主任:**

王淀佐 院士 北京有色金属研究总院

**常务副主任:**

黄伯云 院士 中南大学

**副主任(按姓氏笔划排序):**

于润沧 院士 中国有色工程有限公司  
古德生 院士 中南大学  
左铁镛 院士 北京工业大学  
刘业翔 院士 中南大学  
孙传尧 院士 北京矿冶研究院  
李东英 院士 北京有色金属研究总院  
邱定蕃 院士 北京矿冶研究院  
何季麟 院士 宁夏东方有色金属集团有限公司  
何继善 院士 中南大学  
汪旭光 院士 北京矿冶研究院  
张文海 院士 南昌有色冶金设计研究院  
张国成 院士 北京有色金属研究总院  
陈景 院士 昆明贵金属研究所  
金展鹏 院士 中南大学  
周廉 院士 西北有色金属研究院  
钟掘 院士 中南大学  
黄培云 院士 中南大学  
曾苏民 院士 西南铝加工厂  
戴永年 院士 昆明理工大学

**委员(按姓氏笔划排序):**

卜长海 厦门厦顺铝箔有限公司  
于家华 遵义钛厂  
马保平 金堆城钼业集团有限公司  
王辉 株洲冶炼集团有限责任公司  
王斌 洛阳栾川钼业集团有限责任公司

王林生	赣州有色冶金研究所
尹晓辉	西南铝业(集团)有限责任公司
邓吉牛	西部矿业股份有限公司
吕新宇	东北轻合金有限责任公司
任必军	伊川电力集团
刘江浩	江西铜业集团公司
刘劲波	洛阳有色金属加工设计研究院
刘昌俊	中铝山东分公司
刘侦德	中金岭南有色金属股份有限公司
刘保伟	中铝广西分公司
刘海石	山东南山集团有限公司
刘祥民	中铝股份有限公司
许新强	中条山有色金属集团有限公司
苏家宏	柳州华锡集团有限责任公司
李宏磊	中铝洛阳铜业有限公司
李尚勇	金川集团有限公司
李金鹏	中铝国际沈阳铝镁设计研究院
李桂生	江西稀有稀土金属钨业集团公司
吴连成	青铜峡铝业集团有限公司
沈南山	云南铜业(集团)公司
张一宪	湖南有色金属控股集团有限公司
张占明	中铝山西分公司
张晓国	河南豫光金铅集团有限责任公司
邵武	铜陵有色金属(集团)公司
苗广礼	甘肃稀土集团有限责任公司
周基校	江西钨业集团有限公司
郑萧	中铝国际贵阳铝镁设计研究院
赵庆云	中铝郑州研究院
战凯	北京矿冶研究总院
钟景明	宁夏东方有色金属集团有限公司
俞德庆	云南冶金集团总公司
钱文连	厦门钨业集团有限公司
高顺	宝钛集团有限公司
高文翔	云南锡业集团有限责任公司
郭天立	中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
梁学民	河南中孚实业股份有限公司
廖明	白银有色金属股份有限公司
翟保金	大冶有色金属有限公司
熊柏青	北京有色金属研究总院
颜学柏	陕西有色金属控股集团有限责任公司
戴云俊	锡矿山闪星锑业有限责任公司
黎云	中铝贵州分公司

# 总序



有色金属是重要的基础原材料，广泛应用于电力、交通、建筑、机械、电子信息、航空航天和国防军工等领域，在保障国民经济建设和社会发展等方面发挥了不可或缺的作用。

改革开放以来，特别是新世纪以来，我国有色金属工业持续快速发展，已成为世界最大的有色金属生产国和消费国，产业整体实力显著增强，在国际同行业中的影响力日益提高。主要表现在：总产量和消费量持续快速增长，2008年，10种有色金属总产量2 520万吨，连续7年居世界第一，其中铜产量和消费量分别占世界的20%和24%；电解铝、铅、锌产量和消费量均占世界总量的30%以上。经济效益大幅提高，2008年，规模以上企业实现销售收入预计2.1万亿以上，实现利润预计800亿元以上。产业结构优化升级步伐加快，2005年已全部淘汰了落后的自焙铝电解槽；目前，铜、铅、锌先进冶炼技术产能占总产能的85%以上；铜、铝加工能力有较大改善。自主创新能力显著增强，自主研发的具有自主知识产权的350 kA、400 kA大型预焙电解槽技术处于世界铝工业先进水平，并已输出到国外；高精度内螺纹铜管、高档铝合金建筑型材及时速350 km高速列车用铝材不仅满足了国内需求，已大量出口到发达国家和地区。国内矿山新一轮找矿和境外矿产资源开发取得了突破性进展，现有9大矿区的边部和深部找矿成效显著，一批有实力的大型企业集团在海外资源开发和收购重组境外矿山企业方面迈出了实质性步伐，有效增强了矿产资源的保障能力。

2008年9月份以来，我国有色金属工业受到了国际金融危机的严重冲击，产品价格暴跌，市场需求萎缩，生产增幅大幅回落，企业利润急剧下降，部分行业



已出现亏损。纵观整体形势，我国有色金属工业仍处在重要机遇期，挑战和机遇并存，长期发展向好的趋势没有改变。今后一个时期，我国有色金属工业发展以控制总量、淘汰落后、技术改造、企业重组、充分利用境内外两种资源，提高资源保障能力为重点，推动产业结构调整和优化升级，促进有色金属工业可持续发展。

实现有色金属工业持续发展，必须依靠科技进步，关键在人才。为了提高劳动者素质，培养一大批高水平的科技创新人才和高技能的技术工人，由中国有色金属工业协会牵头，组织中南大学出版社及有关企业、科研院校数百名有经验的专家学者、工程技术人员，编写了《中国有色金属丛书》。《丛书》内容丰富，专业齐全，科学系统，实用性强，是一套好教材，也可作为企业管理人员和相关专业大学生的参考书。经过编写、编辑、出版人员的艰辛努力，《丛书》即将陆续与广大读者见面。相信它一定会为培养我国有色金属行业高素质人才，提高科技水平，实现产业振兴发挥积极作用。

康翔

2009年3月

# 前 言

随着我国铝加工工业的高速、持续稳定发展，铝加工行业中、高级技术工人短缺的现象越来越严重，为了培养中、高级技术工人，出版一套适合于他们学习的丛书十分必要。但是目前这方面的专业书籍很难见到，为此编写了《铝合金锻造生产》一书作为铝业职工读本，供铝合金锻造生产者及有需求的读者参看。

本书系统论述了铝合金锻造的基本原理、工艺、缺陷及废品分析、模具选择及制造、设备等，同时介绍了国内外有关铝合金锻造生产的新工艺、新技术。

本书共分 10 章：概述；铝合金锻造技术基础；铝合金自由锻造；铝合金模锻；铝合金锻件热处理；铝合金锻件的缺陷分析与制量控制；铝合金锻造模具；特种锻造工艺；锻压设备；锻造生产中的安全与环保。

本书是铝合金锻造生产技术人员及中、高级技术工人的教学参考用书，同时也可供铝合金材料研究部门、加工企业、使用单位及相关部门的科技工作者、教师、学生、管理人员等使用。

本书在编写过程中，王庆亮、刘科研、穆永明和石继山等给予许多帮助并参与编写了第 9 章部分内容。同时本书参考应用了国内外有关专家、学者的一些文献资料中的图表和数据等，并得到中南大学出版社的支持，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，时间仓促，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2011 年 6 月

## 目 录



<b>第1章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 锻造生产的特点及铝合金锻件的应用领域	1
1.1.1 锻造生产的特点	1
1.1.2 铝合金锻件的应用领域	2
1.2 锻造方法分类及工艺流程	2
1.2.1 锻造方法分类	2
1.2.2 锻造工艺流程	4
1.3 锻造生产技术的现状及发展趋势	4
1.3.1 我国锻造生产的现状及与发达国家的比较	4
1.3.2 锻造生产技术的发展趋势	5
<b>第2章 铝合金锻造技术基础</b>	<b>6</b>
2.1 铝合金的锻造工艺性能	6
2.1.1 铝合金的锻造工艺性能特点	6
2.1.2 铝合金的可锻性指标及影响因素	7
2.2 铝合金的锻压生产的主要工艺参数	11
2.2.1 铝合金的锻造温度范围	11
2.2.2 变形速度	15
2.2.3 变形程度	16
2.2.4 应力-应变状态	21
2.2.5 锻造变形力	22
2.3 铝合金的锻造方式	22
2.3.1 自由锻造	22
2.3.2 胎膜锻造	23
2.3.3 模型锻造	23
<b>第3章 铝合金自由锻造</b>	<b>24</b>
3.1 概述	24
3.1.1 自由锻造的特点	24
3.1.2 常用于锻造的铝合金及其加工特性	25
3.1.3 自由锻件分类	25

3.2	自由锻造前的准备	26
3.2.1	自由锻造坯料类型	26
3.2.2	坯料准备	27
3.2.3	工模具准备	28
3.2.4	坯料加热	29
3.3	自由锻造基本工序分析	31
3.3.1	工序分类	31
3.3.2	镦粗	31
3.3.3	拔长	39
3.3.4	冲孔工序	45
3.3.5	扩孔	49
3.3.6	芯轴拔长	52
3.3.7	弯曲	55
3.3.8	修整	55
3.3.9	锻造比	56
3.4	自由锻造压力计算	57
3.4.1	理论计算法	57
3.4.2	经验类比法	58
3.5	自由锻工艺	60
3.5.1	锻件图的设计及余量与偏差标准的确定	60
3.5.2	确定原始毛坯的质量和尺寸	63
3.5.3	制定锻造变形工艺	65
3.5.4	编写工艺卡片	68
3.6	胎模锻造	68
3.6.1	胎模锻造的特点	68
3.6.2	胎模锻件的分类	68
3.6.3	胎模分类及应用	69
3.6.4	胎模设计	73
3.6.5	胎模锻工艺	74
<b>第4章</b>	<b>铝合金模锻技术</b>	<b>76</b>
4.1	概述	76
4.1.1	生产方法及特点	76
4.1.2	模锻件的分类	78
4.1.3	工艺过程及技术内容	80
4.1.4	基本技术资料	80
4.2	模锻件图设计	81
4.2.1	设计步骤及因素	81
4.2.2	工艺结构要素	81

4.2.3	分模面的选择	83
4.2.4	偏差及机械加工余量	87
4.2.5	模锻斜度	94
4.2.6	圆角半径	99
4.2.7	冲孔连皮	101
4.2.8	腹板厚度、肋与肋间距	103
4.2.9	模锻件图的绘制	106
4.2.10	模锻件技术要求的内容	109
4.3	模锻工艺	109
4.3.1	模锻成形原理	109
4.3.2	制定模锻工艺依据	111
4.3.3	模锻工艺过程的组成及工艺流程	111
4.3.4	生产准备	112
4.3.5	成形工序	117
4.3.6	润滑	121
4.3.7	模锻变形后工序	122
4.4	设备压力的确定	124
4.4.1	模锻锤压力的确定	124
4.4.2	液压机压力计算	124
4.4.3	热模锻曲柄压力机的压力计算	126
4.4.4	摩擦压力机压力计算	126
4.5	典型锻造工艺过程举例	127
<b>第5章</b>	<b>铝合金锻件热处理</b>	<b>130</b>
5.1	铝合金锻件热处理的特点	130
5.2	铝合金锻件退火工艺制度	130
5.3	铝合金锻件固溶热处理	131
5.3.1	淬火时的冷却介质及其温度	132
5.3.2	冷却介质温度	132
5.3.3	其他影响因素	133
5.3.4	淬火残余应力及其消除方法	133
5.3.5	淬火过程中的注意事项	135
5.4	时效	135
5.4.1	常用铝合金锻件时效工艺	136
5.4.2	铝合金锻件时效工艺及操作要点	136
5.5	铝合金锻件热处理设备简介	137
5.5.1	热处理加热设备	137
5.5.2	热处理辅助设备及辅助材料	140

<b>第6章 铝合金锻件的缺陷分析与质量控制</b>	<b>142</b>
6.1 铝合金锻件缺陷分析	142
6.1.1 缺陷分类	142
6.1.2 原材料引起的缺陷	143
6.1.3 下料过程中产生的缺陷	146
6.1.4 加热过程中缺陷的产生原因及预防措施	146
6.1.5 锻造过程中缺陷的产生原因及预防措施	147
6.1.6 热处理缺陷	156
6.1.7 其他工序产生的缺陷	159
6.2 质量控制内容及方法	164
6.2.1 质量控制责任	165
6.2.2 质量控制内容	165
6.2.3 质量控制方法	166
6.3 质量检验内容和方法	169
6.3.1 质量检验内容	169
6.3.2 铝合金锻件质量检验	171
<b>第7章 铝合金锻造模具</b>	<b>190</b>
7.1 概述	190
7.1.1 分类	190
7.1.2 基本结构	190
7.1.3 锻模的特点	191
7.2 锻模设计	191
7.2.1 一般要求及步骤	191
7.2.2 终锻模膛设计	192
7.2.3 预锻型槽	197
7.2.4 制坯模膛	202
7.2.5 锻模结构	204
7.3 锻模制造及检验	214
7.3.1 锻模材料	214
7.3.2 模具钢的检验	217
7.3.3 锻模制造工艺	217
7.3.4 锻模热处理	221
7.4 锻模检验	224
7.4.1 模膛的检验	224
7.4.2 锻模模膛表面粗糙度检验	224
7.4.3 锻模硬度的检验	224
7.5 锻模的使用、维护及管理	225
7.5.1 锻模的使用	225

7.5.2	锻模的维护	229
7.5.3	锻模的管理	229
7.6	锻模的失效及提高锻模使用寿命的途径	230
7.6.1	锻模的失效形式及原因	231
7.6.2	提高锻模使用寿命的措施	232
<b>第 8 章</b>	<b>特种锻造工艺</b>	<b>237</b>
8.1	绪论	237
8.2	辊轧	237
8.2.1	辊锻	237
8.2.2	楔横轧	240
8.3	辗扩成形	241
8.3.1	辗扩工艺特点	241
8.3.2	辗扩的工作过程	242
8.3.3	辗扩工艺分类	242
8.3.4	辗扩主要工艺参数和设备规格的确定	242
8.4	旋转锻造	243
8.4.1	旋转锻造的特点	244
8.4.2	旋转锻造工艺方法分类	244
8.5	摆动辗压	245
8.5.1	工作原理	245
8.5.2	工艺特点和应用	245
8.5.3	工艺的分类	246
8.6	多向模锻	246
8.6.1	多向模锻工作过程和工艺特点	247
8.6.2	成形工艺和设备	247
8.6.3	锻模设计	248
8.7	等温模锻	249
8.7.1	工艺特点	249
8.7.2	适用范围	250
8.7.3	工艺装备	250
8.7.4	设计与制造原则	251
8.8	粉末锻造成形	252
8.9	液态模锻	252
8.9.1	特点及应用范围	253
8.9.2	工艺流程及分类	253
8.9.3	主要工艺参数	254
8.9.4	对设备的要求	255
8.10	其他锻造新技术	255

8.10.1	无飞边模锻	255
8.10.2	闭塞锻造	256
8.10.3	超塑性锻造	256
8.10.4	旋压成形技术	258
<b>第9章</b>	<b>锻压设备</b>	<b>259</b>
9.1	概述	259
9.2	锻压设备的分类	259
9.3	几种主要锻压设备的特性	260
9.3.1	锻锤类锻压设备	260
9.3.2	热模锻压力机	271
9.3.3	平锻机	273
9.3.4	液压机	275
9.3.5	螺旋压力机	287
9.3.6	特种锻压设备	289
9.4	锻造常用辅助设备	299
9.4.1	加热设备	299
9.4.2	热处理设备	300
9.4.3	矫直设备	302
9.4.4	锻造辅助设备	302
<b>第10章</b>	<b>锻造生产中的安全与环保</b>	<b>305</b>
10.1	概述	305
10.2	锻造生产过程中的安全隐患	305
10.3	锻造生产安全技术准则及要求	306
10.3.1	锻造生产安全操作技术一般准则及要求	306
10.3.2	锻造生产安全技术简介	308
10.4	污染物主要来源、危害及治理	314
10.4.1	震动的主要来源、危害及治理	314
10.4.2	噪声的主要来源、危害及治理	314
10.4.3	工业废水、废气及粉尘的主要来源、 危害及治理	316
10.4.4	热污染的主要来源、危害及治理	318
<b>参考文献</b>		<b>320</b>



# 第1章 绪论

“锻造”是人类发明的最古老的压力加工生产技术之一。人类发现和使用金属的几千年历史都伴随锻造生产技术的发展。锻造生产是机械制造行业的基础工艺之一，是机械产品加工不可或缺的重要手段，在工业生产中占有举足轻重的地位。锻造生产能力及其工艺水平，对一个国家的工业、农业、国防和科学技术的影响很大。锻造生产技术作为一种传统的制造技术，在工业生产中发挥了重要作用，至今仍是一种不可替代的加工方法。

由于铝合金锻件具有密度小，比强度、比刚度高等一系列优点，已在航空航天、交通运输、船舶、兵器等各个工业部门大量使用，铝合金锻件已成为各个工业部门机械零件必不可少的材料。特别是对轻量化程度要求高的飞机、航天器、铁道高速列车、汽车、船舶、坦克等的重要受力部件和结构件，近几年来已大量使用铝及铝合金锻件和模锻件。

## 1.1 锻造生产的特点及铝合金锻件的应用领域

### 1.1.1 锻造生产的特点

锻造是金属在塑性状态下所完成的体积成形，在锻造设备上通过工具施力迫使塑性状态下的金属按设定的方式流动，使它在宏观上获得预定的几何形体及轮廓线面尺寸，在微观上改变晶粒的形状、大小和方向，形成新的纤维组织和结构，因而可消除铸造枝晶、疏松和缩孔等缺陷，改善金属组织。所以，锻造既是获得所需零件宏观外形，又是改善金属微观组织性能的加工技术。对于受力大、力学性能要求高的重要机械零件，多数采用锻造方法来制造。在生产效率、金属材料利用率、产品的力学性能等重要技术经济指标方面，锻造生产均比机械加工以及同样应用广泛的压铸、铸造、焊接工艺具有明显优势。

与其他金属加工工艺相比，锻造生产有如下特点：

①与其他压力加工方法相比，锻件的形状可以最大限度地接近零件形状，并且随着锻造生产技术的发展，锻件正向着近净成形、净成形方向发展。

②与压铸、铸造方法相比，锻造工艺可以细化晶粒，锻合空洞，压实疏松，打碎碳化物与非金属夹杂并使之沿变形方向分布，改善或消除成分偏析等，从而优化材料内部组织，使其结构致密，提高其综合力学性能。锻件比铸造件质量高，能承受大的冲击力作用，其塑性、韧性和强度等力学性能都是铸造件无法比拟的。采用锻件可以在保证零件设计强度的前提下，减轻机器自身质量，这对交通运输工具，如车辆、飞机和航天器等具有重要意义。

③与机械加工方法相比，锻造工艺是一种体积成形工艺，即在整体性保持不变的情况下依靠塑性变生物质转移来实现工件形状和尺寸变化，不产生切屑，可以节约大量金属材料，材料的利用率高。而且能够得到合理的流线分布，避免因机械加工而导致金属内部流线被切断，容易造成应力腐蚀，承载拉压交变应力的能力较差等缺陷，充分发挥了金属材料的