

变形铝合金 及其模锻成形 技术手册

吴生绪 潘琦俊 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



变形铝合金及其模锻成形 技 术 手 册

吴生绪 潘琦俊 编著



机械工业出版社

本书是作者从生产第一线长期的工作实践中结合理论和现场实际经验总结而成,也是对于变形铝合金的锻造成形(特别是汽车用铝合金锻件)具有实际指导意义的宝贵技术资料。本书无论是对军工还是民用变形铝合金锻造成形,都有重要的参考价值和直接的借鉴价值。

本书的特点是内容丰富、资料翔实,尤其是所用图片资料更使所述内容真切,是我国目前出版的最为实用的变形铝合金模锻成形典籍。

本书可供锻造、机械制造、冶金、化工、汽车、摩托车、高速列车、航空航天等行业的工程技术人员、生产管理人员和技术工人参阅;也可供大专院校锻造(塑性成形)专业、材料及机械专业师生参阅

图书在版编目(CIP)数据

变形铝合金及其模锻成形技术手册/吴生绪,潘琦俊
编著. —北京:机械工业出版社,2013.8
ISBN 978-7-111-43126-8

I. ①变… II. ①吴… ②潘… III. ①变形铝合金—
模锻—技术手册 IV. ①TG146.2-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第147108号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:沈红 责任编辑:沈红 崔滋恩 吕德齐
版式设计:霍永明 责任校对:李锦莉 程俊巧
责任印制:张楠
北京京丰印刷厂印刷
2014年1月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·37.5印张·1237千字
0 001—2 000册
标准书号:ISBN 978-7-111-43126-8
定价:139.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

编辑热线:010-88379778

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010) 88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

序 1

汽车工业、造船工业及风电和核电的发展促进了锻造业的发展。因此，我国锻造业呈现出了一片欣欣向荣的喜人景象。

变形铝合金锻造虽然目前还是一个应用面较窄的分支，但却有着广阔的发展前景。

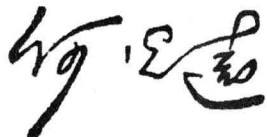
铝合金锻造通常广泛地应用在航空航天领域。然而，汽车轻量化的要求，催生了民用铝合金锻造工艺技术的发展。随着铝产量的不断提高，随着各种车辆轻量化时代的到来和民用航空业的发展要求，铝合金锻造的应用将越来越广泛。

《变形铝合金及其模锻成形技术手册》这部书，从实践中总结出了实用性很强的铝合金锻造生产经验，丰富了我国锻造行业工艺和技术的内容，填补了锻造类丛书中的一个空白。该书的作者为锻造行业做了一件非常有益的事。同时，这部书也标志着我国锻造行业已进入了一个蓬勃发展的新时期。

愿以此书的出版发行为契机，期盼我国铝合金锻造工艺技术能够飞速发展，服务于国民经济的发展和需要，服务于中华民族制造业的发展和需要。

中国锻压协会名誉理事长

何光远

A stylized, handwritten signature in black ink, likely reading '何光远' (He Guangyuan), positioned below the printed name.

序 2

铝合金锻造是有色金属锻造的重要分支，是我国锻造业发展到今天重要的开发领域之一。

《变形铝合金及其模锻成形技术手册》一书，是基于变形铝合金的物理、化学性能和有色金属锻造的技术基础，对变形铝合金模锻成形进行全面论述的工具书，内容涉及相关基础理论阐述、生产实践经验总结和规程规范标准介绍等。它将理论、技术、工艺、生产和管理等内容有机地融为一体，同时还提出了一些有待继续研究、开发和实践的导向性内容。因此，这本书作为国内较系统地总结和研究变形铝合金模锻成形的著作，应对我国铝合金锻造的技术研究、工艺制订、生产管理和企业规划具有重要的参考价值和指导作用。

承蒙该书作者之约，我思量许久，才写下以上文字，主要因为自己虽然服务锻造行业多年，但对锻造真谛还是领悟甚少。劳动密集型的锻造业在信息时代和市场竞争的今天，亟需典籍要义的支撑。有鉴于此，在该书出版发行之际，谨致贺忱和谢意。

中国锻压协会
常务副理事长兼秘书长
张 金



前 言

变形铝合金模锻成形工艺技术过去基本属于航空航天领域的专业范畴。但是,随着铝产量的不断提高和汽车轻量化及能源政策的变化,铝合金锻件的应用范围越来越广,并已经扩展到了民用的许多工业部门和领域。如高速列车、汽车、摩托车、高速舰艇、航空航天器、各类发动机制造以及自行车等工业部门都在不断地扩大铝合金锻件的使用范围。

变形铝合金的锻造成形,由于材料本身的内外摩擦因数大、变形抗力大、锻造成形温度范围狭窄及其强化为固溶淬火、时效强化等特点而具有典型的工程特色,在这一技术领域我国的现状是基础工艺技术还不普及,而且还比较落后。

变形铝合金模锻成形也是我国锻造行业这支奇葩上的一个花蕾。这个花蕾随着我国锻造业的快速发展,一定会在神州大地之上绽开怒放,装点我国现代化建设的宏伟蓝图。届时,我国锻造业不仅是世界锻造大国,也将成为世界的锻造强国。

本书立足于生产实践,从变形铝合金材料的概述、模锻成形的工艺技术基础、常用锻造及加热设备、成形模具及模框设计、铝合金锻件的热处理及质量控制和现代模拟技术在铝合金模锻成形工程中的应用都有较为详尽的论述与相关实例。

全书由吴生绪和潘琦俊编著。从专业技术角度来讲,我们毕竟还受到工作范围和制造条件的限制,所以书中内容所涉及到的技术层面还不够宽广,疏文脱节,挂一漏万在所难免,也可能会有瑕疵和疏节离章之处。因此,在匆匆奉达之时,还望业内各位专家、老师和朋友不吝赐教,斧正为盼,以期进一步完善理论,完善工艺,促进我国变形铝合金模锻技术的发展。

本书在编写过程中还受到了中国锻压协会名誉理事长何光远老部长(原机械工业部部长)和中国锻压协会常务副理事长兼秘书长张金同志的关心和帮助,同时也得到了王乐安等业内许多专家的帮助和指导,在此一并表示衷心的感谢。

吴生绪 潘琦俊

编写说明

1. 关于力学性能的符号

常用力学性能符号（标准 GB/T 228—1987）为 σ_b 、 $\sigma_{p0.2}$ 、 δ_5 。

σ_b 为抗拉强度；

$\sigma_{p0.2}$ 为规定非比例延伸强度；

δ_5 为断后伸长率。

在新的标准 GB/T 228.1—2010 中，抗拉强度符号为 R_m 、规定非比例延伸强度为 $R_{p0.2}$ 、断后伸长率为 A 。

为了方便读者，特此说明：在本书中采用 σ_b 、 $\sigma_{p0.2}$ 和 δ_5 的符号。新旧标准名称对照如下。

新标准（GB/T 228.1—2010）		旧标准（GB/T 228—1987）	
性能名称	符号	性能名称	符号
抗拉强度	R_m	抗拉点	σ_b
屈服强度	—	屈服点	σ_s
上屈服强度	R_{eH}	上屈服强度	σ_{su}
下屈服强度	R_{eL}	下屈服点	σ_{sl}
规定塑性延伸强度	R_p （如 $R_{p0.2}$ ）	规定非比例伸长应力	σ_p （如 $\sigma_{p0.2}$ ）
断后伸长率	A	断后伸长率	δ_5
	$A_{11.3}$		δ_{10}
	A_{xmm}		δ_{xmm}

2. 关于“布氏硬度”的符号

在新的标准（GB/T 231.1—2002）中，布氏硬度的符号为 HBW，此前的标准（GB/T 231—1984）符号为 HBS 和 HBW（硬度值大于 460 时用硬度合金球施加试验力用 HBW 表示，小于 460 时用合金钢球施加试验力用 HBS 表示）。

为执行贯彻标准、过渡方便和适合于不同层面读者的习惯，又因资料来源不同，本书相关章节中出现有 HBS 和 HBW 两个符号。

3. 关于“热模锻压力机”

在锻造行业中，有一类压力机常被称“热模锻压力机”，但在国标 GB/T 8541—1997 中并无“热模锻压力机”这一术语。这一类型的压力机属于机械压力机之列。鉴于一种习惯，本书中也使用了“热模锻压力机”一词。

4. “掏料”一词

在锻造工艺中，为了后续变形顺利，将影响变形的多余金属去除掉。这一操作，在部分企业中习惯地称为掏料。将预成形半成品冲孔部位的多余金属冲掉的模具称之为掏料模。按专业来讲，掏料模就是冲连皮模。

5. 矫正和校正

按照汉字含义，将弯曲的物件弄直称之为矫正（也称矫形、纠正偏差）；比对原稿进行文审称之为校正（即校订或订正、校阅、校勘、校准、校对）。据此，本书对锻件形状的修正按

矫正来定义。

6. 模膛、型槽和型腔

本行业的习惯是将模具的型腔称之为模膛，但有的地方也称为型槽（如辊锻模具）或型腔（出于引用部分标准的原因）。

7. 例子中的数据

出于对企业的负责，本书所用一些实例中的数据是修正过的，仅作参考，不可直接应用于工程之中。

8. 锻料、坯料

锻料是指经计算从原料上锯割下来的待锻金属材料，坯料是指模锻前已制好的半成品，也叫坯件。

9. 预锻件

预锻件是指经预锻模具而成形的半成品。

10. 炉料、炉气

炉料是热处理范畴内的称呼，是指装入加热炉内的金属材料。炉气是指加热炉内的气氛（空气），通常用作描述加热炉炉内温度（即炉气温度）。

在加热过程中，炉料温度和炉气温度是有差异的，炉料温度低于炉气温度。随着加热过程的进行，炉料不断地从炉气获得热量，温度逐步提高。当达到加热工艺所规定的保温时间后，炉料心部的温度与炉气温度趋于一致。此时，加热炉仪表显示的炉气温度才是炉料的温度。

目 录

序 1	
序 2	
前言	
编写说明	
第 1 章 铝和铝合金分类	1
1.1 概述	1
1.1.1 金属铝	1
1.1.2 铝的资源	4
1.1.3 铝工业的发展史	4
1.1.4 铝的消费结构	5
1.2 铝合金的分类	5
第 2 章 铝合金的相图	10
2.1 相图的特征	10
2.1.1 二元相图的特征	11
2.1.2 三元相图的特征	11
2.1.3 非平衡冷却的影响	12
2.1.4 相图中的相区分析	13
2.1.5 杠杆定律和重心法则	13
2.2 铝合金中的相	14
2.3 部分变形铝合金的相的组成	15
2.4 部分铝合金的相图	20
2.4.1 实用温标	20
2.4.2 部分铝合金的二元相图	20
2.4.3 部分铝合金的三元相图	46
第 3 章 铝及铝合金产品牌号的表示	
方法	58
3.1 我国铝合金产品牌号的表示方法	58
3.1.1 牌号的标准术语和表示方法	
总则	58
3.1.2 冶炼产品和铸造产品牌号的表示方法	58
3.1.3 加工产品牌号的表示方法	59
3.2 铝及铝合金国际产品牌号的表示方法	61
第 4 章 铝及铝合金状态代号的表示	
方法	62
4.1 我国铝及铝合金状态代号的表示方法	62
4.1.1 基础状态代号	62
4.1.2 细分状态代号	62
4.1.3 状态代号的变化与新旧状态代号的对应关系	65
4.2 铝及铝合金状态代号的国际标准 和国外部分标准	66
第 5 章 铝及铝合金的牌号与化学成分	70
5.1 我国变形铝合金的新旧牌号对照	70
5.2 我国标准工业纯铝的牌号与化学成分	71
5.3 我国变形铝合金的牌号与化学成分	71
5.4 美国 AA 标准的铝及铝合金	87
第 6 章 变形铝合金的特性	109
6.1 变形铝合金的物理性能	109
6.2 变形铝合金的化学性能	109
6.2.1 大气环境的影响	109
6.2.2 水的影响	115
6.2.3 土壤的影响	115
6.2.4 食品、化工产品的影响	115
6.2.5 温度、压力的影响	116
6.3 变形铝合金的冶金特征	116
6.4 变形铝合金的力学性能	119
6.5 变形铝合金的热处理性能	121
6.5.1 回复	121
6.5.2 再结晶	122
6.5.3 固溶与脱溶	123
6.5.4 回归现象	124
6.6 变形铝合金的加工特性	124
第 7 章 变形铝合金各系合金的基本性能	126
7.1 1×××系铝合金	126
7.1.1 微量元素在 1×××系铝合金中的作用	126
7.1.2 1×××系铝合金的常用性能	126
7.1.3 1×××系铝合金的品种、状态和用途	131
7.2 2×××系铝合金	132
7.2.1 合金元素和杂质元素在 2×××系铝合金中的作用	132

7.2.2	2×××系铝合金的常用性能	135	8.1.1	铝及铝合金模锻件尺寸的分类	177
7.2.3	2×××系铝合金的主要牌号及其用途	139	8.1.2	铝及铝合金模锻件尺寸偏差的规定和使用	177
7.3	3×××系铝合金	140	8.1.3	铝及铝合金模锻件的单面加工余量	182
7.3.1	合金元素和杂质元素在3×××系铝合金中的作用	141	8.2	一般工业用铝及铝合金锻件的技术标准	182
7.3.2	3×××系铝合金的部分性能	141	8.3	铝合金的塑性变形	187
7.3.3	3×××系铝合金的工艺性能	143	8.3.1	基础理论	188
7.3.4	3×××系铝合金的品种、状态和用途	145	8.3.2	流线设计与锻件质量	193
7.4	4×××系铝合金	145	8.3.3	铝合金的锻造成形	197
7.4.1	相关元素在4×××系铝合金中的作用	145	8.3.4	铝合金的锻造变形特性	200
7.4.2	4×××系铝合金的部分性能	146	第9章	锻造及加热设备	210
7.4.3	4×××系铝合金的工艺性能	146	9.1	锯切设备	210
7.4.4	4×××系铝合金的品种、状态和用途	147	9.2	磨光机和清洗机	210
7.5	5×××系铝合金	147	9.3	加热设备	211
7.5.1	合金元素和杂质元素在5×××系铝合金中的作用	147	9.4	锻造成形设备	212
7.5.2	部分5×××系铝合金的力学性能	148	9.4.1	螺旋压力机	212
7.5.3	部分5×××系铝合金的工艺性能	149	9.4.2	摩擦螺旋压力机	215
7.5.4	5×××系铝合金的用途	150	9.4.3	热模锻压力机	222
7.6	6×××系铝合金	153	9.4.4	液压机	226
7.6.1	合金元素、添加元素和杂质元素在6×××系合金中的作用	153	9.4.5	制坯设备	237
7.6.2	6×××系铝合金的部分性能	154	9.5	热处理设备	239
7.6.3	部分6×××系铝合金的力学性能	155	第10章	锻前准备与加热	241
7.6.4	6×××系铝合金的工艺性能	158	10.1	原材料的质量要求与检验	241
7.6.5	6×××系铝合金的用途	158	10.2	锻料的准备	244
7.7	7×××系铝合金	161	10.3	加热	245
7.7.1	合金元素和杂质元素在7×××系铝合金中的作用	161	10.4	加热炉的校验	251
7.7.2	部分7×××系铝合金的性能	163	10.4.1	热处理炉的保温精度	251
7.7.3	7×××系铝合金的工艺性能	168	10.4.2	测定周期	251
7.7.4	7×××系铝合金的用途	168	10.4.3	测试装置	251
7.8	8×××系铝合金	170	10.4.4	检测方法	253
7.9	新型变形铝合金	172	第11章	锻造的基本知识与制坯	258
7.10	变型铝合金的选用	174	11.1	锻造的目的	258
第8章	铝合金锻造的工艺技术基础	177	11.2	锻造加工的分类	258
8.1	铝及铝合金模锻件的尺寸偏差及加工余量	177	11.3	锻造的基本知识	259
			11.3.1	最小阻力定律	259
			11.3.2	锻造工艺的基本工序	260
			11.3.3	自由锻造的基本工序	263
			11.3.4	自由锻造的工艺过程	265
			11.4	制坯	267
			11.4.1	挤压仿形型材	268
			11.4.2	铸造制坯	268
			11.4.3	自由锻造制坯	269
			11.4.4	辊锻制坯	270

11.4.5 楔横轧制坯	305	15.1.3 力能特性曲线的应用	418
11.4.6 多工位模具制坯	313	15.2 模架设计	420
11.5 部分制坯实例	313	15.2.1 模架的种类	420
第12章 铝合金锻造的润滑和锻造		15.2.2 模架结构设计	422
模具用钢	316	15.2.3 模框式模架设计应用实例	438
12.1 润滑	316	15.3 模框的设计	447
12.2 锻造模具的常用材料	317	15.3.1 模框的设计要求	448
12.2.1 热作模具用钢的性能要求	317	15.3.2 调节式控锻模框	448
12.2.2 常用热作模具钢的分类、牌号 及含义	318	15.4 模块的尺寸系列	452
12.2.3 热作模具用钢的热处理	319	15.4.1 整体式锻模模块	452
12.3 模块	321	15.4.2 组合式锻模模块	453
12.3.1 模块失效的初步分析	321	15.5 常用螺旋压力机的技术参数	455
12.3.2 模块坯料的技术要求	327	15.6 模膛及其相关结构要素的设计	456
12.3.3 模块的使用与保养	327	15.6.1 设计原则与技术要求	456
12.3.4 模块的强韧化处理	328	15.6.2 开式锻模的设计	457
第13章 汽车用铝合金控制臂的分 类及其他锻件	330	15.6.3 闭式锻模的设计	461
13.1 汽车用控制臂的分类	330	15.6.4 精密锻模的设计	462
13.2 控制臂在汽车上的部位和作用	334	15.6.5 锻模主要尺寸公差及其他相关 结构要素的设计	463
第14章 铝合金锻造模具的设计		15.7 部分摩擦压力机用锻模实例	465
通则	342	15.7.1 铝合金支架锻造模具	465
14.1 模锻中影响金属充填模膛的因素	343	15.7.2 扣件锻造模具	465
14.2 模锻中金属材料的折叠	347	15.7.3 车用控制臂锻造模具	469
14.3 锻造模具模膛设计概述	349	15.7.4 多曲形锻件成形模具	471
14.4 模膛及相关结构要素	352	15.7.5 叉形铝合金锻件成形模具	474
14.5 操作性结构要素	362	15.7.6 下控制臂锻件成形模具	478
14.6 锻模模框的设计	369	第16章 液压机用锻模	484
14.7 坯料弯曲模具的设计	371	16.1 液压机上模锻基础	485
14.8 预锻模膛的设计	372	16.1.1 液压机上模锻件分类	485
14.9 终锻模具的设计	374	16.1.2 模锻工步的选择	485
14.10 掏料模具的设计	377	16.1.3 锻件图的制订	486
14.11 切边模具与冲孔模具的设计	379	16.1.4 设备吨位的确定	498
14.11.1 切边模具的结构形式	379	16.2 模膛设计	498
14.11.2 简单切边模具的结构设计	381	16.2.1 终锻模膛	498
14.11.3 冲孔模具的结构形式	399	16.2.2 预锻模膛	500
14.11.4 连续模具的设计	404	16.2.3 制坯模膛	502
14.11.5 复合模具的设计	404	16.3 模具结构的设计	502
14.12 等温锻造与超塑性锻造模具的设计	410	16.3.1 导柱和锁扣	502
14.13 矫正模具的设计	411	16.3.2 钳口	504
第15章 螺旋压力机用锻模	414	16.3.3 模膛的布局	505
15.1 螺旋压力机的力能特性	414	16.3.4 模膛壁厚的确定	506
15.1.1 惯性螺旋压力机的力能关系	414	16.3.5 模块尺寸的确定	506
15.1.2 高能螺旋压力机的力能关系	417	16.3.6 顶出器	506
		16.3.7 模具的固定	507
		16.3.8 模块标准	509

16.4 油压机上的模锻	510	18.1.1 原材料产生的缺陷	552
16.4.1 模块的安装	510	18.1.2 锻造过程中产生的缺陷	552
16.4.2 16000kN 油压机所用模框的 设计	511	18.1.3 热处理过程中产生的缺陷	552
16.5 部分锻模设计	513	18.2 锻件的质量控制	554
16.5.1 三角支架锻模	513	18.2.1 源头质量控制	554
16.5.2 叶轮锻模	514	18.2.2 加热设备的控制	554
16.5.3 汽车控制臂锻模	516	18.2.3 锻件质量控制要点	555
第 17 章 铝合金锻件的热处理及 质量控制	520	第 19 章 锻造数字模拟技术	556
17.1 固溶淬火	520	19.1 锻件开发中的设计	556
17.1.1 加热	520	19.2 部分锻件开发中的模拟应用实例	556
17.1.2 保温	521	19.2.1 弓形铝合金控制臂锻造模拟 成形	556
17.1.3 淬火	522	19.2.2 铝合金轴座锻造成形模拟	559
17.2 时效强化	524	19.2.3 铝合金转向节锻造模拟成形	562
17.3 部分锻铝合金的力学性能应用与 热处理制度	527	19.2.4 铝合金控制臂辊锻制坯及锻造 模拟成形	564
17.3.1 2A14 (LD10)	527	附 录	567
17.3.2 2A50 (LD5)	528	附录 A 变形铝及铝合金热处理 (摘自 YS/T 591—2006)	567
17.3.3 2B50 (LD6)	530	附录 B 轿车用高强度锻铝合金 6A10 化学 成分与力学性能 (摘自 QC/T 756—2006)	580
17.3.4 2A70 (LD7)	531	附录 C 部分铝合金等温锻造工艺 参数	581
17.3.5 2014	533	附录 D 部分铝合金超塑性锻造工艺 参数	581
17.3.6 2214	535	附录 E 锻造生产的安全与环保 (摘自 GB 13318—2003)	581
17.3.7 2618A	536	附录 F 锻造加热炉能耗分等	586
17.3.8 4A11 (LD11)、4032	538	附录 G 噪声标准 (摘自 GB 12348)	586
17.3.9 6A02 (LD2)	539	参考文献	587
17.3.10 6061 (LD30)	542		
17.3.11 6063 (LD31)、6063A	545		
17.3.12 7050	547		
第 18 章 铝合金锻件的质量控制	552		
18.1 锻件常见的主要缺陷	552		

第1章 铝和铝合金分类

1.1 概述

1.1.1 金属铝

1. 铝的性质

铝及其合金已经广泛地应用在工业、农业、交通运输业、航天航空、机器制造、文体用具、医疗器械以及人们生活的各个方面和领域。工业上广泛使用的纯铝具有以下特点：

1) 熔点低。金属的熔点与纯度有关，99.996%的铝熔点为660.37℃，99.97%的铝熔点为659.8℃。金属铝熔炼、铸造和加工都比较容易。

2) 密度小。金属的密度与温度和纯度有关。室温下纯度为99.996%铝，其密度为2698.9kg/m³；而纯度为99.75%的铝，其密度为2703kg/m³，约为钢铁的密度为35%，可制造轻结构，有“会飞的金属”之称。

3) 可强化。纯铝强度不高，冷加工硬化能使其强度提高一倍以上。与此同时，塑性变低。但是，对于纯铝可通过添加各种元素合金化（变成铝合金），使其强度提高，而塑性下降不太大。有的铝合金还可通过热处理进一步强化，其比强度与与优质合金钢相媲美。

4) 塑性好，易加工。铝可轧成薄板和箔，拉成管材和细丝，挤成各种型材，锻造成各种零件，可进行高速车削、铣削、镗削、刨削等机械加工，无低温脆性。

5) 耐腐蚀。铝表面上极易生成致密而牢固的氧化铝（Al₂O₃）薄膜，而且此膜被破坏后又会立即生成，继续保护铝的基体不被腐蚀。因此，铝可在大气、普通水、多数酸和有机物中直接使用。

6) 导热、导电性好。铝的导热、导电性仅次于金、银和铜。室温下电工铝的等体积电导率可达到62% IACS，若按单位质量导电能力计算，其导电能力为铜的两倍。

另外，铝还具有无磁性、反射性强、有吸声性、耐核辐射和美观等特性。

铝是元素周期表中第三周期ⅢA族元素，原子序数为13，相对原子质量26.98154，外层电子构型为3s²3p¹，原子半径为0.143nm，离子半径为

0.086nm。

金属铝为银白色，铝的基本物理性质如下：

元素的化合价为3；相对原子质量为26.98；原子半径为0.143nm；晶格类型为面心立方晶格，无同素异晶转变；密度（99.97%的Al），固态（20℃）时为2.6996（g/cm³），液态（700℃）时为2.371（g/cm³），液态（1000℃）时为2.289（g/cm³）；熔点为660.24℃（含99.996%的Al）；沸点为2467℃；熔化潜热为388.1J/g；比热容为0.95kJ/（g·K）（常温、固态）；线胀系数为23.6×10⁻⁶（0~100℃）K⁻¹；导热率为217.7W/（m·K）（0~100℃）线收缩率为1.7%~1.8%；液态→固态的体收缩率为6.6%；弹性模量为67.6~69.6GPa；抗拉强度为88.2~117.6MPa；屈服强度为19.6~88.2MPa；断后伸长率为11%~15%；冲击韧度值为9.8~19.6J/cm²；硬度为235.2~313.6HBW；电导率（99.6%的Al 20℃时）为62% IACS；电阻率（99.99%的Al 20℃时）为26.7nΩ·m；电阻温度系数为0.1（nΩ·m/K）。

铝的质量轻和耐腐蚀是其性能的两大突出特点。纯铝的密度约为2.7g/cm³，仅为钢铁、铜密度的1/3左右。无论是固体铝或熔融铝，其密度均随着纯度的提高而降低；同等纯度的熔融铝的密度，则随温度的提高而降低。

铝对自然界的水（含海水）、大气中的各种元素，以及油料与各种化学物品，都有良好的耐蚀性。这是由于铝的化学性质极其活泼，其最特殊的性能是具有同氧（特别是空气中的氧）强烈结合的倾向，铝在空气中被其表面生成的一层厚度约为2×10⁻⁴mm的致密氧化膜所覆盖。它阻止了铝的继续氧化，从而使铝具有良好的耐蚀性。

铝氧化的程度，取决于温度、铝的粉碎程度及存在于其中的其他金属杂质。当温度高于铝的熔点时，其氧化速度最快。而粉碎得很细的铝粉，在空气中加热即可剧烈燃烧。铝中若存在镁、钙、钠、铜、硅时，可增加氧化程度。铝中有杂质存在的区域，氧化膜与铝的连接力大为减弱。

铝在工业用酸中的溶解度和气体在铝中的溶解度，因介质的不同而不同。工业铝易溶于盐酸，随着纯度的提高其溶解度则急剧下降。硫酸对铝溶解的作

用缓慢,各种浓度的冷硝酸均不能溶解铝。若将硝酸加热,则可加速溶解。铝在乙酸等有机酸中的基本呈稳定状态。气体在铝中的溶解度随温度的升高而增加。氢、氮、一氧化碳等气体均能溶解于铝液中,其中部分气体溶解后与铝形成化合物。

铝在抛光以后,对可见光、辐射热和电磁波都有良好的反射率,可用来制作高质量的反射镜、热源反射器等,也常用作房顶,可反射大部分太阳热能。

2. 铝的用途

由于铝有许多优异的性能,因此其用途十分广泛。除了直接应用纯铝之外,通常都是将纯铝配制成各种合金的使用。铝的用途用以下几个方面。

(1) 建筑铝材 当今建筑业是铝的第二大消费行业,许多国家建筑铝材用量已超过了20%。日本、西班牙、意大利等国,由于木材匮乏,铝在建筑业中应用所占的比例更大。

我国在20世纪80年代开始生产铝合金建筑挤压型材并应用于建筑中。2003年,我国建筑业用铝达到2200kt,其中轧制材为195kt、挤压材为1386kt、棒线材为71kt、铸件为288kt、其他铝材为261kt。

铝在建筑业中,主要用于公共设施、工业设施、农业设施和建筑物的构架、屋面、墙面的围护结构、骨架、门窗、吊顶、饰面、地板、遮阳构件以及装饰等方面;储存谷类的粮仓,储存酸、碱和各种液态、气态燃料的储存罐,蓄水池的内壁及输送管材,公路、人行通道和铁路桥梁的跨式结构、护栏及通行大型船舶的江河上的开合式桥梁;都市中的立交桥及闹市区横跨街道的天桥;建筑施工与修理用的脚手架、踏板、升降梯及水泥预制件的模板等。

铝及铝合金在建筑业上的应用已有100余年的历史了。早在1896年,加拿大蒙特利尔市的人寿保险大厦便装上了铝制飞檐。1987年和1903年,罗马的两座文化设施分别采用了铝制屋顶。1933年,在美国匹兹堡,第一次将铝合金应用在市内桥梁的通道上。1951年,英国伦敦建成的展览馆,其馆盖是直径为109m的圆形铝屋顶。

(2) 石油化工设备方面 铝材制造的石油化工设备有卧式、立式、方形、矩形和球形等容器、塔器、热交换器及各种管道等。

铝对一些化工产品有很强的耐腐蚀性。铝及其合金在-196~0℃的低温下,其韧性不下降,而强度与塑性还会随着温度的下降有所提高,因此适合于制作液化气体容器、易爆物质容器;铝对辐射热的反射率高达95%以上,更适合于制作易挥发性物质的容器。

由于铝制设备的耐蚀性能好,不易污染产品,所以可以制造某些对铁离子污染敏感的高纯度产品设备。

铝的耐磨性能不高,因此不宜制造流体,特别是含有固态粒子的流体高速运行的设备。

要避免在液体介质中,同时使用铝和钢(或其他金属),以免引起电化学腐蚀。铝零件(或构件)在与其他金属零件或构件接触时,应在其表面涂以氯乙烯或酚醛清漆,以防接触类腐蚀。

铝制设备与管道,其保温材料应选择中性的。

在20世纪60年代,美国还将铝合金(2014)管应用在石油与天然气的钻探工程中。铝管代替钢管可以大幅度提高钻机的启钻提升能力达50%~100%,节约内燃机燃料消耗15%~20%,且每台设备运送的总长度可增加60%。铝钻杆的应用,大幅度提高了钻井深度,这对于钻探深井和超深井很有意义。不仅如此,铝钻杆在工作过程中不会因碰撞引起火花,从而保障了油气开发的安全。

(3) 交通运输方面 铝及铝合金在交通运输业上的应用也是有百余年的历史了。1891年,瑞士人建造了一艘可乘坐8个人的铝艇;1897年,美国科拉克公司使用铝合金制作了汽车的油箱;1903年,莱特兄弟发明的第一架飞机,其上就使用了13.6kg的铝材。从此,航空事业的飞速发展,便打开了人类交通的新纪元。

2003年,全球铝(原铝与再生铝之和)的消费约为40000kt。其中,原铝消费约为28000kt。交通运输业也是用铝最多的行业之一,约占铝消费量的31.5%。

不论是轨道车辆,还是飞机、汽车,铝及铝合金的应用对于提高其速度、降低能耗都是非常有意义的。第一辆铁路车辆于1829年在英国问世,当时因为铝的产量极少,其价格比金子还贵,铁路车辆只能用钢材制造。然而,随着铝业技术的发展和技术的提高,铝材在交通运输工具中的应用比例也越来越大。不仅制作一些车内零件,甚至于连车体、底板、控制构件等都使用铝合金制造。我国制成了双浴盆式铝合金运煤敞车,还将铝合金大量地应用在“新时速”列车的制造中和磁悬浮高速列车上。铝合金应用技术最为成熟的当数德国和日本国。

作为现代社会,人类赖以生存和发展的四大交通运输工具之一的汽车,对铝合金的应用前景更是广阔无比。19世纪末,铝合金在汽车制造业中,首先用来制作汽车上的油箱、轮毂、发动机传动装置及壳体等零部件。

目前,美国轿车制造每使用0.454kg的铝合金零

部件,汽车自身的质量可下降1.021kg。美国汽车工业的用铝量,已占铝全部消耗量的11%左右。1984年,小汽车用铝量平均为62.14kg;1990年,增加为90.72kg;2003年,则增加到了115kg。现在,已有全铝桥车车身构架。

此外,防冲挡铝构件、全铝散热器都在普及与推广。如将铝材应用在船舶上,其发展前景十分看好。船舶自身的轻量不仅减轻了船体的质量,增加了航行速度、续航能力和运载能力,还可使船的结构合理化,改善船体稳定性与排水量及船宽的关系。由于铝的耐蚀性好,与钢相比,铝制的船体不用涂漆,因而使保养和维修费用大为减少。

(4) 航空、航天方面 由于铝的密度小,所以人们将其应用于飞机制造。铝也因此获得了“会飞的金属”的殊荣。1903年,莱特兄弟发明的飞机只用了13.6kg铝材。从那时之后的30多年里,飞机主要还是用木材、钢管和帆布来制作。以后随着飞机设计的进步和铝工业的快速发展,尤其是维尔姆在1906年发现Al-Cu-Mg合金的时效强化现象之后,铝合金以其密度小、强度大才逐步成为一种主要的航空用材;当时,铝合金的强度约为400MPa。到了1930年,美国铝业公司研究成了24S高强度铝合金。1936年,日本人五十岚制成了Al-Zn-Mg-Cu系超硬铝ESD合金。1942年,美国制成同等成分的75S合金。1945年,苏联制成了B95合金。超硬铝的强度达到了500MPa。

铝材在飞机上的应用如图1-1-1所示。铝材在航天和火箭方面主要用于制造燃料箱、助燃剂箱。除此之外,火箭和航天器的许多零部件都是用铝来制造的,如整流罩、卫星安放支架、旋转台支架、低温氢气管、液氧槽(管)、液氢槽(管)、常温氧气管、箭体外壳、航天器内各构件、操作控制系统零部件等。

(5) 兵器工业方面 铝材在兵器工业领域应用得最多的是装甲车、坦克及高速鱼雷艇。特别是防弹性能好的铝合金,其应用前景更为广阔。

此外,铝材在各种战舰、战机、运输机、舰艇的上部建筑、内装设施及军用浮桥和临时性飞机跑道等各个方面也都获得了广泛的应用。

(6) 电工铝材 铝因为具有良好的导电性能(在纯金属中仅次于银、金及铜),在电工器材方面广泛地用作导体。

铝主要以线材、管材、箔材等形式而应用于电力、电信工业之中,也有用板材制造各种电器外壳与罩体等。铝合金多以各种形状结构的型材用于大功率

电器元件的散热器。铝材用于导体是从1876年开始的。当时,英国在博尔顿架设了世界上第一条铝制输电导线。1910年,美国铝业公司发明了钢芯铝绞线,并架设于尼亚加拉大瀑布的上空。从此,架空高压输电线路逐步为钢芯铝绞线所代替。

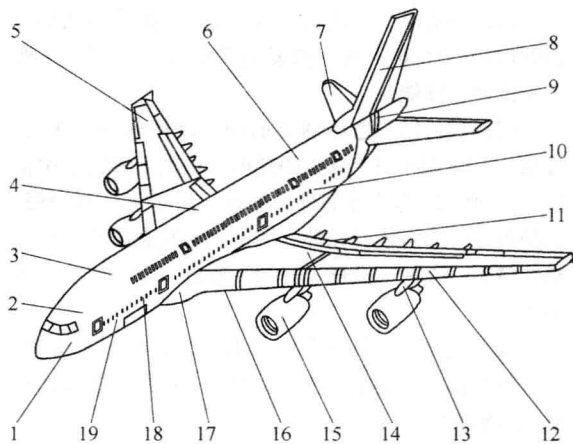


图 1-1-1 铝材在飞机上的应用示意图

- 1—驾驶舱骨架 2—桁条 3—机身蒙皮 4—机身连接件
- 5—翼肋 6—体内桁架 7—升降舵 8—垂直翼构件
- 9—机尾骨架 10—地板梁构件 11—减速风板
- 12—襟翼紧固件 13—发动机悬挂架 14—翼内油骨架
- 15—发动机外壳 16—起落架构件
- 17—机身机翼连接件 18—大梁
- 19—座椅构件

现在,全世界生产的铝大约有14%用作电工材料。其中,电力导体几乎全为铝材。

此外,在通信设施中,各种天线和波导管均用铝型材制成,还有铝质电子零件应用在家用电器、音响设备、录像录音设备、照明与照像器材、光学仪器、通信器材、自动控制仪表以及电饭煲、冷藏车、冷库(柜)、冰箱、空调、洗衣机等各个方面。

(7) 包装铝材 第二次世界大战之后,铝材从军用逐步全面地转向民用。其中,包装用铝材也是一个主要领域。目前,包装行业用铝量约为全部铝消费量的25%左右。铝材主要以薄板与箔材形式用于包装行业。早在1902年,铝箔就开始用于香烟的包装。1931年开始用铝板材生产牛奶瓶盖。到20世纪60年代之后,铝材在包装行业中的应用剧增,主要是应用于饮料与食品的包装。

现在,铝在容器包装业中,其主要应用形式有刚

性全铝的罐、盒、瓶、壶、桶、锅等；半刚性容器有盒、杯、罐、浅盘、碟等有柔性的包装；家用箔、食品包装箔；各类瓶件的密封片、盖；复合材料容器；软管（牙膏及药类包装）及其他制品的包装等。

(8) 文体用品 由于体育器材向着质量轻、强度高及耐用性强的方向发展，因此铝材受到了重视。在其设计制造时，将比强度（强度/密度）与比刚度（弹性模量/密度）列为研发的主要课题，同时还要考虑抗冲击性能。

用铝材可以制造棒球类的硬、软棒球棒、球盒、投球位；网球和羽毛球类的拍框、拍把手铆钉、拍接头等；滑雪板的受力部件、板边、后护板、斜护板、底护板等；滑雪杖及扣环；弓箭的弓身和箭杆；田径类的撑竿、支柱、横杆、栏架、标枪、接力棒及起跑器等。

除上述之外，铝材在农用机械、食品加工机械、工具与容器、温室粮仓，以及在核工业的一些设施建设上也都有应用。

1.1.2 铝的资源

在地壳中铝的资源十分丰富，其丰度（矿藏储量约占地壳构成物质的比例）为 8.13g/kg 左右，仅次于氧和硅，超过了铁，是地球上储量最多金属元素。因为铝的化学性质活泼，与氧亲和力大，所以在自然矿物中不存在金属纯铝。自然界中铝矿物和含铝矿物有 250 多种，如刚玉（ Al_2O_3 ）、一水软铝石（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）、一水硬铝石（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）、三水铝石（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ）、高岭石（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）、红柱石（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ）等。

世界上 90% 以上的氧化铝是用铝土矿生产出来的。全世界已探明铝土矿储量有 550 ~ 750 亿 t。其分布情况：加勒比地区和中美洲为 20 ~ 30 亿 t，南美洲为 190 ~ 250 亿 t，欧洲为 30 ~ 40 亿 t，非洲为 150 ~ 200 亿 t，亚洲为 80 ~ 130 亿 t，澳洲为 70 ~ 100 亿 t。我国的铝土矿主要分布于河南、山西、贵州、山东和广西等地，多数为高铁高硅的一水硬铝型，主要杂质是高岭石中的 SiO_2 和少量的 Fe_2O_3 、 TiO_2 。此外，浙江、安徽两省有丰富的钾明矾石资源，云南等地有较为丰富的霞石资源。

1.1.3 铝工业的发展史

铝，英文名称为 Aluminium。该单词词是由古罗马语 Alumen（明矾）一词衍生而来的。

1746 年，德国科学家波特（J. H. Pott）用明矾制

得了氧化铝。61 年之后的 1807 年，英国人戴维（H. Davy）试图电解熔融氧化铝得到金属铝，但未成功。然而，他继续对铝进行研究。1809 年戴维给预想的金属取名为 Alumium，后改为 Aluminium。

1825 年，丹麦科学家奥斯忒（H. C. Oersted）用钾汞齐还原出了无水氧化铝，首次获得几毫克金属铝。从此，金属铝面世。

1927 年德国科学家沃勒（F. Wohler）用还原氧化铝得到少量金属铝。

1854 年法国科学家德维尔（S. C. Deville）用钠还原 NaAlCl_4 络合盐，制得金属铝并建立了加工厂，生产餐具、玩具和头盔等数量很少的产品。由于当时铝的产量很低，所以价格十分昂贵，等同于黄金，难以普及使用。

1886 年，美国霍尔（C. M. Hall）和法国埃鲁特（D. L. Heroult）同时分别获得用冰晶石—氧化铝熔盐电解方法制取金属铝的专利。两年后，1888 年，美国匹兹堡建立了第一家电解铝厂。从此，铝生产进入一个新阶段。

1888 年，人们开始用拜耳法从铝土矿中生产氧化铝，而且直流电解技术有了很大的进步，为铝生产向工业规模发展奠定了基础。

到 19 世纪末期，铝的生产成本开始明显下降，于是，金属铝也就成为了一种普通常用金属。

20 世纪初期，铝材除了日常用品外，主要在交通运输工业上得到了应用。1901 年，用铝板制造汽车车体；1903 年，美国铝业公司把铝部件供给莱特兄弟制造小型飞机。汽车发动机开始采用铝合金铸件，造船工业也开始采用铝合金厚板、型材和铸件。随着铝产量的增加和科学技术的进步，铝材在其他工业部门（如医药器械、铝印刷版及炼钢用的脱氧剂、包装容器等）的应用也越来越广泛，大大刺激了铝工业的发展。

1910 年世界的铝产量增加到 45000t 以上，已开始大规模生产铝箔和其他新产品，如铝软管、铝家具、铝门窗和幕墙。同时，铝制炊具及家用铝箔等各种新产品也相继出现，使铝的普及化程度向前推进了一大步。

德国 A·维尔姆于 1906 年发明了硬铝合金（Al-Cu-Mg 合金），使铝的强度提高两倍，在第一次世界大战期间被大量应用于飞机制造和其他军火工业。此后又陆续开发了 Al-Mn、Al-Mg、Al-Mg-Si、Al-Cu-Mg、Al-Zn-Mg 等不同成分和热处理状态的铝合金。这些铝合金具有不同的特性和功能，大大拓展了铝的用途，使铝在建筑、汽车、铁路、船舶及飞机制造等工

业部门的应用得到了迅速的发展。

第二次世界大战期间,铝工业在军事工业的强烈刺激下获得了高速增长。1943年原铝总产量猛增到200万t。战后,由于军需的锐减,1945年原铝总产量下降到100万t。但是,由于各大铝业公司积极开发民用新产品,把铝材的应用逐步推广到仪器仪表、电子电气、交通运输、日用五金、食品包装等各个领域,使铝的需求量逐步增加。

1956年,世界铝产量超过铜,居有色金属首位。到20世纪80年代初期,世界原铝产量已超过1600万t,再生铝消费量达到450万t。铝工业的生产规模和生产技术水平达到了相当高的水平。

1.1.4 铝的消费结构

对于铝的消费,本书是指生产各种铝加工材以及配制铸造铝合金,并不包含铸造生产各种零件的量。

(1) 我国铝的消费结构 我国铝的消费量增加速度居世界首位,消费结构变化也大。据不完全统计,我国的铝消费量中,建筑行业约占30%、交通运输约占14.5%、机械行业占不到9%、包装(包括易拉罐)约占8%、电器与电力约占12.8%。

近几年我国铝加工材的消费量不断增加,结构也在变化,年平均增长率可达7.5%左右。同时,中国正日益成为全球制造业的中心,铝材消费量的年平均增长率可能会超过12%。

(2) 铝在汽车制造业中的应用 铝材应用于汽车上是从1901年开始的。它首先用来制作内饰件、部分壳体、板件铸件等,到了20世纪20年代开始制作结构件。1968~1973年期间,每辆汽车上铝的用量达到了21kg,1974年便增加到了38kg。

据美国汽车工业有关方面统计,轿车每使用0.454kg的铝制零件,车的自身重量可减少1.021kg。

随着汽车制造技术的不断提升,消费者对车辆底盘悬架系统要求也越来越高,要求乘车舒适、操控灵活,再加上全球气候变暖,减排要求越来越高,能源价格不断攀升。蕴藏量有限和不可再生的石油资源的随着工业化的发展在逐渐减少,造成了高油价时代的到来。2008年石油价格,曾一度上升到每桶150美元,这些都对汽车工业提出了严峻的挑战,这也加快了汽车工业必须要朝轻量化发展的步伐。

2010年前轿车的平均质量由以前的1300kg左右降到1000kg左右。一辆轿车质量若减轻10%,油耗可降低8%~10%。因此,很多欧美汽车巨头都纷纷

投入大量的人力、财力,研究怎么来降低车身质量。用铝合金来代替钢,已在中高档车上不断得到应用。本田汽车于2004年10月发表战略报告说,考虑轿车使用200kg铝合金零件,其中40kg为锻件。

汽车轻量化是时代的必须。随着世界性的节约燃料的发展要求和技术措施的实施,铝在汽车上的应用将是大有可为。以罐装车为例,来说明这个问题。如果用铝来代替钢,拥有45000L容积的罐装车,比传统的罐装车减轻质量约为2500kg。以耗油量进行评估,汽车每降低质量100kg,同样行驶100km,便可节油大约为0.65L。若减少1L耗油,便可减少CO₂排放量2.33kg。如果将油罐车的油罐全部铝合金化,那么每年可减排CO₂的量为2150.2万t。

一辆汽车的行驶操控性和舒适性与底盘结构中悬架系统息息相关,现代轿车用的各种独立式悬架,如横臂式、纵臂式、麦弗逊式和多连杆式悬架,这些悬架都必不可缺地用到控制臂。因为控制臂是用于约束来自转向盘对汽车行进方向的影响,从而对方向进行有效和可靠的控制。除此之外,控制臂在复杂的路面工作环境中,还具有调整高速运动中上下颠簸和平面偏摆产生振动的作用。除了控制臂外,铝合金还可以用来制作轮毂及其他零件。

用铝合金材质来降低控制臂质量,符合汽车工业的发展需求。铝合金的密度大致为2.79g/cm³,是钢锻件的34%,铜锻件的30%,所以铝合金是轻重化的理想材料。铝合金具有比强度高,比刚度大,比弹性模量大,疲劳强度高,内部组织细密、均匀、无缺陷,加工性能好,有良好的耐蚀性,吸振性强等优点,因此它是悬架系统钢控制臂理想的替代材料。采用铝合金悬挂系统控制臂能提高车辆底盘回弹响应速度,从而大大提高车辆的操控能力,行驶舒适性也随之得到质的提升。

现在国外中高档车上的控制臂几乎全部用铝合金代替钢,如奔驰、宝马、奥迪、沃尔沃等品牌,近年发展势头迅猛的SUV、MPV也开始采用铝合金控制臂。这是大势所趋,也是时代的要求。因此,铝合金控制臂发展趋势还在进一步发展和扩大。

1.2 铝合金的分类

铝及铝合金分类的方法较多,这里介绍目前世界上大部分国家采用的三种分类方法。

1. 按照铝的合金相图及其热处理特性的分类

铝的合金相图如图1-2-1所示。

原铝在市场供应中统称为电解铝,是生产铝材及铝合金材的原料。铝是强度低、塑性好的金属,除因