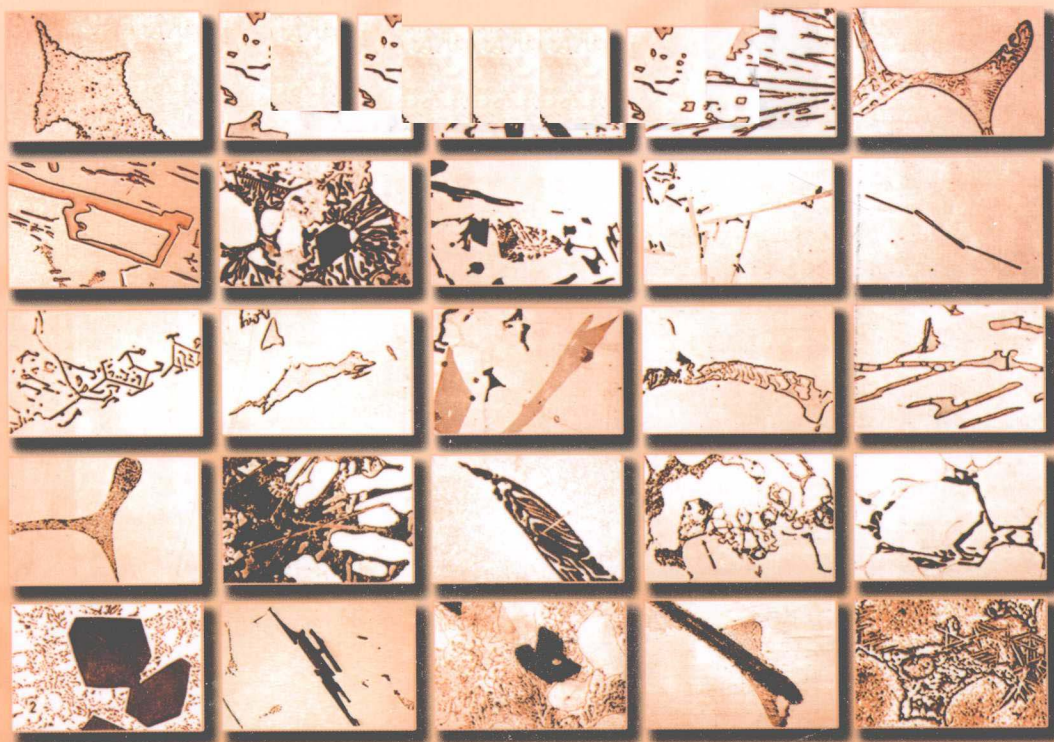


现代铝加工生产技术丛书

主编 周江 赵世庆

铝合金材料组织与 金相图谱

李学朝 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 周江 赵世庆

铝合金材料组织与 金相图谱

李学朝 编著

北 京

冶金工业出版社

2010

内 容 简 介

本书是《现代铝加工生产技术丛书》之一,详细介绍了铝及铝合金 8 个系以及粉末冶金铝合金和铝合金双金属复合板的主要相组成及其特征,各种加工方式(压延、压挤、锻造、冷拉等)对合金组织的影响,各种热处理状态(均匀化、退火、淬火、时效等)下合金组织的特点和规律,加工制品主要缺陷产生原因和对材料性能的影响,对其较为典型的组织状态,均附有图片和必要的说明。本书在内容组织和结构安排上,力求理论联系实际,突出实用性、科学性和行业特色,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和管理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、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教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

铝合金材料组织与金相图谱 / 李学朝编著. —北京:冶金工业出版社, 2010.7

(现代铝加工生产技术丛书)

ISBN 978-7-5024-5263-6

I. ①铝… II. ①李… III. ①铝合金—相图—图谱
IV. ①TG146.2-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 085046 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 yjcb@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 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5263-6

北京盛通印刷股份有限公司印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2010 年 7 月第 1 版, 2010 年 7 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 25 印张; 2 彩页; 612 千字; 387 页

120.00 元

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(100711) 电话: (010) 65289081

(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	周 江	赵世庆		
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	尹晓辉	方清万
	王德满	田 树	左宏卿	李 迅
	李 响	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	闫维刚	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	姜文举	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

东北轻合金有限责任公司

西南铝业（集团）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、华北铝业有限责任公司的代表。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。

前 言

迄今,我国铝及铝合金材料与加工业已走过近 60 年的历程,在这几十年里,特别是改革开放以来,我国铝加工业有了飞速的发展。从 2005 年起,我国成为世界第一大铝加工材生产国,并连续几年雄踞世界之首,2009 年我国铝加工材产量达 1620 万吨/年,成为名副其实的铝加工材产销大国、出口大国和贸易大国。但应看到,我国还不是一个铝加工强国,特别是在铝合金材料方面,尚未形成完整的合金体系和热处理状态体系;在生产效益与质量方面,仍远远落后于国际先进水平,许多高档的、高质量铝材仍然依赖进口;在产品质量检测与控制方面,与工业发达国家相比,仍存在很大差距。这些都大大制约了我国铝加工业的发展。因此,积极总结我国长期积累的科研成果与生产实践经验,吸收、消化国外先进技术,努力提高我国铝加工业技术水平已成为必然,也是人们的迫切希望。

本书是《现代铝加工生产技术丛书》之一,是按照《现代铝加工生产技术丛书》的统一规划和要求进行编写的。早在 20 世纪 70 年代,由原冶金工业部委托冶金工业出版社和东北轻合金加工厂,由变形铝合金金相学专家、研究员级高级工程师李学朝先生主持,组织编写了《变形铝合金金相图谱》一书,该书于 1975 年 8 月由冶金工业出版社出版,对我国铝合金加工业的发展曾经起到了很大的促进作用。该书至今已过去 30 多年,我国的铝合金及其加工技术有了很大的变化,就连合金牌号和状态也修改过几次,技术和设备也有了很大的发展,其内容已远远不能满足我国铝加工业发展的需要。鉴于此,《现代铝加工生产技术丛书》编委会决定编写本书,基本思路是在 1975 年 8 月出版的《变形铝合金金相图谱》的基础上,本着吸取有用的,删除过时的,有选择地增加新的、较为先进和成熟的技术内容为原则编写。

本书由原《变形铝合金金相图谱》的组织者和编者之一,原东北轻合金加工厂金相室主任李学朝先生主持编写,并联合东北轻合金有限责任公司、西南铝业(集团)有限责任公司、中铝西北铝加工分公司、上海瑞尔实业有限公司等企业的有关专家共同编撰完成。

本书虽以原《变形铝合金金相图谱》为基础,但从结构到内容,均有较大变化,在保留原书有用内容的基础上,增加了多年来我国铝合金加工业在合金系和产品品种生产及工艺研究中的新成果,以合金组织为重点,适当增补有关力学性能和耐腐蚀性能方面的新内容。本书增补了 $2 \times \times \times$ 系(铝-铜系)、 $3 \times \times \times$ 系(铝-锰系)、 $5 \times \times \times$ 系(铝-镁系)、 $6 \times \times \times$ 系(铝-镁-硅系)的内容,新增加了 $4 \times \times \times$

系(铝-硅系)、 $8\times\times\times$ 系(以铝-铜-锂系为主)、烧结铝合金以及铝合金复合材料等内容。本书举例典型,数据翔实,图文并茂,深入浅出地解释了生产中出现的有关技术质量难题,可以说是一本结合实践,能解决相关理论与技术问题,并反映现代铝加工材料组织性能和金相图谱的实用读本。

本书是铝加工生产企业工程技术人员和管理人员必备的工具书,也可供从事有色金属材料与加工的科研、设计、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教学参考书。

本书共分11章,具体撰稿人及撰稿章节如下:

第1章由李学朝、李健成编写;第2章由李学朝编写;第3章中的3.1节由程远明、邵尉田编写,3.2节由林浩编写,3.3节由汪洋编写;第4章中的4.1节由宋明文编写,4.2、4.3节由刘静安、林林、温庆红编写;第5章由周学博、李建荣编写;第6章由沈韵琪、李学朝编写;第7章中的7.1节由周约礼编写,7.2节由邵尉田、李建荣、李学朝编写;第8章由李念奎编写;第9章由林林、温庆红、刘静安编写;第10章由吕新宇编写;第11章由邵尉田编写。全书由谢水生教授和刘静安教授审定。

本书在编写过程中,李健成和李健军、李健强以及上海瑞尔实业有限公司汽车配件轻量化研究中心有关专家、学者和工人师傅给予了许多帮助,并做了大量具体工作。同时本书参考了国内外有关专家和学者的一些文献资料,应用了一些企业的图表、数据等,并得到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,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

2010年5月10日

目 录

1 总论	1
1.1 变形铝及其合金的分类和状态	1
1.2 变形铝合金中的主要元素及相组成和力学性能	2
1.3 变形铝合金铸锭 (DC) 及其加工制品在各种状态下的组织与性质	31
1.3.1 半连续铸造铸锭 (DC) 的组织 and 均匀化	31
1.3.2 变形铝及其合金的塑性变形和半成品的恢复与再结晶	38
1.3.3 变形铝及其合金的动态恢复和动态再结晶及制品热加工状态的组织和性质	46
1.4 冷压延、冷拉伸及冷拔、冷轧状态的组织	59
1.5 变形铝合金热处理状态的组织和性质	61
1.5.1 退火状态的组织和性质	61
1.5.2 淬火及时效状态的组织和性质	62
1.5.3 淬火及时效状态组织的电子显微镜观察和电子衍射金相分析	76
1.6 变形铝合金制品缺陷金相分析和对制品性能的影响	90
1.6.1 氧化膜	90
1.6.2 小亮点	96
1.6.3 光亮晶粒	103
1.6.4 羽毛状晶 (花边状组织)	107
1.6.5 铜扩散	113
1.6.6 缩尾	114
1.6.7 粗晶环	121
1.6.8 过烧	123
2 1×××系 (工业纯铝)	140
2.1 杂质含量及相组成	140
2.2 热处理特性	144
2.3 铸锭 (DC) 及加工制品的组织 and 性能	146
3 2×××系 (铝-铜系) 合金	160
3.1 2×××系合金之一——铝-铜-镁系合金	160
3.1.1 化学成分及相组成	160
3.1.2 热处理特性	162
3.1.3 铸锭 (DC) 及加工制品的组织 and 性能	165
3.2 2×××系合金之二——铝-铜-镁-铁-镍系合金	184

3.2.1	化学成分及相组成	185
3.2.2	热处理特性	187
3.2.3	铸锭 (DC) 及加工制品的组织 and 性能	188
3.3	2×××系合金之三——铝-铜-锰系合金	201
3.3.1	化学成分及相组成	201
3.3.2	热处理特性	203
3.3.3	铸锭 (DC) 及加工制品的组织 and 性能	206
4	3×××系 (铝-锰系) 合金	216
4.1	3×××系合金之一——3A21 合金	216
4.1.1	化学成分及相组成	216
4.1.2	热处理特性	217
4.1.3	铸锭 (DC) 及加工制品的组织 and 性能	222
4.2	3×××系合金之二——3102 合金	232
4.2.1	化学成分及相组成	232
4.2.2	热处理特性	232
4.2.3	铸轧料及各状态的组织和性能	233
4.3	3×××系合金之三——易拉罐体用 AA3004/3104 合金	238
4.3.1	化学成分及相组成	238
4.3.2	合金的热处理	240
4.3.3	铸锭与加工状态组织	241
5	4×××系 (铝-硅系) 合金	243
5.1	化学成分、变质处理与相组成	243
5.2	热处理特性	248
5.3	铸锭 (DC) 及加工制品的组织 and 性能	249
6	5×××系 (铝-镁系) 合金	257
6.1	化学成分及相组成	257
6.2	热处理特性	258
6.3	铸锭 (DC) 及加工制品的组织 and 性能	261
7	6×××系 (铝-镁-硅系) 合金	274
7.1	6×××系合金之一——铝-镁-硅-铜系合金	274
7.1.1	化学成分及相组成	274
7.1.2	热处理特性	276
7.1.3	铸锭 (DC) 及加工制品的组织 and 性能	278
7.2	6×××系合金之二——铝-镁-硅系合金	304
7.2.1	化学成分及相组成	304

7.2.2 热处理特性	304
7.2.3 铸锭 (DC) 及加工制品的组织 and 性能	306
8 7×××系 (铝-锌-镁-铜系) 铝合金	314
8.1 化学成分及相组成	314
8.1.1 Al-Zn-Mg 合金	314
8.1.2 Al-Zn-Mg-Cu 合金	315
8.2 热处理特性	318
8.2.1 均匀化处理	318
8.2.2 固溶处理	318
8.2.3 时效	319
8.2.4 退火	320
8.3 铸锭 (DC) 及加工制品的组织 and 性能	321
9 8×××系 (以铝-铜-锂系为主) 合金	355
9.1 化学成分和相组成	355
9.1.1 化学成分	355
9.1.2 相组成	356
9.2 热处理特性	356
9.3 铸锭 (DC) 及加工制品的组织 and 性能	358
10 粉末冶金铝合金	366
10.1 铝合金粉末	366
10.2 锭坯及加工制品特性	367
10.3 锭坯及加工制品的组织 and 性能	368
11 铝合金双金属复合板	374
11.1 铝合金双金属复合板	374
11.2 热轧复合	374
附 录	376
附录 1 变形铝合金化学成分	376
附录 2 变形铝合金主要相晶体结构及浸蚀前后的特征	379
附录 3 变形铝合金部分制品的力学性能参考数据	382
附录 4 铝合金制品的表示方法	383
附录 5 铝合金制品的状态代号	383
参考文献	384

部分照片彩图

1 总 论

随着我国国民经济的快速持续发展,铝及铝合金板、带、箔、管、棒、型、线、锻件等制品在机械制造、交通运输、电气、造船、汽车、航空、航天、化工、建筑等国民经济中已得到广泛应用。

由于铝合金成分、加工变形方式、热处理等生产工艺参数对合金半成品的组织性能有不同影响,因此研究不同状态和条件下,铝及其合金制品的相组成及其组织特征和性质的关系,对提高产品质量,改进生产工艺,制造高、精、尖和质量精密的铝合金制件,正确选用材料,研发新型铝合金都有十分重要的意义。

1.1 变形铝及其合金的分类和状态

铝合金通常按合金系、热处理特性及性能用途三种方式分类。我国生产的变形铝合金以前是按性能和用途分类的,即工业纯铝、防锈铝、硬铝、超硬铝及锻铝,还有烧结铝和复合铝及其合金材料半成品,除工业纯铝外,其他均属铝和一种或几种主要元素形成的合金。属于防锈铝的有 Al-Mg 系、Al-Mn 系合金;属于硬铝的有 Al-Cu-Mg 系、Al-Cu-Mn 系合金;而 Al-Zn-Mg-Cu 系是超硬铝;Al-Mg-Si 系、Al-Mg-Si-Cu 系和 Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系为锻铝;其中 Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系及 Al-Cu-Mn 系合金中的 2A16、2A02 有较好的耐热性,称为耐热铝合金。除工业纯铝和防锈铝不能热处理强化外,其他各系合金均可用热处理强化。

由于我国铝加工业的发展与壮大需要和国际接轨,所以对原有的变形铝及其合金的牌号和状态进行修订是必要的,目前采用国际四位数字体系命名牌号。纯铝和变形铝合金牌号如表 1-1 所示,所属合金牌号见附录 1。根据国际通用的状态代号并结合我国特有的状态代号规定了变形铝及铝合金的状态代号,详见表 1-2,细分状态代号见附录 5 和 GB/T 16475—1996。

表 1-1 纯铝和变形铝合金牌号

组 别	牌号系列	原 属 合 金 系
铝(铝含量不小于 99.00%)	1×××	工业纯铝
以铜为主要元素的铝合金	2×××	Al-Cu-Mg、Al-Cu-Mn、Al-Cu-Mg-Si、Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系
以锰为主要元素的铝合金	3×××	Al-Mn 系
以硅为主要元素的铝合金	4×××	Al-Si 系
以镁为主要元素的铝合金	5×××	Al-Mg 系
以镁和硅为主要合金元素并以 Mg ₂ Si 相为强化相的铝合金	6×××	Al-Mg-Si 系

续表 1-1

组 别	牌号系列	原 属 合 金 系
以锌为主要元素的铝合金	7×××	Al-Zn、Al-Zn-Mg、Al-Zn-Mg-Cu 系
以其他合金元素为主要合金元素的铝合金	8×××	
粉末冶金铝合金		

表 1-2 变形铝及铝合金的状态代号

代 号	名 称	原 代 号
F	自由加工状态	部分可对应原“R”热加工状态
O	退火状态	M
H	加工硬化状态	Y(含原 Y ₁ 、Y ₂ 、Y ₃ 、Y ₄)
W	固溶热处理状态	CZ(固溶热处理后淬火的自然时效状态)
T	热处理状态(与 F、O、H 状态不同)	CS(固溶热处理后淬火并人工时效状态是“T”状态中的 T6 状态)

按现在国际四位数字体系牌号命名，则原合金牌号所属合金系有如下变动：

2×××系中，包括了原 Al-Cu-Mn 系合金 2A16、2A17 和 Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系合金 2A70、2A80，还有 Al-Cu-Mg-Si 系的 2A50、2B50、2A14，把 6A02 合金并入 6×××系，详见 GB/T 16475—1996 和 GB/T 3190—1996。

上述各系合金根据其性能和用途，通过铸造和不同的压力加工方式（压延、挤压、拉伸、模锻（含自由锻）、冷拉伸及冷拔、冷轧）生产成各种板、带、箔、管、棒、型、线及锻件。本书按国际四位数字体系牌号和国际通用状态代号叙述，以合金相组成及组织特征为重点，并配以相应的力学性能数据，从而体现合金半成品组织及力学性能的相互关系。

鉴于 2A50、2B50 合金时效强化以 Mg₂Si 为主，所以在本书图谱中将这两个合金仍并入 Al-Cu-Mg-Si 系叙述。

1.2 变形铝合金中的主要元素及相组成和力学性能

在常用的合金元素中，铝和银、锌、镁、铜、锂、锰、镍、铁及非金属元素硅在靠铝一边形成共晶反应；和铬、钛形成包晶反应；在 Al-Pb 系中出现偏晶反应。它们在铝中的固溶度以银、锌、镁、铜、锂最大，锰、硅、镍、钛、铬、铁次之，以铅为最小。

从图 1-1 Al-Ag 平衡图看出，银在铝中的固溶度随温度变化的情况和锌相似。而且随温度上升，其固溶度有规律地增加，到 527℃(800K)时发生急骤变化，566℃(839K)时发生 $L \rightleftharpoons (Al) + Ag_2Al$ 共晶反应。银在铝中的固溶度高达 55.6%，而锌在铝中发生共析反应时的最大固溶度为 31.6%。银的这种变化近年来已引起人们的注意。研究表明：微量银可显著扩大 Al-Zn-Mg 系合金达到最大时效效果的温度区间，提高合金的强度和耐应力腐蚀能力。在 Al-Cu-Mg 系合金中，当铜比镁的比例较高时，加入少量银能导致形成亚稳相 θ' (CuAl₂)，从而提高合金强化效果。把银和镁一起加入 Al-Cu-Li 合金中，可同时使 θ'

和 S' 及 $T_1((Al_6CuAg)Mg_4)$ 相在不同晶面析出, 钉扎位错移动, 显著提高合金强度, 成为超轻重量材料。Al-Mg 系合金在室温时时效强化效果很低, 但加入银后不但可提高镁在铝中的固溶度, 而且还产生 $T(Mg_{32}(Al \cdot Ag)_{49})$ 和 GP 区同时存在, 使 Al-Mg 合金成为热处理可强化的合金。银能提高铝的再结晶温度, 使合金的硬度随其含量的增加而升高, 而且晶界和晶粒中心硬度相近。

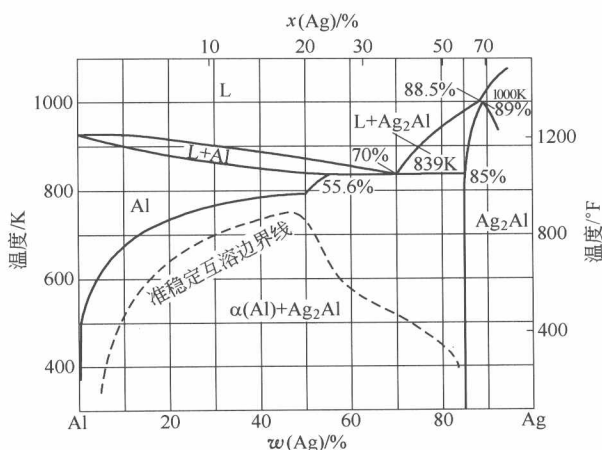


图 1-1 Al-Ag 相图的铝端

虚线: 亚稳定相区线

合金中的铜、锂等元素以及合金中的化合物 Mg_2Si 、 $MgZn_2$ 、 $S(CuMgAl_2)$ 相等, 由于随温度高低有较大的固溶度变化, 所以经淬火及时效后能使合金显著强化。

铁、硅在有的合金中作为杂质加以控制, 它们和铝形成 $FeAl_3$ 、 $\alpha(FeSi_3Al_{12})$ 、 $\beta(Fe_2Si_2Al_9)$, 并会和合金中的锰等形成更复杂的化合物 $(FeMn)Al_6$ 、 Mn_3SiAl_{12} 、 Cu_2FeAl_7 、 $(FeMnSi)Al_6$ 。其中 $(FeMn)Al_6$ 是铁溶于 $MnAl_6$ 或锰溶于 $FeAl_3$ 中的固溶体, 而 $(FeMnSi)Al_6$ 则为铁溶于 Mn_3SiAl_{12} 中的固溶体。由于这些化合物都不能固溶或很少固溶于 $\alpha(Al)$ 中, 所以对合金的时效强化作用很小, 或不参与强化。

综上所述, 这些杂质相对合金的时效强化虽有不良影响, 但如果据其特性合理使用, 则可以改变合金的其他性能。例如 $Fe/Si \geq 2$ 时, 工业纯铝中有更多的 $FeAl_3$ 相, 这时有好的耐高温动水腐蚀性能。调整铁、硅含量或加入其他元素能使合金中的铁、硅杂质相成为骨骼状的 $\alpha(FeSi_3Al_{12})$ 或 $(FeMnSi)Al_6$, 便可消除因 $\beta(Fe_2Si_2Al_9)$ 或 $(FeMn)Al_6$ 粗大片状物造成的合金塑性和工艺性能降低的现象。

固溶于铝中的锰、铬、铅等元素不但能提高合金的再结晶温度, 而且即使在比较缓慢的冷却速度下也很难析出, 必须在随后加热时才析出, 这种现象称为回火分解, 析出物呈点状, 是锰、铬和铝及其他元素的化合物, 是有些合金弥散强化的主要相, 其分布状态对合金性能影响很大。研究表明, 这些化合物会随着合金温度的升高和保温时间的延长聚成长大或成小串分布, 其大小和相似程度, 对合金的热加工工艺和恢复及再结晶行为有明显影响。

钪是铝合金最佳变质剂, 溶入铝中生成 $ScAl_3$ 可显著细化铝合金铸态组织, 改变半连

续铸造铸锭结晶过程,使铸锭获得非树枝状组织。铈还是变形铝合金最佳的抗再结晶元素,其对再结晶温度提高的程度比锆更显著。

钛是某些合金已广泛应用的变质剂,可细化合金的晶粒,能使连续铸造铸锭不易产生“孪晶”(即不易出现羽毛状晶)并提高铝的再结晶温度。由于钛可细化变形合金的晶粒,而且在有铁存在的情况下,其提高再结晶温度的能力比无铁时更大,从而提高合金力学性能,保证合金具有良好的工艺性能和机加工性。

除 $1\times\times\times$ 系工业纯铝外,系统地了解其他各系合金平衡图靠铝(角)部分的相区分布,对分析合金的相组成和其强化机制、制订热处理工艺制度都有很大的意义。

$2\times\times\times$ 合金包括 Al-Cu-Mg 和 Al-Cu-Mn 和原 Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系及原 Al-Mg-Si-Cu 系的大部分。从 Al-Cu-Mg 系平衡图(图 1-2、图 1-3)看出该系合金除了产生 CuAl_2 、 Mg_2Al_3 外,还生成 $\text{S}(\text{CuMgAl}_2)$ 相及 $\text{T}(\text{CuMg}_4\text{Al}_6)$ 相。在 507°C (780K) 发生三元共晶反应: $\text{L} \rightleftharpoons (\text{Al}) + \text{CuAl}_2 + \text{S}(\text{CuMgAl}_2)$ 相,共晶成分为: 33.1%Cu、6.25%Mg。在共晶温度下 $\alpha(\text{Al})$ 中最大溶解度为 4.1%Cu、1.7%Mg; 当温度为 518°C (791K) 时,成分为 24.5%Cu 及 10.5%Mg 的液体发生 $\text{L} \rightleftharpoons \alpha(\text{Al}) + \text{S}(\text{CuMgAl}_2)$ 相的伪二元共晶反应,此时 $\alpha(\text{Al})$ 中的最大固溶度为 2.9%Cu 及 2.9%Mg。图 1-3 所示工业生产的 $2\times\times\times$ 系硬铝合金的成分大都处于上述三相区和两相区,而且成分在该三相区、并靠近 $\alpha(\text{Al}) + \text{S}(\text{CuMgAl}_2)$ 两相区的合金强度最高,成分在 $\alpha(\text{Al}) + \text{S}(\text{CuMgAl}_2)$ 相区者有高的耐热性。

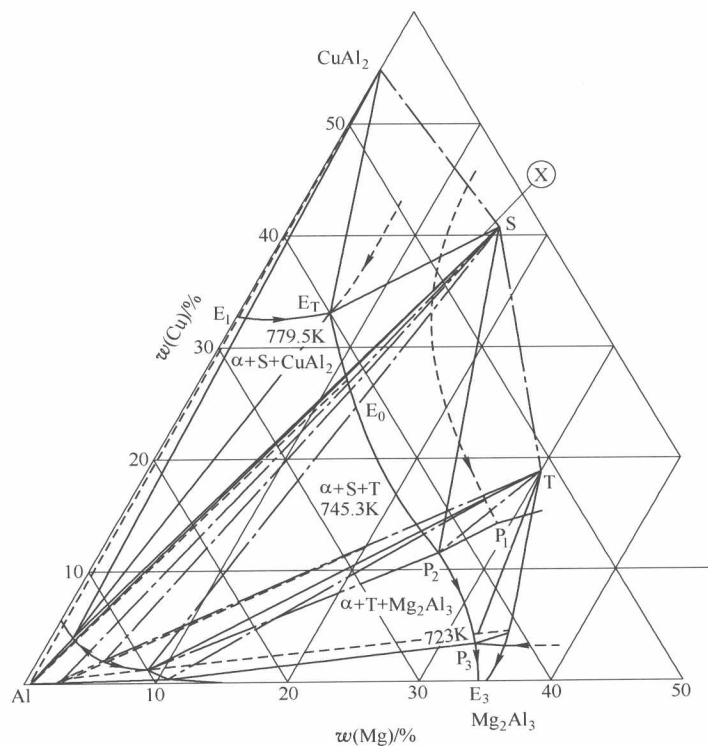


图 1-2 Al-Cu-Mg 系合金平衡图靠近铝角部分

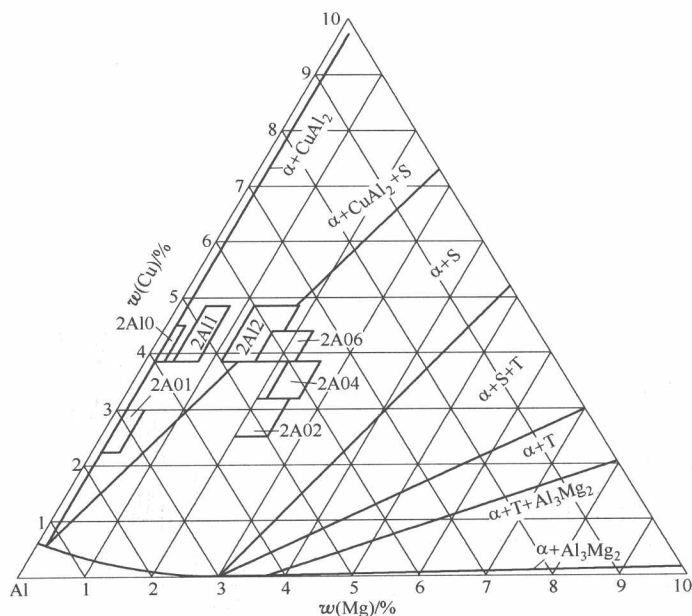


图 1-3 Al-Cu-Mg 系工业合金的位置及在 200℃ 的相区分布

Al-Cu-Mn 系平衡图如图 1-4、图 1-5 所示。图 1-4 是靠铝角液相面，图 1-5 是不同温度的相区分布。

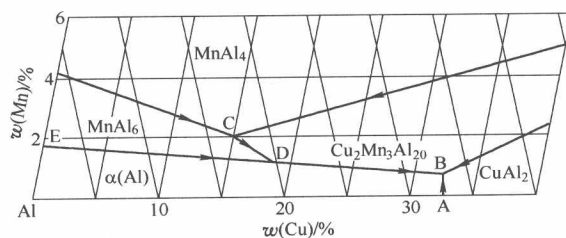


图 1-4 Al-Cu-Mn 系相图铝角（液相面）

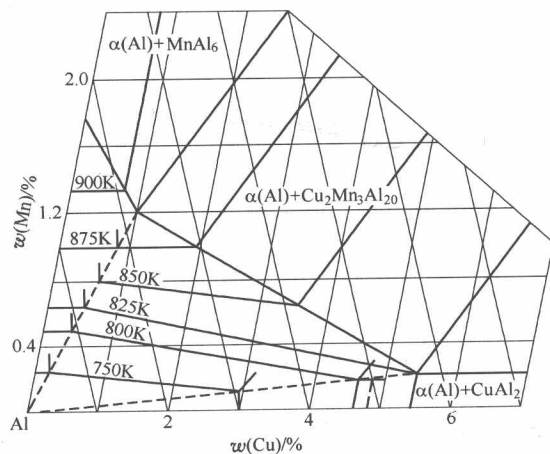


图 1-5 Al-Cu-Mn 系相图铝角（不同温度的相区分布）