

高等学校教材

有色金属材料及制备

司乃潮 傅明喜 编著



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

有色金属材料及制备/司乃潮, 傅明喜编著. —北京:
化学工业出版社, 2006.1
高等学校教材
ISBN 7-5025-7803-X

I. 有… II. ①司…②傅… III. 有色金属-金属材料-高等学校-教材 IV. TG146

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 127587 号

高等学校教材

有色金属材料及制备

司乃潮 傅明喜 编著

责任编辑: 杨 菁 陈 丽

文字编辑: 余德华

责任校对: 郑 捷

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社
教材出版中心

出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 440 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7803-X

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

当前材料科学发展迅速，新材料、新技术、新工艺不断出现。我国已将新材料列为四大高新技术之一重点发展，设立了“863”和“973”及国家自然科学基金重大项目等新技术专项以支持这一领域的发展。因此也明确了有色金属材料及制备在工业生产及国民经济中的地位。为了适应新形势，适应高校的教育改革，满足学生素质教育的需要，结合专业调整改革的现状，根据工科相关材料类专业学生学习的需要，编写了这本教材。目的是为了增强学生的学习兴趣，拓宽其专业知识面。

本书力求加强基础理论，阐明基本概念与基本问题，尽可能结合国内实际，反映国内外先进成果，并做到言简意赅、便于学习。尽可能做到理论联系实际，力求比较全面地介绍有色金属材料及制备的主要内容及其进展。因此本书可作为高等工科院校材料类专业教材，也可供企业和科研单位相关的工程技术人员、管理人员等学习和参考。

本书共分十三章。第一至五章分别介绍了铝合金、镁合金、铜合金、锌合金、钛合金的种类、成分、组织与性能，以及合金元素的作用；第六章介绍了轴承合金及其熔铸工艺；第七章介绍了形状记忆合金，主要介绍了镍基、铜基形状记忆合金的组织、性能与应用；第八章介绍了有色金属热处理的原理与工艺；第九至十三章分别介绍了铝合金、镁合金、铜合金、锌合金、钛合金的制备原理与典型制备工艺。

全书由江苏大学司乃潮教授、傅明喜副教授编著。其中第一至五章、第七至十三章由司乃潮负责撰写，第六章由傅明喜负责撰写，全书由司乃潮统稿。

由于编者水平有限，书中难免存在某些瑕疵，敬请读者批评指正。

编著者

2005 年 7 月

目 录

第一章 铝合金	1
第一节 概述	1
一、工业纯铝的一般特性及应用	1
二、铸造铝合金的分类及其特点	3
第二节 铝硅类合金	5
一、铝硅合金的成分、组织、性能及用途	5
二、提高铝硅合金性能的主要途径	8
三、多元铝硅合金的成分、组织、性能及用途	15
第三节 铝铜类合金	23
一、铝铜二元合金的成分、组织、性能及用途	23
二、高强度 Al-Cu-Mn-Ti 合金	24
三、耐热铸造铝合金	26
第四节 铝镁类合金	28
一、铝镁二元合金的成分、组织、性能及用途	29
二、 α 固溶体的细化	30
三、合金元素对铝镁合金的影响	31
第五节 铝锌类合金	33
一、铝锌二元合金的成分、组织、性能及用途	33
二、Al-Zn-Mg 合金的成分、组织、性能及用途	34
三、Al-Zn-Mg 合金的发展	35
第二章 镁合金	38
第一节 概述	38
一、合金成分与牌号标记方法	38
二、镁合金的分类方法	40
三、镁合金系及其特点	42
第二节 镁铝合金系	42
一、镁铝合金的成分、组织、性能	42
二、多元镁铝合金	43
第三节 镁锌合金系	44
一、镁锌合金的成分、组织、性能	44
二、多元镁锌合金	44
第四节 镁锰合金系	45
一、镁锰合金的成分、组织、性能	45
二、多元镁锰合金	46
第五节 镁稀土合金系	46
一、镁铈系合金	46

二、镁钇系合金	47
第六节 其它镁合金系	47
一、镁钪合金	47
二、镁锂合金	48
第七节 镁合金的金相组织	50
一、镁合金金相分析方法	50
二、镁铝合金铸态组织	51
三、镁铝合金热处理组织	53
第三章 铜合金	55
第一节 概述	55
第二节 锡青铜	59
一、铜锡二元合金的成分、组织	59
二、铜锡二元合金的性能及工艺特点	60
三、多元锡青铜	61
四、锡青铜中的杂质	62
第三节 铝青铜	63
一、铜铝二元合金的成分、组织、性能	63
二、铝青铜的缓冷脆性	64
三、多元铝青铜	64
第四节 其它青铜	66
一、铅青铜	66
二、铍青铜	67
三、铜锰基高阻尼合金	68
第五节 黄铜	69
一、铜锌二元黄铜	69
二、多元黄铜	71
第六节 铜合金成分优化设计	72
第四章 锌合金	75
第一节 概述	75
一、锌铝合金的类型	75
二、锌铝合金的使用性能及材料选择	76
第二节 凝固组织、相变及合金元素的作用	78
一、锌铝合金的结晶特点	78
二、典型合金的结晶、固态相变及室温组织	80
三、合金元素的作用	81
四、锌铝合金的金相检验	85
第三节 锌铝合金的力学性能	85
一、一般力学性能	85
二、时效对合金组织与性能的影响	86
第四节 锌铝合金的特殊性能	89
一、疲劳特性	89

二、锌铝合金的摩擦磨损行为	91
三、锌铝合金的晶间腐蚀	93
四、锌铝合金的高温性能	95
五、锌铝合金耐热性研究	97
第五节 外界条件对锌合金组织与性能的影响	99
一、凝固冷却速度的影响	99
二、半固态搅拌对组织与性能的影响	100
三、变形加工对组织与性能的影响	102
四、锌铝合金的阻尼性能	102
第五章 钛合金	105
第一节 概述	105
第二节 纯钛	105
一、纯钛的特性	105
二、杂质对纯钛的影响	106
三、工业纯钛简介	107
第三节 钛的合金化	107
一、钛中合金元素的分类与作用	107
二、钛合金的分类及特点	110
第四节 钛合金的相变	114
一、同素异构转变	114
二、马氏体相变	115
三、 ω 相变	117
四、钛合金慢冷却中的相变	117
五、钛合金的亚稳相图及快冷中的相变	118
六、界面相	119
七、 $\alpha+\beta$ 钛合金的基本组织类型与性能特点	120
八、亚稳相的分解	124
第六章 轴承合金及其熔铸	127
第一节 概述	127
第二节 锡基轴承合金	129
一、锡基轴承合金的成分、组织、性能	129
二、常用的锡基轴承合金	129
第三节 铅基轴承合金	130
一、铅锑系合金	130
二、铅钙钠系合金	132
第四节 铝基轴承合金	133
一、Al-Sn 合金	133
二、Al-Sb 合金	134
三、Al-Si 合金	134
四、铝-石墨复合材料	134
第五节 锡基和铅基轴承合金的熔铸	136

一、钢壳的清理与挂锡	136
二、锡基和铅基轴承合金的熔制	137
三、锡基和铅基轴承合金的铸造	138
第七章 形状记忆合金	143
第一节 概述	143
一、形状记忆合金的发展	143
二、热弹性马氏体相变、伪弹性及超弹性	143
三、形状记忆效应	144
第二节 钛镍基形状记忆合金	144
一、Ti-Ni 合金的力学性能	144
二、Ti-Ni 合金的形状记忆特性	145
第三节 钛镍形状记忆合金的应用	149
一、Ti-Ni 形状记忆合金在医学领域中的应用	149
二、Ti-Ni 形状记忆合金的工程应用	151
第四节 铜基形状记忆合金	154
一、铜基形状记忆合金的时效效应	154
二、铜基形状记忆合金的循环效应	161
第五节 改善铜基形状记忆合金的性能	163
一、复合稀土对 Cu-Zn-Al 形状记忆合金力学性能的影响	163
二、冷热循环对 Cu-Zn-Al 形状记忆合金性能的影响	166
三、Cu-Zn-Al (-RE) 形状记忆合金马氏体稳定化的研究及解决措施	169
第六节 铜基形状记忆合金的应用	171
一、铜锌铝形状记忆合金用于过热保护器 (保安单元)	171
二、Cu-Zn-Al 形状记忆合金在工程结构减振中的应用	173
第八章 有色金属热处理	180
第一节 铝合金热处理	180
一、铝合金热处理的目的和种类	180
二、铝合金的热处理特点和原理	181
三、铝合金的热处理工艺	184
四、Al-Cu4% 合金组织、性能的一般变化	186
五、其它铝合金系的时效过程	190
六、时效硬化原因	192
七、时效理论的应用	194
八、铝合金热处理常见缺陷及其防止措施	198
第二节 镁合金热处理	200
一、镁合金的固态相变特点	200
二、镁合金热处理的主要类型	202
三、典型镁合金热处理工艺	203
第三节 钛合金热处理	205
一、钛合金热处理的特点	205
二、退火	206

三、强化热处理	207
四、形变热处理	210
五、钛合金的 β 及近 β 加工	211
六、钛合金的化学热处理及表面改性	212
第九章 铝合金制备技术	214
第一节 铝合金的净化处理原理	214
一、气孔和夹杂物对合金性能的影响	214
二、气体和氧化夹杂物的来源	215
三、影响合金液吸氢的因素	216
四、熔炼时间对吸氢的影响	219
第二节 铝合金的净化处理工艺	219
一、气体精炼剂	219
二、固体精炼剂	220
第三节 铝合金现代变质处理技术	222
一、细化处理	222
二、共晶硅变质处理	224
第四节 铝合金典型制备工艺	228
一、铝硅合金典型制备工艺	228
二、铝铜合金典型制备工艺	229
三、铝镁合金典型制备工艺	229
第十章 镁合金制备技术	231
第一节 镁合金的物理化学特性	231
一、镁-氧反应	231
二、镁-水反应	231
三、镁与其它气体间的反应	232
四、镁与某些化学物质间的反应	232
第二节 镁合金的净化和变质处理	232
一、镁合金的精炼	232
二、镁合金的变质	233
三、镁合金的熔剂	233
四、镁合金的型砂	233
第三节 镁合金的典型制备工艺	234
一、含锆镁合金的制备工艺	234
二、含稀土镁合金的制备工艺	239
三、含钍镁合金的制备工艺	240
第十一章 铜合金制备技术	242
第一节 铜合金的氧化和脱氧	242
一、铜合金的氧化特性	242
二、铜合金的脱氧	243
三、磷铜脱氧	243
第二节 铜合金液的除气	245

一、氧化法除氢	245
二、沸腾法除氢	246
第三节 铜合金所用熔剂	246
一、覆盖熔剂	246
二、精炼熔剂	247
第四节 铜合金典型制备工艺	247
一、铜合金熔炼的一般原则	247
二、炉料管理及回炉料牌号判断	248
三、铜合金制备工艺要点	248
第十二章 锌合金制备技术	251
第一节 锌铝合金制备工艺	251
一、重力铸造锌铝合金的工艺特点	251
二、合金的熔化及浇铸工艺特点	252
三、锌合金溶液的特性	254
第二节 锌铝合金的细化处理	254
一、盐类细化剂	254
二、含钛中间合金细化剂	255
三、稀土细化处理	259
第十三章 钛合金制备技术	261
第一节 钛合金的物理化学特性	261
一、钛与氧的反应	261
二、钛与氮的反应	261
三、钛与空气的反应	262
四、钛与氢的反应	262
五、钛与水（气）的反应	263
第二节 钛合金典型制备工艺	264
一、非自耗电极电弧炉制备工艺	264
二、自耗电极电弧炉制备工艺	265
三、真空自耗电弧凝壳炉制备工艺	269
参考文献	271

第一章 铝 合 金

第一节 概 述

和铜、铁、钢相比，铝是年轻得多的金属。但是，铝在地壳中的蕴藏量极大，分布极广，据统计，地壳中铁占 4.7%，铝占 7.5%，比所有有色金属的总和还要多。

随着发电业的飞速进步，电冶铝迅速发展，1955 年铝的世界年产量已超过了铜的世界年产量，目前铝的世界年产量已远远超过 2000 万吨，今后，铝在所有金属结构材料中的比重将不断增加。

铝的密度小，塑性高，具有优良的导电和导热性，表面有致密的氧化膜保护，抗蚀性能好。在纯铝中加入其它金属或非金属元素，能配制各种可供压力加工或铸造用的铝合金，具有比纯铝更为优异的铸造性能和使用性能，由于铝的密度小，故其比强度（抗拉强度/密度）很高，远比灰铸铁、铜合金和球墨铸铁为高，仅次于镁合金、钛合金和高合金钢。

铝及其合金的上述优点决定了它在工业上愈来愈重要的地位和突飞猛进的发展。现在铝及其合金不但大量用于军事工业、农业、轻工业、重工业和交通运输事业，也广泛用作建筑结构材料、家庭生活用具和体育用品等。

本章所讨论的是常用铸造铝合金的成分、组织、性能以及它们的应用和发展动向。

一、工业纯铝的一般特性及应用

所有铸造铝合金都是在纯铝的基础上加入各种不同的元素制成的，主要成分是铝，因而其基本特性，如密度、熔点、导热性、线胀系数、收缩率等物理性能和化学性能、切削加工性能等都和纯铝的性能密切相关。表 1-1 简要列出了工业纯铝的各种性能。

表 1-1 工业纯铝的特性

项 目		性能指标	备 注
原子及晶体结构	原子序数	13	没有同素异晶转变
	元素的化合价	3	
	原子量	26.98	
	原子半径	0.143nm	
	晶格类型	面心立方晶格	
	晶格常数	0.404nm	
化学性能		在淡水、海水、空气、浓硝酸、硝酸盐、汽油、润滑油、各种有机物质中有良好的耐蚀性，但在碱、碳酸盐、盐酸及卤化物中耐蚀性很差	铝的化学活性很强，极易氧化，而形成致密的氧化膜，对某些物质能起保护作用
物理性能	密度 20℃(常态)	2.6996g/cm ³	99.97%Al
	700℃(液态)	2.371g/cm ³	
	熔点 99.996%Al	660.24℃	
	99.6%Al	658.7℃	
	沸点	2467℃	
	熔化潜热	388.116J/g	

续表

项 目		性能指标	备 注
物理性能	比热容 常温、固态	0.946J/(g·K)	99.7%Al
	熔点、液态	1.289J/(g·K)	
	热导率(0~100℃)	2.177W/(cm·K)	
	线胀系数(0~100℃)	23.6×10^{-6}	
	由液态变为固态时的收缩率	6.6%	
	电极电位(标准状况)	-1.3V	
	电导率	$38.2\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	
力学性能	弹性模量 E	69000~71000MPa	约为铜的 62%~65%
	抗拉强度 σ_b	90~120MPa	
	屈服强度 σ_s	20~90MPa	
	伸长率 δ	11%~25%	
	布氏硬度	24~32HB	
	冲击韧度 α_k	10~20J/cm ²	

从表 1-1 中所列数据可知纯铝的优良性能是多方面的。

铝的密度小，仅为铁的 1/3 左右。

铝的塑性高，可以采用锻、轧、压等压力加工方法制成各种管、板、棒、线等型材，如果压力加工后再经退火处理，纯铝的塑性更高，伸长率可达 30%~40%，用它可以制成厚度为 0.0006mm 左右的铝箔和极细的金属丝。

铝的导电、导热性能很好，仅次于银和铜，可用来制造电线、电缆等各种导电制品和各种散热器等导热元件。

铝和氧的亲合力很大，在室温下即能同空气中的氧结合生成极薄的 Al_2O_3 膜，膜厚约为 $2 \times 10^{-4}\text{mm}$ ，膜极致密，没有空隙，与铝基体的结合力很强，能阻止氧气向金属内部扩散而起保护作用。保护膜一旦破损后，能迅速生成新的薄膜，恢复其保护作用，因而在空气中有足够的抗蚀能力。但铝的抗蚀能力随杂质含量的增加而降低，特别是镁能严重破坏致密的 Al_2O_3 膜。

纯铝在冷的醋酸、硝酸和有机酸中，具有很高的抗蚀性能。酸的浓度愈高、温度愈低，其抗蚀性能愈好。浓的和稀的硫酸在低温中与铝的反应很慢，但热的浓硫酸却能与铝起剧烈的反应，产生 SO_2 气体。

碱类、盐酸、碳酸盐、食盐等能破坏氧化膜，引起铝的强烈腐蚀。因此，烧碱 (NaOH) 往往用作铝或铝合金的宏观组织腐蚀剂。

纯铝的熔点为 660.37°C ，随着杂质含量的增加，熔点下降。纯铝的沸点可达 2467°C ，当含有杂质时，沸点可能下降至 2100°C 左右。

铝有很高的熔化潜热，约为 388.116J/g ，比热容约为 $1.289\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 。如表 1-2 所示，1g 铝自 0°C 加热至熔点的热含量（包括熔化潜热）要比其它金属高得多，因而铝的熔点虽较低，但熔化时需要消耗较多的热能。

表 1-2 几种金属自 0°C 至熔点的热含量 /J·g⁻¹

金属名称	铝(Al)	铁(Fe)	铜(Cu)	铂(Pt)	银(Ag)	金(Au)
热含量	1081.45	1046.7	678.26	428.73	355.88	242.83

纯铝的力学性能较低，因纯度不同，波动范围较大。一般是纯度愈低，抗拉强度和硬度

2 此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

愈高而塑性愈低。

纯铝的浇铸温度为 700~750℃，流动性不好，铝的线收缩率是 1.7%~1.8%，体收缩率是 6.4%~6.6%，都较大，因此，纯铝的铸造性能差，容易产生热裂等铸造缺陷，很少用来浇铸各种铸件。纯铝的线胀系数也较其它常用金属大，见表 1-3。

表 1-3 纯铝和几种常用金属材料的线胀系数 α $/\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

材 料 名 称	温度范围/℃		
	20~100	20~200	20~200
纯铝	23.86	24.58	25.45
纯铜	17.2	17.5	17.9
碳钢	10.6~12.2	11.3~13.0	12.1~13.5
铸铁	8.7~11.1	8.5~11.6	10.1~12.2

工业纯铝中，经常含有铁和硅等杂质。这些杂质降低铝的塑性、导电性和导热性，并减弱氧化膜的保护作用，大大降低纯铝的化学稳定性。

综上所述，纯铝由于力学性能低、铸造性能差而主要用来配制铝合金，制作电线、电缆和制造家庭用器皿。

二、铸造铝合金的分类及其特点

在纯铝中加入一些其它金属或非金属元素所熔制的合金，不仅仍能保持纯铝的基本性能，而且由于合金化作用，使铝合金获得了良好的综合性能。

配制铝合金的元素，主要有硅、铜、镁、锌以及稀土元素等，它们在铝中的加入量较大，能强烈影响铝的力学性能和物理、化学性能。现在世界各国品种繁多的铸造铝合金，基本上都是由这几种元素和铝的合金化所派生出来的。国标列出了 Al-Si、Al-Cu、Al-Mg、Al-Zn 4 类 26 种牌号的铸造铝合金，参见表 1-4。

各类铸造铝合金的特点简述如下。

1. Al-Si 类合金（含 Si 量 $\geq 5\%$ ）

此类合金通常称为硅铝明。它具有优良的铸造性能，如收缩率小、流动性好、气密性好和热裂倾向小等，经过变质处理之后，还具有良好的力学性能、物理性能和切削加工性能，是铸造铝合金中品种最多、用量最大的合金。

2. Al-Cu 类合金（含 Cu 量 $\geq 4\%$ ）

具有较高的室温和高温力学性能，主要作为耐热和高强度铝合金应用。但铸造性能较差，抗蚀性也较低，线胀系数较大，有“永久生长”现象。此类合金大多作为耐热铝合金和高强度铝合金用。

3. Al-Mg 类合金（含 Mg 量 $\geq 5\%$ ）

具有非常优异的抗蚀性能，力学性能高，加工表面光亮美观，密度是现有铝合金中最小的。但熔炼、铸造工艺比较复杂，除用作耐蚀合金外，是发展高强度铝合金的基础之一，也可作为装饰用合金。

4. Al-Zn 类合金

锌在铝中的溶解度非常大，当铝中加入的锌大于 10%时，能显著提高合金的强度，它的最大优点是不需热处理就能使合金强化。但这种合金抗蚀性能差，有应力腐蚀倾向，铸造时容易产生热裂。

5. Al-RE（混合稀土）类合金

表 1-4 铸造铝合金牌号化学成分和力学性能①

类别	序号	合金牌号	合金代号	主要元素 / %							铸造方法②	合金状态③	力学性能④ (不低于)		
				Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	其它元素			抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	布氏硬度 (5/250/30)/ HBS
Al-Si 类	1	ZAlSi7Mg	ZL101	6.5~7.5		0.25~0.45					SB, RB, KB	T6	222	1	70
	2	ZAlSi7MgA ^⑤	ZL101A	6.5~7.5		0.25~0.45			0.08~0.20		SB, RB, KB	T6	271	2	90
	3	ZAlSi12	ZL102	10.0~13.0							SB, RB, KB	T2	133	4	50
	4	ZAlSi9Mg	ZL104	8.0~10.5		0.17~0.3		0.2~0.5			SB, RB, KB	T6	222	2	70
	5	ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.6					S, R, K	T6	222	0.5	70
	6	ZAlSi5Cu1MgA ^⑤	ZL105A	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.55					SB, R, K	T5	271	1	85
	7	ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	7.5~8.5	1.0~1.5	0.3~0.5		0.3~0.5	0.10~0.25		SB	T6	241	1	90
	8	ZAlSi7Cu4	ZL107	6.5~7.5	3.5~4.5						SB	T6	241	2.5	90
	9	ZAlSi12Cu2Mg	ZL108	11.0~13.0	1.0~2.0	0.4~1.0		0.3~0.9			J	T6	251		90
	10	ZAlSi12Cu1Mg11Ni1	ZL109	11.0~13.0	0.5~1.5	0.8~1.3					J	T6	241		100
	11	ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	8.0~11.0	1.3~1.8	0.4~0.6		0.10~0.35	0.10~0.35		SB	T6	251	1.5	90
Al-Cu 类	12	ZAlSi7Mg1A	ZL114A	6.5~7.5		0.45~0.60	1.2~1.8		0.10~0.20		SB	T5	290	2	85
	13	ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	4.8~6.2		0.4~0.65					S	T5	271	3.5	90
	14	ZAlSi8MgBe	ZL116	6.5~8.5		0.35~0.55			0.10~0.30		S	T5	290	2	85
	15	ZAlCu5Mn	ZL201		4.5~5.3				0.15~0.25		S, J, R, K	T5	330	4	90
	16	ZAlCu5MuA ^⑤	ZL201A		4.8~5.3				0.15~0.35		S, J, R, K	T5	388	8	100
	17	ZAlCu10	ZL202		9.0~11.0						S, J	T6	163		100
	18	ZAlCu4	ZL203		4.0~5.0						S, R, K	T5	212	3	70
	19	ZAlCu5MnCdA ^⑤	ZL204A		4.6~5.3				0.15~0.35		S	T5	437	4	100
	20	ZAlCu5MnCdVA ^⑤	ZL205A		4.6~5.3				0.15~0.25, V0.05~0.3, Zr0.05~0.2, B0.005~0.06		S	T6	467	3	140
	21	ZAlR5Cu3Si2	ZL207	1.6~2.0	3.0~3.4	0.15~0.25		0.3~0.5	0.15~0.35		S	T1	163		75
	22	ZAlMg10	ZL301			9.5~11.0					S, J, R	T4	280	9	60
Al-Mg 类	23	ZAlMg5Si1	ZL303	0.8~1.3		4.5~5.5		0.1~0.4			S, J, R, K	F	143	1	55
Al-Zn 类	24	ZAlMg8Zn1	ZL305			7.5~9.0	1.0~1.5		0.1~0.2		S	T4	290	8	90
	25	ZAlZn11Si7	ZL401	6.0~8.0		0.1~0.3	9.0~13.0				S, R, K	T1	192	2	80
	26	ZAlZn6Mg	ZL402			0.5~0.65	5.0~6.5		0.15~0.25		S	T1	222	4	65

① 本表中数据摘自国家标准“铸造铝合金技术条件”。

② S—砂型铸造；J—金属型铸造；R—熔模铸造；K—壳型铸造；B—变质处理。

③ F—铸态；T1—自然时效；T4—固溶处理后自然时效；T5—固溶处理后不完全人工时效；T6—固溶处理后完全人工时效。

④ 某些牌号合金可以采用多种铸造方法及不同热处理工艺，以得到不同的力学性能。

⑤ 牌号后面注有“A”字的，是优质合金，要求杂质含量总和低于0.8%。

高温强度高，热稳定性好，可用于在 350~400℃ 温度下工作的零件。只是其室温力学性能较差，目前应用不多，也未列入国标。

第二节 铝硅类合金

Al-Si 类合金一般以含 5%~14%Si 作为基本成分。它们在工业上应用的时间虽然较 Al-Cu 类合金为晚，但由于它具有良好的铸造性能、力学性能和物理性能等，而获得最广泛的应用。

一、铝硅合金的成分、组织、性能及用途

(一) Al-Si 二元相图

Al-Si 二元合金具有简单的共晶型相图（图 1-1）。室温下仅形成 α 和 β 两种相。 α 相是 Si 溶于 Al 中的固溶体，性能和纯铝相似，所以也可以写成 (Al) 相。在共晶温度 577℃ 时，Si 的最大溶解度是 1.65%，室温时只有 0.05%， β 相是 Al 溶于 Si 的固溶体，其溶解度至今尚未完全确定，其量极微，故可将 β 相看成是纯硅。当含 Si 量在 1.65%~12.6% 时，结晶过程中先析出 α 相，到 577℃ 时，析出 (α + β) 共晶体。通常把共晶体中的 β 相称为共晶 Si，它在铸态下若不经变质处理，呈粗大的片状；共晶和过共晶成分的合金组织中出现的初晶母相称为初晶 Si，它在铸态下若不经变质处理，呈粗大的多角形块状或板状。

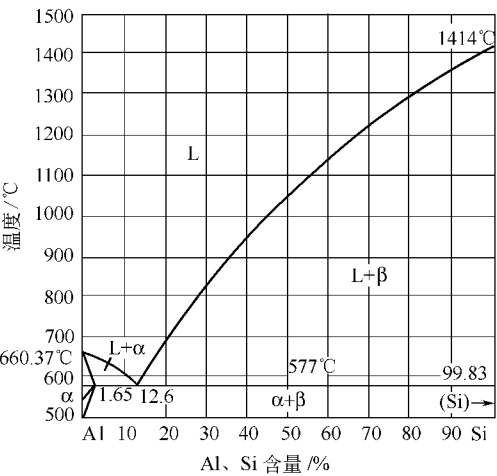


图 1-1 Al-Si 二元相图

(二) 含 Si 量对合金组织和性能的影响

1. 含 Si 量对铸造性能的影响

二元 Al-Si 合金中，随着含 Si 量的增加，合金的结晶温度范围不断变小，组织中共晶体的数量逐渐增加，因此，合金的流动性（充型能力）显著提高（图 1-2）。

纯铝的线收缩率较大，但 Si 几乎不收缩，因此，随着含 Si 量的增加，合金的线收缩率也随之下落，热裂倾向也相应减少。

根据生产经验，当含 5%Si 时，合金已有相当好的充型能力；含 Si 增至 6% 时，可消除热裂；至 9% 时，已无疏松现象，能获得组织致密的铸件。故常用 Al-Si 合金的含 Si 量均在 5% 以上。

对于一般铸造合金来说，结晶温度范围愈大，流动性应当愈差，但过共晶 Al-Si 合金凝固时，由于初晶 Si 析出，放出大量结晶潜热（Si 的结晶潜热为 1808.69J/g，而 Al 仅为 388.116J/g），所以含 Si 量较多，直至含 Si 20%~22% 时离开共晶点较远，合金仍有比共晶合金更好的流动性。从图 1-2 可见，含 Si 为 16%~18% 时，流动性最好。

2. 含 Si 量对力学性能的影响

图 1-3 表示含 Si 量对 Al-Si 二元合金砂型铸件力学性能的影响。

随着合金中含 Si 量的增加，组织中的 Si 相不断增加，提高了合金的抗拉强度。但 Si 相在未经变质处理以前，在共晶体中一般都呈片状分布，严重地割裂了基体，由于应力集中的

结果，使伸长率显著降低；当含 Si 量超过 13%~14% 时，伸长率只有 1% 以下；抗拉强度也只有 100MPa 左右，失去了使用价值。

经过变质以后，抗拉强度可提高到 200MPa 以上，伸长率可达 6%~12%，解决了 Al-Si 类合金优良的铸造性能与低劣的力学性能这对矛盾，使这一类合金得到了推广使用。

含 Si 量大于 14% 的过共晶 Al-Si 二元合金，随着含 Si 量的增加，由于大量大块状的初晶 Si 析出，抗拉强度和伸长率都急剧下降，对共晶 Si 变质的方法已不见效，而必须细化初晶 Si，并配入强化合金元素以改善力学性能，才有实用价值。

3. 含 Si 量对合金某些物理、化学性能的影响

Si 的相对密度只有 2.35，比 Al 还要小，所以合金中 Si 量增加，相对密度也直线下降（图 1-4）。无论是溶入 α 固溶体内的 Si 或者是共晶 Si、初晶 Si，都大大降低合金的导电性能。图 1-4 中，直线 K 表示合金在 300℃ 回火状态下的电导率变化；曲线 K' 表示合金在 500℃ 淬火状态下的电导率变化，当含 Si 量在 0~1.65% 之间时，在 500℃ 时几乎全部溶入 α 固溶体中，在该温度下急冷，使 α 固溶体处于过饱和状态，电导率急剧下降，因而出现明显的转折点，随后 Si 量再增加时即和 K 直线相平行，这时影响电导率的因素由共晶 Si 和初晶 Si 所决定，所以两种热处理状态对电导率的影响相似。Si 量对导热性能的影响与此相类似。

含 Si 量对 Al-Si 合金耐磨性、耐蚀性、线胀系数的影响见图 1-5。

Si 的显微硬度为 1000~1300HV，而纯 Al 的显微硬度只有 60~100HV，有 Si 相析出的 Al-Si 合金，是软的基体上分布着很多硬质点的理想的耐磨材料（图 1-6），所以合金的磨损量将随含 Si 量的增加而不断减少。

纯 Al 在 0~100℃ 时，每 1℃ 的线胀系数 $\alpha = 23.5 \times 10^{-6}$ ，而 Si 的 $\alpha = 7.6 \times 10^{-6}$ ，相差 3 倍多，所以含 Si 量愈高，合金的线胀系数愈小。这就是 Al-Si 合金能广泛应用于活塞的重要原因。

Al-Si 合金的表面有致密的 Al_2O_3 和 SiO_2 保护膜存在，组织中 α 基体和 Si 相的电位差不大，因此合金有良好的抗蚀性能，甚至在海水中经相当时间的浸蚀后，仍能保持原来的力学性能，应力腐蚀的倾向也很小。图 1-5 表示随着含 Si 量增加，合金腐蚀的量减少。

4. 含 Si 量对 Al-Si 合金切削性能的影响

Al-Si 类合金的切削加工性能较 Al-Cu、Al-Mg 类铸造铝合金差，但比纯 Al 要好。纯

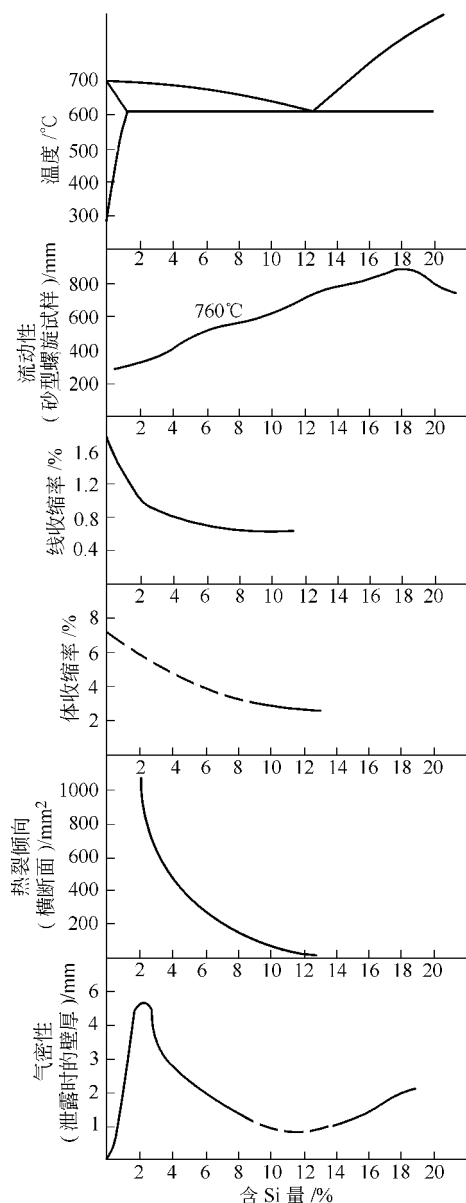


图 1-2 含 Si 量对 Al-Si 二元合金铸造性能的影响

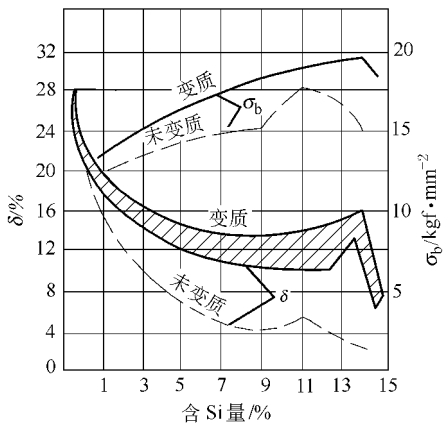


图 1-3 含 Si 量对 Al-Si 二元合金力学性能的影响
 $1\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-2} = 9806.65\text{kPa}$

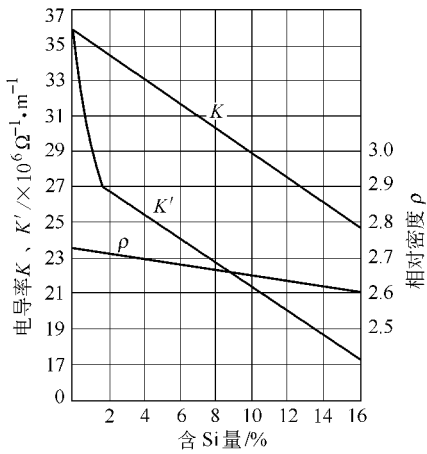


图 1-4 含 Si 量对 Al-Si 合金相对密度、电导率的影响

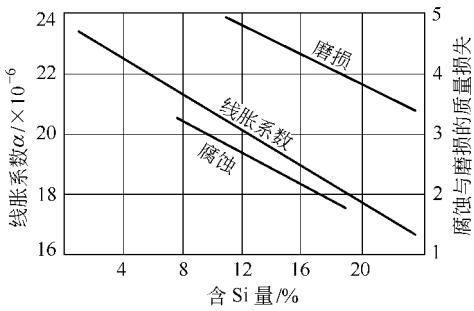


图 1-5 含 Si 量对 Al-Si 合金耐磨性、耐蚀性、线胀系数的影响

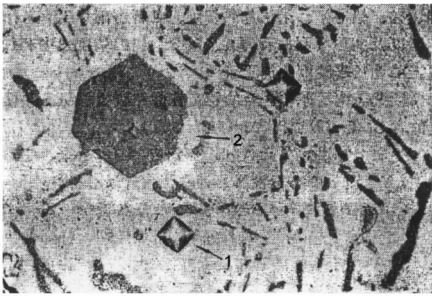


图 1-6 铝基体和初晶 Si 显微硬度的对比
1—铝基体 (95HV)；2—初晶 Si (938HV)

Al 的塑性很大，把它由塑性状态转变为脆性状态并使之破裂需消耗很大的功（图 1-7）。合金中 Si 量增加，共晶体增多，就使切削过程变得较为容易。特别是经变质后的合金，晶粒细化，消耗的切削功可以减小。同样，因为纯 Al 的塑性大，加工后的表面光洁度差，表面粗糙度大，共晶合金的光洁度反较纯 Al 为好。

从图 1-7 可看出，在过共晶范围内（15%~17%Si），随着含 Si 量的增加，切削功下降，所以切削加工不会遇到太大的困难。问题是工件的表面光洁度很差。因为过共晶 Al-Si 合金是由高塑性的 Al 和高脆性的初晶 Si 所组成的复合材料，切削加工时，Al 的塑性大，熔点低，易在工件表面与刀尖接触处产生积屑瘤（刀瘤），随后与破碎的初晶 Si 一起，使工件部分表皮剥落，形成刀痕，因而使表面光洁度变坏，同时，刀具也容易磨损。含 Si 量增至 17%~26%时，磨损得更厉害。因此，过共晶 Al-Si 合金能否用于大批大量生产的零件，在很大程度上取决于它的切削加工性能的改善。

改善过共晶 Al-Si 合金的切削加工性能，可以通过充分细化初晶 Si，加入易切削元素（如锡、铋、铅等），采用加热切削、电解磨削等工艺，以及使用金刚钻石刀具，配合恰当的切削速度和加入切削液等途径，据报道能获得表面光洁度近乎镜面的加工表面。

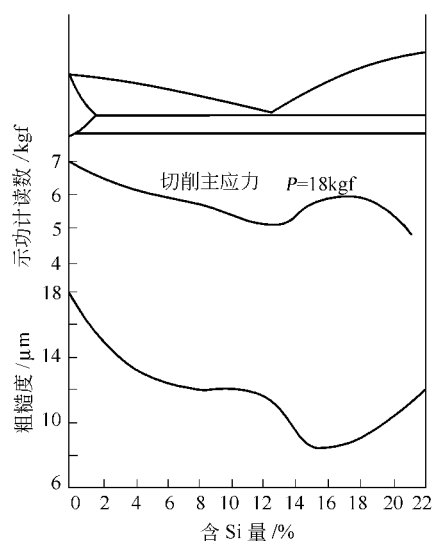


图 1-7 含 Si 量对合金切削性能的影响

1 kgf = 9.80665 N

因此,为了兼顾合金的铸造性能和力学性能,并使切削加工性能不致太差,Al-Si 合金的含 Si 量一般选择在 7%~13% 左右。

生产上常用的二元 Al-Si 合金是 ZL102 合金,它具有下面一些特点。

(1) ZL102 合金没有热处理强化效果,力学性能不高。但耐磨性、抗蚀性和耐热性比含 5%~10% Si 的亚共晶合金好。

(2) 为了提高 ZL102 合金的力学性能,特别是塑性,通常需进行变质处理。

(3) 由于合金处于共晶成分,结晶温度范围极小,具有最佳的铸造性能:很好的流动性,热裂倾向小,不致形成分散性疏松,能获得致密的耐渗漏的铸件,合金的集中缩孔倾向大,可以通过设置必要的冒口而获得高质量铸件。

(4) 由于含 Si 较多,除本身带入氢气外,Si 能降低氢在 Al 液凝固时的溶解度,并使 Al 液的黏度增加,表面张力增大,阻碍了气泡的成长和上浮,这样便使铸件中形成针孔。所以熔炼过程中必须细心地进行精炼除气。

(5) ZL102 合金适于铸造薄壁的、形状复杂的、强度要求不高的零件和压铸件,如各种仪表的壳体等。

二、提高铝硅合金性能的主要途径

为了既能保持 Al-Si 合金的固有优点,又能使力学性能有更大幅度的提高,近几十年来,世界各国铸铝工作者研究并采用了不少行之有效的措施,使这类合金的抗拉强度有的高达 300~400MPa,伸长率也可达到很高的数值,使其应用更为广泛。

(一) Al-Si 合金的变质处理

Al-Si 合金随着含 Si 量的增加,共晶体随之增加,虽然铸造性能获得改善,但组织中出现针状的共晶 Si,甚至出现粗大的多角形板状初晶 Si,严重地割裂了 Al 基体,在 Si 相的尖端和棱角处引起应力集中,合金容易沿晶粒的边界处开裂,或者板状 Si 本身开裂而形成裂纹,使合金变脆,力学性能特别是伸长率显著降低,切削加工性能也不好。因此,此类合金当含 Si 量高于 6% 时,必须进行变质处理。

Al-Si 合金的变质或细化,应包括初晶 α 固溶体、共晶体和初晶 Si 三个部分。虽然通过激冷、高压下结晶等方法也能使这三部分组织细化,但生产上通常是采用加入变质(细化)剂或元素来实现的。

对于含 Si 量较高(>6%)的 Al-Si 合金,影响合金组织性能的主要因素是(α +Si)共晶体和初晶 Si。如果不经变质处理,单纯靠加入细化 α 固溶体的元素来改善共晶体(α +Si)的形状和粒度,往往收效甚微。所以对 Al-Si 类共晶型合金,应强调共晶体(α +Si)的变质处理,而对于固溶体型合金(如 Al-Cu、Al-Mg 等类),影响合金组织、性能的主要因素是 α 固溶体,细化 α 固溶体乃是强化合金的重要手段,这一类型的细化原理将在本章第三节中讨论。

1. 共晶体的变质

共晶成分的合金组织,通过加 Na(钠)或 Na 盐变质处理,由原来的粗片状共晶体