

中南大学出版社“十五”规划有色金属图书

# 铸造 铝合金

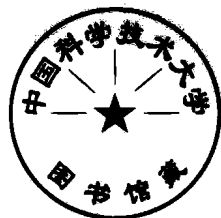
田荣璋 编著



中南大学出版社

# 铸造铝合金

田荣璋 编著



中南大学出版社

---

图书在版编目(CIP)数据

铸造铝合金/田荣璋编著. —长沙:中南大学出版社,2006.9  
ISBN 7-81105-347-0

I. 铸… II. 田… III. 铝合金—铸造 IV. TG292

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 110025 号

---

铸造铝合金

田荣璋 编著

---

责任编辑 程 滨

责任印制 汤庶平

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:0731-8876770

传真:0731-8710482

印 装 衡阳博艺印务有限责任公司

---

开 本 880×1230 1/32 印张 16 字数 395 千字 插页 1

版 次 2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-81105-347-0/TO·011

定 价 45.00 元

---

图书出现印装问题,请与经销商调换

## 前 言

铝在地壳中的丰度仅次于氧和硅，超过铁，为地球上储量最多的金属元素。中国近些年来，在“优先发展铝”的政策指导下，铝产量飞速发展，2005年产铝量达780.6万t，居世界首位。中国已成为世界上产铝大国，用铝大国，出口铝大国。

铸造铝合金是铝合金中的一个大类，中国年用量超过全部用铝量的25%（即超过200万t）。中国从事铝铸造的企业甚多，大型的较少。其产量、产品和技术与世界先进水平比较，还有较大差距。比如，中国铝压铸件占铸件比例还不到50%，合金状态尚无完整体系，品种少，品质一般。仅就汽车用铝铸件（平均），中国为70kg/辆，而世界先进水平为150kg/辆以上。再生铝产量比世界先进水平差10个百分点，而且再生铝企业一般规模小，回收方式与技术落后。要想很快地接近或达到世界先进水平，切记“科学技术是第一生产力”这一理论。掌握知识和技术，依靠科技进步和科技创新，把知识和技术转化为现实生产力。

编者近些年到过不少铝合金铸造厂参观、考查、学习和帮助解决技术问题，深知对铝合金铸造企业的最大支持是技术的教育和传播，而且需要反复地进行才能凑效。因为这些企业（特别是中小企业）技术培训人员少、设备陈旧、技术落后、生产管理较弱、与外界联系少、互相交流经验机会不多和技术资料匮乏，等等。据了解，铸造铝合金知识，多散落在各种有关的图书资料中，尚无一本阐述铸造铝合金的、普及技术知识的专门著作。有些长期从事铝铸造技术工作的同仁，如上海铝业协会李乐泉高级工程师、长沙万方合金制造有限公司总经理肖三等，曾多次建议我写

一本这类的书籍，供铝合金铸造厂职工学习、查阅之用。由于编者工作较多，拖到今日才完稿付梓，总算完成了一个许愿。如果这本小书能够在铝合金铸造行业中起点作用，编者会感到无限地欣慰。

《铸造铝合金》是一本针对企业熟练技术工人和工程技术人员编写的实用性普及技术读物，对大学生和研究生均可作参考书，适宜办培训班做教材。

在编写《铸造铝合金》的过程中，得到很多业内同仁、企业负责人和工程技术人员鼓励，在此表示感谢。书中参考选用不少图书和文章的内容，对这些图书和文章的作者和出版者表示真诚的谢意。特别应该感谢的还有韩德伟教授和谢先娇高级工程师，为编写《铸造铝合金》提供了大量帮助。

书中不足和谬误，请读者批评指正，留再版时改正。

编 者

2006年6月

# 目 录

<b>第1章 概 述</b> .....	(1)
1.1 铝工业发展简史 .....	(1)
1.2 铝的资源 .....	(2)
1.3 铝的冶炼 .....	(3)
1.3.1 氧化铝生产 .....	(3)
1.3.2 电解铝(原铝)生产 .....	(4)
1.3.3 电解铝锭牌号及化学成分 .....	(5)
1.4 国内外铝的产量及消费量 .....	(8)
1.4.1 世界原铝供应及消费情况 .....	(8)
1.4.2 国内电解铝生产及消费情况 .....	(9)
1.5 铝的性质及用途 .....	(10)
1.5.1 铝的性质 .....	(10)
1.5.2 铝的用途 .....	(11)
1.5.3 铝的消费结构 .....	(12)
1.6 中国铝铸件生产情况 .....	(16)
1.7 中国铝工业发展政策 .....	(18)
<b>第2章 常用物理化学基础知识</b> .....	(21)
2.1 化学元素周期表 .....	(21)
2.2 元素物理常数 .....	(21)
2.3 元素物理性质 .....	(21)
2.4 相图 .....	(40)

2.4.1	铝合金二元相图 .....	(40)
2.4.2	铝合金二元相图类型 .....	(41)
2.5	铝合金中相、晶格类型和晶格常数 .....	(48)
<b>第3章</b>	<b>铸造铝合金 .....</b>	<b>(58)</b>
3.1	标 示 .....	(58)
3.2	铸造铝合金的分类和化学成分 .....	(59)
3.2.1	铸造铝合金的分类 .....	(59)
3.2.2	铸造铝合金的牌号、代号及化学成分 .....	(60)
3.2.3	铸造铝合金各国间牌号对照 .....	(69)
3.3	铸造铝合金的性能 .....	(73)
3.3.1	铸造铝合金的力学性能 .....	(73)
3.3.2	铸造铝合金的物理性能 .....	(79)
3.3.3	铸造铝合金的性能比较 .....	(87)
3.4	铸造铝合金的重要特点及用途 .....	(88)
3.5	铸造铝合金物理冶金基础 .....	(90)
3.5.1	铝硅系铸造铝合金 .....	(91)
3.5.2	铝铜系铸造铝合金 .....	(123)
3.5.3	铝镁系铸造铝合金 .....	(139)
3.5.4	铝锌系铸造铝合金 .....	(144)
3.6	改善合金的途径 .....	(150)
<b>第4章</b>	<b>铝合金熔体性质与铸造性能 .....</b>	<b>(151)</b>
4.1	合金化基本原理 .....	(151)
4.1.1	合金化的目的 .....	(151)
4.1.2	合金化过程 .....	(152)
4.1.3	固态金属的结构 .....	(153)
4.1.4	液态金属的结构 .....	(155)

---

4.2 铝合金熔体的物理性质 .....	(157)
4.2.1 铝合金熔体的密度 .....	(157)
4.2.2 铝合金熔体的粘度 .....	(159)
4.2.3 铝合金的表面张力 .....	(161)
4.3 铝合金的铸造性能 .....	(162)
4.3.1 准固相线概念 .....	(162)
4.3.2 合金熔体的流动性 .....	(164)
4.3.3 合金的收缩性 .....	(169)
4.3.4 铸件裂纹 .....	(174)
<b>第5章 氧化、吸气的危害性及熔体净化处理 .....</b>	<b>(178)</b>
5.1 金属氧化及夹杂的危害性 .....	(178)
5.1.1 金属与氧的作用 .....	(178)
5.1.2 铝和水汽的反应 .....	(184)
5.1.3 夹杂 .....	(186)
5.2 铝合金中的气体及其危害性 .....	(188)
5.2.1 铝合金中的气体 .....	(188)
5.2.2 铝熔体的吸气过程 .....	(190)
5.2.3 熔体中氢的危害 .....	(194)
5.3 熔体净化处理 .....	(196)
5.3.1 铝合金熔体的保护 .....	(196)
5.3.2 氢从铝熔体中析出过程 .....	(197)
5.3.3 熔体净化处理 .....	(199)
<b>第6章 铸件组织与熔体组织处理 .....</b>	<b>(215)</b>
6.1 铸件组织及细晶强化 .....	(215)
6.1.1 金属结晶原理 .....	(215)
6.1.2 铸件组织 .....	(219)



6.1.3. 铝合金细晶强化 .....	(223)
6.2 熔体组织处理 .....	(224)
6.2.1 变质处理 .....	(225)
6.2.2 细化固溶体组织 .....	(245)
6.2.3 改变化合物的形态 .....	(249)
6.2.4 消除易熔相有害影响 .....	(250)
<b>第7章 炉料及主要辅助材料 .....</b>	<b>(251)</b>
7.1 炉料 .....	(251)
7.1.1 纯金属 .....	(251)
7.1.2 中间合金 .....	(252)
7.1.3 回炉料 .....	(252)
7.1.4 铸造铝合金锭 .....	(259)
7.1.5 合金元素添加剂 .....	(267)
7.2 辅助材料 .....	(267)
7.2.1 熔炼用工艺辅助材料 .....	(267)
7.2.2 固态熔剂 .....	(268)
7.2.3 涂料 .....	(273)
7.3 熔剂生产的探讨 .....	(274)
7.3.1 概述 .....	(274)
7.3.2 熔剂成分选择 .....	(280)
7.3.3 铝合金用熔剂的标准 .....	(289)
7.4 中间合金生产 .....	(292)
7.4.1 概述 .....	(292)
7.4.2 生产工艺 .....	(293)
7.5 金属添加剂生产 .....	(299)
7.5.1 概述 .....	(299)
7.5.2 生产工艺 .....	(302)

---

7.6 添加合金元素方法的比较 .....	(303)
7.6.1 添加合金元素的方法 .....	(303)
7.6.2 添加合金元素方法的优缺点 .....	(304)
<b>第8章 铝合金的熔炼 .....</b>	<b>(306)</b>
8.1 熔炼设备选择 .....	(306)
8.1.1 电炉 .....	(306)
8.1.2 燃料炉(火焰炉) .....	(309)
8.2 金属的加热过程 .....	(312)
8.2.1 热效率计算 .....	(312)
8.2.2 电阻炉与燃料炉的比较 .....	(313)
8.3 熔炼工艺 .....	(315)
8.3.1 熔炼前准备工作 .....	(315)
8.3.2 装炉 .....	(324)
8.3.3 熔炼工艺 .....	(325)
8.3.4 浇注 .....	(328)
8.3.5 熔炼条件对铝合金熔体品质的影响 .....	(328)
8.3.6 熔炼工艺举例 .....	(330)
<b>第9章 铝合金的铸造 .....</b>	<b>(333)</b>
9.1 概述 .....	(333)
9.2 砂型铸造 .....	(343)
9.3 金属型铸造 .....	(344)
9.4 压力铸造 .....	(347)
9.5 低压铸造 .....	(351)
9.6 差压铸造 .....	(353)
9.6.1 增压法 .....	(355)
9.6.2 减压法 .....	(355)

9.7 真空吸铸 .....	(356)
9.8 熔模铸造 .....	(357)
9.9 石膏型精密铸造 .....	(358)
9.9.1 石膏型熔模精密铸造 .....	(359)
9.9.2 石膏型取模精密铸造 .....	(359)
9.10 挤压铸造 .....	(359)
9.11 半固态铸造 .....	(361)
9.11.1 流变成形 .....	(362)
9.11.2 触变成形 .....	(363)
9.12 铝合金常见铸造缺陷 .....	(364)
9.13 铸件表面处理 .....	(368)
9.13.1 精整 .....	(368)
9.13.2 阳极氧化 .....	(369)
9.13.3 电镀 .....	(369)
9.13.4 焊补 .....	(370)
9.13.5 浸渗 .....	(375)
<b>第10章 铝合金铸件热处理 .....</b>	<b>(377)</b>
10.1 铸造铝合金热处理状态及代号 .....	(377)
10.2 热处理原理 .....	(380)
10.2.1 铸造铝合金的组织特征 .....	(380)
10.2.2 铸造铝合金组织加热和冷却时的变化 .....	(383)
10.2.3 时效 .....	(384)
10.2.4 淬火及时效工艺制订原则 .....	(388)
10.3 铸造铝合金常用的热处理工艺 .....	(391)
10.4 热处理设备 .....	(398)
10.4.1 热处理炉 .....	(398)
10.4.2 淬火冷却设备 .....	(399)

---

10.5	热处理缺陷及其防止方法 .....	(401)
10.6	热处理对合金组织和性能的影响 .....	(403)
10.7	铸造铝硅合金过烧组织鉴别 .....	(415)
<b>第 11 章</b>	<b>铝合金铸件(锭)的检验 .....</b>	<b>(420)</b>
11.1	概 述 .....	(420)
11.2	力学性能检测 .....	(422)
11.2.1	抗拉性能检测 .....	(422)
11.2.2	冲击性能检测 .....	(436)
11.2.3	硬度检测 .....	(439)
11.3	金相组织分析 .....	(451)
11.3.1	宏观分析 .....	(451)
11.3.2	微观分析 .....	(463)
<b>第 12 章</b>	<b>废铝再生利用 .....</b>	<b>(475)</b>
12.1	概 述 .....	(475)
12.2	废铝回收 .....	(477)
12.2.1	废铝回收的意义和政策 .....	(477)
12.2.2	废铝的分类和技术要求 .....	(479)
12.3	再生铝的生产 .....	(481)
12.3.1	再生铝生产 .....	(482)
12.3.2	铝灰渣处理及烟尘排放 .....	(488)
<b>参考文献</b>	.....	<b>(491)</b>

# 第1章 概述

## 1.1 铝工业发展简史

铝(Aluminium), 元素符号为 Al, 银白色, 在化学元素周期表中属 III A 族。

Aluminium 一词是从古罗马语 Alumen (明矾) 衍生而来的。1746 年德国科学家波特(J. H. Pott)用明矾制得氧化铝。1807 年英国人戴维(H. Davy)试图电解熔融氧化铝得到金属铝未成功。1809 年戴维给预想的金属取名为 Alumiun, 后改为 Aluminium。1825 年丹麦科学家奥斯忒(H. C. Oersted)用钾汞齐还原无水氯化铝, 首次获得几毫克金属铝。1827 年德国科学家沃勒(F. Wohler)用钾还原氧化铝得到少量金属铝。1854 年法国科学家德维勒(S. C. Deville)用钠还原  $\text{NaAlCl}_4$  络合盐, 制得金属铝, 并建厂生产一些铝制头盔、餐具及玩具, 其价格昂贵超过黄金。1886 年美国霍尔(C. M. Hall)和法国厄鲁特(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。1888 年美国匹兹保建立第一家电解铝厂, 铝生产进入一个新阶段。

1888 年发明的拜耳法, 是由铝土矿生产氧化铝。因为直流电解技术的进步, 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, 铝本身已成为一种普通常用金属。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

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45000 t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,使铝的需求量逐年增加。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。

## 1.2 铝的资源

在地壳中,铝的丰度为8.2 g/kg,次于氧和硅超过了铁,为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( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、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。

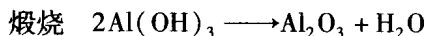
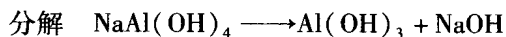
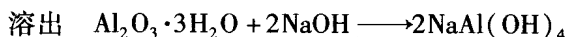
世界上 90% 以上的氧化铝是用铝土矿生产出来的。全世界已探明铝土矿储量有 550 ~ 750 亿 t, 其中分布情况为加勒比地区和中美洲 20 ~ 30 亿 t, 南美洲 190 ~ 250 亿 t, 欧洲 30 ~ 40 亿 t, 非洲 150 ~ 200 亿 t, 亚洲 80 ~ 130 亿 t, 澳洲 70 ~ 100 亿 t。我国已探明铝土矿约 310 处, 保有储量达 22.7 亿 t。中国的铝土矿主要分布于河南、山西、贵州、山东和广西等地, 多数为低铁高硅的一水硬铝型, 主要杂质是高岭石中的  $\text{SiO}_2$  和少量的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ ; 此外, 浙江、安徽两省有以亿 t 计的钾明矾石矿, 云南等地有较丰富的霞石资源。

## 1.3 铝的冶炼

生产金属铝(电解铝), 第一步先生产氧化铝。世界上的氧化铝几乎都是用碱法生产的, 分拜耳法、烧结法和拜耳-烧结联合法, 以拜耳法为主。生产 1 t 金属铝需要两吨氧化铝。

### 1.3.1 氧化铝生产

(1) 拜耳法 拜耳法适用于铝硅比高的铝土矿, 优点是流程简单、投资省和能耗低。原理是用氢氧化钠 ( $\text{NaOH}$ ) 溶液溶出铝土矿中的氧化铝, 得到铝酸钠溶液。溶液与赤泥分离, 净化后降低温度, 加入氢氧化铝作晶种, 经长时间的搅拌, 析出氢氧化铝, 洗涤并在高温煅烧成氧化铝成品。拜耳法的简单化学反应如下:

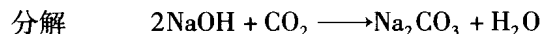
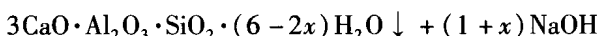
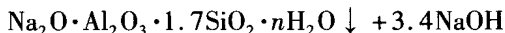
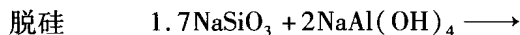
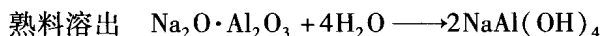
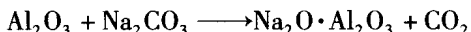


由于三水铝石、一水软铝石和一水硬铝石的矿物性质差别, 在

氢氧化钠溶液中溶解性有很大差异，所以，溶出温度也不同。

(2) 碱石灰烧结法 适用于处理铝硅比低的铝土矿。将铝土矿、碳酸钠和石灰石按一定比例混合配料，在回转窑内烧结成由铝酸钠 ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )、铁酸钠 ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ )、原硅酸钙 ( $2\text{Ca}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ )、钛酸钙 ( $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ ) 组成的熟料。用稀碱溶液溶出熟料中的铝硅酸钠，经过专门的脱硅过程，使溶液提纯。把  $\text{CO}_2$  气体通入精制铝酸钠溶液，加入晶种搅拌，得到氢氧化铝沉淀物，经煅烧为氧化铝成品。

碱石灰烧结法的主要化学反应如下：



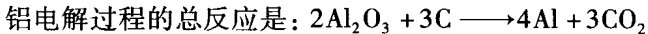
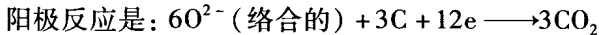
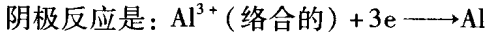
(3) 拜耳 - 烧结联合法 联合法以拜耳法为主，辅以烧结法，分为串联法、并联法和混联法，可充分发挥两法优点，适用于较低铝硅比的铝土矿。

### 1.3.2 电解铝(原铝)生产

铝电解 (electrolytic aluminium) 生产的原理是直流电通过以氧化铝为原料和冰晶石为熔剂的电解质。在  $950 \sim 970^\circ\text{C}$  使电解质溶液中氧化铝分解为铝和氧，阴极上析出铝，阳极上析出  $\text{CO}_2$  和  $\text{CO}$  气体。冰晶石 - 氧化铝溶液具有离子结构，其中，阳离子有  $\text{Na}^+$  和少量  $\text{Al}^{3+}$ ，阴离子有  $\text{AlF}_6^{3-}$ 、 $\text{AlF}_4^-$  和  $\text{Al-O-F}$  络合离子以及少量  $\text{O}^{2-}$  和  $\text{F}^-$ 。在  $1000^\circ\text{C}$  下，钠的析出电位比铝大约负



250 mV。由于阴极上离子的放电不存在很大的过电压，所以



在冰晶石-氧化铝溶液中， $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量一般保持 3% ~ 5%，为了改善电解质的性质，通常添加铝、镁、钙和锂的氟化物。

在阴极上析出的铝液汇集到电解槽底部，而阳极上析出的二氧化碳和一氧化碳气体进入空气中。铝液从电解槽中抽出放进混合炉中，经过净化，铸成电解铝(原铝)锭。铝电解流程见图 1.1。

### 1.3.3 电解铝锭牌号及化学成分

(1) 重熔用铝锭(电解铝锭又称原铝锭)牌号和成分应符合 GB/T 1196—1993 规定。牌号及化学成分见表 1.1。

表 1.1 重熔用铝锭牌号及化学成分

牌 号	化 学 成 分 / %							
	Al	杂质，不大于						总和
		不小于	Fe	Si	Cu	Ca	Mg	
Al99.85	99.85	0.12	0.08	0.005	0.030	0.030	0.015	0.15
Al99.80	99.80	0.15	0.10	0.01	0.03	0.03	0.02	0.20
Al99.70	99.70	0.20	0.13	0.01	0.03	0.03	0.03	0.30
Al99.60	99.60	0.25	0.18	0.01	0.03	0.03	0.03	0.40
Al99.50	99.50	0.30	0.25	0.02	0.03	0.05	0.03	0.50
Al99.00	99.00	0.50	0.45	0.02	0.05	0.05	0.05	1.00

注：①铝含量为 100.00% 与含量等于或大于 0.010% 的所有杂质总和的差值。

②表中未规定的其他杂质元素，如 Zn、Mn、Ti 等，供方可不做常规分析，但应定期分析。

③对于表中未规定的其他杂质元素的含量，如需方有特殊要求时，可由供需双方另行协议。

④分析数值的判定采用修约比较法，数值修约规则按 GB 8170 第 3 章的有关规定进行。修约数位与表中所列极限数位一致。

国际间重熔用铝锭牌号近似对照表，见表 1.2。