

# 冶金学

下卷 有色金属冶金

主编 邱竹贤



NEUPRESS  
东北大学出版社



# 冶金学

下卷 有色金属冶金

主编简介



邱竹贤，1921年农历4月12日生，江苏省海门县人，1943年毕业于交通大学唐山工程学院矿冶系。毕业后，先后在四川电化冶炼厂、台湾高雄铝厂和抚顺铝厂任技术员、工程师。1955年调入东北大学任教至今，现为教授、博士生导师、中国工程院院士、挪威科学院院士。在轻金属冶金和融盐电化学方面有重大贡献。与人合作编写本科生教材《铝电解》（冶金工业出版社1982年第一版，1995年第二版）；独著、合著、合译学术著作18部。

ISBN 7-81054-571-X



9 787810 545716 >

ISBN 7-81054-571-X  
TF·14 定价：29.80元

TF01  
28/2

TF01  
21

# 冶金学

下卷 有色金属冶金

主 编 邱竹贤  
副主编 徐家振

## 内 容 简 介

本书是根据我国高等学校面向 21 世纪教学改革的精神,按照冶金工程专业的教学计划要求而编写的本科生教材。全书分上、下两卷。下卷包括铝冶金、镁冶金、铜冶金、锌冶金、镍冶金、钛冶金、钨冶金、稀土冶金和贵金属冶金等 10 章内容。

本书是作者在积累多年钢铁冶金、有色金属冶金、冶金物理化学专业本科生教学经验的基础上,为了适应高等学校进行素质教育,培养具有创新能力的科技人才,加强基础,拓宽专业面的需要而编写的新型教材。全书重点阐述冶金过程基本原理及冶金工艺流程,介绍现代冶金新方法。

本书内容丰富系统,资料翔实准确,语言简练明快,适合于冶金工程专业(或钢铁冶金、有色金属冶金、冶金物理化学专业)本科生教学使用,亦可作为冶金科技人员的案头必备参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

冶金学. 下卷, 有色金属冶金/邱竹贤主编. —沈阳: 东北大学出版社, 2001. 10  
ISBN 7-81054-571-X

I. 冶… II. 邱… III. ① 冶金学 ② 有色金属冶金 IV. TF01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 071462 号

©东北大学出版社出版

(沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 邮政编码 110004)

电话:(024)23890881(社务室) (024)23892538(传 真)

83687331(发行部) 83687332(出版部)

网址:<http://www.neupress.com> E-mail:[neuph@neupress.com](mailto:neuph@neupress.com)

北宁市印刷厂印刷

东北大学出版社发行

开本:787mm×1092mm 1/16

字数:459 千字

印张:18.5

2001 年 10 月第 1 版

2001 年 10 月第 1 次印刷

责任编辑:郭爱民 刘淑芳

责任校对:米 戎

封面设计:唐敏智

责任出版:秦 力

定价:29.80 元

# 前 言

现代冶金工业通常把金属分为黑色金属和有色金属（或者钢铁和非铁金属）两大类。铁、铬、锰三种金属称为黑色金属，其余各种金属——例如铝、镁、钛、铜、铅、锌、钨、钼、稀土、金、银等数十种金属，称为有色金属。

按照金属的密度、化学特性、在自然界中的分布状况，以及习惯称呼，有色金属又可分为四类：轻金属、重金属、稀有金属和贵金属。

轻金属——包括铝、镁、铍、钛、钾、钠、锂、钙、锶、钡等十余种金属，其密度均小于5.0。它们具有很大的化学活性，不能用一般的火法冶金方法，而是用融盐电解或真空冶金方法来提取。

重金属——包括铜、镍、钴、铅、锌、锡、锑、汞等十余种金属，其密度大于5.0。它们的化学性质一般不如轻金属那样活泼，因此大多数可以用火法冶金或湿法冶金方法来提取。

稀有金属——包括钨、钼、锆、铪、铌、钽、稀土金属等数十种金属。一般的概念是：稀有金属是指工业上应用较晚，而为人们不太熟悉的，或者自然界中赋存较分散以致提取方法比较复杂的那些有色金属而言，按照金属各自的化学特性不同，分别用火法冶金或湿法冶金或融盐电解方法来制取。按照某些部门的传统习惯，钛算作稀有金属。本书将钛列入稀有金属。

贵金属——包括金、银、铂族金属共八种。其化学性质最稳定，在空气中保持其美丽的光泽，可用做装饰品，因而价值较高，称为贵金属。

本书是根据我国高等学校面向21世纪教学改革的精神，按照冶金工程专业的教学计划要求而编写的。其内容涉及各种有色金属的自然分布状况、性质和用途、冶炼的理论和方法等，是一本内容比较全面而充实的教材。

全书共分四篇，即轻金属冶金、重金属冶金、稀有金属冶金和贵金属冶金，分别由邱竹贤（铝冶金，镁冶金）、徐家振（铜冶金，锌冶金，镍冶金）、涂贛峰（钛冶金，钨冶金，稀土冶金）、翟秀静（金银及铂族金属冶金）等人编写。本书蒙翟玉春、单维林、王家庆、冯法伦、王兆文诸位老师评审，谨此致谢。编写一本简明的有色金属冶金学，还是初步尝试，书稿中如有不妥之处，请读者指正以便加以修订。

编 者

2001年春于东北大学

## 目 录

## 前 言

## 第一篇 轻金属冶金

第1章 铝冶金 .....	1
1.1 概 述 .....	1
1.2 从铝土矿提取氧化 .....	12
1.3 铝电解 .....	19
1.4 铝精炼 .....	30
1.5 炼铝用碳素电极 .....	35
1.6 铝生产中的环保治理 .....	41
1.7 废铝与废旧阴极碳块的再生利用 .....	42
1.8 炼铝用惰性电极材料 .....	46
1.9 电热还原法熔炼铝-硅-铁-钛合金 .....	51
1.10 融盐电解法制取铝基母合金 .....	54
第2章 镁冶金 .....	57
2.1 概 述 .....	57
2.2 电解法炼镁 .....	59
2.3 热法炼镁 .....	67
2.4 镁的精炼 .....	71

## 第二篇 重金属冶金

第3章 铜冶金 .....	73
3.1 概 述 .....	73
3.2 造钨熔炼的基本原理 .....	80
3.3 造钨熔炼 .....	94
3.4 钨的吹炼 .....	111
3.5 粗铜火法精炼 .....	118
3.6 电解精炼 .....	122
3.7 铜的湿法冶金 .....	127

<b>第4章 锌冶金</b> .....	132
4.1 概 述 .....	132
4.2 硫化锌精矿的焙烧 .....	135
4.3 锌焙砂的浸出 .....	140
4.4 中性浸出液的净化 .....	149
4.5 硫酸锌溶液的电沉积 .....	153
4.6 火法炼锌 .....	156
4.7 锌冶金新方法新技术 .....	165
<b>第5章 镍冶金</b> .....	168
5.1 概 述 .....	168
5.2 氧化镍矿的火法冶金 .....	170
5.3 硫化镍矿的火法冶金 .....	173
5.4 氧化镍矿的湿法冶金 .....	184
5.5 硫化镍矿的湿法冶金 .....	187
5.6 镍的精炼 .....	188

### 第三篇 稀有金属冶金

<b>第6章 钛冶金</b> .....	194
6.1 概 述 .....	194
6.2 钛铁矿精矿的还原熔炼 .....	197
6.3 从钛铁矿精矿生产人造金红石简介 .....	199
6.4 四氯化钛的生产 .....	199
6.5 粗四氯化钛的精制 .....	203
6.6 镁热还原法生产海绵钛 .....	205
6.7 钠热还原法生产金属钛 .....	208
6.8 钛的精炼 .....	209
<b>第7章 钨冶金</b> .....	210
7.1 概 述 .....	210
7.2 苏打高压浸出法 .....	212
7.3 苛性钠浸出法 .....	214
7.4 钨酸钠溶液的处理 .....	215
7.5 分解钨矿物原料的其他方法简介 .....	217
7.6 钨的二次金属回收简介 .....	217
7.7 三氧化钨的生产 .....	218
7.8 钨粉的生产 .....	218

7.9 粉末冶金法生产致密钨 .....	221
7.10 钨的熔炼 .....	223
<b>第8章 稀土冶金 .....</b>	<b>225</b>
8.1 概 述 .....	225
8.2 氟碳铈矿-独居石混合型精矿的浓硫酸分解 .....	228
8.3 熔盐电解法生产稀土金属 .....	233
8.4 热还原法制取稀土金属 .....	237

## 第四篇 贵金属冶金

<b>第9章 金、银及铂族金属冶金 .....</b>	<b>240</b>
9.1 概 述 .....	240
9.2 沙金的提取冶金 .....	247
9.3 脉金矿的提取冶金 .....	249
9.4 有色金属共生矿的提取冶金 .....	256
9.5 难处理金矿的提取冶金 .....	262
9.6 铂族金属的提取冶金 .....	266
9.7 海水中金的提取 .....	272
<b>第10章 贵金属二次资源与生态环境 .....</b>	<b>276</b>
10.1 贵金属二次资源的综合利用 .....	276
10.2 贵金属冶金与生态环境 .....	280



# 第一篇 轻金属冶金学

## 第1章 铝冶金

### 1.1 概述

#### 1.1.1 铝冶金的历史

铝在自然界中分布极广，地壳中铝的含量约为8%，仅次于氧和硅，居第三位。在各种金属元素当中，铝居首位。铝的化学性质十分活泼，但是自然界中发现了少量元素状态的铝。含铝的矿物总计有250多种，其中主要的是铝土矿、高岭土、明矾石等。

我国开采和利用铝矿有悠久的历史，很早就开始从明矾石提取明矾(古称矾石)，以供医药及工业上使用。汉代《本草经》(公元前1世纪)一书中记载了16种矿物药物，其中就包括矾石、铅丹、石灰、朴硝、磁石<sup>①</sup>。明代宋应星所著《天工开物》(公元1637年)一书中记载了矾石的制造和用途。

Aluminium一词从明矾衍生而来，古罗马人称明矾为Alumen。1746年，Pott从明矾中制取一种金属氧化物。Marggraf认为黏土和明矾中含有同一种金属氧化物。1876年，Morveau称此种氧化物为氧化铝Alumine(英文为Alumina)。1807年，英国Davy试图用电解法从氧化铝中分离出金属，未成功。1808年，他将此种拟想中的金属称为Aluminium，以后沿用此名。

金属铝最初用化学法制取。1825年，丹麦Oersted用钾汞还原无水氯化铝，得到一种灰色的金属粉末，在研磨时呈现金属光泽，但当时未能加以鉴定。1827年，德国Wöhler用钾还原无水氯化铝，得到少量细微的金属颗粒。1845年，他把氯化铝气体通过熔融的金属钾表面，得到金属铝珠，每颗铝珠的质量为10~15mg，于是铝的一些物理性质和化学性质得到初步的测定。

1854年，法国Deville用钠代替钾还原NaCl—AlCl<sub>3</sub>络合盐，制取金属铝。钠和钾同为一价碱金属，但钠的相对原子质量比钾的小，制取1kg铝所需的钠量大约是3.0~3.4kg，而用钾大约需要5.5kg，故用钠比较经济。当时称铝为“泥土中的银子”。1855年，Deville在巴黎世界博览会上展出了12块小铝锭，总量约为1kg。1854年，在巴黎附近建成了世界上第一座炼铝厂。1865年，俄国Бекетов提议用镁还原冰晶石来生产铝。这一方案后来在德国Gmelingen铝镁工厂里采用。

<sup>①</sup> 此类矿物的化学式应为：矾石——KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O；铅丹——Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>；石灰——CaO；朴硝——Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O；磁石——Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>。

自从 1887~1888 年电解法炼铝工厂开始投入生产后, 化学法便渐渐被弃用了。在此之前的 30 多年内采用化学法总共生产了约 200t 铝。

在采用化学法炼铝期间, 德国 Bunsen 和法国 Deville 继英国 Davy 之后研究电解法。1854 年, Bunsen 发表了试验总结报告, 声称通过电解 NaCl-AlCl<sub>3</sub> 络合盐, 得到金属铝。他在电解时采用炭阳极和炭阴极。Deville 除了电解 NaCl-AlCl<sub>3</sub> 络合盐之外, 还电解此络合盐和冰晶石的混合物, 都得到了金属铝。Deville 也许是认识到氧化铝可溶于熔融氟盐的一个人。那时候, 用蓄电池作为电源不能获得较大的电流, 而且价格很贵, 因此电解法不能在工业上进行生产。只有在 1867 年发明了发电机, 并在 1880 年加以改进之后, 才使电解法可以用于工业生产。

1883 年, 美国 Bradley 提出利用氧化铝可溶于熔融冰晶石的特性来电解冰晶石-氧化铝融盐的方案。3 年之后(即 1886 年), 美国 Hall 和法国 Héroult 通过实验不约而同地申请了冰晶石-氧化铝融盐电解法炼铝的专利, 获得批准。这就是历来所称的 Hall-Héroult(霍尔-埃鲁)法。

Hall 认为氧化铝是炼铝的适当原料, 唯一的问题是要寻找一种适宜的熔剂, 因为氧化铝的熔点很高。所以他系统地研究各种熔剂, 进行试验, 一直到冰晶石为止。Héroult 则相反, 自从电解纯冰晶石溶液得到铝之后, 为了降低熔点而添加了 NaCl-AlCl<sub>3</sub> 络合盐, 但由于 NaCl-AlCl<sub>3</sub> 易于水解, 故改用氧化铝。可见, 他们是殊途同归的。

1888 年, 美国匹兹堡电解厂开始用冰晶石-氧化铝融盐电解法炼铝。瑞士冶炼公司也在同时采用该法炼铝。与化学法相比, 电解法成本比较低, 而且产品质量好, 故沿用至今。

以后, 其他国家相继采用电解法炼铝。法国始于 1889 年, 英国 1890 年, 德国 1898 年, 奥地利 1899 年, 挪威 1906 年, 意大利 1907 年, 西班牙 1927 年, 前苏联 1931 年, 中国 1938 年。

### 1.1.2 现代铝工业

自从发明冰晶石-氧化铝融盐电解法以来, 全世界的原铝产量迅速增长。1890 年正值电解法诞生伊始, 铝产量只有 180t, 1900 年增加到 6 990t, 1925 年为 18 万 t, 1950 年为 150 万 t, 1970 年为 1 025 万 t, 1980 年为 1 560 万 t, 2000 年为 2 400 万 t(见图 1-1)。

用电解法或其他方法直接生产出来的纯铝称为原铝, 现代铝工业除了生产原铝之外, 还生产精铝和高纯铝, 以及多种铝基合金。

现代铝工业有三个主要生产环节: ①从铝土矿提取纯氧化铝; ②用冰晶石-氧化铝融盐电解法生产金属铝; ③铝加工。此外, 还有两个重要的辅助环节: ①炭素电极制造; ②氟盐生产。如图 1-1 所示为历年以来全世界原铝年产量的增长曲线。

图 1-2 为现代铝工业生产流程简图。

现代铝工业生产, 主要采用冰晶石-氧化铝融盐电解法, 其中氧化铝是炼铝的原

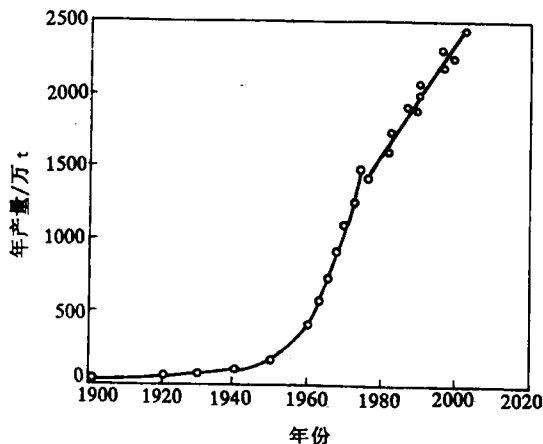


图 1-1 全世界原铝年产量增长曲线

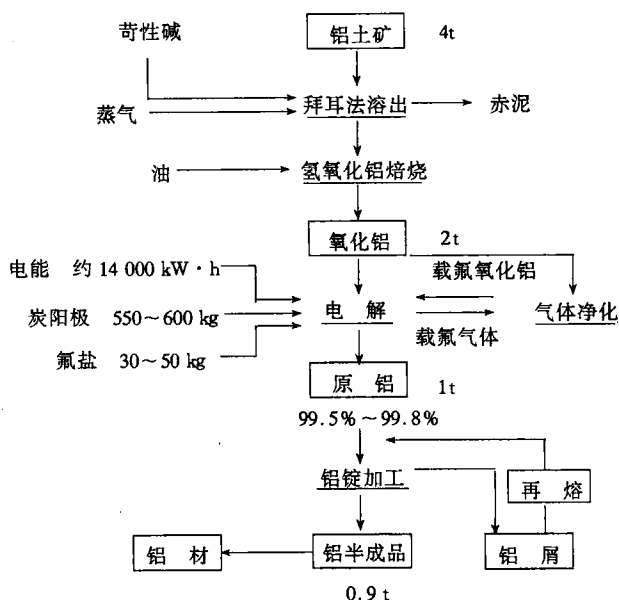


图 1-2 现代铝工业生产流程简图

料，冰晶石是熔剂。直流电通入电解槽，在阴极和阳极上发生电化学反应。电解产物，阴极上是液体铝，阳极上是气体 $\text{CO}_2$  ( $\varphi(\text{CO}_2) \approx 75\% \sim 80\%$ ) 和  $\text{CO}$  ( $\varphi(\text{CO}) \approx 20\% \sim 25\%$ )。在工业电解槽内，电解质通常由质量分数为 95% 的冰晶石与 5% 的氧化铝组成，电解温度为  $950 \sim 970^\circ\text{C}$ 。电解液的密度约为  $2.1\text{g}/\text{cm}^3$ ，铝液密度为  $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ ，两者因密度差而上下分层。铝液用真空抬包抽出后，经过净化和过滤，浇铸成商品铝锭，其纯度可达到  $99.5\% \sim 99.8\%$ 。阳极气体中还含有少量有害的氟化物、沥青烟气和二氧化硫。经过净化后，废气排入大气，回收的氟化物返回电解槽内。

### 1.1.3 铝的性质和用途

铝是元素周期表上第 3 周期  $\text{III}_A$  族元素。原子序数 13，相对原子质量 26.981 54 (1977 年国际相对原子质量表，以  $^{12}\text{C}$  为基准)。主要同位素是  $^{27}\text{Al}$  (稳定的)，丰度接近 100%。

#### 1.1.3.1 铝的物理性质

铝是一种轻金属，具有银白色的金属光泽。铝的主要物理特性如下：

① 熔点低。铝的熔点与纯度有密切关系。纯度 99.996% 以下的铝，其熔点最精确测定值为  $933.4\text{K}$ ，或者取整数为  $933\text{K}$  ( $660^\circ\text{C}$ )，这是公认值。纯度 99.99% 的铝，熔点一般低  $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 。工业纯铝的最终凝固点低至  $575^\circ\text{C}$ ，这相当于  $\text{Al-FeSiAl}_5\text{-Si}$  合金的共晶点，所以工业纯铝有一个凝固温区。

② 沸点高。液态铝的蒸气压不高，沸点为  $2467^\circ\text{C}$ 。

③ 密度小。从晶格参数算出铝的密度为  $2.6987\text{g}/\text{cm}^3$ ，而实测的密度值为  $2.6966 \sim 2.6988\text{g}/\text{cm}^3$ ，同计算值接近， $\text{Al}^{3+}$  的半径为  $0.0535\text{nm}$ 。铝的密度也与其中所含的合金元素或杂质的种类和数量有关。使密度增大的元素是  $\text{Fe}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Mn}$ 、 $\text{V}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ti}$ 、 $\text{Pb}$  等，使其减小的元素是  $\text{B}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Li}$  等， $\text{Si}$  稍稍减少铝的密度。工业纯铝的密度主要取决于其中  $\text{Fe}$  和  $\text{Si}$  的质量分数。一般工业纯铝中  $m(\text{Fe})/m(\text{Si}) = 2 \sim 3$ ，密度约为  $2.70 \sim 2.71\text{g}/\text{cm}^3$ 。

④ 电阻率小。高纯铝(其中 Al 的质量分数为 99.995%)的电阻率在 293K 时为  $(2.62 \sim 2.65) \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ , 这相当于铜的标准电阻率的 1.52~1.54 倍。用作工业导电材料的铝, 在 293K 时, 电阻率不大于  $2.80 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。一般质量分数为 99.5%~99% 的铝, 电阻率为  $(2.80 \sim 2.85) \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。铝中添加其他元素, 都会增大铝的电阻率。

⑤ 铝具有良好的导热能力。在 20℃ 时, 铝的热导率为  $2.1 W / (cm \cdot ^\circ C)$ 。

⑥ 铝具有良好的反射光线的的能力, 特别是对于波长为  $0.2 \sim 12 \mu m$  的光线。

⑦ 铝没有磁性, 不产生附加的磁场, 所以在精密仪器中不会起干扰作用。

⑧ 铝易于加工, 可用一般的方法把铝切割、焊接或粘接, 铝易于压延和拉丝。

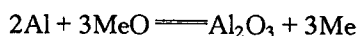
⑨ 铝的再生利用率高。现在全世界的再生铝量每年达到 600 万 t, 大约是原铝总产量的 1/4。废铝再生所用的能量大约是原铝生产所用的 5%。

⑩ 铝可以同多种金属构成合金, 例如 Al-Ti, Al-Mg, Al-Zn, Al-Li, Al-Fe 合金。某些合金的力学强度甚至超过结构钢, 具有很大的强度/质量比值。

### 1.1.3.2 铝的化学性质

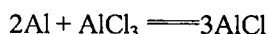
① 铝同氧反应, 生成  $Al_2O_3$ 。氧化铝的生成热  $\Delta H_{298}^0 = -1677 \pm 6.2 kJ/mol$ , 相当于  $-31 kJ/g(Al)$ 。 $Al_2O_3$  的生成热很大, 这就可以解释铝在自然界中很少以游离状态出现的原因。铝粉容易着火。

② 铝在高温下能够还原其他金属氧化物。利用这些反应可制取纯金属, 例如 Mg, Li, Mn, Cr 及其相应的铝基母合金, 或者焊接钢轨。其一般反应式(Me 表示金属)是:



在高温 2000℃ 左右, 铝易于同碳起反应, 生成碳化铝( $Al_4C_3$ )。有催化剂冰晶石存在时,  $Al_4C_3$  的生成温度可降低到 900℃ 左右。在 1100℃ 以上温度铝同氮起反应, 生成氮化铝(AlN)。

③ 在 800℃ 以上温度, 铝同三价卤化物(例如  $AlF_3$ ,  $AlCl_3$ ,  $AlBr_3$ ,  $AlI_3$ )起反应, 生成一价铝的卤化物。在冷却时, 一价铝的卤化物分解出常价铝的卤化物和铝。利用这种歧解反应, 可以从铝合金中提取纯铝。其反应式为:



④ 由于铝的两性性能, 铝易于同稀酸起反应, 铝又易于被苛性碱溶液侵蚀, 生成氢气和可溶性铝盐, 但是高纯度铝能够抵御某些酸的腐蚀作用, 可用来储存硝酸、浓硫酸、有机酸和其他化学试剂。

⑤ 铝不与碳氢化合物(饱和的或不饱和的, 脂肪族的或芳香族的)起反应。但是因碳氢化合物中可能有痕量的碱或酸, 铝也会受到腐蚀。铝不与酒精、酚、醛、酮、醌起反应。但是, 铝同醋酸起反应, 温度升高, 则反应加剧。

⑥ 铝的保护剂。铝的保护剂有多种有机的或无机的胶体(如树脂、树胶、淀粉、糊精等), 碱金属的铬酸盐和重铬酸盐, 铬酸, 高锰酸盐, 过氧化氢以及其他氧化剂。它们能够促进生成铝表面上的保护性氧化膜。但是这些保护剂并不是绝对保险的, 因为其中往往含有某些有害的杂质, 而且当环境不同时, 它们的防护作用会减退。

### 1.1.3.3 铝与人体健康的关系

据报道, 人体内摄入少量的铝, 对健康无损害。进一步的实验表明, 铝不像其他常用金属那样会在烹饪中加速维生素 C 的损失。牛奶在铝制容器中进行低温消毒时, 维生素 C 的损失量不超过在玻璃容器中进行同一操作时的损失量(30%)。但在铜制容器中, 在同样条件

下, 维生素 C 全部损失掉。

少量的铝溶解在某些食物中, 特别是那些含有有机酸的蔬菜中, 例如西红柿。如果全部食物都在铝制的容器中烹饪, 那么每人每天要摄入 12mg 铝, 其中大约 40% 来自烹饪器皿。

据加拿大多伦多(Toronto)大学的研究, 动物的衰老症与体内摄入过量的铝有关, 所以要禁忌过量的铝。

据《沈阳日报》1999年6月17日载, 俄罗斯医学研究人员经过多年研究后, 发现了使用铝锅烹调有碍健康的机理。莫斯科埃里斯曼卫生科学研究所对烹调用铝锅进行了3年多的化验分析。结果发现, 金属铝破坏人体中负责细胞能量交换的三磷酸腺苷, 使细胞能量交换呈非自然形式进行, 使细胞得不到足够能量而无法正常繁殖。研究人员指出, 使用铝锅制作含酸或含碱的食物, 这时铝的溶解性提高, 对人体尤为有害。用铝锅烧煮米饭、稀粥、面条、土豆则无碍人体健康, 但不可用其存放隔夜食物。

此外, 另一种金属元素——铅——的毒性很大, 而据最近的研究证明, 铝能对抗铅的某些毒性。因此, 对铝也应一分为二地看待。

#### 1.1.3.4 铝合金的种类

铝合金分两类: 铸造用铝合金与加工用铝合金。

① 铸造用铝合金。硅是一种常用的合金元素, 因为它能够增进合金的流动性, 提高其抗热震性, 增进其紧压能力, 但是铝硅二元合金的力学强度尚嫌不足, 所以还要加入其他合金元素, 例如铜和镁, 并且要经过热处理, 添加少量的钠或铯, 可以使铝-硅共晶改性, 增大其延展性。添加少量的钛, 磷或钛、硼, 可使晶粒细化, 从而提高其抗热震性, 增加抗张强度。高铁含量的铝合金在模铸中可避免合金粘在硬模上。

② 加工用铝合金。加工用铝合金的组成见表 1-1。编号 1000 系列合金实际上是纯铝(纯度为 99% 或更高, 表中未列出)。1100 系列合金中添加质量分数为 0.12% 的 Cu, Fe 和 Si 是其中的主要杂质。此种组成的合金具有良好的抗腐蚀性、高导热性和导电性以及低力学强度。但是此种合金的抗腐蚀性较低, 所以在 2000 系列合金板材上通常涂覆高纯铝或 6000 系列镁-硅合金, 以求对芯板作电化学保护。2024 合金是第二次世界大战中所用飞机的结构材料。

在 3000 系列合金中, Mn 是主要的合金元素。此种合金不能经热处理, 但是比 1000 系列合金坚强得多。3003 合金具有良好的加工性能和焊接性能, 且具有适当的力学强度, 可满足多方面的需要。

在 4000 系列合金中, Si 是主要的合金元素。Si 能降低合金的熔点, 而不引起合金的脆性。此种合金用作焊条或钎焊合金, 因为其熔点低于被焊接的金属。

在 5000 系列合金中, Mg 是主要的合金元素。Mg 是最有效和应用最广泛的铝合金元素之一。当与 Mn 结合时, 可构成中等强度乃至高强度的不可热处理的铝合金。作为固溶体硬化剂, Mg 比 Mn 的有效性增大 50%~60%; 而且 Mg 可多量添加。此种合金具有良好的焊接性能, 即使在海水中也有良好的抗腐蚀性能。

在 6000 系列合金中, Mg 和 Si 是主要的合金元素。此种合金是可以热处理的,  $Mg_2Si$  是其强化析出物。著名的 6061 合金是一种性能优良、可热处理的铝合金; 它虽然不如 2000 系列或 7000 系列合金那样坚强, 但此种含有硅化镁的铝合金兼有良好的加工性能和良好的抗腐蚀性能。

表 1-1 典型的加工用铝合金的额定组成

铝协会 编号	合金元素质量分数 / %							用 途
	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	其 他	
1100 1350		0.12					1.0(Si + Fe)最高 99.5% Al最低	金属板材结构, 槽, 盘 导电材料
2014 2024 2036 2219	0.8	4.4 4.4 2.6 6.3	0.8 0.6 0.25 0.3	0.5 1.5 0.45			0.1V, 0.18Zr, 0.06Ti	飞机结构, 车辆 飞机结构, 轮毂 汽车板材 宇航结构, 焊接
3003 3004 3105		0.12	1.2 1.2 0.6	1.0 0.5				一般用途, 烹饪用具 一般用途, 罐头盒板材 建筑材料
5052 5083 5182 5252			0.7 0.35	2.5 4.4 4.5 2.5	0.25 0.15			一般用途 阻燃压力容器 罐头盒板材, 汽车板材 汽车光亮饰物
6009 6010 6061 6063 6201	0.8 1.0 0.6 0.4 0.7	0.33 0.33 0.28	0.33 0.33	0.5 0.8 1.0 0.7 0.8	0.20			汽车板材 汽车板材 一般用途, 建筑材料 一般用途, 挤压材 导电材料
7005 7075		1.6	0.45	1.4 2.5	0.13 0.23	4.5 5.6	0.14Zr, 0.04Ti	卡车车身, 火车 飞机结构材料

在 7000 系列合金中, Zn 是主要的合金元素。当 Zn 与少量 Mg 配合时, 构成一种可热处理、具有很高强度的合金。其他元素如 Cu 和 Cr 少量加入。此族合金中 7075 合金是最好的, 这是现在已知的一种强度很高的合金, 用来制造承受高应力的部件, 如飞机骨架等。

铝钛合金和铝锂合金是新型合金, 是重要的航空材料。钛使合金的强度增大, 而锂使合金的密度减小, 使弹性模量增大。添加 Mg 可使铝锂合金的密度进一步减小, 强度增大。 $Al_3Li$  是 Al-Li 系的强化析出物, 而  $LiMgAl_2$  和  $Al_2Li$  是 Al-Li-Mg 系的强化析出物。

### 1.1.3.5 铝的用途

#### (1) 传统用途

由于铝具有质轻(其密度相当于钢铁的 1/3)、良好的导热性和导电性、可加工性以及构成高强度、耐腐蚀性的合金等优良的性能, 因而铝成为有色金属中应用最广泛的金属。大量的铝用于制造建筑用结构材料、饮料罐和其他包装材料、电力输送线、日用品、机械设备诸方面。铝工业现在是世界上最大的电化学工业, 铝的产量仅次于钢, 居各种有色金属之首。

铝在低温下的强度特性引人瞩目, 它的强度随温度降低而增大。即使温度降至  $-198^{\circ}\text{C}$ , 铝也不变脆。铝具有良好的防腐性能。在空气中铝表面生成一层光滑的、如金刚石一样硬的氧化铝薄膜。它像玻璃一样透明, 但是紧紧地粘附在铝上。这是铝的天然保护膜, 其厚度大约是  $0.2\mu\text{m}$ 。此外, 还可用阳极氧化的方法, 在铝材或铝制品表面涂上色彩鲜艳的氧化膜, 或者用电泳的方法涂上美丽的有机漆, 使它成为经久耐用而又美观的建筑材料和日用品。

铝是一种优良的导电材料。铝的导电能力虽然只有铜的 65%~66%, 但是按质量计算,

铝比任何其他金属能够更好地导电。以传导等量电流而论，铝的导电截面积大约是铜的 1.6 倍，然而铝的质量只有铜的 50%，换言之，铝的用量可节省一半，况且铝的价值只有铜的一半。故用铝做导电材料可显著地节省投资。

铝具有良好的导热性能。铝的热导率差不多是不锈钢的 10 倍。因此它是制造机器活塞、热交换器、冷却器翅板、饭锅、电熨斗等的理想材料。铝还具有良好的反射光和热的能力，所以铝可用来制造反光镜，又可用作保温材料。铝可反射 95% 的热辐射。铝没有毒性，它不会影响它所包装的饮料和食品的味道和质量。铝没有磁性，它不会产生附加磁场，所以在精密仪器中不会起干扰作用。铝还易于加工，用一般的方法就可进行切割、钻孔和焊接，或把铝压成薄板和铝箔，或拉成铝丝。

提高人民生活质量是一个十分重大的问题，铝与提高人民生活质量有着密切的关系。除如前所述的建筑、交通、包装等用途与人民生活息息相关外，日常生活到处都要用到铝，如电饭煲等炊具，电冰箱、洗衣机、录像机、电视机等家用电器，文体用品，家具日用五金。

铝还可用于制作铝质辅币。我国的铝质辅币自 1957 年 12 月 1 日开始发行，至今已有 40 多年了。由于硬币色泽光亮，花纹简洁，而且外形大小及轻重适合，使用方便，所以在流通中很受欢迎，在国内外的钱币收藏界也赢得了许多爱好者的重视。

### (2) 铝在交通运输业上的应用

近年来能源价格上涨，汽车和铁路车辆的用铝量明显增多，其目的是为减轻车身的重量，以求节省燃料。平均言之，汽车上用铝代替钢，每千克铝可减轻车身质量 1.5kg，而车身质量每减轻 1kg，可在 16 万 km 总行程中节省汽油 10L。现在新型轿车上的用铝量，已从 60kg 增加到 130kg。德国奥迪公司于 1995 年推出豪华车(A8)。这种新型轿车采用了铝合金横梁与坚固的压铸复合构件相连接的构造，不仅具有优于钢制车体的强度，而且使车体质量减轻了 40%。此外，全铝汽车正在研制，在新型的电动汽车上用 Al 空气电池作动力。

### (3) 铝在航空工业上的应用

铝材是飞机的主要结构材料，一般占 50%~80%。民用飞机铝材用量均在 70% 以上，在可以预见的将来，铝合金仍然会是飞机的主要结构材料。由于复合材料的应用，传统铝合金的比例会有所下降，但在复合材料中，最有可能应用的却是铝基复合材料。同时，高强高韧合金 2224、7055 等，以及新合金如 Al-Ti 和 Al-Li 合金、快速凝固耐热铝合金等，都将首先作为新型的航天航空结构材料进入应用。

表 1-2 为波音-麦道飞机公司大型客机的选材比例。

表 1-2 波音-麦道飞机公司大型客机的选材对比(结构质量分数) %

飞机型号	铝合金	钢	钛合金	复合材料	其他
B-747	81	13	4	1	1
B-757	78	12	6	3	1
B-767	80	14	2	3	1
B-777	70	11	7	11	1
DC-10	78	14	5	1	2
MD-11	76	9	5	8	2

在军用飞机上，铝材同样是重要的结构材料，例如俄罗斯的 CY-27 飞机，铝合金占 60%；美国的 F-16 战斗机，铝材占 64%。

导弹与火箭的结构材料，除火箭发动机(包括液体与固体燃料发动机)主要使用了钢材以

外, 其余部件基本上采用有色金属材料, 而且发动机中的镍基高温合金属于有色金属材料, 新型液氧煤油发动机燃烧室采用铜合金, 其他结构件以铝合金为主, 其次是钛合金、镁合金, 还有一部分难熔金属合金。表 1-3 给出了国外几种导弹、火箭使用铝材的情况。

表 1-3 国外几种火箭、导弹采用的结构材料

型 号	射程/km	箱 体	箱间及级间结构	气 瓶
红 石	400	5052, 5086 合金	2024 铝合金	
丘比特	3 000	5086 铝合金	2024 铝合金	
雷 神	2 400	2014 铝合金		
宇宙神	12 000	301 不锈钢		Ti-6Al-4V
大力神	12 000	2014 铝合金	HK-31A 镁合金	Ti-6Al-4V
土星 1	登月飞行	一级 5456, 二级 2014 铝合金	7075 铝合金	Ti-6Al-4V
土星 V	登月飞行	一级 2219, 二、三级 2014	7075 铝合金	Ti-6Al-4V

#### (4) 铝在冶金工业上的应用

在钢铁冶金工业上用铝作脱氧剂, 钢锭浇铸时用作冒口发热剂, 平均每吨钢需要 0.8kg 铝。现在全世界每年产钢约 8 亿 t, 因此钢铁工业上的用铝量达到 60 多万 t。

此外, 还用铝作还原剂, 生产高熔点金属。

#### (5) 铝在农业上的应用

拓展铝的新用途是一个十分重要的研究课题。因为铝的许多优越性能虽然已经被认定, 但是至今尚未被充分开发利用。下面是铝在农业上的新用途。

值得指出的是, 铝材在农业上可发挥重要的作用, 除制造农业机械外, 有特殊意义的是铝合金粮仓系统。对于像我国这样一个人口众多的国家, 粮食贮备是十分重要的, 而我国在粮食贮备中的一个突出问题是贮藏装备不足和技术落后。采用铝材制造的粮仓是解决粮食贮备设施不足的有效措施。其中用铝合金型板卷绕而成的螺旋型铝合金粮仓, 与建设传统的钢筋混凝土粮仓相比, 建造铝合金粮仓的劳动强度减轻 20%, 基建投资可减少 1/3~1/2, 可在产粮地区就地建造, 不受气候与土壤的限制, 特别适用于南方潮湿多雨地区。除大型粮仓外, 还可以制造小型家用粮囤, 使用十分方便。

增加农田喷灌面积是粮食与经济作物增产的主要措施之一。而发展农业喷灌, 首先要发展能够快速拆卸的地面管网和永久性地下管网。经久耐用、耐蚀性高、重量轻的铝合金管是最理想的材料。它的喷灌效果是很好的, 可使粮食增产 20%, 蔬菜和饲料作物产量可提高 10%~20%。我国是一个缺水国家, 喷灌和滴灌是今后大力推广的项目, 铝材将会发挥积极的作用。

#### (6) 铝合金能源

在世界能源越来越紧张的今天, 铝合金燃料是一种理想的新能源。

研究人员将一般汽车稍加改造, 不用汽油, 只需放入一些类似饼干的铝合金燃料, 就可以使汽车连续行驶 2 000km。这种厚度为 1cm 的铝合金, 看上去与一般铝材无区别, 但它可



以全部转换成电能，用以驱动满载的轿车或卡车。铝合金变成电能的秘密在一个“魔盒”里。这是一个化学电池，铝合金片作为正极，负极则是空气。当正、负极电路一接通，铝合金就在电解液中逐步转化为电能。

经测定，用于汽车的铝合金电池能产生 500W 功率的电能，它不必每天充电，只要更换一次铝合金，电池就可以重复使用。铝合金在电池中提供的能量，相当于同体积的汽油产生能量的 4 倍。使用铝合金的电池电动汽车体积与通常汽车动力装置的体积相差无几，因此，汽车的改装或制造，只需做局部“手术”就行了，而且使用这种铝合金燃料不产生污染物。贮藏和运输十分安全。铝合金燃料不仅可作汽车燃料，而且还可用于照明灯具、音响电视、野外生活或作业用具等，用途十分广泛。

现代科学证实，地壳是由许多化学元素组成的，地壳的上层叫硅铝层，含硅和铝较多，地壳中铝元素的含量占地壳总质量的 7.5%，铝资源非常丰富。科学家们预言：铝合金将成为 21 世纪的理想新能源。

#### 1.1.4 铝 矿

铝的化学性质十分活泼，它通常以化合物形态存在于自然界中。含铝的矿物有 250 多种，最常见的是硅酸盐族和硫酸盐族。现代铝工业用铝土矿作原料，其中 Al 的质量分数为 25%~30%。一般泥土中 Al 的质量分数大约为 8%~10%。

已知有 250 多种含铝矿物。其中硅酸盐矿物约有 100 种，硫酸盐矿物 35 种，氧化物矿物 15 种，卤化物矿物 15 种，碳酸盐矿物 5 种，其他 80 种。

在表 1-4 上列出几种主要的含铝矿物的名称和化学组成，这些矿物都与炼铝有关。

表 1-4 主要的铝矿物

矿物名称	化学式	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ /%	$w(\text{Al})$ /%	晶系	硬度 (莫氏)	密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
刚玉	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	100	52.9	六方，斜方	9	4.05
一水软铝石	$\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$	85	45	斜方	3.5~4	3.01~3.06
一水硬铝石	$\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$	85	45	斜方	6.5~7	3.44
三水铝石	$\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$	65.4	34.6	单斜	2.5~3.5	2.40
高岭石	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	39.5	20.9	三斜，单斜	1~3	7.5
蓝晶石	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$	63	33.3	三斜	4~7	3.5~3.7
红柱石	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$	63	33.3	斜方	7	3.1~3.2
硅线石	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$	63	33.3	斜方	7.5	3.25
钠长石	$\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$	19.4	10.3	三斜	6~6.5	2.61
钙长石	$\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$	36.7	19.1	三斜	6~6.5	2.76
正长石	$\text{K}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$	18.4	9.7	单斜	6	2.56
霞石	$(\text{Na}, \text{K})_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$	33	17.4	六方	5.5~6	2.55~2.65
钾明矾石	$\text{K}_2\text{SO}_4\cdot\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\cdot 4\text{Al}(\text{OH})_3$	36.9	19.5		3.5~4	2.82
冰晶石	$\text{Na}_3\text{AlF}_6$	12.8	6.8	单斜	2.5	2.97

注：表中矿物的理论结晶水质量分数： $\text{Al}(\text{OH})_3$ —34.6%， $\text{AlO}(\text{OH})$ —15%， $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ —13.9%， $\text{FeO}(\text{OH})$ —10.1%。