

• 高等学校教学用书 •

有色金属材料 工程概论

黎文献 主编



冶金工业出版社

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

高等学校教学用书

有色金属材料工程概论

黎文献 主编

北京
冶金工业出版社
2007

内 容 简 介

本书以有色金属及其合金的特性和加工方法为重点,阐述了有色金属材料的概貌及一般规律。全书共分4章。第1章为有色金属及其合金,包括铝、镁、钛、铜、难熔金属及其合金的分类、特性、生产和加工方法。第2章为铸锭生产,介绍了有色金属的熔炼和铸锭技术。第3章为有色金属材料塑性加工,包括锻造、轧制、挤压、拉拔等。第4章为有色金属材料塑性加工工艺,介绍了有色金属材料的生产方法、热加工和冷加工工艺以及一些典型产品的生产工艺,如铝箔、建筑型材、内螺纹铜盘管、钨丝等。

本书可作为高等院校冶金和材料专业的教材,也可供与冶金和材料专业相关的科研、生产、技术、管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

有色金属材料工程概论/黎文献主编. —北京:冶金
工业出版社,2007.6
高等学校教学用书
ISBN 978-7-5024-4227-9

I. 有… II. 黎… III. 有色金属—高等学校—教材
IV. TG146

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第067705号

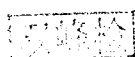
出 版 人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)
责任编辑 李 梅(电话:010-64027928) 美术编辑 李 心
版面设计 张 青 责任校对 符燕蓉 李文彦 责任印制 牛晓波
ISBN 978-7-5024-4227-9
北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
2007年6月第1版;2007年6月第1次印刷
787mm×1092mm 1/16;28.25印张;752千字;440页;1-3000册
49.00元

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

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

冶金工业出版社部分图书推荐

| 书 名 | 定价(元) |
|----------------------|--------|
| 预焙槽炼铝(第3版) | 89.00 |
| 有色金属资源循环利用 | 65.00 |
| 铝加工技术实用手册 | 248.00 |
| 铜加工技术实用手册 | 268.00 |
| 湿法提锌工艺与技术 | 26.00 |
| 冶金熔体结构和性质的计算机模拟计算 | 20.00 |
| 锆铪冶金 | 60.00 |
| 锆铪及其化合物应用 | 45.00 |
| 钨钼冶金 | 79.00 |
| 钛冶金 | 33.00 |
| 金银冶金 | 49.00 |
| 电炉炼锌 | 75.00 |
| 钢冶金 | 56.00 |
| 稀有金属冶金学 | 34.80 |
| 2004年材料科学与工程新进展(上、下) | 238.00 |
| 材料的结构 | 49.00 |
| 金刚石薄膜沉积制备工艺与应用 | 20.00 |
| 金属凝固过程中的晶体生长与控制 | 25.00 |
| 有色金属冶金动力学及新工艺(英文版) | 28.00 |
| 有色冶金炉窑仿真与优化 | 32.50 |
| 固体电解质和化学传感器 | 54.00 |
| 有色金属材料的真空冶金 | 42.00 |
| 有色金属提取冶金手册·铜镍 | 65.00 |
| 有色金属提取冶金手册·锡铋汞 | 59.00 |
| 轻金属冶金学 | 39.80 |
| 有色冶金工厂设计基础 | 24.00 |
| 矿石及有色金属分析手册 | 47.80 |
| 有色冶金炉设计手册 | 165.00 |
| 陶瓷基复合材料导论(第2版) | 23.00 |
| 陶瓷-金属复合材料 | 25.00 |



前 言

材料是社会进步的物质基础和先导,是现代科学技术发展和国民经济建设的重要支柱。有色金属材料为材料领域的一个分支,在国民经济建设和国防建设中有着不可替代的作用。

除钢铁以外的金属都属有色金属,亦称非铁金属(non-ferrous metals)。尽管与钢铁相比,有色金属的消耗量较小,但众多的有色金属各具独特的性能,因此有色金属材料在各个方面都起着重要的作用。

有色金属材料按用途可分为结构材料和功能材料;按加工方法可分为铸造材料和变形材料。但通常按金属和金属特性划分,如铝及铝合金、镁及镁合金、钛及钛合金(铝、镁、钛及其合金又称为轻金属材料),铜及铜合金(称为重金属材料),难熔金属及其合金,贵金属及其合金,稀土金属及其合金等。有色金属品种繁多,性能各异,加工方法多种,加上不同热处理状态,从而能生产出满足诸多服役条件的材料。

有色金属材料虽然牌号众多,但同类材料有许多共同特点,加工过程也有许多共同规律,本书以常用有色金属材料及其加工方法为重点,阐述有色金属材料工程概貌及其一般规律,并力图与材料科学的基本问题相结合。材料科学与材料工程紧密结合是开发新型材料的重要途径。

本书由中南大学长期从事有色金属材料教学、科研的教授及其他相关单位专家编写,全书由黎文献主编、整理和定稿。具体编写人员如下:

第1章 有色金属及其合金

第1节 铝及铝合金 黎文献

第2节 镁及镁合金 余 琨

第3节 钛及钛合金 邓 炬(西北有色金属研究院)

第4节 铜及铜合金 王碧文(中铝洛阳铜加工集团公司)

第5节 难熔金属及其合金 邓 炬

第2章 铸锭生产 刘维镐 陈存中 章四琪

第3章 有色金属材料塑性加工 彭大暑

第4章 有色金属材料塑性加工工艺 胡其平

本书可以作为高等院校冶金和材料相关专业的教材,亦可供有关科研、生产技术人员及企业管理人员参考。

由于篇幅有限,有色金属材料热处理未专列篇章介绍,不足之处,敬请读者指正。

编 者

2007年3月于长沙

目 录

| | |
|---------------------------------|-----|
| 1 有色金属及其合金 | 1 |
| 1.1 铝及铝合金 | 1 |
| 1.1.1 纯铝的特性 | 1 |
| 1.1.2 铝的合金化规律 | 2 |
| 1.1.3 铝合金牌号及状态表示法 | 4 |
| 1.1.4 变形铝合金 | 17 |
| 1.1.5 铸造铝合金 | 32 |
| 1.1.6 铝基复合材料 | 35 |
| 1.2 镁及镁合金 | 38 |
| 1.2.1 镁的特性及合金化规律 | 38 |
| 1.2.2 铸造镁合金 | 40 |
| 1.2.3 变形镁合金 | 51 |
| 1.2.4 镁基复合材料 | 61 |
| 1.2.5 镁合金的发展趋势 | 64 |
| 1.3 钛及钛合金 | 65 |
| 1.3.1 概述 | 65 |
| 1.3.2 工业纯钛 | 67 |
| 1.3.3 钛合金 | 70 |
| 1.3.4 钛及钛合金半成品生产 | 93 |
| 1.3.5 钛废料回收 | 97 |
| 1.3.6 钛合金的发展趋势 | 97 |
| 1.4 铜及铜合金 | 98 |
| 1.4.1 铜的特性、微量元素对其影响及合金化规律 | 98 |
| 1.4.2 变形铜合金 | 106 |
| 1.4.3 铸造铜合金 | 128 |
| 1.4.4 铜基复合材料 | 133 |
| 1.5 难熔金属及其合金 | 134 |
| 1.5.1 概述 | 134 |
| 1.5.2 难熔金属的特性 | 135 |
| 1.5.3 难熔金属的强韧化 | 136 |
| 1.5.4 钨及其合金生产 | 143 |
| 1.5.5 钼及其合金生产 | 146 |
| 1.5.6 钽及其合金生产 | 149 |
| 1.5.7 铌及其合金生产 | 152 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| 1.5.8 高纯难熔金属的制取 | 154 |
| 2 铸锭生产 | 156 |
| 2.1 有色金属熔炼 | 156 |
| 2.1.1 熔体成分的控制 | 156 |
| 2.1.2 熔体的精炼 | 177 |
| 2.2 有色金属熔炼技术 | 204 |
| 2.2.1 反射炉熔炼技术 | 205 |
| 2.2.2 坩埚炉及感应炉熔炼技术 | 205 |
| 2.2.3 真空电弧炉熔炼技术 | 209 |
| 2.2.4 电渣炉熔炼技术 | 212 |
| 2.2.5 电子束炉熔炼技术 | 215 |
| 2.2.6 等离子炉熔炼技术 | 217 |
| 2.3 有色金属铸锭 | 219 |
| 2.3.1 铸锭组织的形成与控制 | 219 |
| 2.3.2 铸锭晶粒组织的控制 | 224 |
| 2.3.3 变质处理 | 227 |
| 2.3.4 铸锭主要缺陷分析 | 231 |
| 2.4 有色金属的铸锭技术 | 249 |
| 2.4.1 金属模铸锭技术 | 249 |
| 2.4.2 立式连续铸锭及半连续铸锭技术 | 250 |
| 2.4.3 卧式连铸技术 | 256 |
| 2.4.4 其他铸锭新技术 | 261 |
| 3 有色金属材料塑性加工 | 269 |
| 3.1 锻造 | 270 |
| 3.1.1 自由锻 | 270 |
| 3.1.2 模锻 | 274 |
| 3.1.3 特殊锻压方法 | 277 |
| 3.2 轧制 | 280 |
| 3.2.1 平辊轧制基础知识 | 280 |
| 3.2.2 平辊轧制过程的控制 | 295 |
| 3.2.3 型材轧制 | 307 |
| 3.2.4 管材轧制 | 314 |
| 3.3 挤压 | 325 |
| 3.3.1 挤压的基本方法与特点 | 325 |
| 3.3.2 挤压时金属的流动规律 | 327 |
| 3.3.3 挤压制品的组织和性能特点与控制 | 338 |
| 3.3.4 挤压力 | 346 |
| 3.3.5 挤压温度—速度规程 | 355 |
| 3.3.6 挤压新技术新方法 | 357 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| 3.4 拉拔 | 364 |
| 3.4.1 拉拔的基本方法 | 364 |
| 3.4.2 金属圆棒拉拔时变形与应力 | 367 |
| 3.4.3 空拉管的变形与应力 | 372 |
| 3.4.4 衬拉 | 374 |
| 3.4.5 拉拔制品中的残余应力 | 377 |
| 3.4.6 其他拉拔方法 | 379 |
| 3.5 板料冲压 | 382 |
| 3.5.1 冲裁 | 382 |
| 3.5.2 弯曲 | 385 |
| 3.5.3 拉深 | 389 |
| 3.5.4 旋压 | 394 |
| 3.5.5 成形 | 397 |
| 3.5.6 高速成形 | 399 |
| 4 有色金属材料塑性加工工艺 | 401 |
| 4.1 有色金属材料生产方法与工艺流程 | 401 |
| 4.1.1 加工方法的选择 | 401 |
| 4.1.2 几种主要产品的加工方法 | 403 |
| 4.1.3 工艺流程的确定 | 404 |
| 4.1.4 生产工艺流程图 | 405 |
| 4.2 热加工工艺 | 407 |
| 4.2.1 热加工的锭坯准备 | 407 |
| 4.2.2 锭坯的加热及变形温度控制 | 411 |
| 4.2.3 热加工变形程度的确定 | 414 |
| 4.2.4 热加工变形速度的确定 | 416 |
| 4.2.5 热加工的润滑与冷却 | 418 |
| 4.3 冷加工工艺 | 420 |
| 4.3.1 冷加工坯料准备 | 420 |
| 4.3.2 冷加工变形程度的确定 | 421 |
| 4.3.3 冷加工变形速度的确定 | 425 |
| 4.3.4 冷加工的润滑与冷却 | 425 |
| 4.3.5 冷加工过程中的退火 | 426 |
| 4.3.6 其他辅助工序 | 430 |
| 4.4 有色金属加工产品缺陷与质量控制 | 431 |
| 4.4.1 外形与尺寸偏差 | 431 |
| 4.4.2 表面质量 | 432 |
| 4.4.3 加工时的断裂 | 432 |
| 4.4.4 组织与性能 | 433 |
| 4.4.5 产品的质量的控制 | 433 |
| 4.5 典型产品生产工艺简介 | 434 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 4.5.1 轧制铝箔 | 434 |
| 4.5.2 6063 建筑型材 | 434 |
| 4.5.3 IC 引线框架铜合金带材生产 | 435 |
| 4.5.4 H62 黄铜带生产 | 436 |
| 4.5.5 钨丝 | 437 |
| 4.5.6 内螺纹铜盘管 | 438 |
| 参考文献 | 439 |

1 有色金属及其合金

1.1 铝及铝合金

除钢铁以外,铝材是用量最多、应用范围最广的第二大类金属材料,广泛用于航空、航天、建筑、电力、交通运输及包装等领域。铝(Al)作为一种金属元素是1825年被发现的,1866年Hall-Héroult熔盐电解法问世后,铝的生产进入了工业化规模阶段。近百年来,铝工业发展很快,1921年全世界铝产量仅为20.3万t,到2005年,全世界铝产量已达3170万t(其中中国786.6万t)。其应用广泛和发展迅速是由铝及其合金优良的性能所决定的。

1.1.1 纯铝的特性

纯铝有着许多独特的性质和优良的综合性能,主要为:

(1) 密度小。铝的密度为 2.699 g/cm^3 ,约为钢的密度的 $1/3$ 。铝与镁(1.738 g/cm^3)、铍(1.848 g/cm^3)、钛(4.507 g/cm^3)统称为常用的轻金属。

(2) 可强化。纯铝的抗拉强度虽然不高(高纯铝退火状态的抗拉强度约为 50 MPa),但它可以通过固溶强化、沉淀强化、应变强化等手段,使铝合金的强度提高到适合的预定目标。今天超高强度铝合金的抗拉强度已超过 700 MPa ,其比强度可与优质的合金钢媲美。

(3) 易加工。铝及其合金可用任何一种铸造方法铸造;其塑性好,可轧制成板材和箔材,拉拔成线材和丝材,挤压成管材、棒材及复杂断面的型材;可以以很高速度进行车、铣、镗、刨等机械加工。

(4) 耐腐蚀。虽然在热力学上铝是最活泼的金属之一,但铝及其合金的表面极易形成一薄层致密、牢固的 Al_2O_3 保护膜,这层保护膜只有在卤素离子或碱离子的激烈作用下才会遭到破坏,这层保护膜使铝在大气中、氧化性介质中、弱酸性介质中、pH值介于 $4.5\sim 8.5$ 之间的水溶液中是稳定的,属耐腐蚀性能良好的金属材料。

(5) 导电、电热性好。铝是良好的电导体和热导体。99.99%的纯铝在 20°C 时的电阻率为 $2.6548\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$,相当于国际退火铜标准电导率(IACS)的 64.94% ,在长度和重量相等的情况下,铝导体导输的电流是铜导体导输电流的2倍。所有高纯金属的电阻率均随温度的降低而迅速单调降低,铝的电阻率降低得特别快,并超过了铜,在低于 62 K 时,高纯铝的电阻率小于高纯铜的电阻率,而且在很低温度下受磁场的有害影响较小。

铝的热导率约为铜的 $1/2$,铁的3倍,不锈钢的12倍。完全退火的高纯铝在 273.2 K 时的热导率为 $2.36\text{ W}/(\text{cm}\cdot\text{K})$,高于 100 K 时,其热导率对杂质含量不敏感。

(6) 无磁性,冲击不产生火花。这对某些特殊用途十分可贵,如作仪表材料,电气设备屏蔽材料,易燃、易爆物生产器材及容器等。

(7) 耐核辐射。对低能范围的中子,其吸收面积小,仅次于铍、镁、铍等金属。而铝耐辐射的最大优点是对照射生成的感应放射能衰减很快。

(8) 耐低温,无低温脆性。铝在零摄氏度以下,随着温度的降低,强度和塑性不仅不会降低,反而提高。

(9) 反射能力强。铝的抛光表面对白光的反射率达 80% 以上,纯度越高反射率越高。铝对

红外线、紫外线、电磁波、热辐射等都有良好的反射性能。

(10) 美观,呈银白色光泽。铝经机加工就可以达到很低的粗糙度和很好的光亮度。如果经阳极氧化和着色,不仅可以提高耐腐蚀性能,而且可以获得五颜六色光彩夺目的制品。铝可以电镀、覆盖陶瓷、涂漆,而且涂漆后不会产生裂纹和剥皮,即使局部损坏也不会产生蚀斑。

铝的上述特性是由它的物理、化学性质所决定的。铝的晶体结构为面心立方,原子序数为13,相对原子质量为26.98。铝有多个同位素,主要的同位素是 ^{27}Al ,很稳定。铝的主要物理性能列于表1-1-1。

表 1-1-1 铝的主要物理性能

| 性 能 | 数 值 |
|--------------|--|
| 晶格常数(298 K) | $4.0496 \times 10^{-10} \text{ m}$ |
| 密度(固体) | 2.699 g/cm^3 |
| 线胀系数(298 K) | $23 \times 10^{-6} / \text{K}$ |
| 热导率(298 K) | $2.37 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ |
| 体积电阻率(298 K) | $2.655 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ |
| 表面张力(熔点) | 0.868 N/m |
| 熔点 | 933.5 K |
| 沸点 | 2767 K |
| 熔化潜热 | 397 J/g |
| 热容 | $0.90 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ |

1.1.2 铝的合金化规律

大多数金属元素可与铝形成合金,使铝获得固溶强化和沉淀强化。但只有几种元素在铝中有较大固溶度,从而成为常用的合金化元素。一些元素在铝中的最大平衡固溶度见表1-1-2,从表中可以看出,最大平衡固溶度超过1%(摩尔分数)的元素有8个:银、铜、镓、锗、锂、镁、硅和锌。

表 1-1-2 主要合金元素在铝中的最大平衡固溶度和因快速凝固扩展的固溶度

| 元 素 | 温度/℃ | 平衡溶解度● /% | 扩展溶解度/% |
|-----|------|-----------|---------|
| Ag | 566 | 55.6 | 66.6 |
| Cu | 548 | 5.67 | 34.0 |
| Zn | 382 | 82.8 | 60.0 |
| Mg | 450 | 14.9 | 37.5 |
| Li | 600 | 4.2 | — |
| Fe | 655 | 0.052 | 9.7 |
| Si | 577 | 1.65 | 16.5 |
| Cr | 660 | 0.77 | 11.0 |
| Mn | 650 | 1.82 | 16.8 |
| Ni | 640 | 0.05 | 10.3 |
| Co | 660 | <0.02 | 10.3 |
| Mo | 660 | 0.25 | 3.5 |
| V | 665 | 0.6 | 3.7 |
| Ti | 665 | 1.0 | 3.5 |
| Zr | 660 | 0.28 | 4.9 |

● 本书凡未注明的百分含量均为质量分数。

续表 1-1-2

| 元 素 | 温度/℃ | 平衡溶解度/% | 扩展溶解度/% |
|-----|------|---------|---------|
| Sn | 230 | <0.01 | 1.1 |
| Ga | 30 | 20.0 | 82.8 |
| Ge | 424 | 7.2 | 16.8 |

锰的最大平衡固溶度达0.9%(摩尔分数),其他元素的平衡固溶度都比较低。由于银、镓、锗属稀贵金属,不可能用作一般工业合金的主要添加元素,因此,铜、镁、锌、硅、锰、锂成为铝合金的主要合金化元素,它们不仅有足够大的固溶能力而显示明显的固溶强化作用,而且相互之间可以形成许多金属间化合物,通过热处理进行控制,从而对沉淀强化起重要作用。因此无论是变形铝合金或铸造铝合金,其主要合金系列都是以铜、镁、锰、锌、硅为主要合金化元素建立起来的。锂由于化学性质十分活泼,获取金属锂较困难,成本高,在一定程度上阻碍了其应用。但是 Al-Li 合金具有突出的优良性能,在航空航天领域有着广泛用途,近十年来 Al-Li 合金有了很快的发展。

铬、钛、锆、钒等过渡族元素,在铝中的固溶度都比较小。这些元素主要用于形成金属间化合物以细化晶粒或控制回复和再结晶,使合金组织结构得到改善。铁和镍主要作为提高合金耐热性能元素加入。

合金元素对纯铝性能的影响示于图 1-1-1~图 1-1-9。

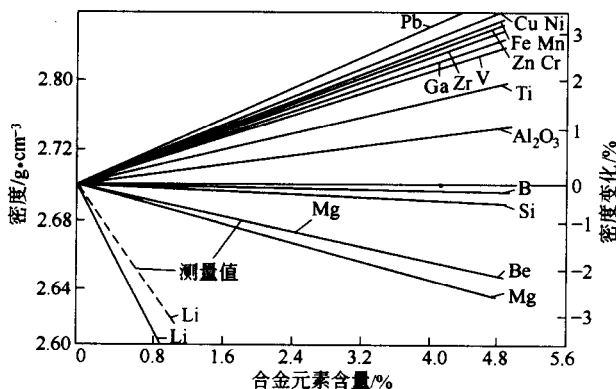


图 1-1-1 合金元素的含量对纯铝密度的影响(计算值)

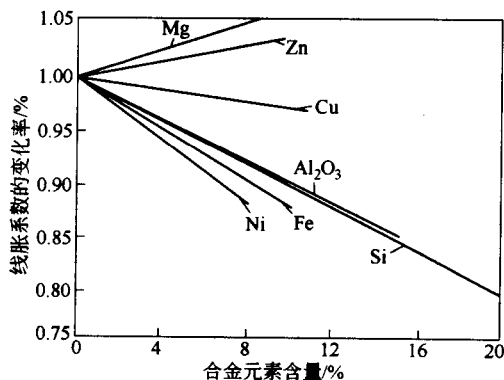


图 1-1-2 合金元素含量对高纯铝线胀系数的影响
(以 99.996% Al 的线胀系数为 1 作基准)

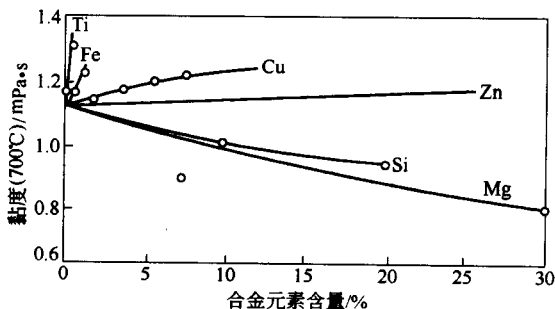


图 1-1-3 合金元素对纯铝在 700℃ 时黏度的影响

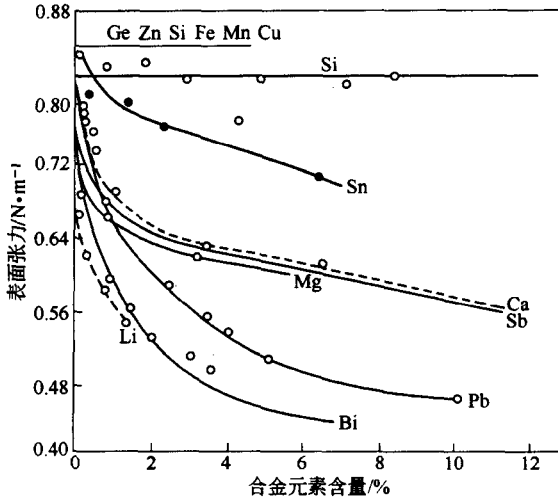


图 1-1-4 合金元素含量对熔融铝 (99.99%) 表面张力的影响

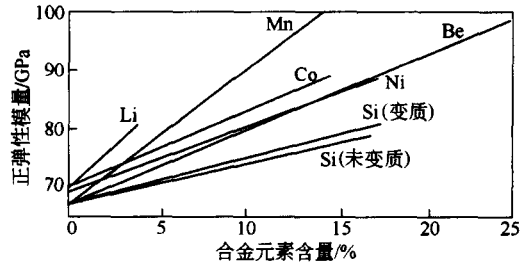


图 1-1-5 合金元素对纯铝弹性模量的影响

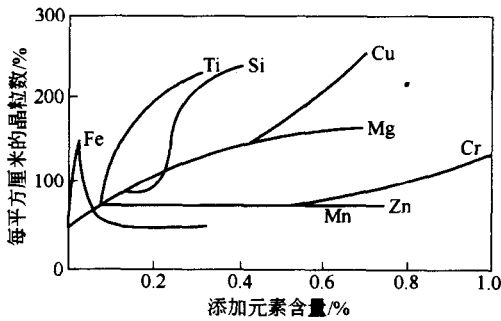


图 1-1-6 少量添加元素对 99.99% 铝再结晶晶粒尺寸的影响 (冷变形程度为 80%)

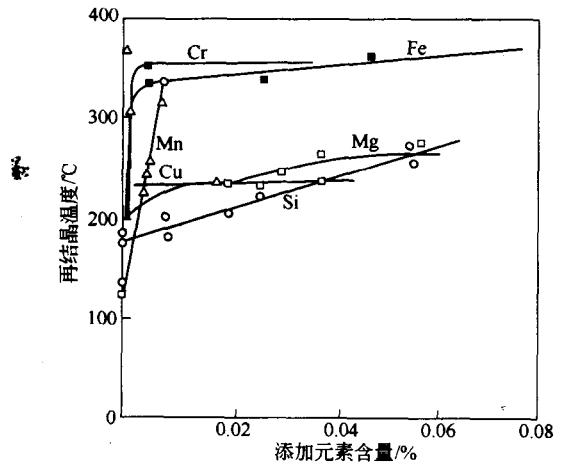


图 1-1-7 微量元素对高纯铝 (99.999%) 再结晶温度的影响 (冷变形程度为 40%)

1.1.3 铝合金牌号及状态表示法

铝合金分为变形铝合金和铸造铝合金两大类,各分为若干合金系列,如表 1-1-3 所示。每个合金系又有若干合金牌号,每种合金均有不同的加工状态和热处理状态以适应各种用途。

表 1-1-3 我国变形铝合金和铸造铝合金系列

| 变形铝合金 | | 铸造铝合金 | |
|-------|------------------|-------|---------|
| 牌号系列 | 主要合金化元素 | 牌号系列 | 主要合金化元素 |
| 1××× | 无(铝含量不小于 99.00%) | ZL1×× | Si |

续表 1-1-3

| 变形铝合金 | | 铸造铝合金 | |
|-------|------------------------------------|-------|---------|
| 牌号系列 | 主要合金化元素 | 牌号系列 | 主要合金化元素 |
| 2××× | Cu | ZL2×× | Cu |
| 3××× | Mn | ZL3×× | Mg |
| 4××× | Si | ZL4×× | Zn |
| 5××× | Mg | | |
| 6××× | Mg 和 Si 并以 Mg ₂ Si 为强化相 | | |
| 7××× | Zn | | |
| 8××× | 除上述元素外的其他元素 | | |
| 9××× | 备用组 | | |

我国变形铝合金和铸造铝合金牌号和成分见表 1-1-4~表 1-1-6,状态表示法简述如下。

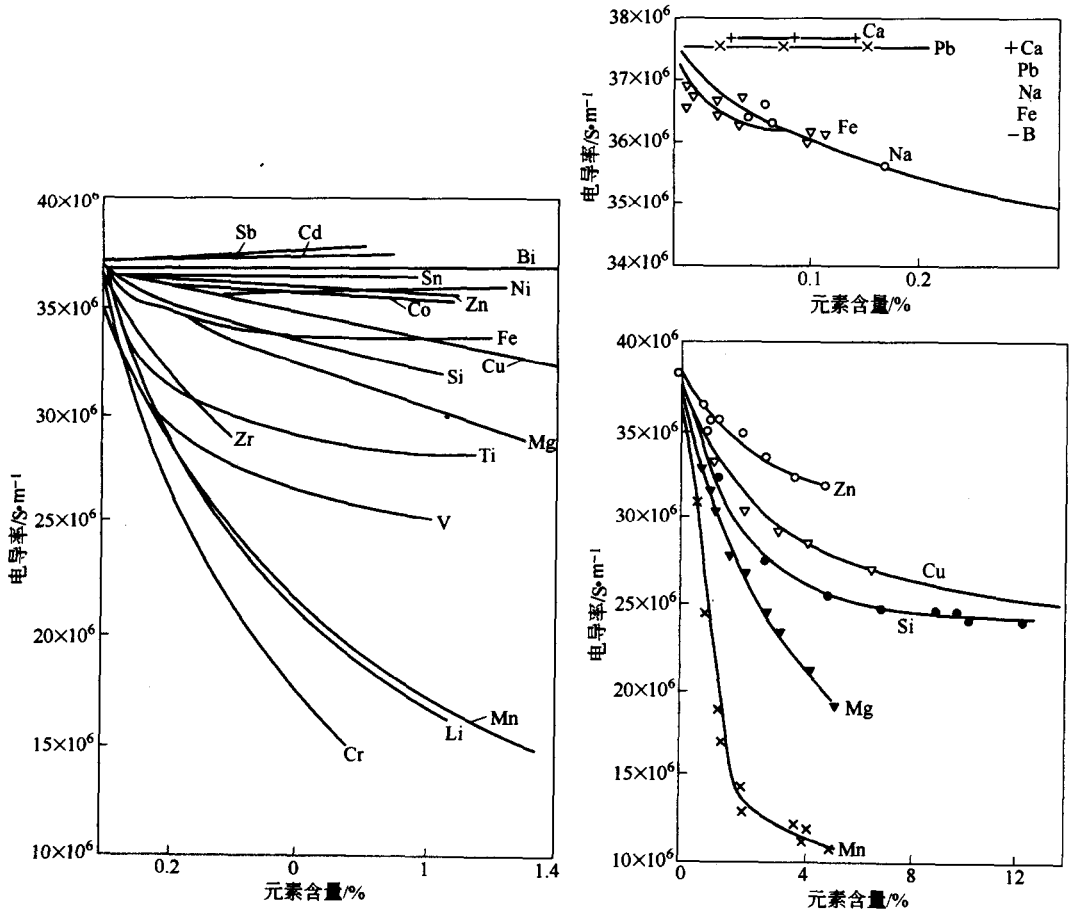


图 1-1-8 合金元素和杂质含量对纯铝(99.99%)导电性能的影响

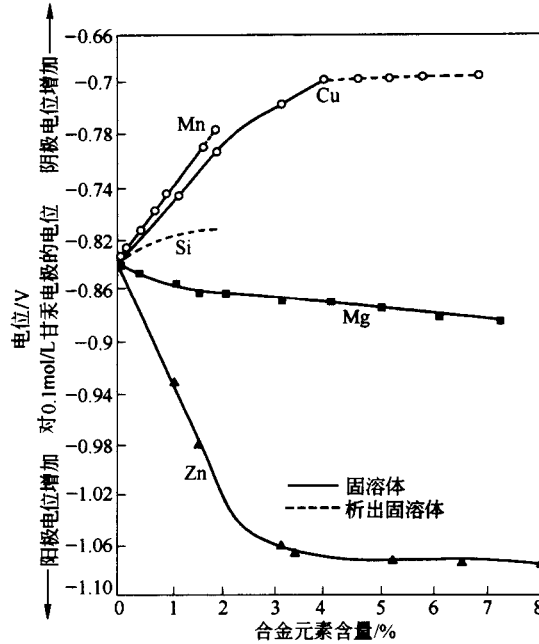


图 1-1-9 主要合金元素含量对高纯铝电极电位的影响

表 1-1-4 我国变形铝合金牌号及化学成分(GB/T3190—1996)

| 序号 | 牌号 | 化 学 成 分 /% | | | | | | | | | | | 备注 | | | |
|----|-------|------------|-------|-------|------|------|------|----|------|----------------------------|------|-------|------|-------|-------|-----|
| | | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Zr | 其他 | | Al | | |
| | | | | | | | | | | | | 单个 | | | 合计 | |
| 1 | 1A99 | 0.003 | 0.003 | 0.005 | — | — | — | — | — | — | — | 0.002 | — | 99.99 | LG5 | |
| 2 | 1A97 | 0.015 | 0.015 | 0.005 | — | — | — | — | — | — | — | 0.005 | — | 99.97 | LG4 | |
| 3 | 1A95 | 0.030 | 0.030 | 0.010 | — | — | — | — | — | — | — | 0.05 | — | 99.95 | — | |
| 4 | 1A93 | 0.040 | 0.040 | 0.010 | — | — | — | — | — | — | — | 0.007 | — | 99.93 | LG3 | |
| 5 | 1A90 | 0.060 | 0.060 | 0.010 | — | — | — | — | — | — | — | 0.01 | — | 99.90 | LG2 | |
| 6 | 1A85 | 0.08 | 0.10 | 0.01 | — | — | — | — | — | — | — | 0.01 | — | 99.85 | LG1 | |
| 7 | 1A80 | 0.15 | 0.15 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | — | — | 0.03 | Ca:0.03; V:0.05 | 0.03 | — | 0.02 | — | 99.80 | — |
| 8 | 180A | 0.15 | 0.15 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | — | — | 0.06 | Ca:0.03 | 0.02 | — | 0.02 | — | 99.80 | — |
| 9 | 1070 | 0.20 | 0.25 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | — | — | 0.07 | — | 0.03 | — | 0.03 | — | 99.70 | — |
| 10 | 1070A | 0.20 | 0.25 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | — | — | 0.07 | — | 0.03 | — | 0.03 | — | 99.70 | — |
| 11 | 1370 | 0.10 | 0.25 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | — | 0.04 | Ca:0.03; V+Ti:0.02; B:0.02 | — | — | 0.02 | 0.10 | 99.70 | — |
| 12 | 1060 | 0.25 | 0.35 | 0.05 | 0.03 | 0.03 | — | — | 0.05 | V:0.05 | 0.03 | — | 0.03 | — | 99.60 | — |
| 13 | 1050 | 0.25 | 0.40 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | — | — | 0.05 | V:0.05 | 0.03 | — | 0.03 | — | 99.50 | — |
| 14 | 1050A | 0.25 | 0.40 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | — | — | 0.07 | — | 0.05 | — | 0.03 | — | 99.50 | — |
| 15 | 1A50 | 0.30 | 0.30 | 0.01 | 0.05 | 0.05 | — | — | 0.03 | Fe+Si:0.45 | — | — | 0.03 | — | 99.50 | LB2 |

续表 1-1-4

| 序号 | 牌号 | 化 学 成 分 /% | | | | | | | | | | | | | 备注 | |
|----|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|------|------|---------------------------------|-------------------|----|------|------|-------|------|
| | | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Zr | 其他 | | Al | | |
| | | | | | | | | | | | | 单个 | 合计 | | | |
| 16 | 1350 | 0.10 | 0.40 | 0.05 | 0.01 | — | 0.01 | — | 0.05 | Ca:0.03; V+Ti:0.02 B:0.05 | — | — | 0.03 | 0.10 | 99.50 | — |
| 17 | 1145 | Si+Fe:0.55 | | 0.05 | 0.05 | 0.05 | — | — | 0.05 | V:0.05 | 0.03 | — | 0.03 | — | 99.45 | — |
| 18 | 1030 | 0.35 | 0.6 | 0.10 | 0.05 | 0.05 | — | — | 0.10 | V:0.05 | 0.03 | — | 0.03 | — | 99.35 | — |
| 19 | 1A30 | 0.10 ~ 0.20 | 0.15 ~ 0.30 | 0.05 | 0.01 | 0.01 | — | 0.01 | 0.02 | — | 0.02 | — | 0.03 | — | 99.30 | L4-1 |
| 20 | 1100 | Si+Fe:0.95 | | 0.05 ~ 0.20 | 0.05 | — | — | — | 0.10 | ① | — | — | 0.05 | 0.15 | 99.00 | — |
| 21 | 1200 | Si+Fe:1.00 | | 0.05 | 0.05 | — | — | — | 0.10 | — | 0.05 | — | 0.05 | 0.15 | 99.00 | — |
| 22 | 1235 | Si+Fe:0.65 | | 0.05 | 0.05 | 0.05 | — | — | 0.10 | V:0.05 | 0.06 | — | 0.03 | — | 99.35 | — |
| 23 | 2A01 | 0.50 | 0.50 | 2.2 ~ 3.0 | 0.20 ~ 0.50 | 0.20 ~ 0.50 | — | — | 0.10 | — | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LY1 |
| 24 | 2A02 | 0.30 | 0.30 | 2.6 ~ 3.2 | 0.45 ~ 0.70 | 2.0 ~ 2.4 | — | — | 0.10 | — | 0.15 | — | 0.05 | 0 | 余量 | LY2 |
| 25 | 2A04 | 0.30 | 0.30 | 3.2 ~ 3.7 | 0.5 ~ 0.8 | 2.1 ~ 2.6 | — | — | 0.10 | Be:0.001 ~0.01② | 0.05 ~ 0.40 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LY4 |
| 26 | 2A06 | 0.50 | 0.50 | 3.8 ~ 4.3 | 0.5 ~ 1.0 | 1.7 ~ 2.3 | — | — | 0.10 | Be:0.001 ~0.005② | 0.03 ~ 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LY6 |
| 27 | 2A10 | 0.25 | 0.20 | 3.9 ~ 4.5 | 0.30 ~ 0.50 | 0.15 ~ 0.30 | — | — | 0.10 | — | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LY10 |
| 28 | 2A11 | 0.7 | 0.7 | 3.8 ~ 4.8 | 0.4 ~ 0.8 | 0.4 ~ 0.8 | — | — | 0.10 | — | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LY11 |
| 29 | 2B11 | 0.50 | 0.50 | 3.8 ~ 4.5 | 0.4 ~ 0.8 | 0.4 ~ 0.8 | — | — | 0.10 | — | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LY8 |
| 30 | 2A12 | 0.50 | 0.50 | 3.8 ~ 4.9 | 0.3 ~ 0.9 | 1.2 ~ 1.8 | — | 0.10 | 0.30 | Fe+Ni:0.50 | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LY12 |
| 31 | 2B12 | 0.50 | 0.50 | 3.8 ~ 4.5 | 0.3 ~ 0.7 | 1.2 ~ 1.6 | — | — | 0.10 | — | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LY9 |
| 32 | 2A13 | 0.7 | 0.6 | 4.0 ~ 5.0 | — | 0.30 ~ 0.50 | — | — | 0.6 | — | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LY13 |
| 33 | 2A14 | 0.6 ~ 1.2 | 0.7 | 3.9 ~ 4.8 | 0.4 ~ 1.0 | 0.4 ~ 0.8 | — | 0.10 | 0.30 | — | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LD10 |

续表 1-1-4

| 序号 | 牌号 | 化 学 成 分 /% | | | | | | | | | | | | | 备注 | |
|----|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|------|------|----|------|
| | | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | | Ti | Zr | 其他 | | | Al |
| | | | | | | | | | | | | | 单个 | 合计 | | |
| 34 | 2A16 | 0.30 | 0.30 | 6.0 ~ 7.0 | 0.4 ~ 0.8 | 0.05 | — | — | 0.10 | — | 0.10 ~ 0.20 | 0.20 | 0.05 | 0.10 | 余量 | LY16 |
| 35 | 2B16 | 0.25 | 0.30 | 5.8 ~ 6.8 | 0.2 ~ 0.4 | 0.05 | — | — | — | V:0.05~0.15 | 0.08 ~ 0.20 | 0.10 ~ 0.25 | 0.05 | 0.10 | 余量 | — |
| 36 | 2A17 | 0.30 | 0.30 | 6.0 ~ 7.0 | 0.4 ~ 0.8 | 0.25 ~ 0.45 | — | — | 0.10 | — | 0.10 ~ 0.20 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LY17 |
| 37 | 2A20 | 0.20 | 0.30 | 5.8 ~ 6.8 | — | 0.02 | — | — | 0.10 | V:0.05~0.15 B:0.001~0.01 | 0.07 ~ 0.16 | 0.10 ~ 0.25 | 0.05 | 0.15 | 余量 | LY20 |
| 38 | 2A21 | 0.20 | 0.2 ~ 0.6 | 3.0 ~ 4.0 | 0.05 | 0.8 ~ 1.2 | — | 1.8 ~ 2.3 | 0.20 | — | 0.05 | — | 0.05 | 0.15 | 余量 | — |
| 39 | 2A25 | 0.06 | 0.06 | 3.6 ~ 4.2 | 0.5 ~ 0.7 | 1.0 ~ 1.5 | — | 0.06 | — | — | — | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | — |
| 40 | 2A49 | 0.25 | 0.8 ~ 1.2 | 3.2 ~ 3.8 | 0.3 ~ 0.6 | 1.8 ~ 2.2 | — | 0.8 ~ 1.2 | — | — | 0.08 ~ 0.12 | — | 0.05 | 0.15 | 余量 | — |
| 41 | 2A50 | 0.7 ~ 1.2 | 0.7 | 1.8 ~ 2.6 | 0.4 ~ 0.8 | 0.4 ~ 0.8 | — | 0.10 | 0.30 | Fe+Ni:0.7 | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LD5 |
| 42 | 2B50 | 0.7 ~ 1.2 | 0.7 | 1.8 ~ 2.6 | 0.4 ~ 0.8 | 0.4 ~ 0.8 | 0.01 ~ 0.20 | 0.10 | 0.30 | Fe+Ni:0.7 | 0.02 ~ 0.10 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LD6 |
| 43 | 2A70 | 0.35 | 0.9 ~ 1.5 | 1.9 ~ 2.5 | 0.20 | 1.4 ~ 1.8 | — | 0.9 ~ 1.5 | 0.30 | — | 0.02 ~ 0.10 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LD7 |
| 44 | 2B70 | 0.25 | 0.9 ~ 1.4 | 1.8 ~ 2.7 | 0.20 | 1.2 ~ 1.8 | — | 0.8 ~ 1.4 | 0.15 | Pb:0.05; Sn:0.05 Ti+Zr:0.20 | 0.10 | -0.05 | 0.15 | 余量 | — | |
| 45 | 2A80 | 0.5 ~ 1.2 | 1.0 ~ 1.6 | 1.9 ~ 2.5 | 0.20 | 1.4 ~ 1.8 | — | 0.9 ~ 1.5 | 0.30 | — | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LD8 |
| 46 | 2A90 | 0.5 ~ 1.0 | 0.5 ~ 1.0 | 3.5 ~ 4.5 | 0.20 | 0.4 ~ 0.8 | — | 1.8 ~ 2.3 | 0.30 | — | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 | LD9 |
| 47 | 2004 | 0.20 | 0.20 | 5.5 ~ 6.5 | 0.10 | 0.50 | — | — | 0.10 | — | 0.05 | 0.30 ~ 0.50 | 0.05 | 0.15 | 余量 | — |
| 48 | 2011 | 0.40 | 0.7 | 5.0 ~ 6.0 | — | — | — | — | 0.30 | Bi:0.20~0.6 Pb:0.20~0.6 | — | — | 0.05 | 0.15 | 余量 | — |
| 49 | 2014 | 0.5 ~ 1.2 | 0.7 | 3.9 ~ 5.0 | 0.4 ~ 1.2 | 0.2 ~ 0.8 | 0.10 | — | 0.25 | ③ | 0.15 | — | 0.05 | 0.15 | 余量 | — |
| 50 | 2014A | 0.5 ~ 0.9 | 0.50 | 3.9 ~ 5.0 | 0.4 ~ 1.2 | 0.2 ~ 0.8 | 0.10 | 0.10 | 0.25 | Ti+Zr:0.20 | 0.15 | — | 0.05 | 0.15 | 余量 | — |