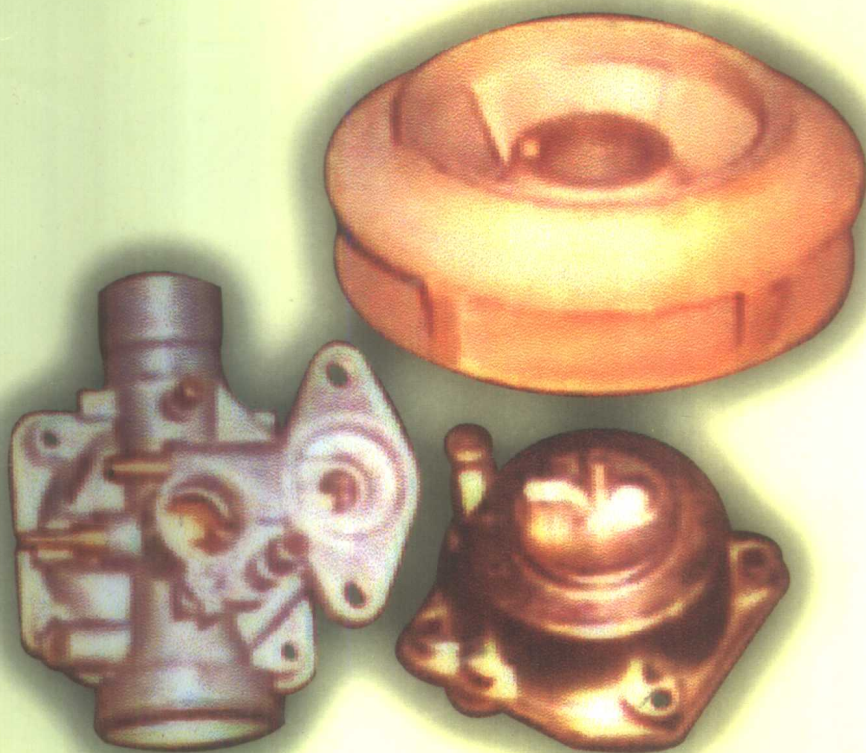


罗启全 编著

铝合金 熔炼与铸造

广东科技出版社



铝合金熔炼与铸造

罗启全 编著

广东科技出版社
· 广 州 ·

总和

0

0

0

0

其分

和

5

0

0

5%。

做常

g

3

图书在版编目 (CIP) 数据

铝合金熔炼与铸造/罗启全编著. —广州: 广东科技出版社, 2002.9

ISBN 7-5359-3049-2

I. 铝… II. 罗… III. ①铝合金-熔炼 ②铝合金-铸造 IV. TG292

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 026205 号

出版发行: 广东科技出版社

(广州市环市东路水荫路 11 号 邮编: 510075)

E-mail: gdkjzbb@21cn.com

http: //www.gdstp.com.cn

出版人: 黄达全

经 销: 广东新华发行集团

印 刷: 广州市穗彩彩印厂

(广州市石溪富全街 18 号 邮编: 510288)

规格: 787mm×1092mm 1/16 印张 17.75 字数 350 千

版 次: 2002 年 9 月第 1 版

2002 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1~3 000 册

定 价: 38.00 元

如发现因印装质量问题影响阅读, 请与承印厂联系调换。

内 容 提 要

本书系统地介绍了铝及铝合金的基本知识，铝合金的分类，熔炼用金属与非金属材料，合金液的吸气，氧化与排除方法，熔炼与铸造工艺及设备，质量的控制与缺陷的防止，环境和劳动保护等内容。并配有插图。

本书为国内迄今一本比较系统、详尽介绍有关铝合金熔炼与铸造工艺的专著，适合铝合金铸件和铝材、铝制品生产厂家从事铝合金熔炼与铸造的有关人员和学校、科研单位等有关人员阅读参考。

前 言

我国改革开放 20 多年来，家电、建材、摩托车、汽车等工业蓬勃发展，对铝合金铸件（尤其是压铸件）、型材和制品的需求量和品种日益增多。为适应此需要，全国各地（尤其是广东等沿海经济发达地区）兴办了不少铝合金铸造厂、型材加工厂。据了解，这些厂家在铝合金熔炼和铸造过程中都不同程度地存在一些技术质量问题，影响了产品质量和经济效益。考虑到国内迄今尚无一本专门论述铝合金熔炼与铸造的书出版，且在已有的铸造书中仅把此内容作为一章，内容较简单或出版时间过早，加之铝及铝合金在今后相当长的时期内还将是一种使用量最多、用途日益扩大、开发前景看好的非铁金属材料，为交流经验，切磋技艺，把先进的军工技术向民用转移，把国外的先进技术为我所用，共同促进我国铝合金熔炼与铸造技术的进步，作者编写了本书。

本书汇集了国内外有关铝及铝合金熔炼与铸造方面的技术、经验、材料、设备及研究发展动向等，是多家军工企业和研究机构的铸造科技人员和作者本人几十年工作经验的总结，可供铝及铝合金铸造生产厂家、学校和科研单位从事铝合金熔炼与铸造的科技人员、工人及供销等人员阅读参考。

由于作者水平有限，书中错漏之处在所难免，敬请读者指正，作者深表感谢！

罗启全
2002 年 3 月

目 录

绪论	(1)
一、铝合金在国防和国民经济中的地位和作用	(1)
二、我国铝合金熔炼与铸造现状	(1)
三、铸造铝合金和变形铝合金的发展趋势	(2)
第一章 概述	(3)
第一节 铝及铝合金的基本知识	(3)
一、铝及铝合金的特点及其在工业上的应用	(4)
二、铝及铝合金的分类	(5)
三、铸造性能与合金系的关系	(7)
四、各系铝合金的主要合金化元素、性能及应用	(13)
五、微量元素与杂质对铝合金性能的影响	(36)
第二节 铝合金熔炼与铸造的任务和目的	(42)
一、熔炼的主要任务和目的	(42)
二、铸造的主要任务和目的	(42)
第二章 铝合金液的吸气、氧化及夹杂物	(44)
第一节 铝合金液的吸气与气体缺陷的形成	(44)
一、合金液中气体的来源及其影响因素	(44)
二、气孔的形状、特征及其危害	(48)
三、氢在铝合金液中的扩散和析出	(49)
四、气孔的形成机理	(49)
第二节 铝合金液的氧化	(50)
一、金属的氧化特性	(50)
二、铝合金的氧化	(50)
三、影响铝合金氧化的因素	(51)
第三节 夹杂物的形成、特点及危害	(53)
一、夹杂物的分类及特点	(53)
二、夹杂物的危害	(56)
第三章 铝合金的熔炼	(58)
第一节 熔炼用金属材料	(58)
一、新金属	(58)
二、中间合金	(61)
三、回炉料	(68)
四、对材料保管的要求	(69)

第二节 熔炼用辅助材料	(69)
一、铝合金用熔剂	(69)
二、铝合金用精炼剂	(71)
三、铝合金常用变质剂	(73)
四、铝合金用涂料	(74)
第三节 熔炼、保温用设备、工具	(78)
一、铸造铝合金用熔炼、保温设备	(78)
二、变形铝合金用熔炼、保温炉	(81)
三、坩埚材料、保温材料	(84)
第四节 熔炼工艺及操作	(90)
一、铝合金熔炼的一般工艺流程	(90)
二、熔炼前的各项准备工作	(90)
第五节 铝合金的熔炼工艺	(94)
一、铸造铝合金的典型熔炼工艺	(95)
二、变形铝合金的典型熔炼工艺	(100)
三、铝及铝合金废料的回收重熔工艺	(100)
第四章 铝合金液的精炼净化	(103)
第一节 精炼的目的和要求	(103)
第二节 铝合金液的精炼净化	(103)
一、炉内精炼	(103)
二、炉外精炼	(112)
三、我国铝合金液精炼技术的现状	(122)
第五章 铝合金晶粒的细化	(123)
第一节 影响金属或合金晶粒度的几个因素	(123)
一、金属或合金液的温度	(123)
二、孕育处理和合金化	(123)
三、铸模的热学性质	(124)
四、振动能的影响	(126)
第二节 铝硅合金的变质处理	(127)
一、变质剂的种类及制备	(127)
二、变质工艺	(129)
三、不同变质剂和变质工艺的比较和评价	(130)
第三节 铝合金的变质处理和孕育处理	(133)
一、亚共晶、共晶型铝硅合金的变质处理	(133)
二、过共晶型铝硅合金的晶粒细化	(134)
三、 α 固溶体的晶粒细化	(136)
第六章 铝合金液质量检测 and 铸造性能与缺陷	(138)
第一节 铝合金液质量的评价检测方法	(138)

一、化学成分的测定	(138)
二、含气量的测定	(140)
三、夹杂物的测定	(144)
四、变质或孕育处理效果的评价	(146)
五、熔液温度的测定	(147)
第二节 熔液质量与铸造性能、铸造缺陷	(148)
一、流动性	(148)
二、收缩性	(152)
三、铸造裂纹	(155)
第七章 铝及铝合金的铸造	(158)
第一节 铸造铝合金的铸造	(158)
一、砂型铸造	(158)
二、金属型铸造	(162)
三、压力铸造	(163)
四、低压铸造	(168)
五、差压铸造	(172)
六、真空吸铸法 (CLA 法)、真空熔化吸铸法 (CLV 法)、真空砂型吸铸法 (CLAV 法)	(173)
七、石膏型精密铸造法	(177)
第二节 变形铝合金的铸造	(190)
一、对铸锭的基本要求	(190)
二、变形铝合金铸锭的铸造方法	(190)
第八章 铝合金的热处理和表面处理	(194)
第一节 铝合金热处理的目的和方法	(194)
一、热处理的目的	(194)
二、热处理方法及工艺	(194)
三、热处理设备、材料	(201)
第二节 表面处理	(202)
第九章 铸造质量与铸造缺陷的控制	(205)
第一节 铸造质量控制	(205)
一、化学成分	(205)
二、机械性能	(205)
三、内部冶金质量	(205)
四、气密性	(206)
五、金相组织	(206)
第二节 液态金属充型过程的控制和浇注系统、冒口、冷铁的设计	(206)
一、液态金属充型过程的控制	(206)
二、铸造铝合金的浇注系统	(209)

三、冒口的作用和冒口的设计与设置	(224)
四、冷铁的设计与制作	(229)
第三节 铸造缺陷的特征、形成原因及防止、补救办法	(232)
一、铝合金铸件常见缺陷特征、形成原因及防止、补救办法	(232)
二、变形铝合金铸锭的质量控制和缺陷防止	(255)
三、铝合金铸锭主要缺陷特征、形成原因及防止、补救办法	(256)
第十章 环境保护及其对策	(259)
第一节 我国铸造业环境和劳动保护的现状	(259)
第二节 铸造行业的环境和劳动保护	(259)
一、加强铸造行业环境保护的基本原则	(259)
二、针对“四害”应采取的措施	(260)
后语	(263)
参考文献	(264)
附表	(266)
附表 1.1 铝合金牌号、代号和化学成分 (HB962—86)	(266)
附表 1.2 铝合金力学性能 (HB962—86)	(268)
附表 2.1 HZL-205 合金化学成分 (HB5228—83)	(270)
附表 2.2 HZL-205 合金的机械、物理、工艺性能 (摘要, HB5228—83)	(270)
附表 3.1 压铸铝合金牌号、化学成分 (HB5012—86)	(270)
附表 3.2 铝合金压力铸造、金属型铸造试样机械性能 (HB5012—86)	(270)
附表 3.3 压铸铝合金常用特性指标 (摘要, HB5012—86)	(271)
附表 4 重熔用铝锭 (GB1196—88)	(272)
附表 5 精铝锭 (GB8644—88)	(272)
附表 6 工业用纯铝箔 (GB3198—82)	(272)
附表 7 工业硅 (GB2881—81)	(273)
附表 8 重熔镁锭 (GB3499—83)	(273)
附表 9 金属锰 (GB2774—87)	(273)
附表 10 电解金属锰 (GB3418—82)	(274)
附表 11 铝锭 (GB469—83)	(274)
附表 12 锌锭 (GB470—83)	(274)

绪 论

一、铝合金在国防和国民经济中的地位和作用

由于铝具有储量大、开采冶炼多、密度小、比强度高、导电性好、外观漂亮、价格适中等特点，使铝及其合金不但在航空、航天、舰船等军事工业，而且在建材、家电、电力和电信线缆等民用工业中占有重要的地位，起着日益重要的作用。世界上各工业发达国家都很重视对铝的研究开发、生产和应用。

我国的铝合金铸件和铝合金型材、制品已从 20 多年前主要用于航空航天等军事工业，发展到大量用于国民经济的各个部门。现在，世界各国军工和民用工业中使用量最多的非铁金属材料（即有色金属材料）便是铝及铝合金，它也是 20 世纪发展得最快的金属材料，预计今后仍将在国防和国民经济中占有重要地位。

二、我国铝合金熔炼与铸造现状

解放前，我国几乎没有铝合金铸造和铝合金加工工业。解放后，为适应我国航空、航天工业的建立对铝合金铸件和铝型材的需要，在原苏联的帮助下，建立并逐步发展了我国的铝合金铸造和铝合金加工工业，并在以后逐步向民用工业发展。至今，不但建立了从铝矾土开采、铝冶炼到铝合金铸造和铝合金加工的完整的铝工业体系，而且建立了适合我国国情的一整套铸造铝合金和变形铝合金的国家标准或部颁标准和几个铝合金研究室，技术水平不断提高，已可铸造出流道弯曲、型面异常复杂的飞机发动机增压器、整体叶轮或重达 2t 多的铝合金铸件，可挤压出各种形状截面和不同厚薄和长度的铝合金型材。铸造方法也不断进步，低压铸造、差压铸造、石膏型精密铸造、真空吸铸等先进的铸造方法已用于铝合金铸造。加工技术也进步较快，近年从国外引进了不少自动化程度较高的铝型材挤压设备和一些先进的工艺技术如精炼、变质技术等，使我国的铝合金铸造和铝合金加工工业发展到了较高的水平。

但我国的铝合金铸造和加工技术，与世界先进水平相比还存在较大的差距，主要反映在设备和工艺都还比较落后，废品率高，生产率低，经济效益差，除少数军工企业的铸造和加工设备较好、专业化程度较高、工艺技术比较先进外，民用工业、特别是乡镇和私营企业，技术和设备都比较落后，因而产品合格率和生产率都不高，经济效益普遍都比较差。

三、铸造铝合金和变形铝合金的发展趋势

(一) 铸造铝合金今后的发展趋势

(1) 在现有技术标准和技术水平上大力发展铝合金优质铸件,即通过提高材料纯度(限制Fe、Si等杂质含量在0.5%以下),采用更复杂的合金化强化手段(增加合金化元素)、制定复杂热处理强化制度等途径获得强度比一般铸造铝合金高98MPa左右,内部冶金质量好,各部位机械性能均匀可靠的铸件,达到减轻零件重量(对宇航、舰艇、运输车辆业尤为重要)、节约能耗、提高铸件合格率、降低成本,满足现代各类工程机械的需要。

(2) 研究开发出兼具高力学性能和工艺性能的新型铸造铝合金,如美国正在研究的利用快速凝固的微晶合金,由于具有极细的显微结构,不仅强度和疲劳韧性好,而且还具有一定的韧性,其工艺性能也较好。

(3) 大力推广石膏型铝合金精密铸造、低压铸造、真空吸铸等先进铸造工艺,改进铸造更大更复杂的薄壁整体结构件工艺技术,以获得表面和内部质量好、尺寸精度高、形状复杂的大型薄壁的铝合金铸件。

(二) 变形铝合金今后的发展趋势

(1) 采用世界上先进的精炼、过滤技术和变质处理细化晶粒的方法,进一步提高合金液的清净程度和力学性能,以及采取电泳等新的工艺提高型材和制品的外观质量和防腐能力。

(2) 在研究铝合金成分的同时,大力加强对熔炼、铸造和加工、热处理等工艺的研究,主要是对浇注铸锭的合金液净化、晶粒细化处理、对铸锭的中间型变热处理(IT-MT,获得等轴微细再结晶组织)和对产品、型材的最终型变热处理(FTMT,获得均匀分布的高密度位错和均匀的显微析出物)以提高合金的塑性、韧性和强度,以及采取连续淬火等工艺。

(3) 开发快速凝固微晶铝合金和以铝为基的复合材料。

第一章 概 述

近 100 多年来, 由于航空航天、舰船等军事工业激烈竞争的需要, 摩托车汽车工业、建材工业的发展、铸造和压延技术及设备的进步以及前述铝合金所具有的优势, 使铝合金成为 20 世纪发展得最快、使用量最多的非铁金属材料。

铸造铝合金自 19 世纪七八十年代的初级的铝锌合金发展到 20 世纪的铝铜、铝硅、铝镁合金, 直到今天合金化程度更高、室温和高温强度更高、综合性能更好的新一代铝铜合金。其机械强度, 已由 19 世纪的 160 MPa 左右, 提高到现在的 500 MPa 左右; 铸造技术, 已从 19 世纪末 20 世纪初只能铸造形状比较简单、单件重量在 10 kg 以内、壁厚在 8 mm 以内、尺寸精度为 $\pm 2 \sim 3$ mm 的铝合金铸件, 发展到今天可铸造形状复杂的整体叶轮、大型 (最大尺寸为 $2 \sim 3$ m, 重达数吨) 薄壁 (局部壁厚为 1 mm)、高精度 (尺寸公差可控制在 $\pm 0.05 \sim 0.1$ mm/25 mm 或 $\pm 0.08 \sim \pm 0.15$ mm/25 ~ 30 mm 范围) 高强度的铝合金铸件。即在合金品种、铸造技术、设备等方面都取得了惊人的进步, 其产量约为社会对铝合金制品需求总量的 40% 左右。

变形铝合金自 80 年前只能生产飞机上截面形状简单、长度比较短的桁条、蒙皮和形状比较简单的铝制品, 发展到今天可加工出 1000 多种各类复杂截面形状、长度达数米甚至 10 多米、表面经过防锈、防腐处理的军民专用或通用型材及板材、管材、箔材、棒材和数百种军民用铝制品、日用品。其产量约占社会对铝合金制品需求总量的 60% 左右。

从以上情况可知, 铝合金真不愧是国防和国民经济中一种极重要的工程材料, 特别受到航空、航天、舰艇、建材、家电、各种车辆以及仪器仪表等工业部门的高度重视, 工业发达国家均大力予以开发, 其开发和应用前景都十分看好, 预计它仍将成为本世纪 (至少是本世纪上半叶) 使用得最多、开发前景最好的一种非铁金属工程材料。

铝合金的熔炼和铸造是铝合金铸造和铝合金加工过程中的关键工序, 它一方面为铝合金铸造提供优质铸锭或合金液, 决定铸件生产过程中的铸造性能和最终产品质量, 另一方面为铝合金型材、铝制品、日用品的加工提供优质铸锭并决定其加工过程中的加工性能和最终产品质量, 所以铝合金的熔炼、铸造技术是获得优质铝合金铸件和优质铝合金型材、制品、日用品的关键技术, 掌握了铝合金的熔炼、铸造技术, 就在很大程度上掌握了铝合金铸件和铝合金型材的生产技术。

第一节 铝及铝合金的基本知识

了解并掌握铝及铝合金的一般特性、铝合金的分类及各类铝合金的特点, 主要合金化元素及微量合金元素在铝合金中的作用, 气体及各类夹杂物对铝合金性能和产品质量的影响等基本知识, 对从事铝合金熔炼和铸造的工作者来说是很必要的基础知识。

一、铝及铝合金的特点及其在工业上的应用

铝的密度小，比强度（抗拉强度和密度的比值—— σ_b/γ ）高，具有优良的导电导热性能，容易铸造和回收再生，其表面又有一层白色的薄层氧化膜，不但其抗腐蚀性能好，而且外观漂亮。人们利用其上述特性，以它为基体，在其中加入少量的各种金属或非金属元素，开发出多种可以铸造和压力加工的铝合金，从而获得了比纯铝更好的使用性能，而其基本特性即物理、化学性能如密度、熔点、线膨胀系数、收缩率、传热性能、切削加工性能、表面加工性能等都与基体铝的原有上述特性保持着紧密的联系。所以我们必须首先了解有关纯铝的有关特性，下面摘录了纯铝的一些主要特性数据：

元素的化合价 3

相对原子质量 26.98

原子半径 0.143 nm

晶格类型 面心立方晶格，无同素异晶转变

密度 固态（20℃）时为 2.6996（g/cm³）；液态（700℃）时为 2.371（g/cm³）

熔点 660.24℃（含 99.996% 的 Al）

沸点 2467℃

熔化潜热 388.1 J/g

比热 0.95 kJ/（g·K）（常温、固态）

线膨胀系数 23.6×10^{-6} （0~100℃）

导热系数 217.7 W/（m·K）（0~100℃）

线收缩率 1.7%~1.8%

液态→固态的体收缩率 6.6%

弹性模量 E 67.6~69.6 GPa

抗拉强度 σ_b 88.2~117.6 MPa

屈服强度 σ_s 19.6~88.2 MPa

伸长率 σ 11%~15%

冲击韧性值 a_k 9.8~19.6 J/cm²

布氏硬度 HB 235.2~313.6 MPa

化学性质：在海水、油类、浓硝酸中有优异的抗蚀性，但对碱、卤化物的耐蚀性较差。

工艺性能：在浇注温度为 700~730℃ 时，纯铝液的流动性较差，充型能力差，易产生热裂气孔等铸造缺陷。

由于纯铝的铸造性能差、机械性能低，故主要用它来配制合金和作下述用途：

1) 纯铝的塑性高达 25%，可采用锻造、滚轧、挤压等加工方法，将其制成各种管材、板材、线材以及薄到厚度仅为 0.06 mm 的箔材和 $\phi 0.05$ mm 左右的铝丝；

2) 纯铝的导电、传热性能好，延展性好，比重小，被大量用作两电线电缆及电器上的散热器具中的传热元件；

3) 用来制造涂料、颜料等用的铝粉。

由于纯铝具有上述诸多优越的特性，所以以它为基配制的多种系列的铝合金都具有各自的特点，在国防和国民经济、人民生活中发挥着日益重要的作用。

二、铝及铝合金的分类

按加工方法和铝与其他元素形成的二元相图，可把铝及铝合金分为两大类：铸造铝合金和变形铝合金。见图 1-1。

（一）铸造铝合金

这是用来铸造工程机械等铸件或其他制品、器具的一类铝合金。它根据在铝基体中加入的主要合金化元素，现有的分为 Al-Si 系、Al-Cu 系、Al-Mg 系、Al-Zn 系、Al-RE 系 5 类。

此外，近年国外还在开发 Al-Li 系铝合金。据资料介绍，美国和英国的几家铝业公司已推出了 Al-Li 系合金的锻件、挤压件和板材，已开发出 4 种变形铝锂合金。

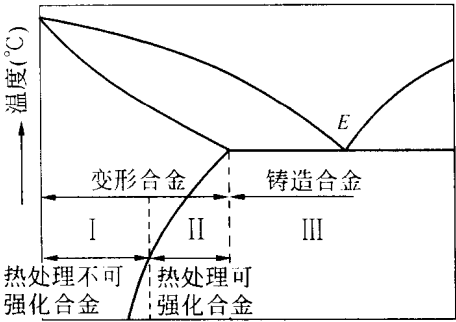


图 1-1 铝合金二元相图的相区分

（二）变形铝合金（又称加工铝合金）

这里通过锻造、滚轧、辗压、挤压等方法给铝合金施以外力，使其产生形变而成为各种不同形状、尺寸、性能的材料或制品的一类铝或铝合金。变形铝合金通常采用下述 3 种方法来分类：

1) 根据其能否采用热处理手段来强化性能，分为可热处理强化铝合金（这类铝合金有宇航工业、模具工业用的锻造铝合金、硬铝合金、超硬铝合金及特殊用途铝合金）和不可热处理强化铝合金（这类铝及铝合金有高纯铝、工业高纯铝、防锈铝等），它们的代号如表 1-1 所列。

表 1-1 常用变形铝及铝合金的名称和代号

名称	锻铝	硬铝	超硬铝	特殊铝	防锈铝	硬钎焊铝	高
代号	LD	LY	LC	LT	LF	LQ	Al -
纯铝锭		工业高纯铝锭			工业纯铝	工业高纯铝	包
- 05		A198.0 - A199.7			L1 - L6	LG1 - LG5	
覆铝	喷铝粉		涂料铝粉	细铝粉		特细铝粉	炼钢、化
LB	FLP		FLU	FLX		FLT	FLG
工业用铝粉	铝镁粉 FLM		纯铝 L				

2) 根据在铝基体中加入的主要合金化元素又可分为 Al-Cu 系、Al-Mg 系、Al-Mn 系、Al-Si 系、Al-Mg-Si 系、Al-Zn-Mg 系。这些系列铝合金的合金化程度和机械性能都没有铸造铝合金的高，一般多不将它作动力负荷的工程结构件，故本书不分类介绍其特点、可参看铸造铝合金的分类介绍。

3) 按合金性能和用途可分为抗腐蚀铝合金、高强度铝合金和超高强度铝合金。

门窗铝型材的化学成分为：0.4%~0.9% Mg、0.2%~0.6% Si、 $Fe \leq 0.35\%$ ，其余微量强化元素为：Cu、Mn、Zn、Cr、Ti，其含量均 $< 0.1\%$ ，其他杂质 $< 0.15\%$ 。

下面简要介绍各系铝合金的主要特点。

1. Al-Si 系铝合金

这是在 Al-Cu 系铝合金之后开发出来的一类铝合金。其含 Si 量 4%~22%，通常被称为矽铝明 (Silumin) 或硅铝明。该系合金由于加入了大量的 Si 而具有优良的铸造性能，即流动性好，收缩小，热裂倾向小。此外气密性也好，经过变质处理和热处理后，具有优良的机械性能、物理性能和加工性能，也有较好的抗蚀性，是铸造铝合金中品种最多（我国有 18 个品种）、使用量最大的一类铸造铝合金。

2. Al-Cu 系铝合金

这是继 Al-Zn 系铝合金之后开发出来的第二代铸造铝合金。其含 Cu 量 3%~11%。由于 Cu 起固溶强化和析出硬化作用而使该系合金具有极高的室温和高温机械性能，是各类铝合金中强度最高的一类铝合金。它的焊接性能和机械加工性能好，但其铸造性能较差、抗蚀性也不太好，线膨胀系数也比较大。

3. Al-Mg 系铝合金

这里继 Al-Si 系铝合金之后开发出来的第四代铸造铝合金。其含 Mg 量 4%~11%，具有良好的机械性能和最好的抗腐蚀性能，也有较好的机械加工性能，且加工后表面光亮。由于 Mg 的密度比 Al 小，故这类铝合金的密度是现有铝合金中密度最小的。但 Mg 极易氧化烧损、使熔炼、铸造工艺复杂。

4. Al-Zn 系铝合金

这是开发应用得最早的第一代铸造铝合金。Zn 在 Al 中的溶解度非常大（在共晶温度 382℃ 时可达 84%），虽然这类铝合金有一个很大特点：当含 Zn 量达 10% 以上时不经过热处理也有较好的机械性能，但其主要缺点有：①过饱和的 α 固溶体在不高的温度下即进行分解，析出 Zn，使 Al-Zn 合金的耐热性能非常低；②Zn 和 α 固溶体的电位差大，使其抗腐蚀性能也很差；③容易产生比重偏析；④合金的密度大。所以单纯的 Al-Zn 合金用处不大，而多使用其三元合金。

5. Al-RE (混合稀土) 铝合金

这是近 20 年来开发出来的新型铝合金。因加入铝基体中的混合稀土（米什金属）[主要是铈 (Ce)、镧 (La)、钕 (Nd)、镨 (Pr)、钇 (Y) 等镧系的 15 种元素]，强烈地净化和强化了合金，使其具有较高的高温强度和较好的热稳定性，但其最大缺点是室温机械性能差，伸长率很低。目前尚处进一步研究开发提高推广阶段。

6. Al-Li 系合金

这是近 20 余年来，美、英、日等国为适应飞机、导弹、空间飞行器、舰艇的结构

件要求密度小、比强度高，且比刚性也要好而竞相开发的一类新的有色金属工程材料。由于 Li 的密度比 Al 小，加入到 Al 基体中既能降低合金的比重，提高比强度，又能增大其弹性模量，使比刚度获得提高，且其他性能也比较好。据资料介绍，已开发出 Al-Li、Al-Li-Mg、Al-Li-Cu、Al-Li-Cu-Mg 4 个品种，其中变形 Al-Li 系合金已进入规模生产和应用阶段。而铸造 Al-Li 系合金尚处在研制阶段，其开发和应用前景十分看好。

此外，还有 Al-Sn 系、Al-Sb 系铝合金，因其耐磨性好，主要作为轴承材料，但使用量越来越少，本书不作详细介绍。

三、铸造性能与合金系的关系

铝合金所具有的铸造性能是能否获得优质铸件（铸锭）的极为重要的工艺性能。

铸造性能主要指合金本身所具有的下述 3 个特性：

- 1) 合金在熔融状态和固液共存状态下的流动性；
- 2) 凝固相不能承受收缩应力而产生裂纹的性能；
- 3) 由于凝固收缩而引起的外收缩、内收缩、缩孔、气孔等的收缩性能。

当然，合金的铸造性能与合金的浇注温度、铸型温度、冷却速度等因素有关。

通过长期的生产实践与试验研究得知：合金所具有的这些铸造性能与主要合金化元素（或基本合金化元素）的种类和含量有着密切的关系。

（一）铸造性能与准液相和准固相温度范围的关系

合金液浇入铸型（锭模）后，由于热量的散失，合金即开始凝固，根据固相的逐步形成和伴随着凝固收缩中液相的流动，出现了液相-固相共存状态，随着凝固冷却时间的延长，实际出现了两个阶段。第一阶段是凝固初期阶段，在此阶段，初晶固溶体生成树枝状组织并长大，而固相的结晶量（即固相率）比液相少的阶段，在这个阶段，相对于凝固收缩，液相还处于容易流动的准液相状态。之后，进入第二阶段——逐步凝固阶段，即固相的结晶量（固相率）不断增加，树枝状组织进一步长大，使固相相互接触融合，这时也就成为产生收缩应力、合金液的补给、流动能力下降的准固相状态。金相和材料学家常把这两个状态交界（边界）温度称为准固相温度，把固液共存区两个阶段的区分线称为准固相线（即零流动线），见图 1-2 和图 1-3。并把此温度定义为生成的固相长大、互相融合并产生凝固收缩应力的温度。把液相线温度与准固相线温度的温度范围称作准液相温度范围（准液相区），把准固相线温度与固相线温度（或共晶温度）的温度范围称作准固相温度范围（准固相区）。

从上两图可知：准固相线温度与共晶体的结晶量变多的含 5.5%Si（对 Al-Si 合金而言）和 15%Cu（对 Al-Cu 合金而言）的成分的共晶温度一致。准液相温度范围宽的合金成分，其流动性、充填铸型的性能好，也难以产生铸造裂纹；而准固温度范围宽的合金成分，则生成气孔的量多，也容易产生铸造裂纹。所以准液相区和准固相区的大小，对合金的铸造性能有很大的影响。由于合金液充填铸型的性能和向已收缩部位补充

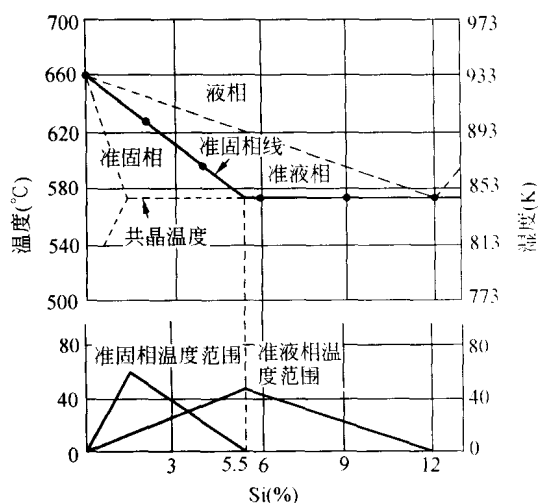


图 1-2 Al-Si 合金的准固相线

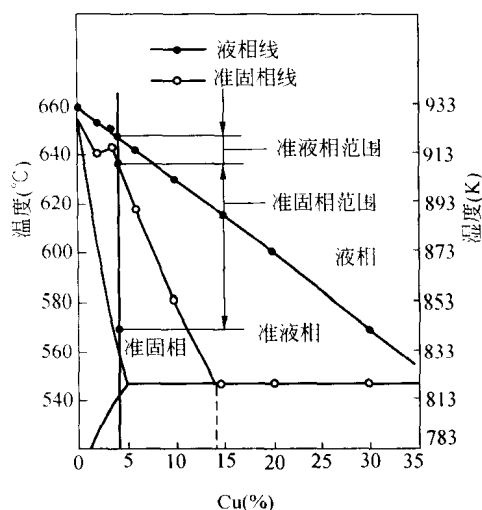


图 1-3 Al-Cu 合金的准固相线

合金液的能力，以及产生铸造裂纹的行为主要发生在固液共存范围内的现象，所以了解合金的准液相区和准固相区及其影响是非常重要的。

(二) 流动性与合金系的关系

所谓合金液的流动性，是指合金液流过铸型狭缝的能力和无缝隙地充填整个铸型型腔每个角落（见岔）的能力。流动性是合金液的铸造性能中最主要的性能，它的好坏，直接关系到能否获得轮廓、外表健全完整和内部无缩孔、疏松等缺陷的铸件（或铸锭）。铸件上经常看到的冷隔、缺肉、缩孔等缺陷都是由于合金液的流动性不好所造成的。所以它对铸件（或铸锭）的合格率有着极重要的影响。

通过采用薄壳铸型和金属铸型在重力下铸造的涡卷形流动性试验，以及使玻璃管内减压而吸引的真空流动性试验（MIT 法）的结果和人们长期的生产实践可知：各类合金的流动性受热物理特性和合金成分（即合金在相图中的位置）、初晶形状、温度、微量元素等因素的影响。

热物理特性包括熔化潜热、比热和导热性，其中熔化潜热对合金液的流动性的影响最大，其值越高，流动性就越好。比热越大，流动性也越好。而导热性越好，则流动性就变坏。

在 Al-Si 系合金中，当含 Si 量为 5% 时，流动性试样的长度为最低值，当含 Si 量增加，则流动性试样的长度也增长，当含 Si 量达 15% 的过共晶成分时，流动性试样的长度最长，之后随着含 Si 量的增加，则流动性试样的长度反而变短。这是因为：①由于 Si 的熔化潜热比基体金属 Al 的熔化潜热大很多，使合金液的流动性随着 Si 含量的增加而变好。②流动性试样长度的极大值不在共晶成分（含 Si 量为 12.6%）而移向右边共过共晶成分（含 Si 量达 15%）。这是因为 Al-Si 系合金在急冷的非平衡状态下，共晶点偏移到过共晶成分一边的原因。Al-Cu 系、Al-Mg 系、Al-Zn-Mg 系等类铝合