

铝 合 金 热 处 理

(普及读物)

《铝合金热处理》编写小组

铝 合 金 热 处 理

(普 及 讀 物)

《鋁合金热处理》编写小组

(只限国内发行)

冶金工业出版社出版

北京印刷七厂印刷

*

开本大 32 印张 2 $\frac{3}{8}$ 字数 56 千字

1972年7月第一版 1972年7月第一次印刷

印数 00,001~31,470 册

统一书号: 15062·3007 定价: (科三) 0.25元

前 言

毛主席教导我们：“我们的文学艺术都是为人民大众的，首先是为工农兵的，为工农兵而创作，为工农兵所利用的。”随着我国社会主义建设事业的迅速发展，广大工农兵迫切需要掌握科学技术知识和各种先进技术。这本《铝合金热处理》就是为从事铝合金加工工作的工人、管理人员、领导干部编写的普及读物。

书中叙述了变形铝合金（俗称熟铝）热处理部分，没有谈到铸造铝合金热处理问题。本书是根据我们生产的实践经验，结合有关参考书籍编写的。书中介绍了铝及铝合金的基本知识，变形铝合金的退火、淬火和时效等热处理基本概念和工艺技术，变形铝合金半制品热处理产生的主要缺陷、废品及其消除方法，以及变形铝合金热处理主要设备等。

由于我们学习马、列和毛主席著作不够，生产经验有局限性，水平不高，书中难免有片面性和错误之处，希望广大读者提出宝贵的批评意见。

编 者

1972年3月

目 录

第一章 铝和铝合金	1
一、铝	1
二、铝合金	8
三、变形铝合金的分组、牌号和用途	12
第二章 变形铝合金热处理概述	16
一、什么是热处理	16
二、变形铝合金热处理分类	18
三、热处理的加热、保温和冷却	19
第三章 退火	21
一、回复退火与再结晶退火	21
二、变形铝合金的退火	25
1. 均匀化退火	26
2. 高温退火	29
3. 低温退火	34
第四章 淬火	36
一、淬火的目的是方法	36
二、淬火过程中组织的变化	37
三、淬火工艺	39
第五章 时效	44
一、时效的的目的是方法	44
二、在时效过程中组织性能的变化	46
三、时效工艺	48
四、淬火后的冷变形	50
第六章 热处理的缺陷、废品及其消除方法	52
第七章 热处理设备	56

一、加热炉.....	56
二、温度测量仪器.....	63
三、淬火水槽.....	67

第一章 鋁和鋁合金

在元素周期表里约有七十种元素为金属元素。这些金属元素可分为两大类，一类是黑色金属（铁和铬、锰），其余的金属都是属于有色金属。几千年来，黑色金属在使用上一直占着首要地位。近半个世纪以来，有色金属，特别是铝、铜、镁、镍、锌、锡、铅等，在工业上的应用得到飞跃的发展。现在，差不多所有的机器，都有有色金属和它的合金制造的零件。铝和铝合金的发展则更为迅速，它的应用范围，仅次于钢铁，居第二位。

铝在地壳中的含量约占 7.5%，比铁在地壳中的储藏量多将近两倍，比其它有色金属储藏量的总和还多数倍。我国有极其丰富的铝矿资源。

解放后，在毛主席的英明领导下，我国铝工业取得了很大成就。经过伟大的无产阶级文化大革命运动，铝工业又有了进一步的发展。

在我国，铝和铝合金被广泛地用于航空工业、电气工业、交通运输业、化学工业、建筑材料以及日用器皿等。铝和铝合金是我国国防和国民经济各部门需要的重要金属材料。

一、鋁

在元素周期表中，铝位于第三组第十三个元素。铝是银白色金属，比重小，导电性能高，约为纯铜的 60%，导热性能好。

纯铝的某些物理性能如下：

原子量	26.97
比 重	2.7
熔 点（純度为99.5%的鋁）	658°C

溶解潜热	93卡/克
线膨胀系数 (20~100°C)	23.8×10^{-6} 厘米/厘米·°C
电阻率 (在20°C时)	0.0269 欧姆·毫米 ² /米
导热率 (在20°C时)	0.52 卡/厘米·秒·°C
法向弹性模数 (在20°C时)	6000~7000 公斤/毫米 ²

铝与空气接触很容易被氧化,在铝的表面形成致密、坚固的氧化膜。它有保护内部的铝不继续氧化的作用。温度升高以后,氧化膜也能保护铝不受氧化。铝熔化以后,在液体铝的表面也有一层坚固的氧化膜,如将氧化膜去掉,它又很快地恢复了。因此,铝在潮湿的空气里,能够抵抗大气的腐蚀。铝还有抗浓硝酸(90~98%)的作用,但在硫酸、盐酸中,铝易受腐蚀,含有氯离子的盐类对铝有腐蚀作用。铝易溶解于碱液中生成铝酸盐。

铝在固体状态时和其他固体金属一样,铝原子是按一定的几何形状有规则、有次序地排列着,结成一个个立方形的结晶格子(简称晶格)。晶格有体心、面心、密排六方三种类型。铝属于面心立方晶格,如图1。在结晶格子中的两相邻原子之间有一定距离,这个距离叫**晶格常数**,一般用长度单位埃(Å)来表示, $1\text{Å} = 10^{-8}$ 厘米。铝的晶格常数等于 4.041Å 。面心立方晶格在受到外力时容易变形,这就是为什么铝的塑性好的道理。铜、银和金都是面心立方晶格,它们的塑性都很好。

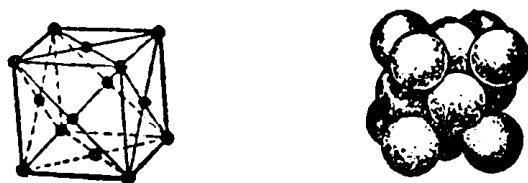
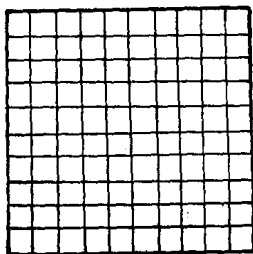


图 1 面心立方晶格

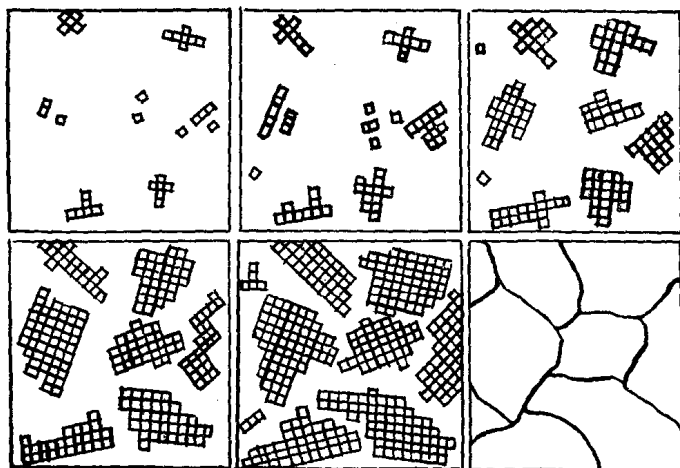
铝熔化成液体以后,固态时的结晶格子已不存在,液体状态下的铝原子,已经得到自由活动的的能力,原子排列不是像固态那样规则了。把熔化状态的液体铝倒到铸模里,温度降到凝固点以下,铝由液体状态转变为固体状态,铝原子又按一定规则次序排

列成面心立方晶格（叫做**结晶**）这个凝固过程叫结晶过程。

按照理想条件，铝在铸模里晶格应该是全部有规则、有次序地堆砌起来的单晶体如图 2(a)。但是，实际情况却不是如此，温度下降到凝固点以下，液体铝并不立即开始结晶，开始结晶的温度，是在凝固点以下，这种现象叫做**过冷**。过冷使液体铝中产生



(a) 理想晶体



(b) 晶体生成及多晶体內晶格不同方位示意图

图 2 理想晶体和多晶体示意图

许多结晶核心，晶核成长为晶体，放出潜热，温度又上升至凝固温度，在结晶过程中还不断产生新的结晶核心，液体铝围绕着结晶核心，生长出树枝状晶体，许许多多的晶体不断生长，彼此接触，直到凝固完了。所以在—个铸锭里是由许许多多方位不同、

形状不规则和大小不同的多晶体所组成，如图 2(b)。这些不规则外形的晶体叫做晶粒。

纯铝在结晶时，容易形成粗大晶粒，如图 3。晶粒粗大的纯铝铸锭，在铸造及压力加工变形时容易出现裂纹，我们希望有较细密的晶粒组织。如果在纯铝中加入少量的钛、锆或硼等，就会使晶粒细化，如图 4。

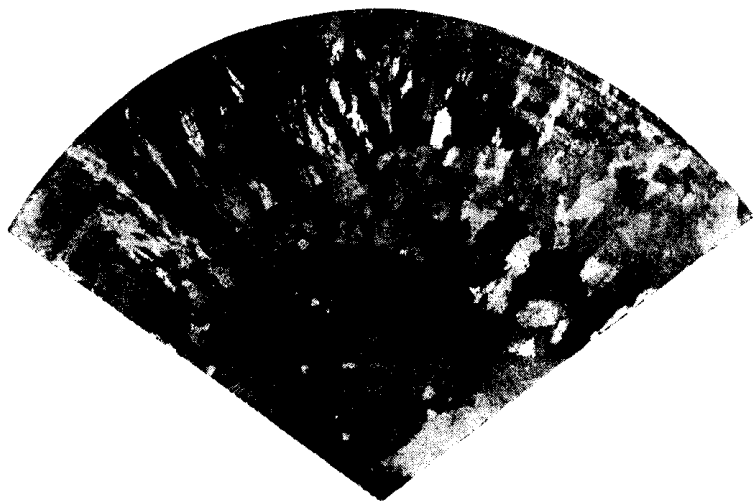


图 3 純鋁鑄錠的粗大晶粒

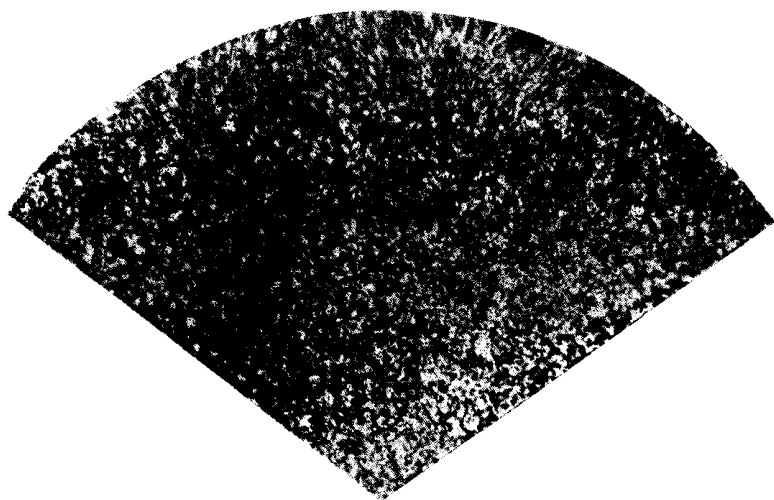


图 4 加入少量的鈦使純鋁晶粒細化的鑄錠

纯铝并不是绝对纯的。就是实验室里使用的 99.999% 高纯铝，也仍然有微量杂质存在。在工业上使用的纯铝叫工业纯铝。一般工业上使用的高纯铝，含铝量为 99.9%，我国高纯铝及工业纯铝的牌号、含铝量及杂质含量列于表 1。

表 1 铝的牌号及杂质含量

铝的牌号	代号	含铝量 (不小于) %	杂 质 (不大于) %					
			铁	硅	铁和硅 的总和	铜	其它	杂质 总和
四号高纯铝	L04	99.996	0.0015	0.0015	—	0.001	—	0.004
三号高纯铝	L03	99.99	0.0030	0.0025	—	0.005	—	0.010
二号高纯铝	L02	99.97	0.015	0.015	—	0.005	—	0.03
一号高纯铝	L01	99.93	0.04	0.04	—	0.01	—	0.07
一号工业高纯铝	L0	99.9	0.06	0.06	0.095	0.005	—	0.10
二号工业高纯铝	L00	99.85	0.10	0.08	0.142	0.008	—	0.15
一号工业纯铝	L1	99.7	0.16	0.16	0.26	0.01	—	0.3
二号工业纯铝	L2	99.6	0.25	0.20	0.36	0.01	—	0.4
三号工业纯铝	L3	99.5	0.30	0.30	0.45	0.015	—	0.5
四号工业纯铝	L4	99.3	0.30	0.35	0.60	0.05	0.1	0.6
五号工业纯铝	L5	99	0.50	0.50	0.9	0.02	锌0.1 锰0.1 镁0.1 其它0.1	1.0
六号工业纯铝	L6	98.8	0.50	0.55	1.0	0.1	—	1.2
七号工业纯铝	L7	98	1.1	1.0	1.8	0.05	—	2.0

从表 1 可以看出，铝中的主要杂质是铁和硅。根据资料介绍，铁溶解在铝中的量很少，在 655°C 时，为 0.05%，在室温时仅溶入 0.002%。在铝中的杂质铁主要与铝形成了金属化合物 FeAl_3 。 FeAl_3 是硬而脆的针状化合物。硅溶解在铝中的量比铁要多一些，在 577°C 时，可溶入 1.65%，在室温时溶入 0.05%。在铝中的杂质硅，除溶入铝中者外，多余的硅是单独存在于铝中的，通常称为“自由硅”。在铝中同时存在杂质铁和硅时，铁、硅和铝形成复杂的化合物，当铁大于硅的含量时，形成化合物 α (Fe-Si-Al)，当硅大于铁的含量时，形成化合物 β (Fe-Si-Al)。

在工业纯铝中，实际上可能有 FeAl_3 、 Si 、 $\alpha(\text{Fe-Si-Al})$ 、 $\beta(\text{Fe-Si-Al})$ 等相存在，至于在一块铝中，究竟存在那一种化合物，这就要根据铁、硅含量和它们含量的比例来确定。这些化合物存在于铝中，使铝的脆性增加，塑性降低，因此铁、硅对铝是有害的杂质。

在铝中含有其它元素，会影响铝的导电性能和导热性能。不同元素对铝的导电及导热性能的影响见图5、图6、图7。

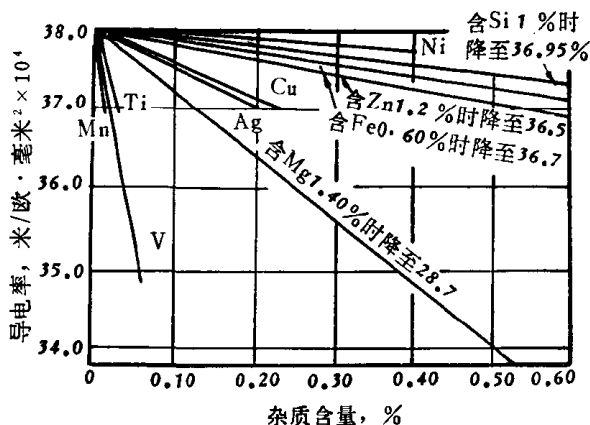


图5 铝中杂质对导电性能的影响

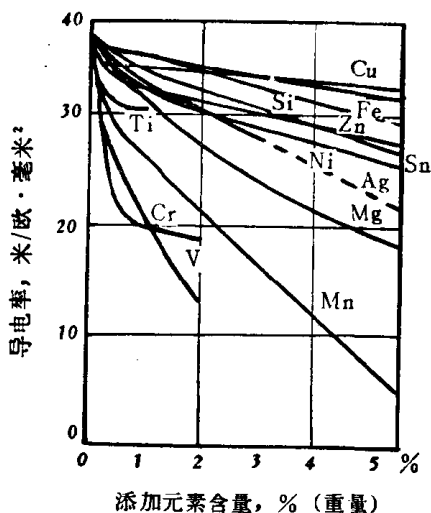


图6 添加元素对铝的导电性能的影响

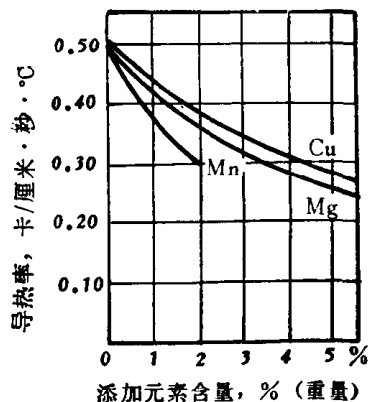


图7 添加元素对铝的导热性能的影响

铝的工艺性能良好，在冷态和热态都有较高的塑性。能在冷态深冲、轧制，能在 $350\sim 500^{\circ}\text{C}$ 温度下进行热加工（轧制、锻造、挤压）。

铝可以焊接，但切削加工性能不好。

铝的机械强度不高，不能承受很大的载荷，退火的铝板，机械性能大致如下：

抗拉强度	$\sigma_b = 8\sim 10$ 公斤/毫米 ²
屈服强度	$\sigma_{0.2} = 3\sim 5$ 公斤/毫米 ²
延伸率	$\delta = 35\sim 40\%$
布氏硬度	$H_B = 25\sim 30$ 公斤/毫米 ²

对铝进行加工变形，铝的抗张强度、屈服强度和硬度都随变形程度增加而提高，延伸率则降低。图 8 是说明变形程度对铝的

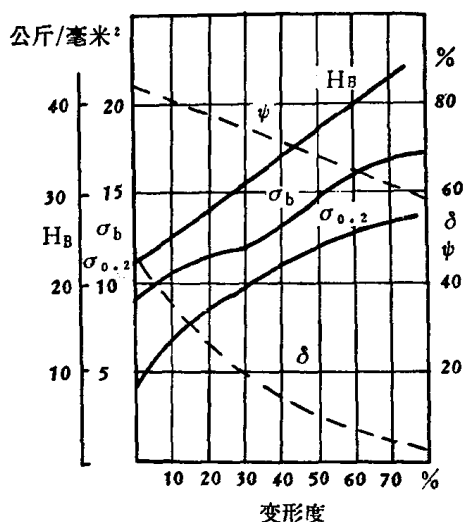


图 8 变形程度对铝的机械性能的影响

抗张强度 (σ_b)、屈服强度 ($\sigma_{0.2}$)、延伸率 ($\delta\%$)、断面收缩率 ($\psi\%$) 和硬度 (H_B) 的影响。铝的变形程度达到 $60\sim 80\%$ 时，抗张强度可达到 $15\sim 18$ 公斤/毫米²，延伸率则从 40% 急剧下降到 $1\sim 1.5\%$ 。这时，铝已开始变脆了。

铝的主要用途是用来制造铝基合金。制造铝合金一般使用牌

号L1、L2、L3、L6的铝。制造工业纯铝板材、管材、棒材、型材和铆钉线材一般使用L4、L5铝。

高纯度铝用于科学试验、化学工业及其它特殊用途。

在电气工业中用铝来代替铜制造导线、电缆、电容器等，一般使用L1、L2铝。

为了提高铝合金板材的抗腐蚀性能，在合金板表面包敷一层纯铝（简称包铝），还有制造日用器皿、铝粉等，一般使用L3铝。

二、铝 合 金

前面已经谈到铝的机械强度比较低的问题，因此，用铝做结构材料承受较大的载荷是不适宜的。如一根粗10毫米的铝棒，用不到一吨力量，就能把它拉断，而一根10毫米粗的普通钢棒，用三吨力量去拉也拉不断。如果在铝中加入一些其它元素，如铜、镁、锰、锌等组成铝合金，铝合金的强度就比铝的强度大幅度地提高了。现在最高强度的铝合金，抗拉强度能够达到60公斤/毫米²以上，和低合金钢差不多。根据工业上的需要，在铝中加入不同的元素，制出不同特性的铝合金，如高强度铝合金、耐腐蚀铝合金、耐热铝合金、锻造铝合金等等。因此，铝合金在工业上就得到了广泛的应用。

将铝配制成合金以后，铝合金与铝比较，它不仅机械性能发生了变化，物理、化学性能也发生了变化。如铝和铜都是导电性很好的金属，把铜加入铝中制成铝铜合金以后，它的导电性能却降低了。从这一现象，我们可以知道，铝铜合金的性能，既不和铝一样，又不和铜一样。因为它的内部组织发生了变化，所以我们要了解铝合金，首先要了解铝合金组织中发生了些什么变化。

我们可以做一个实验来了解铝铜合金组织，将许多个不同含铜量的铝铜合金进行实验研究，先用化学分析方法确定这些铝铜合金的含量，然后再测量这些铝铜合金的熔点、凝固点，用金相

显微镜和X射线方法对铝铜合金内部组织进行分析，得出以下几点：

1. 纯铝的熔化温度也就是它的凝固温度。如纯铝熔化温度是 658°C ，凝固温度也是 658°C 。在凝固过程中，温度不变化，直到凝固完了，温度才下降。铝熔化以后，若往铝中加入铜，铜就象盐溶于水一样溶到了铝里，形成了铝铜合金，铝铜合金在凝固时的情况就和纯铝不一样了。铝铜合金开始凝固的温度要比纯铝低，随着铝中的铜含量增加，铝铜合金的凝固点也随着降低。当铝中铜含量增加到 33% 时，铝铜合金的凝固温度降到 548°C ，这是铝铜合金的最低凝固温度，在铝中再增加铜含量，凝固温度又开始升高了。铝铜合金除了在含铜 33% 时，在凝固过程中温度不发生变化外，其它成分的铝铜合金，在凝固过程中，温度不是恒定不变的，而是一面凝固，一面降温，直到凝固完毕。所以，除含铜 33% 的铝铜合金外，铝铜合金的开始凝固温度和凝固终了温度不是一点，而是一个区间，也就是说，铝铜合金的熔点和凝固点不是一点。

2. 铝铜合金在液态时是均匀的液体，凝固成固体以后，铜在铝中仍然有一定的溶解度，铜在铝中的溶解度与温度有关系，在 548°C 时，铜在固态铝中有最大的溶解度，为 5.65%，温度再升高，就开始溶化为液体。若温度降低，铜在铝中的溶解度也随着降低，在室温 (20°C) 时，铜只能溶入铝中 0.1~0.2%，在固态，铜溶入铝中所形成的均一结构叫做固溶体。一般用代号 α 表示。

3. 超过了铜在铝中的溶解度，多余的铜就不再溶入铝中，而与铝形成金属化合物 CuAl_2 ，这些化合物在固溶体的基体上或晶粒边界上析出来。这时，在铝铜合金的组织中就产生了 α 固溶体和 CuAl_2 两个组成部分，它们每一部分都有自己的物理、化学性质。我们把合金中具有同一成分的均匀组成部分叫做相，如铝铜合金中， α 固溶体和 CuAl_2 就是不同的两个相。铝铜合金中 α 固溶体和 CuAl_2 形成均匀的机械混合物部分，称为共晶体。共晶体的熔点是最低的，当铜含量增加到 33% 时， α 固溶体和 CuAl_2

都形成共晶体，在 548°C 就能全部熔化为液体。铝铜合金共晶体的熔点为 548°C ，称为**共晶温度**。

4. 我们把不同成分的铝铜合金的实验数据如熔点、凝固点、溶解度等综合起来绘制成图，叫做**铝铜二元平衡状态图**，如图9。平衡图的横座标代表铜含量百分数，纵座标代表温度，图中曲线AB是铜在铝中的饱和溶解度曲线，CBE是固相线，CE是液相线，E点是共晶点，BEF线称作**共晶线**，共晶线所表示的温度叫共晶温度。我们通过铝铜二元平衡图，可以清楚地了解到在各种温度、各种铜含量时，铝铜合金中存在的相；各种铝铜合金的熔点和凝固温度；不同温度下铜在铝中的溶解度； α 固溶体的范围和 CuAl_2 化合物生成的区间；合金中共晶体的共晶温度等。

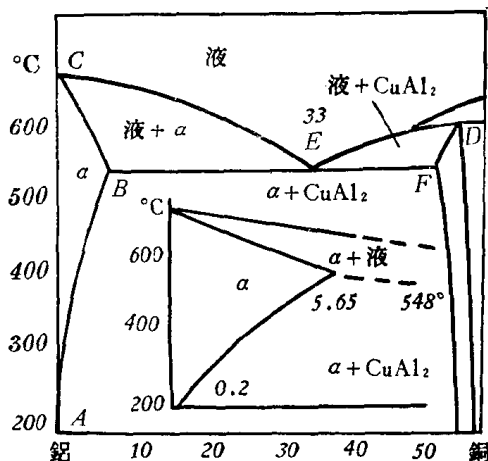


图 9 铝-铜二元平衡图

我们熟悉了铝铜二元平衡图，也就不难熟悉其它铝合金的二元平衡图，依此类推，就可以知道其它合金二元平衡图如铝-锰平衡图，如图10。铝-镁平衡图如图11等等。

从铝合金二元平衡图上使我们了解到铝合金内部组织中主要存在有固溶体、化合物和机械混合物——共晶体。变换合金的组成成分，合金中固溶体、化合物和共晶体的数量也要发生变化，合金的性能也相应地要发生变化。

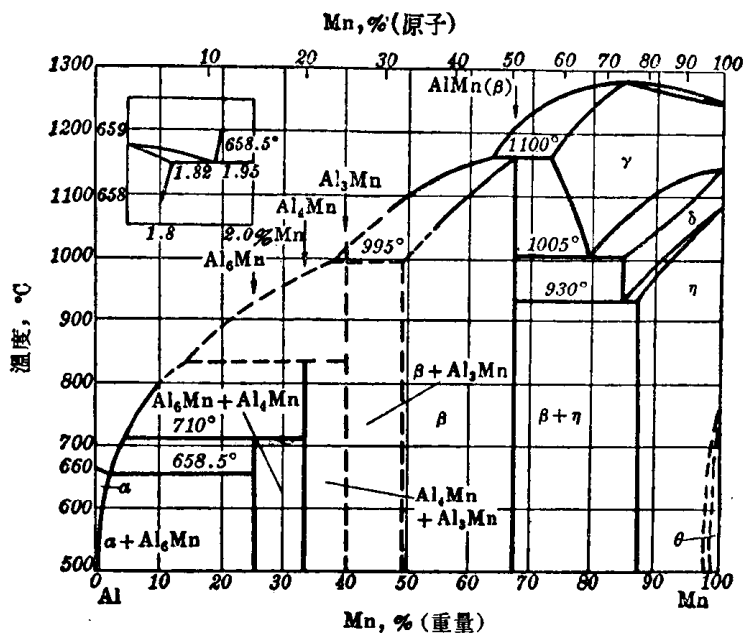


图 10 铝-锰平衡图

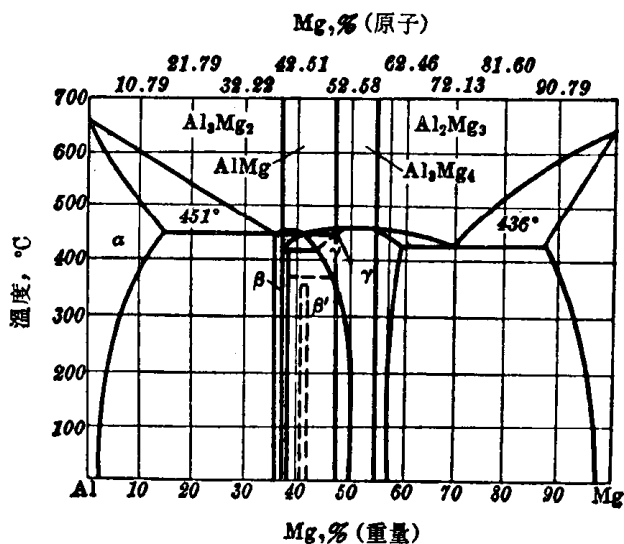


图 11 铝-镁平衡图

铝合金不只是含一种元素，还有含两种、三种以至多种元素的，解释它们的平衡图就需要三元、四元以至多元平衡图。多元

平衡图的原理和二元平衡图是一样的，只不过元素多了，建立平衡图的方法复杂一些。多元合金的组织也和二元合金一样，不外乎固溶体、化合物、共晶体三种，只不过组成的结构复杂一些。

根据铝合金的成分与生产工艺特点，可以将铝合金分为变形铝合金和铸造铝合金。这两组合金可用二元平衡图作一概略的说明，如图12。变形铝合金的化学成分范围，在共晶温度时的饱和溶解度D点的左边，这组合金的化学成分不高，合金有较高的塑性，适于压力加工。

铸造铝合金的化学成分范围，在共晶温度时的饱和溶解度D点的右边。这样，就保证铸造铝合金中有较多的共晶体，在液态时有较好的流动性，对铸型能充分填充使铸件致密，但铸造铝合金的塑性低，不适于压力加工。

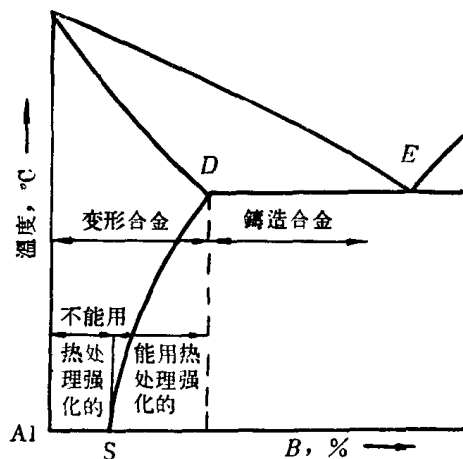


图 12 铝合金分组区分图

三、变形铝合金的分组、牌号和用途

变形铝合金可分为两组：热处理不强化的铝合金和热处理强化的铝合金。

在理论上，根据平衡图区分热处理不强化铝合金和热处理强化铝合金成分范围如图12。在室温下的饱和溶解度S点左边的成