

中等专业学校试用教材

铸造有色金属 及其熔炼

大连工业学校 尚玉润 主编

机械工业出版社

中等专业学校试用教材

铸造有色金属及其熔炼

大连工业学校 尚玉润 主编

机械工业出版社

前 言

本书是根据原国家机械工业委员会教育局于1986年审定的招收初中毕业生，学制为四年的“铸造有色合金及其熔炼”课程教学大纲进行编写的。

在编写过程中，本书力求突出中专教学的特点，做到理论联系实际，突出实用，利于培养学生的动手能力。

本书主要供中等专业学校铸造专业的师生使用，并可供铸造专业的工程技术人员参考。

本书绪论、第一、二、三、五、六章由大连工业学校尚玉润编写，第四章由河北机电学校李玉文编写。本书由尚玉润主编，内蒙古工业学校李富山主审。

在编写过程中，山东机械工业学校赵建康、黑龙江机械制造学校安永德、广西机械工业学校张宝恩、浙江机械工业学校马青圃、包头机械工业学校李敏、南京机械专科学校陈芳洲、湖南机械工业学校陈理安、江西机械工业学校钱泉森等，提出了许多宝贵意见。航天部621所、大连理工大学铸造教研室、沈阳铸造研究所为本书提供了金相图片，在此深表谢意。

由于编者的水平有限，书中缺点和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1	§ 3-5 铸造黄铜	82
第一章 铸造铝合金	3	§ 3-6 铜合金的铸造工艺特点	87
§ 1-1 概述	3	§ 3-7 铜合金的热处理特点	95
§ 1-2 铝硅类铸造铝合金	9	思考题	95
§ 1-3 铝铜类铸造铝合金	18	第四章 铸造铜合金的熔炼	97
§ 1-4 铝镁类铸造铝合金	22	§ 4-1 炉料及配料计算	97
§ 1-5 铝锌类铸造铝合金	24	§ 4-2 铜合金的脱氧	102
§ 1-6 铝合金的铸造工艺特点	26	§ 4-3 铜合金的去气和精炼	105
§ 1-7 铸造铝合金的热处理	31	§ 4-4 铜合金的质量检验	109
思考题	35	§ 4-5 典型铜合金的熔炼工艺	115
第二章 铸造铝合金的熔炼	37	思考题	119
§ 2-1 炉料及配料计算	37	第五章 其他铸造有色合金及其	
§ 2-2 铝基中间合金的熔制	43	熔铸特点	120
§ 2-3 铝合金的去气和精炼	46	§ 5-1 铸造镁合金及其熔铸	120
§ 2-4 铝硅合金的变质处理	53	§ 5-2 铸造锌合金及其熔铸	125
§ 2-5 铝合金熔炼质量的控制	57	§ 5-3 铸造钛合金及其熔铸	127
§ 2-6 典型铝合金的熔炼工艺	62	§ 5-4 铸造轴承合金及其熔铸	128
思考题	64	思考题	131
第三章 铸造铜合金	66	第六章 铸造有色合金用炉	132
§ 3-1 概述	66	§ 6-1 坩埚炉	133
§ 3-2 铸造锡青铜	72	§ 6-2 感应电炉	135
§ 3-3 铸造铝青铜	77	§ 6-3 反射炉和电弧炉	137
§ 3-4 铸造铅青铜	81	参考文献	139

绪 论

有色金属也称为非铁金属。它包括除铁以外的所有其他金属。

有色金属一般分为四类：

1. 普通有色金属

(1) 轻金属 密度小于 3.5 g/cm^3 的金属为轻金属，如铝、镁、钠、钙和钾等。

(2) 重金属 密度大于 3.5 g/cm^3 的金属为重金属，如铜、镍、钴、铅、锌、锡、锑、铋、汞和镉等。

2. 稀有金属

(1) 稀有轻金属 如锂、铍、铷和铯等。

(2) 稀有高熔点金属 如钨、钼、钽、铌、钛、锆、铪、钒和铪等。其特点是熔点高（均在 1700°C 以上）、硬度高、耐腐蚀。

(3) 稀有分散金属 如镓、铟、铊、锗等。这些元素在自然界中的分布很分散，大多数没有形成单独的矿物。

(4) 稀土金属 包括钪、钇以及镧系元素等。

(5) 放射性元素 如镭及锕系元素等。

3. 贵金属

贵金属有金、银、铂等。

4. 半金属

半金属有硅、碲、砷、硼等。这些元素的物理、化学性质介于金属和非金属之间。

为满足工业上的需要，一般将金属制成合金。所谓有色合金是指以一种有色金属为基础，加入另一种或几种其他元素，使之熔合在一起，构成一种新的金属组成物。

有色合金也称为非铁合金。它包括压力加工合金和铸造合金。

铸造有色合金的种类很多，其中铜、铝、镁、锌、钛系的铸造合金以及轴承合金较为常用。

铸造铝合金和铸造镁合金在工业生产中的使用还不足100年的历史。铝、镁的密度小，比强度高，在承受同样载荷的条件下，可以减轻结构的重量，因此被广泛应用于航空、汽车、动力、仪表等工业中。

铸造铜合金是人们使用的最古老的一种合金。铜及其合金具有优良的导热、导电性能，良好的耐蚀性、耐磨性，以及良好的力学性能，故在机器制造业中应用一直很广泛。

钛及其合金是新兴的一种金属材料。它具有很高的比强度和耐蚀性，近年来发展很快。主要做为航空、宇航工业的重要结构材料。在化工工业上作耐蚀材料使用。

铸造锌合金因具有压铸成型的良好工艺性能，故大量用做仪表、各种工具上的压铸件。

锡、铅等金属在我国的使用约和铜一样，具有悠久的历史。现代，锡基、铅基合金因其在润滑油条件下有良好的耐磨性能，故广泛用作轴承合金。

铸造有色合金的特殊性能，决定了它在国民经济中的地位。在国民经济建设中，铸造有

色合金将会得到更广泛地使用。

我国的有色金属铸造具有悠久的历史。据考古发现，夏朝初期，即出现了青铜器。四千多年前我国就有了“红铜器”，商代中期（公元1300年）进入了青铜的成熟阶段，已经掌握了多块陶范拼合造型分铸法等巧妙工艺。铸造的大型青铜铸件“司母戊”大方鼎（重875kg）壮观精美。商末周代是古代青铜器的鼎盛时代，那时人们已能制作造型雄伟，冶铸精良，花样细丽，表面光洁的四羊尊、龙虎尊、人面方尊、莲鹤方壶等。到了春秋后期，随着青铜需求量的增大，出现了一模翻制数范的连续模印法，花纹也更加细致。同时掌握了双金属铸造，制做成韧性好、硬度高的低锡青铜双金属剑。西汉时代铸造的“透光镜”以及造型优美、工艺精湛的“铜奔马”都充分显示了当时科学技术的发达。南北朝时已能冶炼黄铜。明代时我国已掌握了冶锌技术。

由上述可见，在明代以前，我国劳动人民在有色金属铸造方面，为人类作出了巨大的贡献。然而到了近代，由于封建制度的腐败、外国的侵略、统治阶级的黑暗统治和反动，致使我国的科学技术停滞不前。

新中国成立后，有色金属铸造工业得到了迅速的发展。目前我国研制的铸造有色金属的品种已基本配套齐全。建立了一套适合我国国情的铸造有色金属标准。我国生产的27 t大型铜合金螺旋桨具有国际先进水平，并浇注了2 t重的铝合金铸件和700kg重的复杂镁铸件，锌合金和钛合金的生产也有了新的突破。新的精炼和变质方法陆续用于生产。金属型、低压铸造正得到广泛的应用，差压铸造、真空覆模铸造、挤压铸造、高压铸造、流变铸造等先进工艺也在不断使用和推广。

但目前我国的有色金属铸造事业，无论在铸造质量上还是在数量上都不能满足国民经济和国防工业的需要，与世界上先进水平相比，还有一定距离。随着我国经济建设的蓬勃发展，对铸造有色金属生产提出了更高的要求。为了满足我国国民经济建设的需要，我们必须大力发展铸造有色金属的品种。

本书共分六章，包括铸造铝合金，铸造铝合金的熔炼，铸造铜合金，铸造铜合金的熔炼，其他有色金属的熔铸，铸造有色金属用炉等。本书主要以铸造铝合金、铸造铜合金以及它们的熔炼为重点，分别论述铸造铝合金、铸造铜合金的成分、组织与性能之间的关系，铸造工艺特点，合金熔炼过程的规律，熔炼工艺等。对其他有色金属及其熔铸以及常用的一些熔炉，只作一般介绍。

本教材贯彻中华人民共和国法定计量单位制。

第一章 铸造铝合金

铸造铝合金是在纯铝的基础上，加入各种不同的元素制成的。它是应用最广泛的一种轻合金材料。不仅有较小的密度，大多数铸造铝合金还有较好的耐蚀性、耐热性和一定的耐磨性，并具有足够的强度和良好的塑性。铸造铝合金的比强度比一般钢铁材料还高（铸造铝合金的比强度约为9~15）。它的生产成本也比其他轻合金材料低廉，因此被广泛应用。

§ 1-1 概 述

一、纯铝的性质及应用

纯铝是一种银灰色的轻金属。铝在自然界中分布很广，其蕴藏量约占7.5%，在金属中居于首位，几乎是铁蕴藏量的二倍。铝在自然界中是以各种化合物的形式存在。目前世界上铝产量超过1000万t，占非铁金属的第一位。

1. 纯铝的性质

(1) 纯铝的物理性质 纯铝的熔点低(660.37°C)，密度小(2.7g/cm³)；导电、导热性能高，仅次于银和铜，其电导率是铜的62%~65%，导热系数为 $2.26 \times 10^2 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

(2) 纯铝的化学性质 纯铝的化学活泼性强。铝和氧的亲合力很大，在室温下极易和空气中的氧结合，迅速形成一层薄而致密的Al₂O₃薄膜，阻止其内部金属基体继续被氧化，因而铝在空气中有足够的耐蚀能力。铝在醋酸、硝酸和有机酸中具有很高的耐蚀性，酸的浓度愈高，温度愈低，耐蚀愈好。但铝在硫酸、碱类、碳酸盐和食盐中时，因铝的氧化膜能很快被破坏，从而引起铝的强烈腐蚀。

(3) 纯铝的力学性能 纯铝呈面心立方晶格，具有很高的塑性(伸长率达25%)，很低的强度(抗拉强度仅有90~120MPa)和硬度(为24~32HBS)。

(4) 纯铝的铸造性能 纯铝的浇注温度为700~750°C，流动性低，线收缩率(1.7%~1.8%)和体收缩率(6.4%~6.6%)都较大，因而铸造性能差，很少单独用于铸造。

纯铝中主要杂质是铁和硅。这些杂质的存在，降低了铝的塑性、导电、导热性能，并减弱氧化膜的保护作用，大大降低纯铝的化学稳定性。

纯铝按其化学成分可分为工业高纯铝和工业纯铝两大类。工业高纯铝的纯度为99.99%~99.85%，工业纯铝的纯度为99.70%~99.80%，其牌号和化学成分见表1-1。

2. 纯铝的应用

综合上述，纯铝的强度、硬度都较低，铸造性能差，因此不宜作承受较大载荷的零件，工业生产中一般不用纯铝铸件。由于塑性高，工业纯铝可用来配制铝合金以及制作管材、棒材、板材、线材等。目前电器工业中已大量用铝来代替铜制作导线、电缆、电容器及电机的转子导条等。工业高纯铝主要用于科学试验、化学工业以及其他特殊用途。配制铸造铝合金用的铝锭，可查GB1196—83。

表1-1 工业纯铝的化学成分 (GB3190—82)

序号	合金牌号	代号	化 学 成 分 $w_i \times 100$												其他杂质		Al
			Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni	Cr	Ti	Be	Fe + Si	其他杂质			
														单个	合计		
1	五号工业高纯铝	LG5	0.005	—	—	0.003	0.0025	—	—	—	—	—	—	—	0.002	—	99.99
2	四号工业高纯铝	LG4	0.005	—	—	0.015	0.015	—	—	—	—	—	—	—	0.005	—	99.97
3	三号工业高纯铝	LG3	0.01	—	—	0.04	0.04	—	—	—	—	—	—	—	0.007	—	99.93
4	二号工业高纯铝	LG2	0.01	—	—	0.06	0.06	—	—	—	—	—	—	—	0.01	—	99.9
5	一号工业高纯铝	LG1	0.01	—	—	0.10	0.08	—	—	—	—	—	—	—	0.01	—	99.85
6	一号工业纯铝	L1	0.01	—	—	0.16	0.16	—	—	—	—	—	—	0.26	0.03	—	99.7
7	二号工业纯铝	L2	0.01	—	—	0.25	0.20	—	—	—	—	—	—	0.36	0.03	—	99.6
8	三号工业纯铝	L3	0.015	—	—	0.30	0.30	—	—	—	—	—	—	0.45	0.03	—	99.5
9	四号工业纯铝	L4	0.05	—	—	0.35	0.40	—	—	—	—	—	—	0.60	0.03	—	99.3
10	4-1号工业纯铝	L4-1	0.05	0.01	0.01	0.15~ 0.30	0.10~ 0.20	0.02	0.01	—	0.02	—	—	—	0.03	—	99.3
11	五号工业纯铝	L5	0.05	—	—	0.50	0.50	—	—	—	—	—	—	0.9	0.05	0.15	99.0
12	5-1号工业纯铝	L5-1	0.05~ 0.20	—	0.05	—	—	0.10	—	—	—	—	—	1.0	0.05	0.15	99.0
13	六号工业纯铝	L6	0.10	0.10	0.10	0.50	0.55	0.10	—	—	—	—	—	1.0	0.05	0.15	98.8

二、铸造铝合金的分类及特点

1. 铸造铝合金的分类

铸造铝合金中，经常加入的合金元素有硅、铜、镁、锌以及少量的其他元素，如铈、锰、镍、钴、钛、铍等。铸造铝合金既能保持纯铝密度小、耐蚀性好的特点，又有比纯铝高得多的力学性能。如果把铸造铝合金进行热处理，它的力学性能可以和钢铁材料相媲美。

在 GB1173—86《铸造铝合金技术条件》中，所列铸造铝合金的牌号，由表示铸造铝合金的汉语拼音字母“Z”、铝和主要合金元素的化学符号及表示其名义百分含量的数字组成，对于优质合金，在其牌号后附加字母“A”。而合金的代号，由表示“铸铝”的汉语拼音字母“ZL”及其后面的三个阿拉伯数字组成，第一个数字表示合金的系列，第二、三两个数字表示合金的序号。优质合金在其代号后加字母“A”。

按照铸造铝合金中加入的主要元素的多少，可将铸造铝合金分成四类：

- 1) 铝硅类铸造铝合金；
- 2) 铝铜类铸造铝合金；
- 3) 铝镁类铸造铝合金；
- 4) 铝锌类铸造铝合金。

我国铸造铝合金的化学成分、杂质含量、力学性能见表1-2、表1-3、表1-4。

2. 各类铸造铝合金的主要特点

由于各类铸造铝合金中的主要组元不同，所以它们的特点也不同。

(1) 铝硅类铸造铝合金 这类合金中，Si的质量分数一般为6%~13%，属于亚共晶和共晶型合金。它有优良的铸造性能和气密性，线膨胀系数较小，经变质处理后具有良好的力学性能，该合金的耐磨性和耐蚀性也较好。它在各类铸造铝合金中应用最广，适用于多种铸造，是铸造铝合金中产量最大的一类合金，可用来制造较为复杂的铸件。为了改善合金的性能，通常要进行变质处理来细化较脆的硅相。

表1-2 铸造铝合金化学成分 (GB1173-86)

序号	合金牌号	合金代号	主要元素										其他	Al 余量			
			Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti									
1	ZAlSi7Mg	ZL101	6.5~7.5		0.25~0.45												
2	ZAlSi7MgA	ZL101A	6.5~7.5		0.25~0.45												
3	ZAlSi12	ZL102	10.0~13.0														
4	ZAlSi9Mg	ZL104	8.0~10.5														
5	ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.6												
6	ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.55												
7	ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	7.5~8.5	1.0~1.5	0.3~0.5												
8	ZAlSi7Cu4	ZL107	6.5~7.5	3.5~4.5													
9	ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	11.0~13.0	1.0~2.0	0.4~1.0												
10	ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	11.0~13.0	0.5~1.5	0.8~1.3												
11	ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	8.0~10.0	1.3~1.8	0.4~0.6												
12	ZAlSi7Mg1A	ZL114A	6.5~7.5		0.45~0.60												
13	ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	4.8~6.2		0.4~0.65	1.2~1.8											
14	ZAlSi8MgBe	ZL116	6.5~8.5		0.35~0.55												
15	ZAlCu5Mn	ZL201		4.5~5.3													
16	ZAlCu5MnA	ZL201A		4.8~5.3													
17	ZAlCu10	ZL202		9.0~11.0													
18	ZAlCu4	ZL203		4.0~5.0													
19	ZAlCu5MnCdA	ZL204A		4.6~5.3													
20	ZAlCu5MnCdVA	ZL205A		4.6~5.3													
21	ZAlR5Cu3Si2	ZL207	1.6~2.0	3.0~3.4	0.15~0.25												
22	ZAlMg10	ZL301			9.5~11.0												
23	ZAlMg5Si11	ZL303	0.8~1.3		4.5~5.5												
24	ZAlMg8Zn1	ZL305			7.5~9.0	1.0~1.5											
25	ZAlZn11Si7	ZL401	6.0~8.0		0.1~0.3	9.0~13.0											
26	ZAlZn6Mg	ZL402			0.5~0.65	5.0~6.5											

① 在保证合金力学性能前提下, 可以不加铍 (Be)。

② 混合稀土中含各种稀土的质量分数不小于98%, 其中铈 (Ce) 的质量分数约45%。

表1-3 铸造铝合金杂质允许含量 (GB1173-86)

序号	合金牌号	合金代号	杂质含量 不大于 w _i × 100														杂质总和①		
			Fe		Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Zr	Ti+Zr	Be	Ni	Sn	Pb	其他	S	J
			S	J															
1	ZAISi7Mg	ZL101	0.5	0.9	0.2	0.2	0.3	0.35	0.1	0.1	0.1	0.15	0.01	0.05	0.05	0.05	1.0	1.4	
2	ZAISi7MgA	ZL101A	0.2	0.2	0.1	0.1	0.10	0.1	0.1	0.10	0.15	0.01	0.03	0.03	0.03	0.6	0.6		
3	ZAISi12	ZL102	0.7	1.0	0.30	0.10	0.1	0.5	0.20	0.15	0.15	0.01	0.05	0.05	0.05	2.0	2.2		
4	ZAISi9Mg	ZL104	0.6	0.9	0.1	0.1	0.25	0.3	0.5	0.15	0.1	0.01	0.05	0.05	0.05	1.1	1.4		
5	ZAISi5Cu1Mg	ZL105	0.6	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.01	0.05	0.05	0.05	1.1	1.4		
6	ZAISi5Cu1MgA	ZL105A	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.01	0.05	0.05	0.05	0.5	0.5		
7	ZAISi8Cu1Mg	ZL106	0.6	0.8	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.01	0.05	0.05	0.05	0.9	1.0		
8	ZAISi7Cu4	ZL107	0.5	0.6	0.1	0.1	0.3	0.5	0.2	0.2	0.2	0.01	0.05	0.05	0.05	1.0	1.2		
9	ZAISi12Cu2Mg1	ZL108	0.7	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.20	0.20	0.3	0.01	0.05	0.05	0.05	1.2	1.2		
10	ZAISi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	0.7	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.20	0.20	0.3	0.01	0.05	0.05	0.05	1.2	1.2		
11	ZAISi9Cu2Mg	ZL111	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.05	0.05	0.05	1.0	1.0		
12	ZAISi7Mg1A	ZL114A	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.05	0.05	0.05	0.75	0.75		
13	ZAISi5Zn1Mg	ZL115	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.05	0.05	0.05	0.8	1.0		
14	ZAISi8MgBe	ZL116	0.60	0.60	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.20	0.20	0.01	0.05	0.05	0.10	1.0	1.0		
15	ZAICu5Mn	ZL201	0.25	0.3	0.05	0.05	0.2	0.1	0.1	0.2	0.15	0.1	0.05	0.05	0.4	1.0	1.0		
16	ZAICu5MnA	ZL201A	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.05	0.05	0.05	0.4	1.0	1.0		
17	ZAICu10	ZL202	1.0	1.2	1.2	0.3	0.8	0.5	0.5	0.1	0.1	0.5	0.01	0.05	0.4	3.0	3.0		
18	ZAICu4	ZL203	0.8	0.8	1.2	0.05	0.25	0.1	0.1	0.15	0.15	0.05	0.05	0.05	2.1	2.1	2.1		
19	ZAICu5MnCdA	ZL204A	0.12	0.12	0.06	0.05	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.05	0.05	0.05	0.4	0.4	0.4		
20	ZAICu5MnCdVA	ZL205A	0.15	0.15	0.06	0.05	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.05	0.05	0.05	0.3	0.3	0.3		
21	ZAIR5Cu3Si2	ZL207	0.6	0.6	0.30	0.15	0.2	0.15	0.15	0.20	0.20	0.07	0.05	0.01	0.05	0.8	0.8		
22	ZAlMg10	ZL301	0.3	0.3	0.1	0.1	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.05	0.01	0.05	1.0	1.0	1.0		
23	ZAlMg5Si11	ZL303	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.05	0.01	0.05	0.7	0.7	0.7		
24	ZAlMg8Zn1	ZL305	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.01	0.05	0.9	0.9	0.9		
25	ZAlZn11Si7	ZL401	0.7	1.2	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.05	0.01	0.05	1.8	2.0	2.0		
26	ZAlZn6Mg	ZL402	0.5	0.8	0.3	0.25	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.01	0.05	1.35	1.65	1.65		

① S—砂型铸造, J—金属型铸造。

表1-4 铸造铝合金力学性能 (GB1173—86)

序号	合金牌号	合金代号	铸造方法	合金状态	力学性能 不低于		
					抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 $\delta \times 100$	硬度HBS
1	ZAlSi7Mg	ZL101	S、R、J、K	F	153	2	50
			S、R、J、K	T ₂	133	2	45
			JB	T ₄	182	4	50
			S、R、K	T ₄	173	4	50
			J、JB	T ₅	202	2	60
			S、R、K	T ₅	192	2	60
			SB、RB、KB	T ₅	192	2	60
			SB、RB、KB	T ₆	222	1	70
			SB、RB、KB	T ₇	192	2	60
SB、RB、KB	T ₈	153	3	55			
2	ZAlSi7MgA	ZL101A	S、R、K	T ₄	192	5	70
			J、JB	T ₄	222	5	70
			S、R、K	T ₅	231	4	80
			SB、RB、KB	T ₅	231	4	80
			JB、J	T ₅	261	4	80
			SB、RB、KB	T ₆	271	2	90
			JB、J	T ₆	290	3	90
3	ZAlSi12	ZL102	SB、JB、RB、KB	F	143	4	50
			J	F	153	2	50
			SB、JB、RB、KB	T ₂	133	4	50
			J	T ₂	143	3	50
4	ZAlSi19Mg	ZL104	S、J、R、K	F	143	2	50
			J	T ₁	192	1.5	70
			SB、RB、KB	T ₆	222	2	70
			J、JB	T ₆	231	2	70
5	ZAlSi5Cu1Mg	ZAL105	S、J、R、K	T ₁	153	0.5	65
			S、R、K	T ₅	212	1	70
			J	T ₅	231	0.5	70
			S、R、K	T ₆	222	0.5	70
			S、J、R、K	T ₇	173	1	65
6	ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	SB、R、K	T ₅	271	1	85
			J、JB	T ₅	290	2	85
7	ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	SB	F	173	1	75
			JB	T ₁	192	1.5	70
			SB	T ₅	231	2	60
			JB	T ₅	251	2	70
			SB	T ₆	241	1	90
			JB	T ₆	261	2	70
			SB	T ₇	222	2	60
			J	T ₇	241	2	60
8	ZAlSi7Cu4	ZL107	SB	F	163	2	65
			SB	T ₆	241	2.5	90
			J	F	192	2.5	70
			J	T ₆	271	3	100

(续)

序号	合金牌号	合金代号	铸造方法	合金状态	力学性能 不低于		
					抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 $\delta \times 100$	硬度HBS
9	ZA1Si12Cu2Mg1	ZL108	J J	T ₁	192	—	85
				T ₆	251	—	90
10	ZA1Si12Cu1Mg1Ni1	ZL109	J J	T ₁	192	0.5	90
				T ₆	241	—	100
11	ZA1Si9Cu2Mg	ZL111	J SB J, JB	F	202	1.5	80
				T ₆	251	1.5	90
				T ₆	310	2	100
12	ZA1Si7Mg1A	ZL114A	SB J, JB	T ₅	290	2	85
				T ₅	310	3	100
13	ZA1Si5Zn1Mg	ZL115	S J S J	T ₄	222	4	70
				T ₄	271	6	80
				T ₅	271	3.5	90
				T ₅	310	5	100
14	ZA1Si8MgBe	ZL116	S J S J	T ₄	251	4	70
				T ₄	271	6	80
				T ₅	290	2	85
				T ₅	330	4	90
15	ZA1Cu5Mn	ZL201	S, J, R, K S, J, R, K S	T ₄	290	8	70
				T ₅	330	4	90
				T ₇	310	2	80
16	ZA1Cu5MnA	ZL201A	S, J, R, K	T ₅	388	8	100
17	ZA1Cu10	ZL202	S, J S, J	F	104	—	50
				T ₆	163	—	100
18	ZA1Cu4	ZL203	S, R, K J S, R, K J	T ₄	192	6	60
				T ₄	202	6	60
				T ₅	212	3	70
				T ₅	222	3	70
19	ZA1Cu5MnCdA	ZL204A	S	T ₅	437	4	100
20	ZA1Cu5MnCdVA	ZL205A	S S S	T ₅	437	7	120
				T ₆	467	3	140
				T ₇	457	2	130
21	ZA1R5Cu3Si2	ZL207	S J	T ₁	163	—	75
				T ₁	173	—	75
22	ZA1Mg10	ZL301	S, J, R	T ₄	280	9	60
23	ZA1Mg5Si1	ZL303	S, J, R, K	F	143	1	55
24	ZA1Mg8Zn1	ZL305	S	T ₄	290	8	90
25	ZA1Zn11Si7	ZL401	S, R, K J	T ₁	192	2	80
				T ₁	241	1.5	90

(续)

序号	合金牌号	合金代号	铸造方法	合金状态	力学性能 不低于		
					抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 $\delta \times 100$	硬度HBS
26	ZAlZn6Mg	ZL402	J S	T ₁	231	4	70
				T ₂	222	4	65

注：1.铸造方法中：S—砂型铸造；J—金属型铸造；R—熔模铸造；K—壳型铸造；B—变质处理。

2.合金状态中：F—铸态；T₁—人工时效；T₂—退火；T₄—固溶处理和自然时效；T₅—固溶处理和不完全人工时效；T₆—固溶处理和完全人工时效；T₇—固溶处理和稳定化处理；T₈—固溶处理和软化回火处理。

3.某些牌号合金可以采用多种铸造方法及不同热处理方法，以得到不同的力学性能。

(2) 铝铜类铸造铝合金 这类合金中，Cu的质量分数一般都大于4%。其最大特点是耐热性高，是所有铸造铝合金中最高的一类合金。它具有较高的室温和高温力学性能，但耐蚀性、气密性和铸造性能都较差，线膨胀系数大，而且密度也较大。该类合金主要用于耐热和高强度铸件。为了提高其力学性能，通常要对该类合金进行热处理强化。

(3) 铝镁类铸造铝合金 这类合金中，Mg的质量分数一般都大于5%。它的密度最小(2.25 g/cm³)，具有优良的耐蚀性和力学性能(σ_b 可达350MPa)。但铸造性能较差，由于结晶温度范围宽，所以流动性差，线收缩大，缩松倾向也大。合金液易氧化，因而熔炼和铸造工艺复杂。此类合金可用作耐蚀合金，也是发展高强度铝合金的基础之一。目前在航空工业、造船工业、食品工业和化学工业等部门都得到广泛应用。

(4) 铝锌类铸造铝合金 这类合金是铸造铝合金中最便宜的一种。其最大特点是不经热处理就可直接使用。它具有较高的力学性能，但耐蚀性差，铸造中易产生热裂，密度也较大。该类合金没有得到广泛的应用。

§ 1-2 铝硅类铸造铝合金

铝和硅的二元合金或加入镁、铜、锰等合金元素的多元合金为铝硅类铸造铝合金。它的产量在铸造铝合金中占一半以上。该合金在工业上虽然应用时间比铝铜类铸造铝合金晚，但由于它具有优良的铸造性能和良好的力学性能等，因而获得广泛的应用。

一、Al-Si二元铸造铝合金

1. Al-Si二元铸造铝合金的组织

Al-Si二元铸造铝合金又称做普通硅铝明。Al-Si二元合金的相图见图1-1。它是一种简单的共晶型相图，在577°C和 $w_{\text{Si}}=12.5\%$ 时，有 $L \rightarrow \alpha(\text{Al}) + \beta(\text{Si})$ 的共晶反应。在共晶温度下，Si在 $\alpha(\text{Al})$ 中的溶解度为1.65%，室温时溶解度为0.05%。 β 相是Al溶于Si中的固溶体，其溶解量甚微，故用Si表示。

在Al-Si二元合金中，Si的质量分数可高达75%。Si的质量分数小于10%的合金称为亚共晶铝硅合金，其铸态组织为树枝状 $\alpha(\text{Al})$ 和 $\alpha(\text{Al}) + \text{Si}$ 的共晶体。Si的质量分数为10%~14%的合金为共晶铝硅合金，其铸态组织中除了有大量的 $\alpha(\text{Al}) + \text{Si}$ 的共晶组织以外，还可出现少量的初生Si相或初生 $\alpha(\text{Al})$ 相。Si的质量分数在14%以上的合金称为过共晶铝硅合金，其铸态组织由 $\alpha(\text{Al}) + \text{Si}$ 的共晶体和呈多角板状的初生Si组成。随着Si质量分

数的增加，过共晶组织中的初生 Si 增多且粗大。

2. Al-Si二元铸造铝合金的性能

(1) 铸造性能 由图 1-2 可知，Al-Si 二元合金具有优良的铸造性能。在实际使用的 Al-Si 合金中，随着 Si 质量分数的增加，合金的结晶温度范围渐小，组织中的共晶体量不断增加，因而流动性显著增加，补缩效果不断改善，缩松和热裂倾向均减小，气密性不断增大。当 w_{Si} 为 5% 时，合金已有相当好的铸造性能。

对于一般铸造合金来说，共晶成分的合金具有最好的流动性。但过共晶铝硅合金在凝固过程中，由于比热容大的初生 Si 析出，放出大量的结晶潜热 (Si 的结晶潜热为 880J/g，Al 的结晶潜热为 389J/g)，使合金过热，从而获得较共晶成分更高的流动性。由图 1-2 可看出， $w_{Si} = 16\% \sim 18\%$ 时的流动性最好。

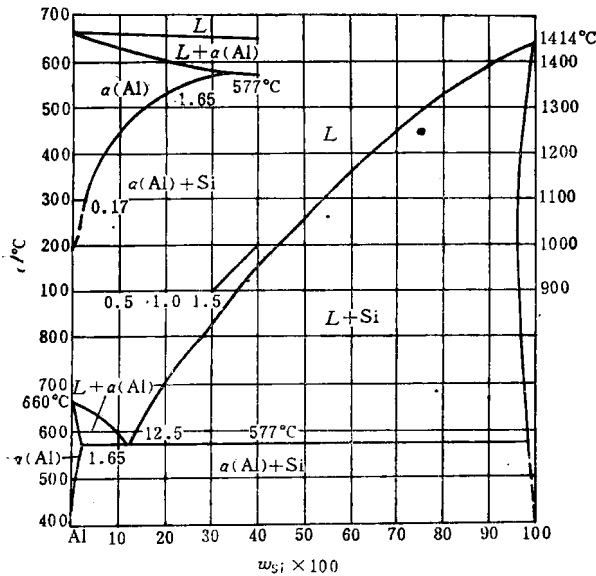


图 1-1 Al-Si 二元合金相图

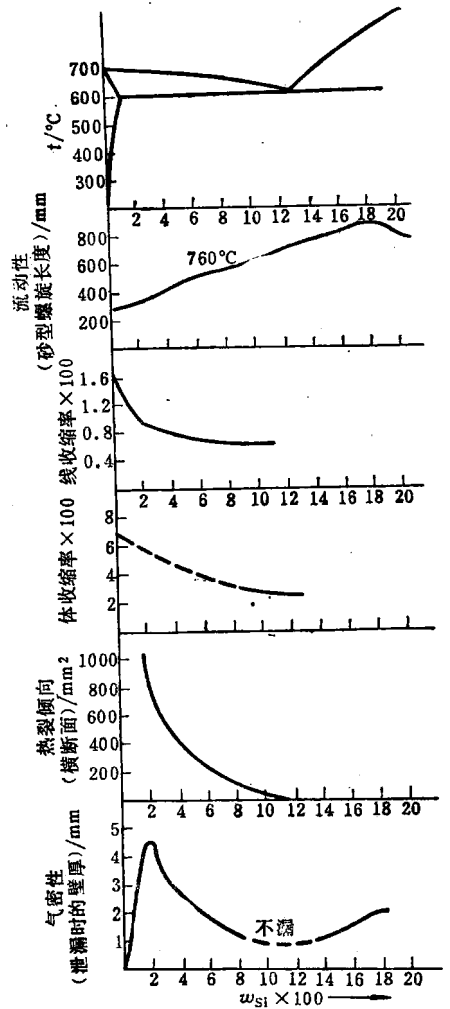


图 1-2 Si 对 Al-Si 二元合金铸造性能的影响

(2) 力学性能 图 1-3 为 Si 的质量分数对 Al-Si 二元合金力学性能的影响。随着 Si 质量分数的增加，组织中的 Si 相不断增加，使合金的抗拉强度有所提高。但在未变质处理时，因 Si 相很脆，共晶硅又分别以粗大的针状和多角形分布在组织中，严重割裂基体而产生应力集中，使塑性降低。当 Si 的质量分数超过 13%~14% 时，伸长率只有 1%，致使合金丧失了使用价值，所以必须经过变质处理。通过变质处理来改变 Si 相的形状，提高铝合金的力学性能，使其抗拉强度可达 160~190MPa，伸长达 6%~12%。

(3) 其他性能 Al-Si 合金具有良好的耐蚀性。这是因为在 Al-Si 合金的表面有一层 Al_2O_3 和 SiO_2 的保护膜，而且组织中的 $\alpha(Al)$ 和 Si 相之间的电位差不大，故不致引起腐蚀。

随着 Si 质量分数的增加，合金中的初生 Si 的硬质点也随之增多，从而在软基体上分布

着许多硬的质点，故 Al-Si 合金具有较高的耐磨性，尤其是共晶铝硅合金，其耐磨性更高。

此外，由于 Si 质点的存在，其切削加工性能较差。

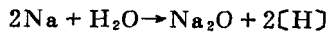
3. Al-Si 类铸造铝合金的变质处理

合金液的变质处理是细化铸造组织的方法之一。对 $w_{Si} > 6\%$ 的 Al-Si 合金，影响其组织性能的因素是 α (Al) + Si 的共晶体和初生 Si，可通过变质处理来提高其力学性能。但对 $w_{Si} < 6\%$ 的 Al-Si 合金不进行变质处理，因为变质剂对其力学性能的提高效果不显著，而且易引起针孔。

(1) Al-Si 合金共晶体的变质处理 Al-Si 合金进行变质时，对变质剂的基本要求是变质效果好、长效、成本低，而且潜伏期短。基于上述基本要求，生产中对共晶成分的 Al-Si 合金最常使用的变质剂是钠及其盐类。近些年来也对其他变质剂的使用进行了大量的研究，并在生产中收到明显的效果。

1) 钠和钠盐的变质 钠 (Na) 的相对原子质量为 22.99，原子半径为 1.92 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)；体心立方晶格；密度为 0.97 g/cm^3 ；熔点为 97.7°C ，沸点为 882°C 。

使用钠变质剂时，其加入量为铝合金液量的 $0.08\% \sim 0.1\%$ 。由于钠较贵，又不易保存，而且钠的熔点、沸点都较低，密度也较小，操作时铝液易沸腾和飞溅，既不安全，也加剧了铝液的氧化。同时在铝液的表面，钠极易与水汽发生反应：



从而在变质处理时易带入气体和夹杂，进入铝液中的钠量也不易控制，当钠量少时造成变质不足，钠量过多时又会造成过变质现象，使力学性能显著降低；尤其是由于钠的密度小，变质时容易造成铝液上部的钠量多，容易发生过变质，底部的铝液则易造成变质不足，致使变质效果很不稳定。因此生产中均采用钠盐来进行变质处理，以保证变质效果的稳定性。所使用的钠盐主要是氟化钠 (NaF)、氯化钠 (NaCl) 和氯化钾 (KCl) 的三元变质剂。关于钠盐的组成将在 § 2-4 中作详细介绍。

Al-Si 合金经过变质处理后，改变了共晶体的结构，细化组织，使原来粗大片状共晶体 α (Al) + Si 及少量多角形初生 Si 的组织变为树枝状的 α (Al) 和 α (Al) + Si 共晶体组成的亚共晶组织，共晶体中的 Si 也变为细粒状。其金相显微组织见图 1-4。

由于组织的显著变化，使合金的力学性能得到提高，特别是塑性的变化更为显著。如 ZL102 合金在变质前的 σ_s 为 $130 \sim 140 \text{ MPa}$ ， δ 为 $1\% \sim 2\%$ ，变质后的 σ_s 为 $170 \sim 230 \text{ MPa}$ ， δ 为 $3\% \sim 8\%$ 。

用钠或钠盐进行变质处理时，其变质能力强，对冷速的敏感性小，因此对任何铸型都适用。但采用钠和钠盐变质的有效时间短，变质经过 $30 \sim 60 \text{ min}$ 后会出现变质衰退现象（即变质的效果随着处理后时间的延长而逐渐消失）。同时钠和钠盐的制备、保存都较麻烦，对坩埚和工具等的腐蚀也较严重。在变质处理过程中，因处理不当有时易产生夹渣、气孔、针孔、过变质及弱变质等缺陷。

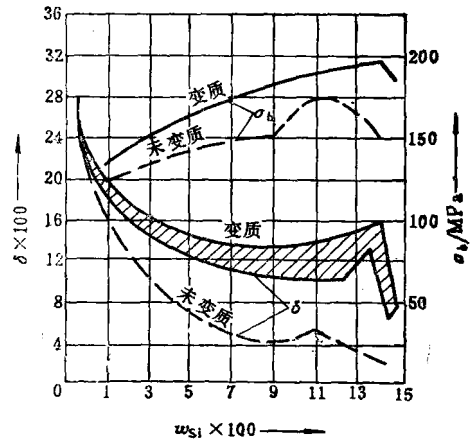


图1-3 Si对Al-Si二元合金力学性能的影响

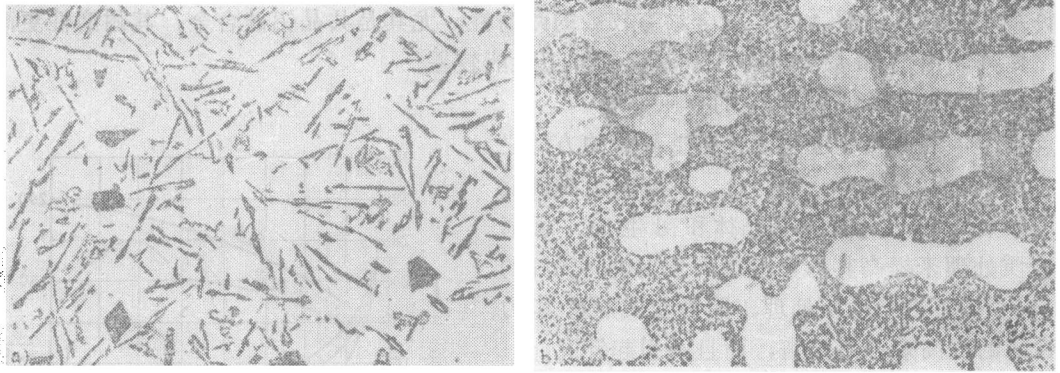


图1-4 $w_{Si} = 12\%$ 的Al-Si合金加三元变质剂处理前后的金相显微组织
a) 变质前 b) 变质后

关于钠和钠盐变质处理的机理,目前并无统一认识,比较集中的意见是认为钠仅能微溶于铝液中,当铝液温度降到铝的液相线附近时,钠在铝液的溶解度就进一步减小,几乎趋于零。也就是说钠在铝液内随温度的降低而析出,形成大量高弥散度的胶状质点吸附于此时出现的硅晶核表面,或聚集于硅晶体的晶界上,所吸附的钠薄膜阻碍了硅晶体的长大而使硅晶粒细化。

经钠变质处理后,由于共晶点移向右下方,共晶温度由 577°C 降到 564°C ,共晶点的Si质量分数由12.5%增到14%左右,使过共晶成分的合金得到 $\alpha(\text{Al})$ 和 $\alpha(\text{Al}) + \text{Si}$ 共晶体的亚共晶组织。

2) 其他变质剂的变质 为了克服钠或钠盐变质的弊病,尤其为了克服钠变质失效(变质衰退),消除针孔、夹渣等缺陷,近年来国内外均在研究和探求新的变质剂,其中锶、铈、铋、铈(混合稀土)、铈、钡等作变质剂都有明显效果。它们都是通过改变共晶体的结构和共晶度来提高其力学性能的。

锶(Sr): 相对原子质量为87.62,原子半径为 2.145 \AA ,面心立方晶格($a = 6.073 \text{ \AA}$),密度为 2.6 g/cm^3 ,熔点为 770°C ,沸点为 1350°C 。Sr的化学活性强,极易氧化,不好保存,且易使铝液吸气,因此多采用 w_{Sr} 为5%、10%、15%的Al-Sr中间合金或含Sr的混合盐($\text{SrCl}_2 + \text{NaF}$)作变质剂。当Sr的加入量(重量)为铝液量的0.02%~0.06%时,能细化共晶硅(见图1-5),使 α 相分布较均匀,其塑性较用Na变质的高。Sr的变质有效时间为6~8h,是一种长效变质剂。Sr的变质温度范围宽,在 $720 \sim 750^{\circ}\text{C}$ 时变质效果相同。Sr对铸件壁厚的敏感小也较小。它对坩埚无腐蚀作用。但Sr的变质易引起吸气,从而增加铸件的针孔,变质后的潜伏期较长。Sr的藏量丰富,产量大,价格便宜,因此采用Sr变质的方法已被应用于生产中。

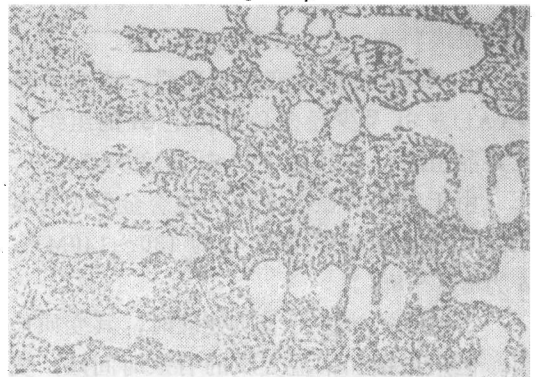


图1-5 Sr对ZL102合金共晶体的变质

铋(Sb): 相对原子质量为121.75,原子半径为 2.903 \AA ,斜方晶格,密度为 6.67 g/cm^3 ,

熔点为 630.5°C ，沸点为 1675°C 。Sb在铝合金中几乎不烧损，加入的Sb为铝液量的 $0.2\% \sim 0.5\%$ 时，能保持100h以上的变质效果，不仅是一种长效变质剂，并具有永久变质的特性。因Sb的密度大，直接加入易产生偏析，故常以 $w_{\text{sb}} = 5\% \sim 8\%$ 的Al-Sb中间合金形式作变质剂。Sb能使共晶硅呈粒状，促进Si相的分枝作用，从而使铝合金的强度、硬度、塑性都有一定的提高。

Sb的变质工艺简单，对坩埚无腐蚀作用，但对铸件的冷速敏感性强，它对缓冷铸件的效果不明显，只适用于激冷铸件。

铋(Bi)：相对原子质量为208.98，原子半径为 1.56 \AA ，菱形晶格($a = 9.479 \text{ \AA}$)，密度为 9.8 g/cm^3 ，熔点为 271.3°C ，沸点为 1680°C 。Bi是一种长效变质剂。其密度为Al的4倍，直接加入易产生重力偏析，因此以 $w_{\text{bi}} = 5\%$ 的Al-Bi中间合金形式加入。Bi的加入量为铝液量的 $0.2\% \sim 0.7\%$ 时，变质效果可保持在3h以上。Bi的变质工艺简单，对坩埚无腐蚀作用，而且资源丰富，价格便宜。但采用Bi变质时，不能获得完全变质的作用，变质后的铝合金，其力学性能不太高，也易产生重力偏析，只适用于不重要的铸件。

锑(Te)：相对原子质量为127.6，原子半径为 1.43 \AA ，六方晶格($a = 4.456 \text{ \AA}$ 、 $c = 5.927 \text{ \AA}$)，密度为 10.24 g/cm^3 ，熔点为 450°C ，沸点为 1390°C 。Te有良好的变质作用，加入的Te量为铝液量的 0.1% 后，不仅能细化共晶硅，还能使 α 枝晶细化。Te和Sb一样，都有促进Si相分枝作用，因而可提高铝合金的力学性能。Te的潜伏期为40min，其变质有效时间最长，几乎能无限期保持其变质作用，它是一种长效变质剂，重熔后也不发生变质衰退。Te的变质温度范围较宽，约为 $680 \sim 740^{\circ}\text{C}$ 。但Te对铸件的冷速敏感性较强，对缓冷铸件效果不明显。

钡(Ba)：相对原子质量为137.34，原子半径为 2.7 \AA ，体心立方晶格($a = 6.079 \text{ \AA}$)，密度为 3.6 g/cm^3 ，熔点为 710°C ，沸点为 1700°C 。Ba是长效变质剂，其变质有效时间约5h，但潜伏期较长。因Ba易氧化，故以Al-Si-Ba中间合金的形式加入，其加入量为铝液量的 $0.05\% \sim 0.08\%$ 。Ba的变质工艺简单，变质效果良好，成本低，并可重熔。Ba对铸件的冷速敏感性也很大，只适用于激冷铸件的生产。

以上几种变质剂的共同特点是长效变质，操作使用方便，对坩埚不腐蚀，形成针孔、夹渣的倾向比钠小，但其变质效果都不如Na。

(2) 过共晶Al-Si合金的变质处理 过共晶Al-Si合金的组织是由初生Si和共晶体 $\alpha(\text{Al}) + \text{Si}$ 组成。随着Si质量分数的增加和冷却速度的减小，初生Si逐渐粗大，并成为形状不规则的板块状晶。其抗拉强度很低，塑性更差。如 $w_{\text{si}} = 25\%$ 的铝合金，不经变质处理，其抗拉强度只有80MPa，伸长率仅有 0.9% ，显然失去使用价值。因此，细化初生Si是制造过共晶Al-Si合金的关键。

对过共晶Al-Si合金的变质处理是采用加磷(P)的方法，使初生Si得到细化。P的相对原子质量为30.97，密度为 1.82 g/cm^3 ，熔点为 44°C ，沸点为 280°C 。在铝合金中加入P后形成AlP，其晶体结构和Si相似(金刚石型)，晶格常数相近(Si为 5.42 \AA ，AlP为 5.45 \AA)，原子间距相近(Si为 2.44 \AA ，AlP为 2.56 \AA)，因此铝合金液在凝固时，AlP做为异质核心，使初生Si细化。由于P的熔点极低，变质时易燃烧，并产生烟雾，生产中多用混合物或中间合金加入铝合金液中(详见第二章§2-4)。

4. ZL102合金