

高等学校教学用书



有色合金及其热处理

东北工学院金相教研室編著

中国工业出版社

本书比较系统地讨论了轻合金、重合金、稀有合金和放射性元素的組織、性质、合金化原理、热处理方法和用途，并在各篇中开辟独立章节，着重讨论了与发展喷气和高温技术，以及原子能工业有关的高温合金和原子反应堆用的金属材料性质、組織、热处理方法和发展现状。

本书适合作高等院校讲授同名课程用的教学用书，也可以供冶金系统各专业高年级大学生和有关厂矿工程技术人员閱讀和参考。

有色合金及其热处理

东北工学院金相教研室編著

中国工业出版社出版（北京德胜门内大街151号）

（北京市書刊出版業登記出字第119號）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行，各地新华书店經售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $18^{7/16}$ ·字数180,000

1961年7月北京第一版，1961年9月北京第一次印刷

印数0834—547·定价（10—6）2.60元

統一书号：15163·166·冶金—56）

目 录

序 言	7
緒 論	9

第一篇 輕金屬及其合金

第一章 鋁及其合金的基本特性	2
§ 1 工业純鋁	2
§ 2 鋁合金組織的特点及其分类	14
§ 3 鋁合金的时效理論	16
第二章 变形用鋁合金	31
§ 1 鋁錳合金	32
§ 2 鋁鎂合金	34
§ 3 鋁-鎂-硅系合金	37
§ 4 鋁-銅-鎂系合金—硬鋁	42
§ 5 鋁-銅-鎂-鋅系高强度鋁合金	51
第三章 变形用鋁合金的热处理	58
§ 1 退火	58
§ 2 淬火	64
§ 3 时效	74
§ 4 回归与二次淬火	78
第四章 鑄用鋁合金	79
§ 1 鋁-硅系鑄用鋁合金—硅鋁敏	80
§ 2 鋁-銅系鑄用鋁合金	85
§ 3 鋁-鎂系鑄用鋁合金	89
§ 5 鋁-鋅系鑄用鋁合金	91
§ 5 鑄用鋁合金的热处理	93
第五章 耐热鋁合金	96
§ 1 耐热鋁合金在使用上的特点	96
§ 2 工业用耐热鋁合金	99
§ 3 提高鋁合金耐热性的途径	110
§ 4 新型耐热鋁合金及其发展现状	117

第六章 鋅及其合金	129
§ 1 鋅及其合金的特性	129
§ 2 工業純鋅	131
§ 3 變形用鋅合金	133
§ 4 鑄用鋅合金	145
§ 5 鋅合金的熱處理	155
§ 6 新型鋅合金	162
第一篇 參考文獻	170

第二篇 重金屬及其合金

第一章 銅與黃銅	173
§ 1 工業純銅	173
§ 2 黃銅的組織和性質	184
§ 3 普通黃銅	191
§ 4 特殊黃銅	194
第二章 錫青銅	208
§ 1 錫青銅的組織和性質	209
§ 2 工業用錫青銅	215
第三章 特殊青銅	220
§ 1 鋁青銅	221
§ 2 鉛青銅	227
§ 3 鉍青銅、鉍銅和鉍青銅	229
§ 4 硅青銅	232
第四章 銅鎳合金	235
§ 1 銅鎳合金的特性	235
§ 2 白銅與鎳銀	237
§ 3 電工用銅鎳合金	240
第五章 銅合金的熱處理	243
§ 1 均化退火	243
§ 2 中間退火和半成品退火	245
§ 3 低溫退火（消除內應力的退火）	251
§ 4 光亮退火	254
§ 5 淬火和回火	258

第六章 鎳、鈰及其合金	262
§ 1 工业純鎳	262
§ 2 一般結構用鎳基合金	271
§ 3 电工用鎳基合金	272
§ 4 鎳基合金的热处理	278
§ 5 鎳基耐热合金	283
§ 6 鎳基耐热合金的热处理	299
§ 7 鈰及其合金	306
第七章 鋅及其合金	316
§ 1 工业純鋅	316
§ 2 鋅基合金	320
第八章 錫、鉛及其合金	331
§ 1 錫的性质与用途	331
§ 2 錫基巴氏合金	333
§ 3 鉛的性质与用途	337
§ 4 鉛基巴氏合金	339
§ 5 焊料及易熔合金	345
第二篇 参考文献	349

第三篇 稀有金屬及其合金

第一章 鈦及其合金	352
§ 1 高純度鈦的性质	353
§ 2 工业純鈦的性质	362
§ 3 鈦的合金化原理	372
§ 4 α -鈦合金	375
§ 5 第一种 α - β -鈦合金	383
§ 6 第二种 α - β -鈦合金	394
§ 7 鈦合金的热处理原理	400
§ 8 工业用鈦合金的热处理工艺	411
第二章 鉻、鋁、鎢及其合金	418
§ 1 鉻的性质	421
§ 2 鉻基合金	434
§ 3 鋁的性质与用途	443

§ 4 鉬基合金	456
§ 5 鎢及其合金	470
第三章 釩、鈮、鉭及其合金	479
§ 1 釩的性质与用途	480
§ 2 釩基合金	488
§ 3 鈮和鉭的性质与用途	493
§ 4 鉭基合金	503
§ 5 鈮基合金	507
第四章 鎳、鈹及其合金	512
§ 1 原子反应堆用金属材料的概要	512
§ 2 鎳的性质和用途	516
§ 3 鎳基合金	528
§ 4 鈹及其合金	535
第五章 鈾、鈾及其合金	548
§ 1 金属鈾的性质	548
§ 2 工业用鈾合金及其热处理	557
§ 3 金属鈾的性质	564
§ 4 关于鈾的合金化与热处理問題	569
§ 5 鈾和鈾的用途, 对人体的危害及其防护	570
第三篇 参考文献	572

第一篇 輕金屬及其合金

比重小于3.5的有色金屬，如鋁（2.70）、鎂（1.73）、鈹（1.85）、鈣（1.55）、鋰（0.55）等称为輕金屬。它們的合金称輕合金。机械性质高，能大規模生产，而且在工业中能大量应用的輕合金，首推鋁和鎂合金。鈹、鈣和鋰等是稀有金屬，主要用作鋼和有色合金的添加元素。

純鋁和純鎂的强度很低，不适于作結構材料。但近几十年来已經成功地創造了质地輕、强度高的鋁、鎂合金。随着鋁、鎂冶炼工业的发展，强大的水电站的建立，生产技术的改进和成本的降低，輕合金在某些机械制造部門中有逐漸代替鉄和鋼的可能性。这一可能性可由表1—4所列举的数据来証明。由表可知，鎂合金、鋁合金和高合金鋼的比强度最高，鑄鉄最低。等重的輕合金工件的比强度与高合金鋼相当，比屈服极限亦大致相等，但輕合金与合金鋼的比刚度却相差悬殊。鋁合金的比刚度比鋼大8.5倍，而鎂合金則大17倍。因此，当工件或机件的重量相等时，用輕合金，特别是用鎂合金能保証最大的刚度。

这些情况說明，輕合金不但目前在飞机制造业中占有絕对的

表 1—4

輕合金与鋼鉄性质的比較

性 能	軟鋼	低 合 金 鋼	高 合 金 鋼	鈹 鈦	鋁 合 金	鎂合金
等体积的相对重量, d	1.0	1.0	1.0	0.92	0.35	0.23
比强度极限, σ_b/d	1.0	1.6	2.5	0.6	1.8~3.3	2.7~3.3
比屈服极限, σ_s/d	1.0	1.7	4.2	0.7	2.9~4.3	2.2~4.3
等重的长板在四支点間弯曲时的比刚度, E/d^3	1.0	1.0	1.0	0.51	8.5	17.0

重要地位，在某些机械制造、桥梁和建筑結構、交通运输和国防

工业中，也有广泛的使用前途。

第一章 鋁及其合金的基本特性

§1 工业純鋁

鋁是在1825年在實驗室中用化学方法（用鉀还原 AlCl_3 ）分离出来的。直到1886年，由于发电事业得到了巨大的进步，获得了强大的电流，并創造了冰晶石电解法以后，才开始进行工业規模的生产。至今，世界各国每年的产鋁总量已超过200万吨。純鋁的主要特点是比重輕，塑性高（ $\delta \geq 60\%$ ），具有优秀的电、热传导性（相当于純銅的50%以上），极大的熔化潛热（ ≈ 90 卡/克）和坚强而且致密的氧化鋁保护膜（抗蝕性高）。这些特点决定了純鋁在工业中的主要用途。

（1）物理性质：鋁为元素周期表中的第三族元素，原子序数为13，原子量为26.97，原子体积等于10。在室溫中具有面心立方晶格，原子半径等于1.43Å，晶格常数 $a = 4.046 \pm 0.004 \text{Å}$ （99.97%鋁），高純鋁的 $a = 4.0413 \pm 0.001 \text{Å}$ 。

比重：鋁的比重因其純度而異。增加硅能降低比重，增加鉄、銅等重金属杂质能提高比重。純度为99.97%的鋁，冷变形后的比重为2.6987，退火后为2.6996。純度为99.75%的工业用純鋁，在20℃的比重为2.703。

熔点：鋁的熔点随純度的提高而逐漸升高，純度为99.66%的熔点为658.68℃，99.97%的为659.8，而高純鋁（99.996%）則为660.24℃。鋁的熔化潛热較其它金属为大，等于93.96卡/克。

沸点：鋁的熔点虽低，但沸点却很高，可作为抗热合金的合金元素。一般认为在一大气压下的沸点在2270~2500℃之間。如在1毫米水銀柱的真空中則沸点为1603~1607℃。鋁的蒸发潛热在2107~2305卡/克之間。

热膨胀：純度为99.952%的电解鋁在20~600℃之間的热膨胀可由下式求出：

$$L_t = L_0 [1 + (22.58t + 0.000989t^2) \times 10^{-6}]$$

式中的 L_0 为最初长度， L_t 为 $t^\circ\text{C}$ 时的长度。

純度为99.996%的高純鋁在20~500 $^\circ\text{C}$ 間的热膨胀方程式如下：

$$L_t = L_0 [1 + (23.22t - 0.0046t^2 + 0.00078t^3) \times 10^{-6}]。$$

由以上两方程式可知，随鋁的純度的提高，綫膨胀亦略为增大。

导热性：鋁的导热性因溫度和純度的高低而異。純度为99.5~99.7%之間的工业純鋁，在室溫中的导热率为0.52卡/秒·厘米·度。純度为99.9%的电解鋁，在190 $^\circ\text{C}$ 的导热率为0.82卡/秒·厘米·度。

导电性：鋁的导电性对于輸电导綫具有重大意义。純鋁的导电性与杂质含量有很大关系。純度为99.97%鋁的退火綫材在20 $^\circ\text{C}$ 的比电阻为2.669微欧姆·厘米，导电率相当于标准軟銅（0 $^\circ\text{C}$ 的比电阻为1.55微欧姆·厘米，20 $^\circ\text{C}$ 为1.682微欧姆·厘米）的64%。国际电气工艺委员会規定，标准軟质鋁在20 $^\circ\text{C}$ 的比电阻应为2.78微欧姆·厘米·相当于銅的62%，电阻溫度系数为0.004。99.997%的高純鋁的导电率則为銅的65.45%。

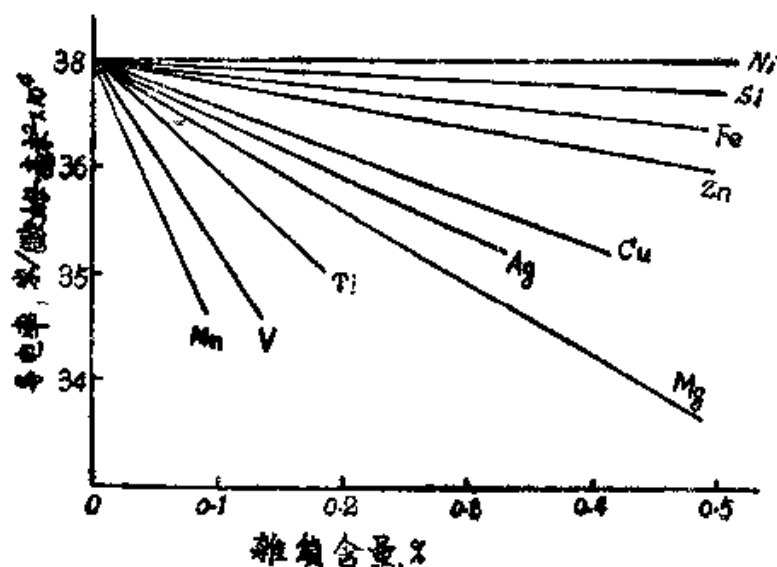


图 1-1 杂质对純鋁导电率的影响

图 1—1 为各种杂质对純鋁导电率的影响。由图可知，形成固熔体的杂质对导电率的影响比較大。例如鎳、硅和鉄的影响最小，銅、銀、鎂次之，錳、鈳、鈦、鉻的影响最大。但同一合金元素由于退火条件不同，其影响亦不同。例如在 500°C 退火的鋁，由于硅被熔解，它的电阻就比在 300°C 退火的鋁高。

鋁的导电率与溫度間的关系如表 1—5 所示。随溫度的升高导电率逐漸降低。

表 1—5

鋁的导电性与溫度間的关系

溫 度, °C	-190	-100	0	100	400
导电率, 欧姆 ⁻¹ ·厘米 ⁻¹ ·10 ⁻⁴	156	65.2	38.2	26.6	12.6

(2) 化学性质：鋁与氧的亲合力很大，仅次于鈣、鋇、鈷、鎂、鋇、鋇而占第七位，在室溫中即能于空气中的氧結合生成极薄的 Al_2O_3 膜。膜厚約为 2×10^{-5} 厘米。膜的密度大，沒有气孔，与鋁（基体）的結合力很强，能阻止氧气向金属内部扩散而起保护作用。保护膜一旦破损后，能迅速生成新的薄膜，恢复其保护作用，因而称其有“自疗性”。由于保护膜的存在，虽然純鋁的电化序很低（标准电位为 -1.67），但在潮湿和多变的气候中仍有足够的抗大气腐蝕的能力。含杂质較多的工业純鋁（98.5~99.9%），在电解液中，甚或在潮湿的大气中亦容易受腐蝕。

鋁在大气中加热（< 660°C）时，氧化速度很慢，与加热時間的平方根成正比。即使在熔融状态，在表面上也能形成坚固的氧化膜，阻止其繼續氧化。鋁中如含有杂质鎂、鈣、鈉、硅或銅，則能增加其氧化速度，特別是鋁鎂合金在加热时最容易氧化。由此可知，鋁的抗氧化性与純度的关系很大。杂质的存在，还能破坏氧化膜与鋁間的結合力，降低鋁的抗蝕性。因此，包鋁用的和化学工业用的鋁，愈純愈好。

鋁是活性很大的元素，除了氧气外，与氯、硫等的作用也很强烈。純鋁在冷的醋酸和硝酸中的活性很小，因此，可用鋁作这

种酸的容器。酸的浓度愈高或温度愈低，铝的抗蚀性亦愈好。浓的或稀的硫酸在低温中与铝的反应很慢，但热的浓硫酸因产生 SO_2 气体，却能与铝起激烈的反应。铝容易在盐酸中溶解，但其速度依铁、硅等杂质的含量而定。碱类和食盐能迅速破坏氧化膜，引起铝的强烈腐蚀，因此，碱（ NaOH ）是铝和铝合金的优良腐蚀剂。

（3）机械及工艺性能：铝的机械性质亦与纯度有关。高纯铝比工业用铝的塑性高，但强度低。纯度为99.996%铝的延伸率 $\delta = 45\%$ ，而强度 σ_b 只有5公斤/毫米²。工业用铝的机械性质如表1—6所示。铝的机械性质不但与纯度有关，与材料状态也有关系。变形硬化后，强度可以提高1~1.5倍，但塑性却显著降低（图1—2）。

表 1—6

工业纯铝的机械性质

机 械 性 能	材 料 状 态		
	铸 态	变 形 后	退 火 后
抗张强度 σ_b , 公斤/毫米 ²	9~12	18~25	8~11
弹性极限 σ_e , 公斤/毫米 ²	—	—	3~4
屈服限 σ_s , 公斤/毫米 ²	—	12~24	5~8
延伸率 δ , %	11~25	4~8	32~40
断面收缩率 ψ , %	—	50~60	70~90
布氏硬度 H_B , 公斤/毫米 ²	21~32	40~55	15~25
冲击韧性 α_K , 公斤/毫米 ^{3/2}	31	—	—
抗剪强度 σ_T , 公斤/毫米 ²	4.2	—	—
疲劳极限 σ_w , 公斤/毫米 ^{3/2}	—	5	4

金属的弹性模量（ E ）与晶格常数有关，可用下示经验公式来表示：

$$E = \frac{K}{a^m}$$

式中的 K 、 m 为常数， a 为晶格常数。

纯铝的晶格常数较大，故 E 值较小。纯度为99.98%的电解

鋁， E 為 6700 公斤/毫米²。當鋁中含有多量的原子半徑較小的雜質（鐵、硅、銅、錳等）時， E 值將增大。例如純度為 99.25% 的工業純鋁， E 為 7100 公斤/毫米²。根據多數的研究結果證明，鋁的彈性模量位於 6650~7300 公斤/毫米² 之間。

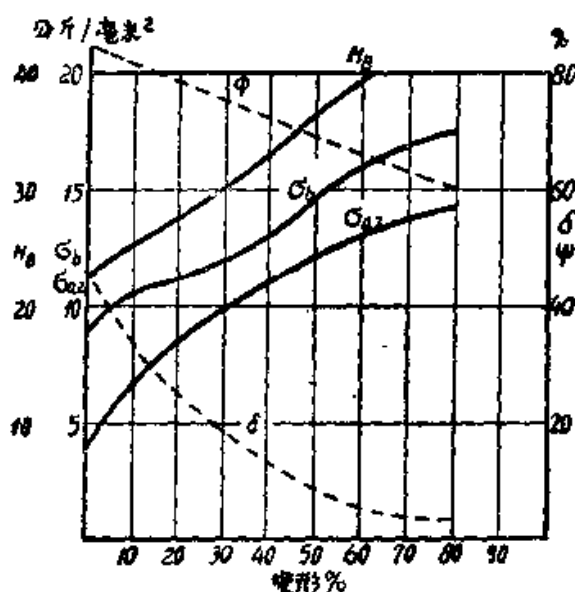


圖 1-2 鋁的機械性質與冷加工度的關係

鋁的試驗溫度由 20° 升高到 510°C 時， σ_b 則降低到 0.55 公斤/毫米²， H_b 降低到 3.5，然而 δ 却增加到 45%， ψ 增加到 99%。

鋁的再結晶溫度，按包契瓦爾的公式 $T_{再} \approx 0.4 T_{熔}$ ，約等於 100°C。但純度降低，再結晶溫度和再結晶時間亦隨之提高和延長。例如純度為 99.9986% 的鋁，在 105°C 須經過 5 秒鐘，而純度為 99.993% 的鋁，在 240°C 須經過 10 分鐘才能再結晶完了。

純鋁不能進行淬火和時效處理，只能進行再結晶退火，借以消除冷變形的影響。工業純鋁板材或其它半成品的退火溫度為 345~370°C。純鋁退火後的機械性質（ σ_b 和 δ ）的變化與純度有關。圖 1-3 為強烈變形後的純鋁（99.9, 99.0 和 98.7%）在不同溫度中退火後的 σ_b 和 δ 的變化。退火後的 δ_b 隨純度的降低而升高（圖 a），但 δ 值的變化則不同（圖 b），在正常退火條件下

(約300°C)，99.9%Al的 δ 值最高，98.7%的最低，但退火溫度大於400°C後，高純鋁的 δ 反而急劇降低。這是在含雜質多的鋁中，散佈在晶間的夾雜能阻止晶粒的過度長大，因而降低了過熱傾向。

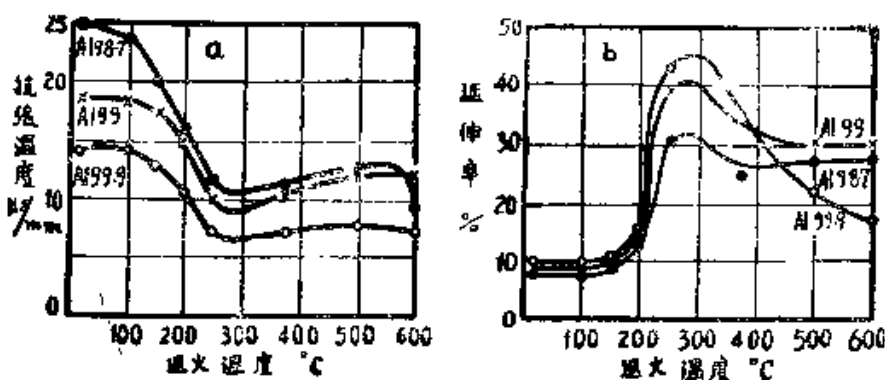


图 1-3 純鋁在各种溫度退火時的強度 (a) 和延伸率 (b) 的变化

鋁可以進行任何種冷、熱壓力加工。熱加工溫度為 400 ~ 500°C，中間退火溫度為 350 ~ 500°C。它的壓延性能極高，可以壓延成厚度為 0.000638 毫米的鋁箔和拔成極細的金屬絲。

(4) 鋁的雜質及其影響：供科研或某些特殊目的用的鋁，純度可達 99.999%，而工業純鋁的純度則為 99.7 ~ 98.5%，約含有 0.3 ~ 2.0% 的雜質。鋁中最常見的雜質是鐵和硅，是由礦石中帶來的。此外，尚有微量的銅、鋅、錳、鉻等，是在二次熔煉時混入的。

鐵在鋁中的存在狀態可用鋁-鐵系平衡圖 (圖 1-4) 來研究。鐵與鋁形成 FeAl_3 化合物，在 1.7% 鐵處與鋁形成共晶。鐵在鋁中的溶解度極小，在共晶溫度 655°C 僅能溶解 0.03%。當鋁中的鐵含量超過 0.03% 時，即形成 $\text{FeAl}_3 + \text{Al}(\alpha)$ 的共晶組織，但因共晶中含鐵過少，故在顯微鏡下看不到典型的共晶組織，只有 FeAl_3 呈黑色夾雜分佈在鋁的晶粒間界上。 FeAl_3 是硬脆的組織，含量多時不但影響塑性，而且使鋁的抗蝕性顯著降低，但能使再結晶後的晶粒細化。

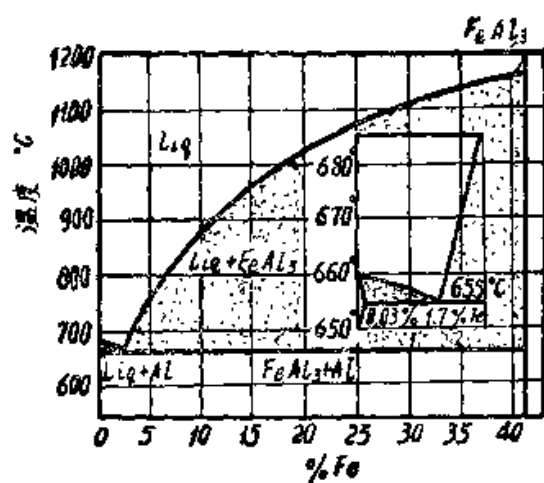


图 1-4 Al-Fe 系状态图

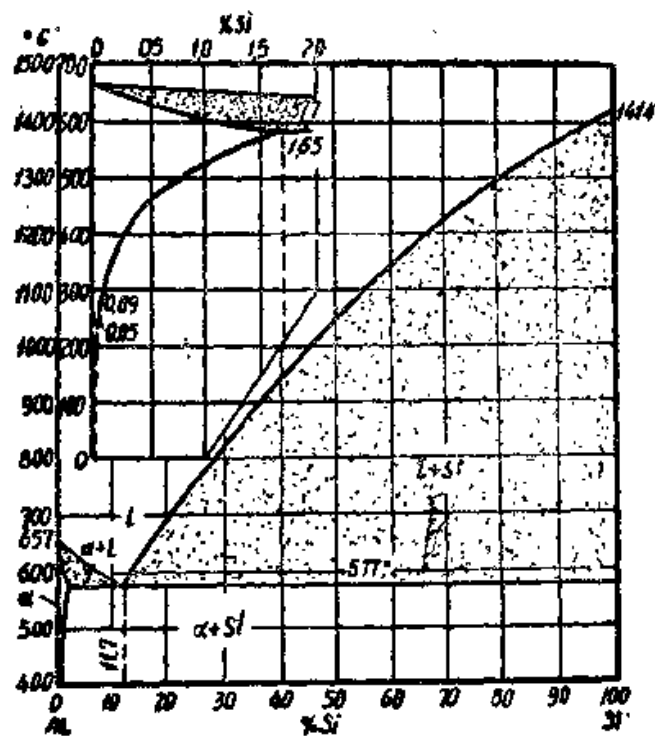


图 1-5 Al-Si 系状态图

鋁-硅系平衡图如图 1—5 所示。在 11.7% 硅处形成二元共晶，共晶溫度为 577℃。硅在鋁中的溶解度較大，在共晶溫度时的最大溶解度为 1.65%，但随溫度的降低而显著下降，在常溫中只能溶解万分之几（約 0.05%）。当硅含量大于 1.65% 时，鋁中即出現共晶組織，大于 11.7% 时即有硅（化学組成与純硅极相近的硅-固溶体）的初晶出現。硅在鋁中的溶解度变化虽然很大，但淬火和时效后的强化效果却很小，故在工业中不利用来进行任何热处理。

鋁中溶解的少量硅，不仅能降低鋁的抗蝕性，而且使鋁板半成品再結晶后的晶粒变粗，是鋁板中最有害的杂质。但含量超过 0.4% 时，随含量的增加，反而使晶粒逐渐变細。

在鋁中，鉄和硅总是同时存在的，因此有新的三元化合物或三元固溶体出現。这些新相的性质、数目和名称尚未完全弄清楚，有时用 α -和 β -相或用 X-相来表示。

当鋁中的硅比鉄多时，形成 FeSiAl_5 化合物，在显微镜下呈亮咖啡色，称之为 β -相，是脆性很大的針状化合物，在应力作用下使鋁容易沿着它而破断。当鋁中的鉄比硅多时，則生成三元化合物 α -相（ $\text{Al}_x\text{Fe}_y\text{Si}_z$ ）。由于鉄和硅的比例不同， α -相可由包晶反应生成，也可以由液相直接形成。如果 Fe 比較多，

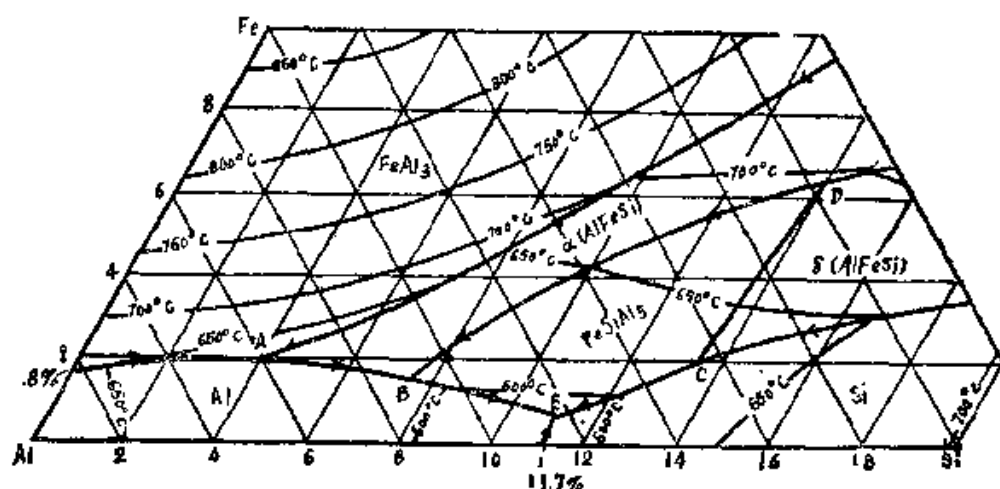


图 1—6 Al-Fe-Si 三元系状态图

α -相則由液相和 FeAl_3 的包晶反应生成(图1—6), 但由于包晶反应往往进行得不彻底, FeAl_3 容易呈包层組織被保留下来。



图1—7 $\text{Al} + \alpha$ -相的共晶組織

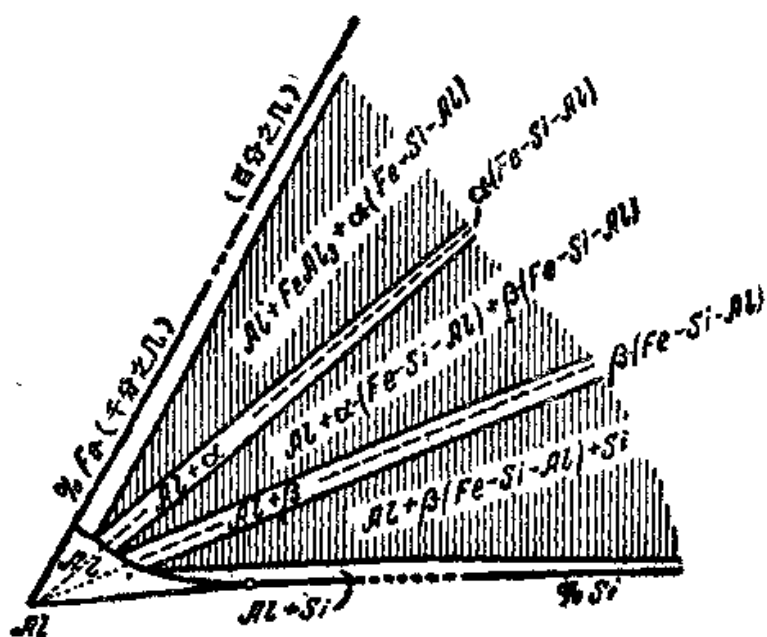


图7—8 Al-Fe-Si 三元系各相分布状态的示意图

α -相是脆的化合物，呈汉字状的美丽图案分布于铝基体中。图1—7即为Al+ α -相的共晶组织。

图1—8为Al-Fe-Si三元系靠近铝端的各相在低温中分布状态的示意图。该系的 FeAl_3 、Si、 α 及 β -相在未腐蚀的试样中即能看出，并可按它们的颜色来区别。单体硅常较其它相的颜色黑些，而三元相最亮。工业纯铝中的铁、硅含量比，一般地说，均恰好能形成三元化合物，很少有 FeAl_3 或Si存在。

前述的各种相，在铸态均呈硬脆的针状或骨骼状组织存在，对铝的塑性很有害。为了消除这些组织的影响，必须在高温（500℃）中进行锻、压和长时间退火，使针状组织破碎和粒状化。粒状化后的组织，即使含量较多，塑性亦能明显的改善，延伸率可提高到20%。如不用压力加工，只进行扩散退火，除了硅以外，很难改变形状，因为只有硅在铝中的溶解度变化较大。

铁、硅除了影响铝的塑性和抗蚀性外，它们的含量比还能影响退火半成品的晶粒度。近年来的研究证明〔3〕，仅当铁、硅含量比 $\text{Fe/Si} \geq 2 \sim 3$ 时，退火后才能获得最细的晶粒，如果硅含量多于铁，反而使晶粒变粗，对板材的冲压加工质量有坏影响。因为铝中（2S板材）的Fe/Si比增大时，使共晶组织增多，退火时的再结晶核心也增多，故能获得细晶粒组织。

铝中如果同时有锰和硅存在，则能形成 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Mn}_2$ 化合物，其形状与 α -相相似，也呈汉字状分布，是脆性很大的组织。

铝中如果同时有铁和锰存在，则能形成 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 化合物，此化合物是铁溶解在 MnAl_6 化合物中的固溶体。 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 是灰色的硬而且脆的片状组织，呈汉字状分布。 $(\text{MnFe})\text{Al}_6$ 比较坚硬，在热变形时很难被破碎和球化。

铝中还经常有微量的杂质铜和锌。这两种元素在铝中的溶解度均比较大，铝在常温中能溶解18%的锌，0.5%铜。因此，少量的铜和锌对铝的组织没有影响，但能影响铝的理化性质（如导电性和抗蚀性等）。

（5）铝的用途：由于工业纯铝的比重小、具有优良的变形