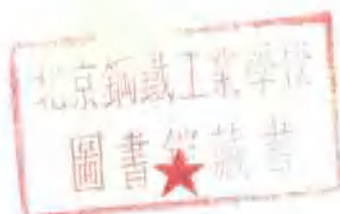


哈爾濱工業大學講義

有色金屬及其合金

金相熱處理教研室編譯



1955

有色金屬及其合金

金相熱處理教研室編譯

1955

編 者：金相熱處理教研室

出版者：哈爾濱工業大學

印刷者：哈爾濱工業大學印刷廠

1955年7月

前 言

在 Д. И. 門德雷耶夫週期表的 92 种穩定元素中約有 70 种为金屬，其中約 60 种在現代已用于机械制造中。按应用的範圍來說，几千年來鉄及其合金（黑色金屬組）在金屬中一直佔首要的地位。但到近代尤其是最近二三十年以來，有色金屬（特別是鋁、銅、鎳、鎂、鈷、鋅、錫、鉛及其他金屬）的使用價值得到很大的增長。現在已很難找出一種機器，它的某些機件不是由有色金屬或其合金制成的。有色金屬在特殊形式的机械制造如汽車制造、發動機制造及儀器制造等部門中的價值是特別大的。

本講義是由張緯斌、胡業明兩同志根据苏联專家 Г. Н. 羅斯托夫蔡夫（Г. Н. Ростовцев）的課堂講稿整理編譯的，內容只包括鋁及其合金和銅及其合金兩部份。由于時間匆促，又限于編者科學水平，錯誤在所難免，望讀者指正。

金相熱處理教研室

1955 年 7 月

第 一 部 分

鋁 及 其 合 金

我們通常称鋁为 20 世紀的金属，这是因为近 30—40 年來，它已成为一种在工業生產部門中具有重要意义的金属。在地殼中，鋁的含量約佔重量的 7.5%，即將近为鉄的兩倍，並比所有有色金属的總和多數倍。因此，鋁在地壳下是分佈最广的金属，其儲量实际上是无窮无尽的。

鋁最早是于 1825 年在實驗室中發現的，當時此种新金属曾为實驗室的珍品。之后它与黄金和鉑金一样主要用于首飾上。

到十九世紀末叶，由于鋁难于獲得而引起價值高昂，因此使鋁还不能广泛地应用在工業上。制鋁工業的發展还在前一世紀末，由于水电站的建立，使其能利用电能來得到它，逐漸發展起來的。

目前鋁的每年生產量要超过兩百万噸。它已成一种最重要的工業用的金属了，無論在航空範圍內、在电机制造事業中、在運輸陣綫上，应用它能使技術不断地得到改進。

帝俄時期沒有制鋁工業，現在苏联已拥有强大的制鋁工業了。在最短的時間內，苏联冶金工作者在沒有外力的帮助下建立了煉鋁工業的組織。目前苏联的制鋁工業在產量和技術方面都在世界上佔据了首要的地位。

鋁 的 性 質

鋁为 Д.И.門德雷耶夫元素週期表中第三組的第十三个元素。鋁的原子量为 26.97，原子体積等于 10，原子半徑在室温時为 1.43Å。固态鋁为面心晶格，晶距为 4.04 Å。鋁沒有同素異形轉變。現在可以得到純度为 99.999% 的鋁。鋁对氧具有很大的親和力；在常温下，通过空气時鋁很快地会覆上一層氧化薄膜，以防止其繼續氧化。熔化鋁時在其表面上也時常生有坚固的氧化膜，这样就可阻止繼續氧化。如將保護

薄膜去掉，它又很快地恢復了。因而鋁能在很潮濕和氣候變化的情況下，很好地抵抗大氣的腐蝕作用。鋁能使很多的金屬氧化物還原成為金屬。加熱時它很容易溶解於稀硝酸和稀硫酸中。鋁溶解於鹼中生成鋁酸鹽。

鋁的最大優點之一，就是它的比重小，因而它在機械製造中成為特別有價值的材料。鋁的比重是隨其純度而定。固態的和熔融的鋁的比重均隨其純度的增高而減小，比重的值同樣也依溫度而定。純度 99.75% 的鋁的比重數值如下（見表 1*）。

表 1

溫 度 °C	20	100	400	658 固態	658 溶態	700	900
比 重 γ/cm^3	2.703	2.690	2.620	2.550	2.382	2.371	2.316

鋁的機械性能同樣依其被外來雜質所滲入的程度而定。較純的鋁比不純的鋁具有較低的強度和較高的塑性。純度 99.996 % 的鋁在試驗時具有 45 % 的伸延率，而強度只等於 5 kg/mm^2 。Г. В. 阿基莫夫曾做過純鋁單晶性質的試驗。單晶的硬度為 $H_B = 15-20 \text{ kg/mm}^2$ ，而滑移強度極限為 4—5 kg/mm^2 。

下面指出了工業用鋁的機械性能與其加工情況的關係（見表 2）如自二表中看到的，工業的鋁，其機械性能在相當大的程度上依照得到試件的情況（鑄造的，退火的，冷工硬化的）而定。

* 表 1 中所列出的數據和大部份鋁的物理化學性質的其他材料是自 1952 年冶金出版社發行的 М. П. 斯拉文斯基著的「元素的物理化學性質」書上借用來的。

表 2

机 械 性 能	金 屬 狀 态		
	鑄造的	压 力 加 工 的	
		軟 的 (退火的)	硬 的 (不退火的)
拉 力 强 度 極 限 kg/mm^2	6—12	8—11	15—25
彈 性 極 限 kg/mm^2		3—4	—
屈 伏 點 kg/mm^2	—	5—8	12—24
伸 延 率 %	11—25	32—40	4—8
断 面 收 縮 率 %	—	70—90	50—60
布 氏 硬 度 kg/mm^2	24—32	15—25	40—55
冲 擊 韌 性 kg-m/cm^2	34	—	—
抗 剪 强 度 kg/mm^2	—	6	10
压 縮 强 度 極 限 kg/mm^2	42	—	—
變動弯曲应力時的疲勞極限 kg/mm^2	—	4	5

根据不同研究者的数据，鋁的彈性系數是在 6650—7300 kg/mm^2 範圍內。

在升高溫度自 20°C 至 510°C 試驗鋁時，其強度極限下降至 0.55 kg/mm^2 ，硬度至 3.5 kg/mm^2 ，而此時伸延率增長到 45 %，断面收縮率到 99 %。

鋁可用任何一種已知的方法在熱狀態和冷狀態下進行壓力加工。鋁的鍛壓性極大，用它可製造厚度至 0.000638 mm 的鋁箔和最細的金屬絲。

熔點也和鋁的其它性質一樣，隨其純度而變，即隨着外來雜質份量

的減少而增高。例如，在純度等于 99.2 % 和 99.5 % 時，鋁的相應熔點為 657°C 和 658°C。較純的鋁 (99.6 %) 在 658.7°C 時熔化，而純度為 99.97 % 的鋁熔點等于 659.8°C。最近對於純度 99.996 % 金屬的測定指出，它的熔點為 660.24°C。鋁的熔化潛熱等于 93.96 кал/г。鋁的最細粉末經受 6000 кг/см² 壓力上會變為緻密的物體，這一物體已廣泛用于粉末冶金中。

鋁的沸點數值彼此間相差極大，並位于 1800—2500°C 範圍內。最近有些研究者指出，沸點的數值是位于較狹的溫度範圍 2270—2500°C 內。在真空中（當殘余壓力約為 1 мм 水銀柱高時），鋁的沸點下降到 1603—1607°C，鋁的蒸發潛熱變動于 2107—2305 кал/г 之間。

鋁比其他金屬具有更大的熱容，在此範圍內已進行多次的研究，但這些研究的結果沒有給出同一的數據，這是因為試件的純度不同之故。同時預先的熱處理和機械加工會影響鋁的熱容，這是由于原子和結晶組織的歪曲，因而改變了內能。

鋁的比熱容數值與溫度的關係，根據各個研究者所得出的數據列于表 3 中。

表 3

溫度°C	0	100	200	300	400	500	600	658 固態	658 溶態
比熱容 кал/г.°C	0.209	0.224	0.237	0.245	0.2529	0.259	0.263	0.273	0.250

雖然熔化溫度低，而一克鋁自 0°C 加熱至熔點時的熱含量（包括熔解熱在內）要較其他金屬高得多（見表 4）。

表 4

金 屬	Al	Fe	Cu	Pt	Ag	Au
熱 含 量 кал/г	258.3	250.0	162.0	102.4	85.0	58.0

各个研究者認為在導熱性方面的數據同樣是不能固定的，而鋁的導熱性是按照其溫度和含有的雜質分量而定。下面根據不同研究者的數字繪出對於工業用鋁的導熱係數大小與溫度關係的圖線（見圖1）。從圖中可看出，於 -125°C 時發現了最小的導熱值，這個現象直到現在還沒有解釋它。隨着純度的升高，鋁的導熱性也增加了。例如，對於純度為99.489%和99.7%的鋁於 200°C 時的導熱性相應地等於0.5和0.531 $\text{кал/см.сек.}^{\circ}\text{C}$ 純度為99.90%的鋁於 190°C 時的導熱性，按照若干研究者所得的數字是增到0.82 $\text{кал/см.сек.}^{\circ}\text{C}$ 。

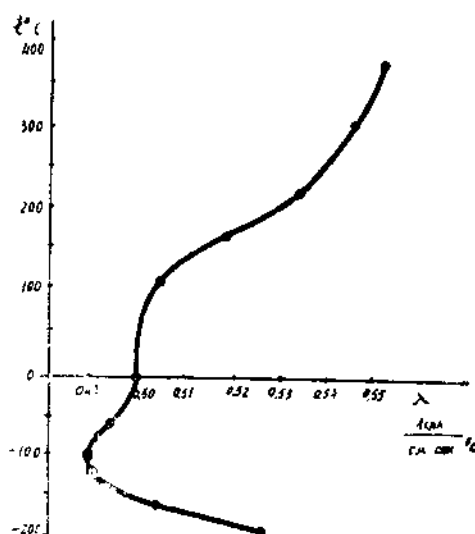


圖1 工業用鋁的導熱係數與溫度關係

對於純度99.952%的電解鋁，在20到 600°C 溫度範圍內，直線膨脹適合於下面的方程式：

$$L_t = L_0 [1 + (27.58t + 0.000989t^2) \times 10^{-6}]$$

純度99.95%的鋁在20— 600°C 範圍內的線膨脹係數的數值列於表5中。

表 5

溫度 $^{\circ}\text{C}$	20—100	100—200	200—300	300—400	400—500	500—600
線膨脹係數	23.8	25.2	27.5	29.5	31.5	33.5

對於純度為99.996%的鋁在20— 500°C 溫度範圍內則得到下列

線膨脹方程式：

$$l_t = l_0 [1 + (23.22t + 0.0046 t^2) \times 10^{-6}]$$

從下列兩方程式的比較中可看出，隨着鋁的純度的升高，直線熱膨脹也略為增加了。

現代了解鋁的導電性的知識是特別有意義的，因為此種金屬正愈來愈廣泛地用作長距離送電的導電材料。

如同其他性質一樣，鋁的導電性也在很大程度上依其純度而定。在不純時即要下降，例如 99.997% 純度鋁的導電性為銅導電性*的 65.45%，99.5% 純度鋁具有導電性較低，只為銅導電性的 62.5%。

各種金屬的含量對於鋁的導電性影響如圖 2 所示。

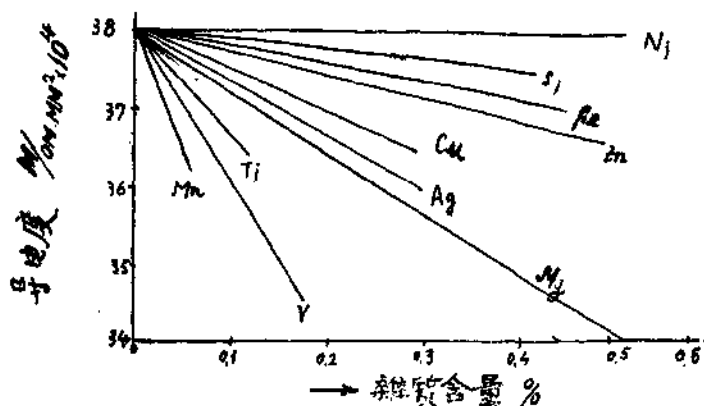


圖 2 鋁中雜質含量對於導電性的影響

鋁的導電性與溫度關係的數字示於表 6 中。

表 6

溫 度 °C	-190	-100	0	100	400
導 電 度 $OM^{-1}CM^{-1}10^{-4}$	156	65.2	38.2	25.6	12.5

*銅於 0°C 時的電阻等於 1.55 MKOM.CM. 20°C 時為 1.682 MKOMCM

鋁的电阻溫度系數隨其純度不同而變動（自0.00433 至 0.004）。

純鋁的有結晶開始溫度按照 A.A. 波契瓦爾的公式（ $T_{\text{開始結晶溫度}} = 0.4T_{\text{熔點}}$ ）約等於 100°C 。由於外來雜質的增加鋁的不純程度也會提高再結晶的開始溫度，並增加其再結晶的時間。例如，純度為 99.9986% 的鋁在 105°C 時，再結晶須經過 5 秒鐘；而純度為 99.993% 的鋁在 240°C 時，再結晶要經過十分鐘（*）。

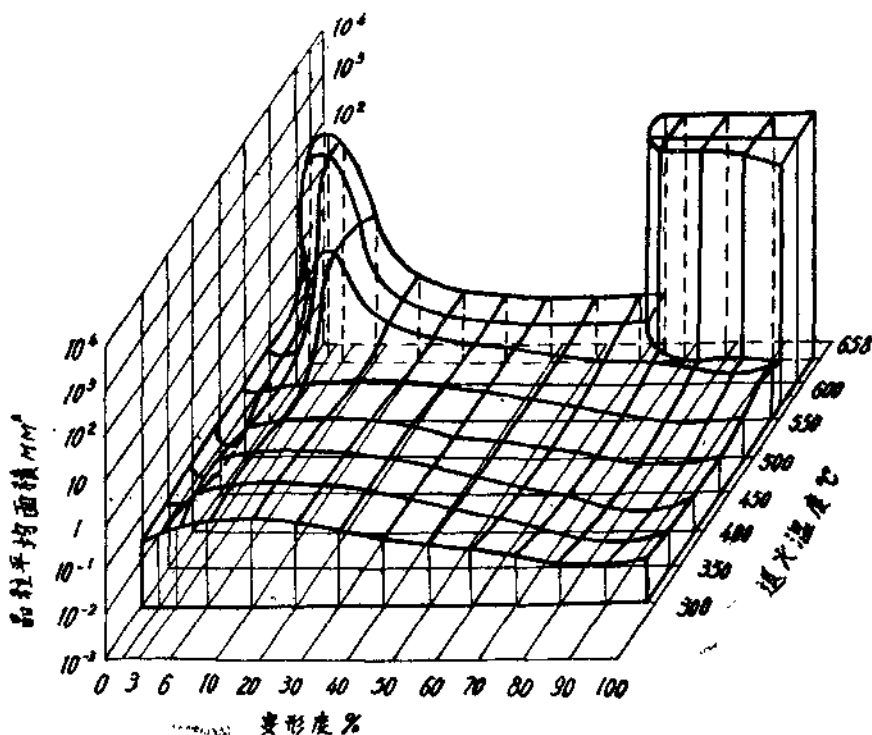


圖 3 純度 99.6% 的鋁的再結晶立體圖

*關於鋁及其合金再結晶的詳細數字可參考 И.Л. 羅開立比爾克和 Е.С. 施皮青涅茨基所著「金屬和合金的再結晶圖解」一書冶金出版社，1950。

圖 3 中示出了純度 99.6 % 的鋁的再結晶立體圖；而純度為 98.5 % 的鋁的再結晶立體圖如圖 4 所示。

苏联定的工業用鋁的牌號如表 7 所示。

表 7

牌 號	化 學 成 份					
	Al	雜 質 (不多于)				
		Fe	Si	Fe + Si	Cu	雜質總和
AB—1	99.90	0.06	0.06	0.095	0.005	0.10
AB—2	99.85	0.10	0.08	0.142	0.008	0.15
A—00	99.7	0.16	0.16	0.260	0.010	0.30
A—0	99.6	0.25	0.20	0.360	0.010	0.40
A 1	99.5	0.30	0.30	0.450	0.015	0.50
A 2	99.0	0.50	0.50	0.900	0.020	1.00
A 3	98.0	1.10	1.0	1.800	0.050	2.00
A 4	95.6	1.8	1.5	3.500	0.100	3.40

牌號 AB 鋁（高純度的）用于制造化學器皿、電線、電解容器、電器的箔片，及為研究及其他特殊目的之用。

牌號 A 00 及 A 0 的鋁用作制造鋁箔、鋁合金防蝕用的包鋁材料、電纜和導電機件、生產特殊用途的鋁合金，同樣也用于化學工業上。

牌號 A 1 的鋁用作生產優質鋁合金，但此種牌號也用于制造電纜和導電機件、包鋁板、鋁箔，還用于備制優質鋁粉及煮沸食物用的器皿。

牌號 A 2 的鋁用于制造鋁合金和其他合金、器皿、電纜和導電機

件及制造中間合金用。

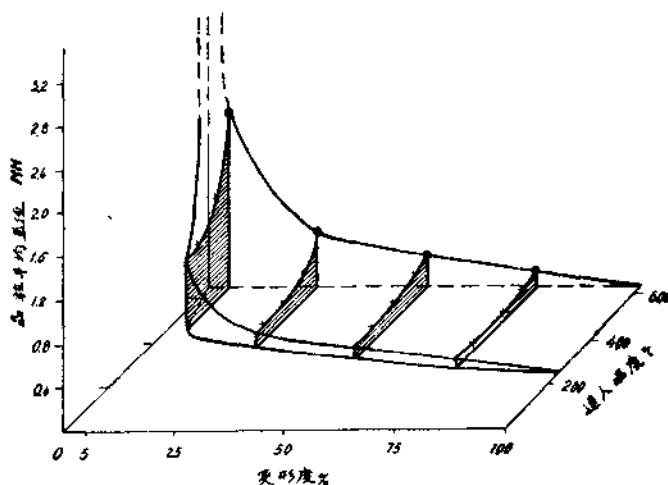


圖 4 純度為 98.5% 的鋁的再結晶立體圖

牌號 A 3 的鋁用于制造不重要的鋁合金及其他合金，用作鋁合金的原料，制造中間合金及广泛需要的机件。

牌號 A 4 的鋁可用作鋼的去氧剂，也可制造鋁粉，以及其他一些方面的应用等。

工業上作为抗蝕材料用純鋁的化学成份有很重要的意义，因而在对化学工業和包鋁上应尽可能地用高純度的鋁，在冷醋酸及硝酸中，鋁活動性很小，因而生產上可用以收藏此等酸類，同時酸的濃度愈高或温度愈低，則鋁的抗蝕性愈好。

其他酸類如硫酸、鹽酸等，必須除去其中的雜質，以避免鋁很快的毀坏，碱類会很快地破坏氧化鋁保護膜而引起鋁的激烈腐蝕。

要得到很純的鋁是相当困难的，因为鋁中或多或少地会出现一些雜質，首先就是鉄和矽，鋁中除鉄和矽外，还存有一定分量的銅和鋅。这些雜質对于鋁的性質的影響，叙述如下。

鉄的影響：鉄在固态鋁中可溶有極少的分量，鋁—鉄平衡圖的一部分

部如圖 5 所示。

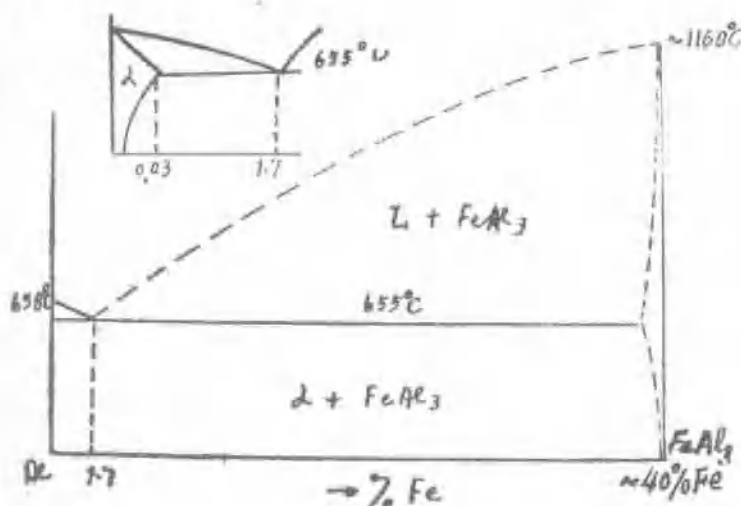


圖 5 鋁—鐵平衡圖的一部份

從圖中看到，假如鐵存于鋁中的分量多于 0.03%，則要生成共晶体 ($\alpha + \text{FeAl}_3$)。有時此種共晶体用 $\text{Al} + \text{FeAl}_3$ 表示。後者的解釋是， α 固溶體含的鐵極少，並且 α 和 Al 在此種情況下應是彼此極其相近的。



圖 6 含鐵 3.5% 的鋁合金 $\times 104$

如圖 5 中看到的，共晶体 $\alpha + \text{FeAl}_3$ 幾乎整個由鋁所組成（鐵在共晶体中為 1.7%）。少量的鐵在共晶体中就使其得到特殊的組織，這種組織好像是單獨自由針狀體 FeAl_3 和鋁的固溶體的集合體。

化合物 FeAl_3 具有高的硬度。它的存在使得鋁的組織不均勻，並減少其塑性。

鋁中含 3.5% Fe 的顯微組織

如圖 6 所示。

矽的影響：矽在鋁中溶解有相當多的份量，在 577°C 時，鋁溶有 1.65% 的矽。隨着溫度的下降，矽的溶解度逐漸減小，並於室溫時達到萬分之几 ($\sim 0.05\%$)，Al—Si 平衡圖列于圖 7 中。從圖中看到，鋁矽合金是可以進行淬火及淬火後回火的。

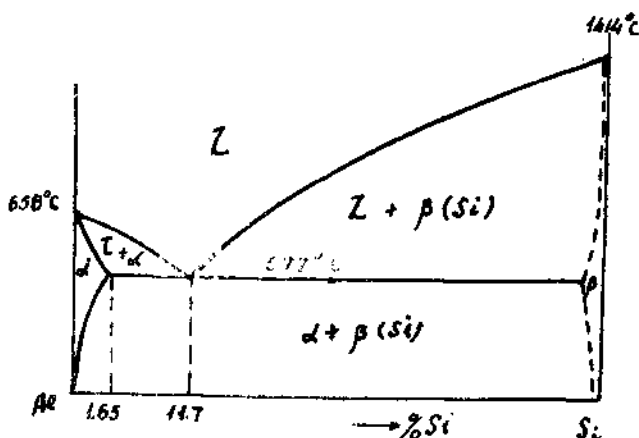


圖 7 Al—Si 平衡圖

實際上，鋁矽合金在淬火時得到的矽在鋁的過飽和固溶體中可在以後加熱（回火）時分解。在過飽和固溶體的分解過程中可呈現若干合金的強化作用，但其效用太小，因而沒有工業上的價值。

如圖中看到的，矽在鋁中只是極小的分量存於 α 固溶體中，多餘的矽呈 β 固溶體狀析出，這種固溶體，按其化學成份來看很接近於矽。如矽在鋁中多於 1.65% 則它進入共晶成份中；而在含量大於 11.7% 時，則呈一次結晶狀存於合金中。

鐵和矽的影響：鋁中同時存有鐵和矽時要呈現新相——三元化合物或三元固溶體。應指出，此類新相的性質還沒有十分完全的研究出來，同樣，它們的數目也還沒有十分的確定。

但是，如鋁中的矽比鐵多些，則生成化合物 FeSiAl_5 ，有時它被稱為

β -相。此時所有的鐵均進到化合物里去：一部分地進入此种化合物中；剩下的鐵則呈自由的状态存于合金中。 β -相為針狀並有很大的脆性；它是極有害的，因為其針狀生成物穿過鋁的固溶體（ α ）晶粒，甚至在很小应力時它就構成剪断面。化合物 FeSiAl_3 （ β -相），為亮咖啡色。

圖 8 中示出了含 4% Si 和 2% Fe 的 Al-Si-Fe 三元合金顯微組織。在固溶體的基底上看到有 β 針狀體（白色）， α 析出物（呈中國字形）及與 β 針狀體一塊的硬的晶粒（黑色）。



圖 8 含 4% Si 和 2% Fe 的 Al-Si-Fe 合金。
合金的組織 $\times 100$

化合物 $\text{Al}_x\text{Fe}_y\text{Si}_z$ 為很脆的相，成奇妙的花紋狀分佈着，好象是（雖然還很遠）中國字的筆劃（中國字，）。

圖 9 中示出 Al-Fe-Si 平衡圖形的一角。

從此圖中看到，依照 Fe 和 Si 的比例，在合金組織中可能為這種或那種在顯微分析時可看到的相。

圖 10 中示出含 2% Si 及 2% Fe 的鋁合金顯微組織，在鉄及矽在鋁中的固溶體基底上看到有針狀化合物 FeAl_3 及呈中國字筆劃狀的 α 析出物。

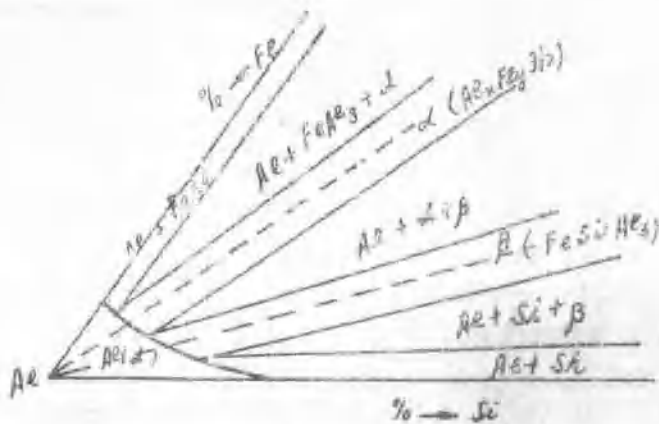


圖 9 Al-Fe-Si 平衡圖的一角

所有上面指出的相， FeAl_3 、Si、 α 及 β 在沒有腐蝕的試片上均能看出，並可按照顏色和對腐蝕的關係而彼此區別開來。

自由體放于顯微鏡下分析時遠較其他各相為黑些；而三元化合物則為最亮。在工業用鋁中鐵和矽的比例應能保證使它們結合于三元相中。

當鋁中的雜質量不足時。在其組織中要出現骨骼狀共晶体 [$\alpha(\text{Al}) + \alpha(\text{Al}_x\text{Fe}_3\text{Si}_2)$]。此種共晶体按其在全合金中分佈的形狀好象是中國字（筆划）。

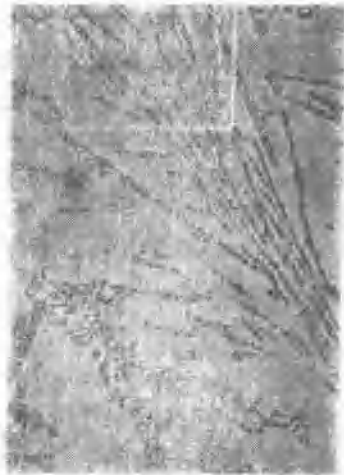


圖 10 含 2% Si 和 2% Fe 的 Al-Si-Fe 合金的組織 $\times 100$

我們已經覺察到在鋁中有雜質存在時遇到的相均有高的硬度、高的脆性，並要損壞鋁的塑性。

要消除雜質的片狀和針狀組織，就得于 500°C 時使用鍛打和以後長時間的退火，此種加工的結果使得這些針狀体和片狀体發生壓碎以及