

航空高等院校教材

三元合金相图及其应用

胡德林 编



航空专业教材编审组

内 容 简 介

本书比较详细地介绍基本三元合金相图的立体图及其分解图,讨论了液相面、固相面和溶解度曲面的空间特征及其投影图;还讨论了等温截面与垂直截面的制作及应用,并对典型合金结晶过程中相平衡、相成分及相对量的变化规律进行了详细分析。书中收集了目前国外一些常用的实际三元合金相图,安排有一半篇幅对生产中常用的合金进行综合分析。

本书可作为高等院校金属材料和热加工类专业学生教材及有关院校教师、工厂与研究所科技人员参考书。

主审稿人 任怀亮

责任编辑 于兴旺

三元合金相图及其应用

胡德林 编

*

西北工业大学印刷厂印装 内部发行

*

787×1092 1/16 印张 10 1/4 253 千字

1982年9月 第一版 1982年9月 第一次印刷 印数 0001-2000 册

统一书号: 18132 j 定价 1.07 元

前 言

本教材是根据航空金属材料及其工艺的特点，弥补目前已经出版的几本金属学原理教材中三元相图部分之不足而编写的。

科学研究和生产实践中应用的合金，多数为三元或多元合金。例如：铸铁为 Fe-C-P 系和 Fe-C-Si 系合金；高合金钢中的不锈钢与模具钢为 Fe-Cr-C 系、高速钢为 Fe-W-Cr-C 系；铝合金中的硬铝为 Al-Cu-Mg 系、硅铝明为 Al-Si-Mg 系合金；钛合金中的 TC4 为 Ti-Al-V 系合金；以及低熔点合金中的 Pb-Sn-Bi 系等。因此，掌握三元合金相图，对于研究与分析实际三元合金是十分重要的。

三元合金相图与二元合金相图都是研究合金的成分、相组成与温度的变化关系，也是正确认识合金组织与性能的基础，同时又是制定与分析各种热加工——锻、铸、焊及热处理工艺的重要依据。不过，三元合金相图的成分不是用平衡线表示，而是用平衡面表示，温度是用空间坐标表示。因此，三元相图不是一个平面图形，而是以等边三角形为底的三棱柱立体图形。

实际三元合金相图非常复杂，但它们都是由几种基本类型的相图组合而成。因此，研究三元合金相图，首先要建立各种基本图形的空间及其投影概念，特别是一些特殊面，如液相面、固相面、溶解度面以及它们的投影图。其次，熟悉立体图中某些截面，如等温截面与垂直截面的应用。最后，必须初步学会分析与运用实际三元合金相图的能力。

编者收集了国外目前一些常用的实际三元相图，并结合自己多年的教学实践，在教材中尽可能保持相图的完整性与正确性，努力做到理论联系实际，安排约一半篇幅是实际三元合金相图的应用，对具体合金进行综合分析，深入浅出，便于自学。每章末都有习题，以便培养运用基本理论去分析与解决实际问题的能力。

本书可作为高等院校金属材料科学与工程以及热加工类专业的教材，也可供有关科技人员自学与参考。

本教材由北京钢铁学院任怀亮付教授审阅。在编写过程中得到了西北工业大学何明付教授的热情帮助；王和序、何仁钦、支福相同志协助绘图、抄写等工作，在此一并表示谢意。

由于编者水平有限，时间仓促，错误一定不少，殷切希望读者提出宝贵意见。

编 者

于西北工业大学

目 录

前 言

第一章 三元合金相图的几何原理.....	1
§ 1—1 三元合金成分表示法.....	1
§ 1—2 三元合金相图中的直线定律与重心定律.....	3
第二章 三元无限互溶型相图.....	7
§ 2—1 立体图及其投影.....	7
§ 2—2 三元固溶体合金的凝固过程.....	7
§ 2—3 等温截面与等温线.....	9
§ 2—4 垂直截面.....	14
第三章 三元简单共晶型相图.....	16
§ 3—1 立体图及其投影.....	16
§ 3—2 典型合金的凝固过程.....	20
§ 3—3 等温截面及其截取方法.....	24
§ 3—4 垂直截面及其制作方法.....	28
第四章 三元复杂共晶型相图.....	31
§ 4—1 立体图及其投影.....	31
§ 4—2 典型合金的结晶过程及其组织.....	38
§ 4—3 等温截面及其应用.....	43
§ 4—4 垂直截面及其制作.....	45
第五章 三元包共晶型相图.....	47
§ 5—1 立体图及其投影.....	47
§ 5—2 典型合金的结晶过程及其组织.....	57
§ 5—3 等温截面与垂直截面.....	62
§ 5—4 具有三元包共晶转变的其它图型.....	63
§ 5—5 具有四相平衡包晶转变的三元相图.....	65
第六章 其它类型的三元相图.....	67
§ 6—1 具有化合物的三元相图.....	67
§ 6—2 具有固态转变的三元相图.....	69

第七章 三元相图中相平衡规律的讨论.....	73
§ 7—1 两相平衡.....	73
§ 7—2 三相平衡.....	75
§ 7—3 四相平衡.....	80
§ 7—4 三元相图中的相区接触规律.....	85
第八章 铝合金三元相图.....	86
§ 8—1 铝—铜—镁三元相图.....	86
§ 8—2 铝—铜—锰三元相图.....	97
§ 8—3 铝—镁—硅三元相图.....	106
§ 8—4 铝—铁—硅三元相图.....	112
§ 8—5 其它铝合金三元相图.....	120
第九章 铁合金三元相图.....	125
§ 9—1 铁—碳—磷三元相图.....	126
§ 9—2 铁—碳—铬三元相图.....	130
§ 9—3 铁—碳—硅三元相图.....	141
§ 9—4 其它铁合金三元相图.....	143
第十章 其它合金三元相图.....	153
§ 10—1 镁合金三元相图.....	153
§ 10—2 钛合金三元相图.....	155
§ 10—3 铜合金三元相图.....	156
§ 10—4 铅合金三元相图.....	157

第一章 三元合金相图的几何原理

§ 1—1 三元合金成分表示法

二元合金只有两个组元，在二元合金相图上，浓度坐标用一条水平线表示。三元合金中有三个组元，浓度已无法再用一条直线来表示，而需要用一个平面来表示。几何学上等边三角形的某些特点可以用来表示三元合金中三个组元的浓度关系。表示这种关系的图形称为浓度三角形。

在图 1-1 所示的浓度三角形中，任选一点 O ，通过 O 点分别作三条边的平行线 1-1、2-2、3-3。与顶角相对的平行线 1-1 在 AC 边上的截距为 a ，与顶角 B 相对的平行线 3-3 在 AB 边上的截距为 b ，与顶角 C 相对的平行线 2-2 在 BC 上的截距为 c 。这三段截距的和等于三角形 ABC 一边的边长，即

$$a + b + c = AB = BC = AC$$

利用等边三角形的这一特性，表示三个组元之间的浓度关系如下：

1. 等边三角形的三个顶点，分别表示 A 、 B 、 C 三个纯组元；
2. 等边三角形的三条边 AB 、 BC 、 CA ，分别表示 A - B 、 B - A 、 C - A 简单二元合金的浓度坐标。凡是位于三角形边上的合金，都是二元合金；
3. 位于等边三角形内任意一点的合金，都是三元合金。如图 1-1 中的 O 合金，其所含三个组元的浓度分别为 a 、 b 、 c 线段长度。如果设等边三角形的边长为 100%，则各线段长度 a 、 b 、 c 分别代表该合金中组元 A 、 B 、 C 的含量，即 $a\%A$ 、 $b\%B$ 及 $c\%C$ ；

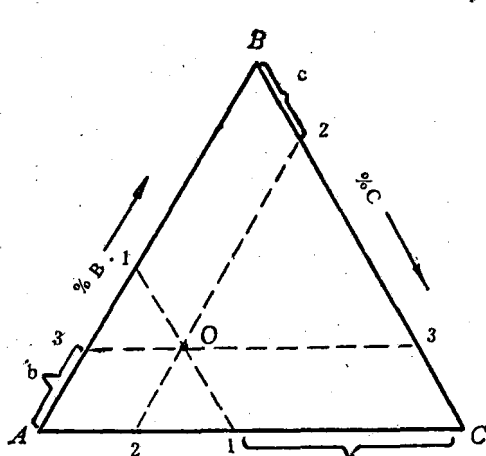


图 1-1 浓度三角形

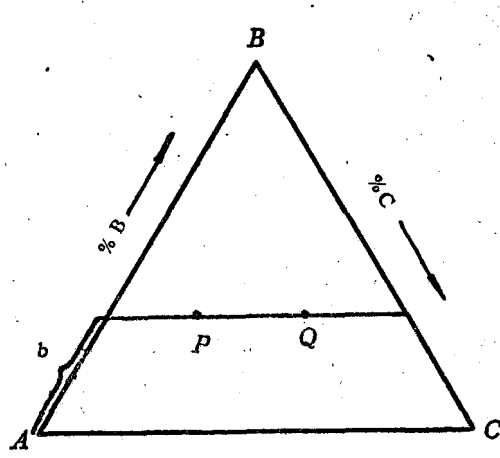


图 1-2 含 B 组元相等的直线

4. 位于平行浓度三角形某一边直线上的所有合金，含其所对角组元的浓度相等。如图 1-2 所示，平行 AC 的直线上的 P 与 Q 合金所含 B 组元的数量相同，即都含有 $b\%B$ 。但是它们所含 A 与 C 组元的数量是不同的；

5. 由浓度三角形的任一顶角向对边作一直线，位于该直线上的所有三元合金，其所含另外两个组元的浓度的比值为一常数。如图 1-3 所示， BD 线上的合金 E 与 F ，其分别含 A 、 C 两个组元的浓度比值保持不变，即

$$\frac{A\%}{C\%} = \frac{Ca_1}{Bc_1} = \frac{Ba'_1}{Bc_1} = \frac{Ba'_2}{Bc_2} = \frac{Ca_2}{Bc_2} = \text{常数}$$

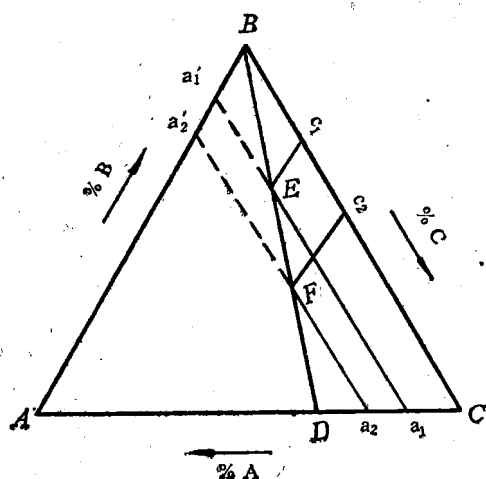


图 1-3 $\frac{A}{C} = \text{常数}$ 的直线

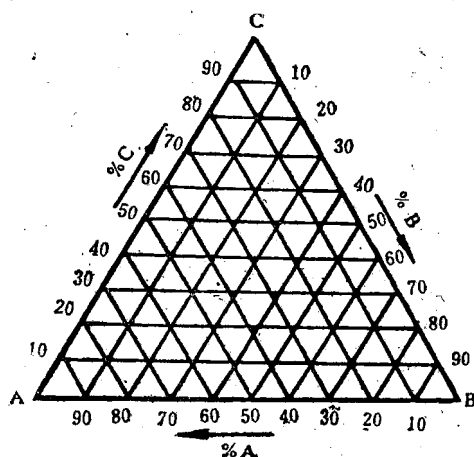


图 1-4 带网格的浓度三角形

实际三元合金相图的浓度三角形都标上网格，如图 1-4 所示，一般均沿着顺时针（有时也用逆时针）一个方向标注组元的浓度。对于工业上某些三元合金，有时以某一组元为基体，其它两个组元含量并不很高，因此常常根据需要，选取一定的范围只研究浓度三角形的一个角，而两个组元的浓度，采用不同方向的标注法，如图 1-5 所示。

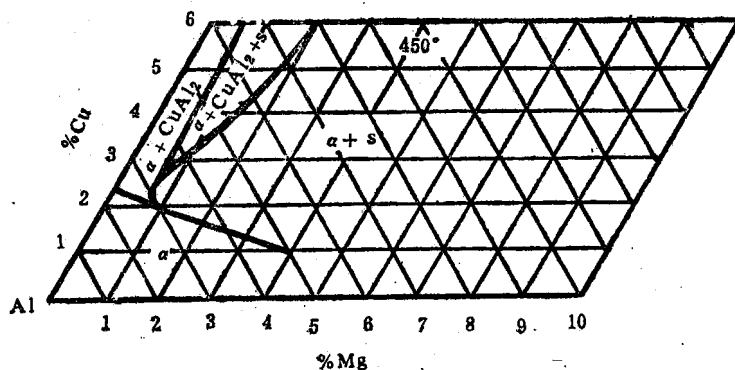


图 1-5 Al-Cu-Mg 相图富 Al 角投影图

三元合金中三组元的浓度关系，除用等边三角形表示外，还可以采用直角坐标法来表示。图 1-6 为直角浓度三角形。直角坐标的原点代表基体组元 A ，纵坐标和横坐标分别表示 B 、 C 组元的浓度。这种直角坐标表示法，绘制方便，但读图与等边三角形法不同，如图 1-6 的 N 点合金，其含 B 量为 1%，含 C 量为 2%，其余为 A 。也就是说不能直接读出 A 的含量。

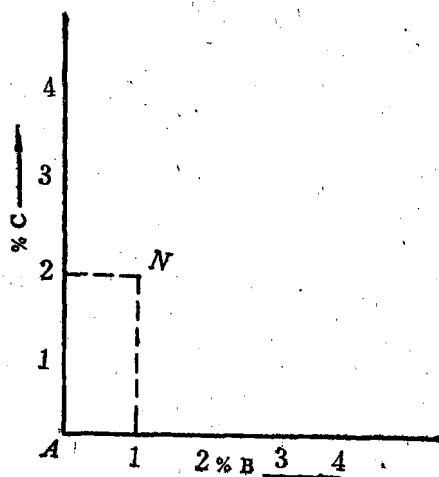


图 1-6 直角浓度三角形

§ 1—2 三元合金相图中的直线定律与重心定律

在研究合金时，一定会遇到熔配合金的问题，若两个或三个已知成分的合金熔配在一起，所得到的新合金的成分是什么？又如在研究合金相变时，由一个相分解为两个或三个平衡相，那么新相和旧相的浓度间有何关系？两个或三个新相的重量各为多少？要解决上述问题，就要用杠杆定律，即直线定律，或用重心定律。

一、直线定律及其应用

如图 1-7 所示，成分为 P 与 Q 的两个三元合金，混合熔化后，得到新的成分为 R 的三元合金，则这个新合金 R 的位置一定在连结线 PQ 上。同时，原始 P 与 Q 合金的重量 w_P 与 w_Q 和截距 RQ 与 PR 呈反比关系，即

$$\frac{RQ}{PR} = \frac{w_P}{w_Q}$$

相反，合金 R 分解为 α 与 β 两个新相，如图 1-8 所示。这两个新相和原合金 R 的浓度点必定在同一条直线上，且 α 与 β 两相的相对重量，与截距 αR 与 βR 呈反比关系。即

$$\frac{w_\alpha}{w_\beta} = \frac{R\beta}{R\alpha}$$

还可以用下列式子求得各相的重量

$$w_\alpha \% = \frac{R\beta}{\alpha\beta} \times 100\%$$

$$w_\beta \% = \frac{R\alpha}{\alpha\beta} \times 100\%$$

这就是三元合金相图中的直线定律。

直线定律可以这样证明：设合金重量为 w_R ， α 相的重量为 w_α ， β 相的重量为 w_β ，则

$$w_\alpha + w_\beta = w_R$$

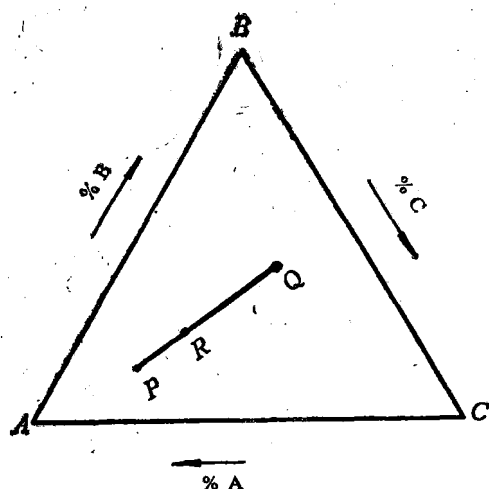


图 1-7 三元相图中直线定律

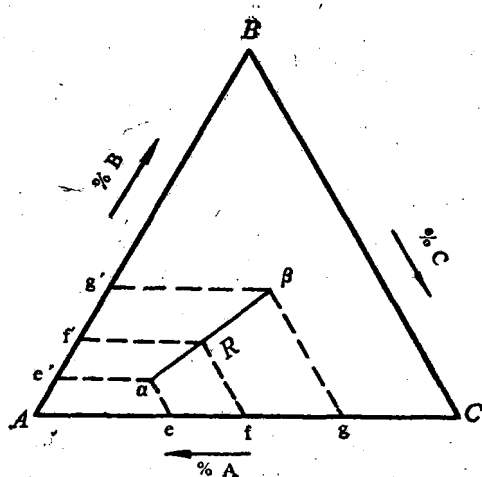


图 1-8 三元相图中直线定律的应用

根据成分表示法可知： α 相中含A组元的百分数可用 ec 线段表示，则 α 相中A组元的重量为 $w_\alpha \cdot ec$ 。同样， β 相中含A组元的百分数可用 gc 线段表示，则 β 相中A组元的重量为 $w_\beta \cdot gc$ 。合金中A组元的百分数可用 fc 线段表示，则合金中A组元的重量为 $w_R \cdot fc$ ， α 与 β 相中含A组元重量之和等于合金中A组元的重量，即

$$w_\alpha \cdot ec + w_\beta \cdot gc = w_R \cdot fc$$

$$w_\alpha \cdot ec + w_\beta \cdot gc = (w_\alpha + w_\beta) \cdot fc$$

$$w_\alpha \cdot (ec - fc) = w_\beta (fc - gc)$$

由图 1-8 可知：

$$ec - fc = ef, \quad fc - gc = fg$$

$$\frac{w_\alpha}{w_\beta} = \frac{fg}{ef}$$

同样可证明

$$\frac{w_\alpha}{w_\beta} = \frac{f'g'}{e'f'}$$

从图 1-8 所示的几何关系可见，R点必定在 $\alpha\beta$ 直线上，同时可求得下列关系

$$\frac{fg}{ef} = \frac{f'g'}{e'f'} = \frac{\beta R}{\alpha R}$$

因此得出：

$$\frac{w_\alpha}{w_\beta} = \frac{\beta R}{\alpha R}$$

这就是我们要证明的直线定律。

从直线定律可以推出如下定则：

1. 由两个不同成分的合金熔合成一个新合金时，则这三个合金的成分点落在一条直线上；
2. 一定成分的合金结晶后形成一个两相合金时，则这两个相的平衡浓度点与该合金的成分点都处于同一条直线上；
3. 在一定成分的合金凝固过程中，知道由液相析出的固相浓度，就可以确定液相的浓

度。相反，知道剩余液相的浓度，就可以确定固相的浓度；

4. 由一个相内析出另一个新相时，则这个新相与析出前后旧相的浓度均在同一条直线上。

二、重心定律

当三个不同成分的合金熔配在一起，或是一个相完全分解成三个新相或是一个相在分解成两个新相的过程时，要找它们之间的成分和相对重量的关系，就要用重心定律。

在三元合金相图中，如由 R 相分解为 α 、 β 、 γ 三个相，则 R 相的浓度点必定位于 $\triangle\alpha\beta\gamma$ 重心（是三相重量重心，不是三角形几何重心）位置上，而且 R 相重量与 α 、 β 、 γ 三个相的重量有如下关系（如图 1-9 所示）

$$w_R \cdot Rd = w_\alpha \cdot ad$$

$$w_R \cdot Re = w_\beta \cdot be$$

$$w_R \cdot Rf = w_\gamma \cdot \gamma f$$

这就是重心定律。

根据上式可以求得各相的重量百分数，即

$$w_\alpha \% = \frac{Rd}{ad} \times 100\%$$

$$w_\beta \% = \frac{Re}{be} \times 100\%$$

$$w_\gamma \% = \frac{Rf}{\gamma f} \times 100\%$$

重心定律可以由下述方法证明：设 β 与 γ 两相混合后， α 相的成分点一定落在直线 $\beta\gamma$ 上。

$$w_\beta \cdot \beta d = w_\gamma \cdot \gamma d$$

其中 d 点就是 $\beta\gamma$ 的重心。又因为 R 相是由 α 、 β 、 γ 三个相组成，因此可以理解为 R 相是由 α 相与 β 、 γ 两相的混合相 d 所组成。根据直线定律 aRd 必定在一条直线上，而且 $w_R \cdot Ra = w_\alpha \cdot ad$ ， R 为 ad 线段的重心。同理可以证明 $w_R \cdot Re = w_\beta \cdot be$ ， R 为 be 线段的重心，得 $w_R \cdot Rf = w_\gamma \cdot \gamma f$ ， R 为 γf 线段的重心。因此， R 为三角形 $\alpha\beta\gamma$ 的重量重心。

除了用几何作图法计算三个平衡相的相对量外，还可以直接用代数法计算。合金 R 以及三个相 α 、 β 、 γ 的成分为：

R 合金中 A 、 B 、 C 组元的浓度分别为 R_A 、 R_B 、 R_C ；

α 相中 A 、 B 、 C 组元的浓度分别为 α_A 、 α_B 、 α_C ；

β 相中 A 、 B 、 C 组元的浓度分别为 β_A 、 β_B 、 β_C ；

γ 相中 A 、 B 、 C 组元的浓度分别为 γ_A 、 γ_B 、 γ_C 。

设 R 合金的量为 1，各相的相对量为 $\alpha\%$ 、 $\beta\%$ 、 $\gamma\%$ ，并且 $\alpha\% + \beta\% + \gamma\% = 1$ 。根据各相中某一组元的量之和应等于合金中这一组元的量，即

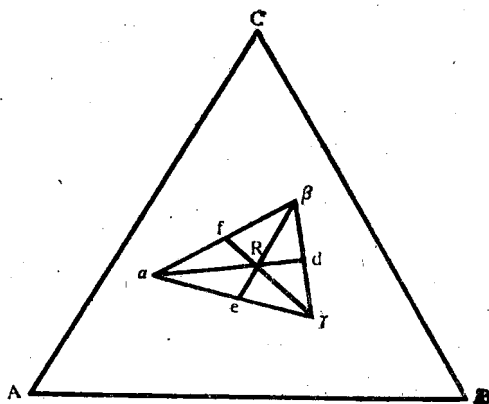


图 1-9 重心定律应用

$$\begin{cases} \alpha_A \cdot \alpha\% + \beta_A \cdot \beta\% + \gamma_A \cdot \gamma\% = R_A \\ \alpha_B \cdot \alpha\% + \beta_B \cdot \beta\% + \gamma_B \cdot \gamma\% = R_B \\ \alpha_C \cdot \alpha\% + \beta_C \cdot \beta\% + \gamma_C \cdot \gamma\% = R_C \end{cases}$$

解联立方程，得

$$\alpha\% = \frac{\begin{vmatrix} R_A & \beta_A & \gamma_A \\ R_B & \beta_B & \gamma_B \\ R_C & \beta_C & \gamma_C \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \alpha_A & \beta_A & \gamma_A \\ \alpha_B & \beta_B & \gamma_B \\ \alpha_C & \beta_C & \gamma_C \end{vmatrix}} \quad \beta\% = \frac{\begin{vmatrix} \alpha_A & R_A & \gamma_A \\ \alpha_B & R_B & \gamma_B \\ \alpha_C & R_C & \gamma_C \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \alpha_A & \beta_A & \gamma_A \\ \alpha_B & \beta_B & \gamma_B \\ \alpha_C & \beta_C & \gamma_C \end{vmatrix}} \quad \gamma\% = \frac{\begin{vmatrix} \alpha_A & \beta_A & R_A \\ \alpha_B & \beta_B & R_B \\ \alpha_C & \beta_C & R_C \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \alpha_A & \beta_A & \gamma_A \\ \alpha_B & \beta_B & \gamma_B \\ \alpha_C & \beta_C & \gamma_C \end{vmatrix}}$$

习 题

1. 在 $A-B-C$ 三元相图浓度三角形中，标出合金 (a) 75% A 、15% B 、10% C 与合金 (b) 50% A 、30% B 、20% C 的位置。
2. 在 $A-B-C$ 三元相图浓度三角形中，指出合金 (a) $B/C = 1/3$ 与合金 (b) $A\% = 60\%$ 的位置。
3. 将成分为题 1 中 (a) 的三元合金 50 公斤，与成分为题 1 中 (b) 的三元合金 20 公斤，熔化在一起形成一个新合金，试用作图法求出此合金的成分点。
4. 欲配制 $Al-Cu-Mn$ 三元合金，采用 $Al-50\%Cu$ 的中间合金 10 公斤， $Al-10\%Mn$ 的中间合金 10 公斤，加纯铝 80 公斤。试用作图法求出所配合金的成分点，并用重心定律验算。
5. 某合金的成分为 94% A ，4.2% B ，1.8% C ，在凝固至某温度时处于 $R-P-Q$ 三相平衡，三相的成分点各为 99.3% A 、0.4% B 、0.3% C ；48% A ，52% B ，0% C ；38% A ，44.8% B ，17.2% C ，试用代数法求出各相的相对量。

第二章 三元无限互溶型相图

三元合金相图中，如果任意两个组元在液态与固态都可以无限互溶，那么它们所组成的三元合金也可以形成无限互溶固溶体。这种无限互溶型的三元相图简称三元匀晶相图。

§2-1 立体图及其投影

图 2-1 为三元匀晶相图的立体图。图中三角形 ABC 为浓度三角形，表示出合金的成分；三角形 ABC 的顶角 A 、 B 、 C 上的垂直线表示温度坐标。三元合金相图一般是用热分析方法测出来的，即在浓度三角形中，选择一系列不同成分的三元合金，测出它们的冷却曲线，求得它们不同的凝固开始温度和凝固终了温度，然后连接各合金的凝固开始温度，所得的曲面称为液相面，如图 2-1 中凸面 $A_1B_1C_1d_L$ ，而连接凝固终了温度所得的曲面称为固相面，如图中的凹面 $A_1B_1C_1d_S$ 。

液相面以上的区域为单相液体，固相面以下的区域为单相 α 固溶体，液相面与固相面之间的区域为液相与固相两相混合区。

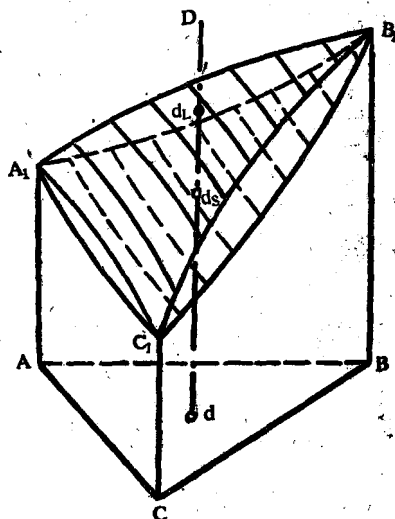


图 2-1 三元匀晶相图立体图

从立体图上可以看出，三个侧面是由三个二元匀晶相图所组成，液相面的边缘就是三个二元合金相图的液相线，固相面的边缘就是三个二元合金相图的固相线。液相面和固相面在浓度三角形上的投影是一样的，都是三角形 ABC 。

§2-2 三元固溶体合金的凝固过程

三元固溶体合金与二元固溶体合金的凝固过程很相似，只是液相与固相的浓度随温度而变化的规律不同。图 2-2 中为 D 合金的凝固过程，当温度降至 t_1 点时开始凝固，由液体中凝固出固溶体 α ，继续降低温度，由液体中不断凝固出固溶体 α ，直至温度 t_2 时凝固完毕。图 2-3 为合金 D 的冷却曲线。

合金 D 的凝固过程中，液相与固相平衡浓度及相对重量有如下的变化规律：当温度降至 t_1 时，由液相内凝固出来的固溶体 α ，其浓度为固相面上的 E 点以 α_E 表示，此时两相平衡关系为 $L_{t_1} \rightleftharpoons \alpha_E$ ；继续凝固，液相的浓度沿着液相面上的空间曲线 $t_1 \rightarrow M \rightarrow N$ 变化，而固溶体 α 的浓度沿着固相面上的空间曲线 $E \rightarrow F \rightarrow t_2$ 变化，并于不同的温度下，具有不同的两

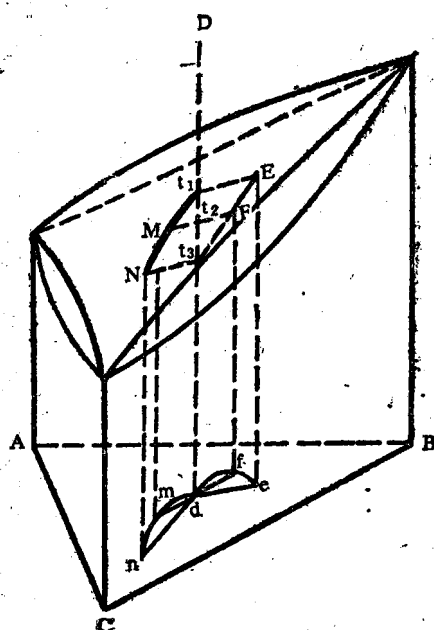


图 2-2 三元固溶体合金 D 的凝固过程

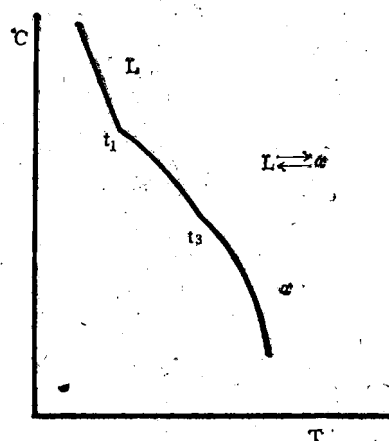


图 2-3 三元固溶体合金的冷却曲线

相平衡关系，如 t_2 时为 $L_M \rightleftharpoons a_F$ ， t_3 时为 $L_N \rightleftharpoons a_{t_3}$ 。当温度降至 t_3 时，固溶体 a 的浓度和原合金的成分完全相同。根据直线定律，不同温度下的两个平衡相的连接线必定通过原合金的成分点。因此，随着凝固温度的降低，两相平衡线以合金成分轴线为中心而旋转，旋转线两端的轨迹为液相浓度的变化线 $t_1 \rightarrow M \rightarrow N$ ，及固相浓度的变化线 $E \rightarrow F \rightarrow t_3$ 。这两条线都是空间曲线，都不处在同一个垂直平面上，在浓度三角形上的投影分别为 $d \rightarrow m \rightarrow n$ 和 $e \rightarrow f \rightarrow d$ 。这两条曲线的平衡关系的投影图形很象一个蝴蝶，所以称为蝴蝶形变化规律，如图 2-4 所示。

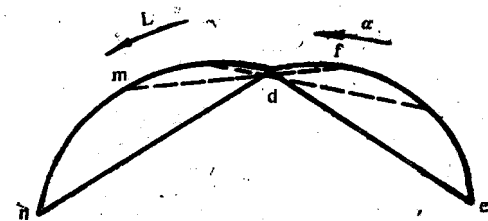


图 2-4 三元固溶体合金的蝴蝶形浓度变化规律

在凝固过程中，任何温度下都可以用直线定律求得平衡两相的重量。例如，合金 D 于温度 t_2 时，液相 L 和固相 a 体的相对重量为

$$L_{t_2} \% = \frac{t_2 F}{M F} \times 100 \%$$

或

$$L_{t_2} \% = \frac{d f}{m f} \times 100 \%$$

而

$$a_{t_2} \% = \frac{t_2 M}{M F} \times 100 \%$$

或

$$a_{t_2} \% = \frac{d m}{m f} \times 100 \%$$

§ 2—3 等温截面与等温线

实际三元相图的立体图形相当复杂，直接应用它来研究不同温度下的相平衡关系是非常困难的，而采用等温截面图，既方便又精确。

等温截面图就是以一定温度所做的平面，与三元相图立体图相截，所截得的平面在浓度三角形上的投影，如图 2-5 所示。等温截面上的 ab 线为截面与液相面相交的曲线 a_1b_1 的投影，称为液相面等温线，而 cd 线为截面与固相面相交的曲线 c_1d_1 的投影，称为固相面等温线。在液相面等温线一边的相区为单相液体 L 区；在固相面等温线的另一边的相区为单相固溶体 α 区；位于液相与固相面等温线之间的相区为两相区，即液相 L 与固相 α 同时并存 ($\alpha + L$)。

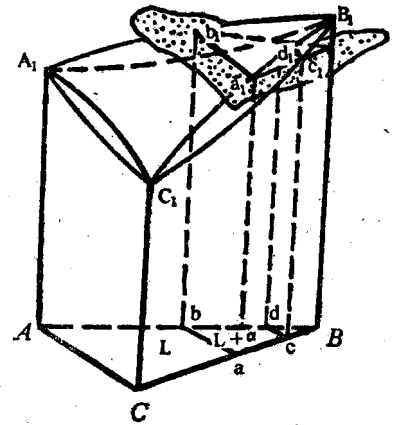
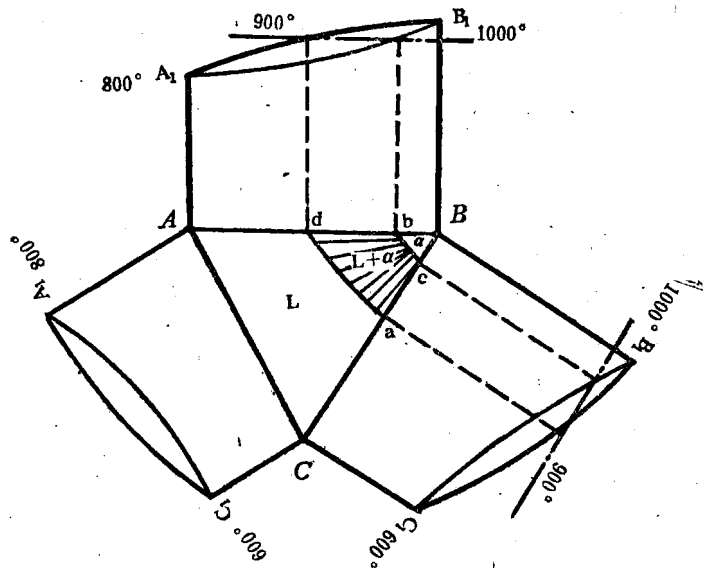
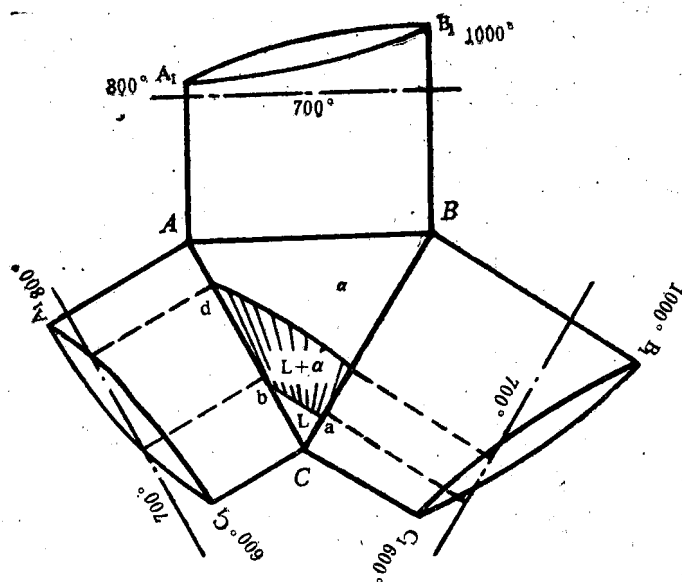


图 2-5 三元匀晶相图的等温截面

不同的温度有不同的等温截面图，其液相与固相面等温线的位置也各不相同。图 2-6 为三组元 A 、 B 、 C (熔点分别为 800°C 、 1000°C 、 600°C) 相图的展开图。图 (a) 为 900°C 等温截面，图 (b) 为 700°C 等温截面。从图中可以看出，当温度降低时，固相 α 区增大，液相 L 区缩小，($\alpha + L$) 两相平衡区移向液相区一方。



(a) 900°C 时的等温截面



(b) 700°C时的等温截面

图 2-6 三元匀晶相图的展开图与等温截面

在等温截面的两相区内，只要合金的成分一定，液相 L 和固相 α 的浓度与相对重量就可以用直线定律来确定。如图 2-7 中的合金 x 与合金 y ，在温度 t 时，合金 x 中浓度为 m 的液相 L 与浓度为 n 的固相 α 两相平衡；合金 y 中浓度为 g 的液相与浓度为 f 的固相 α 两相平衡。两相的相对重量比：

x 合金为

$$\frac{w_L}{w_\alpha} = \frac{xn}{xm}$$

y 合金为

$$\frac{w_L}{w_\alpha} = \frac{yf}{yg}$$

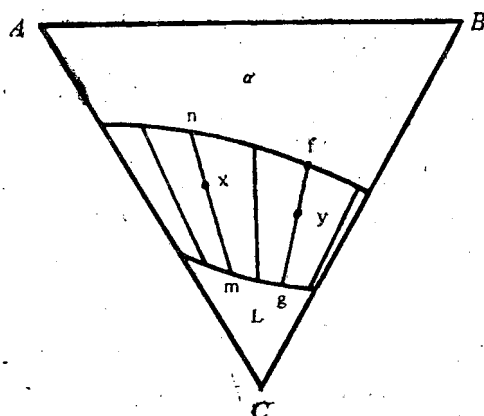


图 2-7 等温截面上两相区直线定律的应用

根据相律，三元合金两相平衡时，有两个自由度。当温度一定时，去掉一个自由度，只剩下一个自由度。这就是说只有一个相的浓度可以独立改变，而另一个相的浓度必然随之而变。因此，在等温截面的两相区内，将已知液相的浓度为 m ，则固相的浓度一定在 mx 的延长线上，并与固相线相交于 n 点，则 L_m 与 α_n 两相平衡， mn 就是二个平衡相的连接线，称为平衡共轭线，简称平衡线。同理， y 合金的平衡线为 gf ，其它还有一系列平衡线如图 2-7 所示。

应该指出，平衡线两终点的位置是根据实验确定的，同时还可以用柯氏定律来确定平衡线的位向。在二元匀晶相图中，如图 2-8 所示，组元 A 在 α 相内的浓度为 C_A^α ，则

$$C_A^\alpha > C_A^L$$

已知

$$C_A^a + C_B^a = C_A^L + C_B^L$$

将上述两式相除得

$$\frac{C_A^a}{C_A^a + C_B^a} > \frac{C_A^L}{C_A^L + C_B^L}$$

不等式两边分母分别减以 C_A^a 与 C_A^L ，仍得不等式

$$\frac{C_A^a}{C_A^a + C_B^a - C_A^a} > \frac{C_A^L}{C_A^L + C_B^L - C_A^L}$$

即为

$$\frac{C_A^a}{C_B^a} > \frac{C_A^L}{C_B^L}$$

该式就是 柯氏定律。即在固溶体内含高熔点组元和低熔点组元的浓度之比，大于在液相内这两者之比。

在三元匀晶相图中，三组元的熔点为 $t_A > t_B > t_C$ ，在等温截面的温度低于 t_A ，而高于 t_B 时，如图 2-9 所示，其中 α 相内含组元 B 与 C 的浓度比为

$$\frac{C_B^a}{C_C^a} = \frac{s'C}{s'B}$$

液相内含组元 B 与 C 的浓度比为

$$\frac{C_B^L}{C_C^L} = \frac{l'C}{l'B}$$

根据柯氏定律，

$$\frac{C_B^a}{C_C^a} > \frac{C_B^L}{C_C^L}$$

则

$$\frac{s'C}{s'B} > \frac{l'C}{l'B}$$

同理，也可以求得如下的相应关系：

$$\frac{C_A^a}{C_B^a} > \frac{C_A^L}{C_B^L} \text{ 及 } \frac{C_A^a}{C_C^a} > \frac{C_A^L}{C_C^L}$$

因此，平衡线 sl 与 An' 之间必定有一定的角度 φ 存在，如果角 φ 为零（即 sl 与 An' 重合）或为负值（即 sl 绕过 An' ），就不符合柯氏定律了。

应用等温截面，不仅可以确定两相区内相平衡关系，而且也可以确定合金的开始凝固温度及凝固终了温度。图 2-10 为合金 x 平衡冷却，自 t_1 至 t_4 温度的等温截面。从图中看出，合金 x 于 t_1 温度开始凝固，而于 t_4 温度凝固终了。

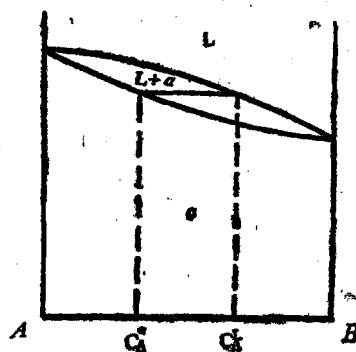


图 -8 二元相图中柯氏定律的应用

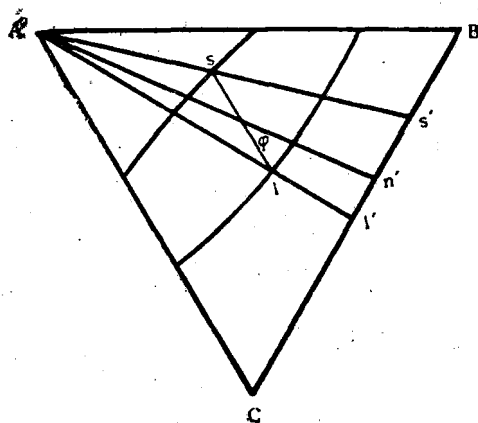


图 2-9 三元相图中柯氏定律的应用

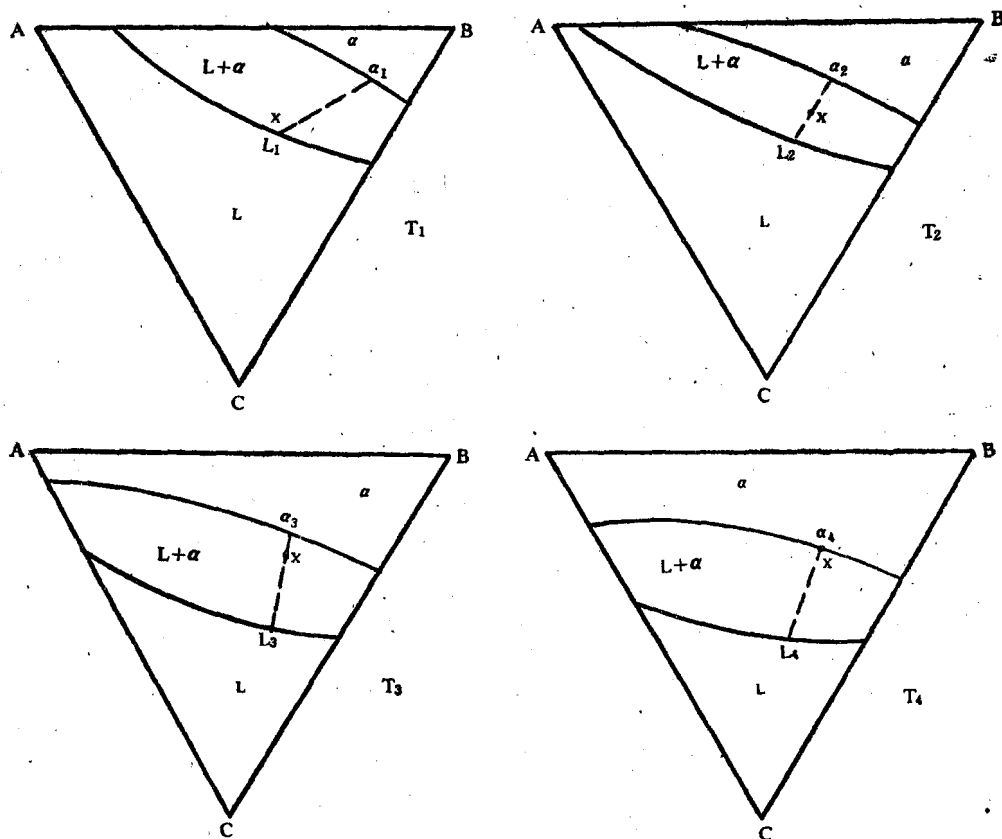


图 2-10 x 合金平衡冷却时的等温截面

应该指出，在不平衡冷却时，由于液相与固相内原子扩散来不及进行完全，三元固溶体合金也产生晶内偏析。同时，凝固终了温度降得更低。如图 2-11 所示，图中实线表示 L 相与 α 相的相界平衡关系，虚线表示两相平均浓度的变化。图 2-12 为图 2-11 中各温度下， L 相与 α 相浓度连线的投影。

为了简化，可以将一系列等温截面上的液相线与固相线，都投影在浓度三角形上，这样，就可以得到液相等温线图与固相等温线图，如图 2-13 所示。在图上可以直接找到一定合金的凝固开始温度与终了温度，如图中合金的凝固开始温度约 980°C ，而凝固终了温度约 975°C 。