

984783

高等学校教材

# 三元合金相图

胡德林 张帆 编著



1.74

西北工业大学出版社

高等学校教材

# 三元合金相图

胡德林 张帆 编著

西北工业大学出版社

1995年11月 西安

(陕)新登字009号

本书详细地介绍基本类型三元相图的立体图及其分解图,讨论了液相面、固相面及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显微组织、相成分及相对量的变化规律进行了详细分析。

本书有一半篇幅收集了目前国内外一些常用的铁合金系、铝合金系、镁合金系、钛合金系、铜合金系及低熔点合金系等实际三元合金相图,同时收集了金属基复合材料与陶瓷材料等新型材料氧化物系三元相图,并对其典型牌号材料进行了综合分析。

本书可作为高等学校金属材料及热加工专业学生的教材,也可供有关学校教师、科研单位研究人员及工厂企业科技人员自学或参考。

高等学校教材  
三元合金相图

胡德林 张帆 编著

责任编辑 刘红

责任校对 杨长照

\*

© 1995 西北工业大学出版社出版发行  
(710072 西安市友谊西路 127 号 电话 4253407)

陕西省新华书店经销

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0763-8/TG·31(课)

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12.5 字数: 300 千字  
1995 年 11 月第 1 版 1995 年 11 月第 1 次印刷  
印数: 1—1 500 册 定价: 10.00 元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

# 前 言

科学研究和生产实践中应用的材料,大多数为三种组元或多种组元组成的材料。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-C-Cr系,高速钢为Fe-W-Cr-C系;钛合金中的TC4为Ti-Al-V系;很多硅酸盐材料是由三种氧化物混合组成的。掌握三元相图,对于了解材料的成分,相组成与温度的变化关系;预测材料的组织与性能;进而正确制订各种热加工——铸、锻、焊、烧结及热处理工艺;甚至开发新材料,都具有十分重要的指导意义。因此,编著者根据多年讲授三元相图课程的经验,并参考由胡德林教授编写、航空教材编审组内部出版的《三元合金相图及其应用》一书,重新编著了本书。

本书内容可分为两大部分:前六章着重介绍三元相图的基本概念和理论,包括三元相图基础知识(第一章),二相平衡、三相平衡及四相平衡相图(第二、三及四章),具有化合物或固态相变的相图(第五章),及基本理论的归纳总结(第六章)。后三章及附录主要介绍工业上常用三元系金属材料的相图。如铁系三元合金相图(第七章),铝系三元合金相图(第八章)。为拓宽读者的知识面,特用一章的篇幅(第九章)扼要介绍了几类氧化物体系三元相图,它们是分析许多硅酸盐材料和陶瓷产品的工具。此外,本书在附录中尽量多地列出了常用实际三元系材料的相图,以便读者在实际生产中遇到问题时查阅。

实际三元相图非常复杂,但是它们都是由几种基本类型的相图组合而成。因此,研究三元相图,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应用实际三元相图的能力。本书正是遵循这一循序渐进的过程编写而成的。编著者在书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,深入浅出,便于自学。每章末都附有习题,旨在培养读者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以及热加工类专业的教材(参考学时数为30学时),也可供有关科技人员自学与参考。

本书第二、四、六、七、八章由胡德林教授编著,第一、三、五、九章由张帆副教授编著。全书由西安交通大学教授沈莲审阅。在编著过程中得到了工程师陈彦、杨惠芳的热情帮助,在此一并表示谢意。

由于编者水平有限,错误难免,殷切希望读者提出宝贵意见。

编 著 者

于西北工业大学

1995年6月

# 目 录

第一章 三元相图基础	1
§ 1-1 三元相图表示法	1
§ 1-2 三元相图中的直线定律和重心定律	7
§ 1-3 三元相图的测定	10
§ 1-4 三元系中的相律及相平衡	11
习题	12
第二章 三元系中的两相平衡相图	13
§ 2-1 三元匀晶合金的平衡凝固过程	13
§ 2-2 等温截面的应用	15
§ 2-3 三元匀晶合金的不平衡凝固过程	17
§ 2-4 具有最高点的三元匀晶相图	19
§ 2-5 具有同素异构转变的三元匀晶相图	19
习题	20
第三章 三元系的三相平衡相图	21
§ 3-1 三相平衡共晶型相图	21
§ 3-2 三相平衡包晶型相图	29
§ 3-3 其他三相平衡相图	32
习题	37
第四章 三元系中的四相平衡相图	38
§ 4-1 三元共晶型相图	38
§ 4-2 三元包晶型相图	48
§ 4-3 三元包共晶型相图	56
习题	63
第五章 其他类型的三元相图	64
§ 5-1 具有化合物的三元相图	64
§ 5-2 具有固态转变的三元相图	68
§ 5-3 复杂三元相图	69
习题	75
第六章 三元相图中相平衡规律的讨论	77
§ 6-1 两相平衡规律	77

§ 6-2	三相平衡规律 .....	78
§ 6-3	四相平衡规律 .....	82
§ 6-4	三元相图中的相区接触法则 .....	87
	习题 .....	88
<b>第七章</b>	<b>铝合金三元系相图 .....</b>	<b>90</b>
§ 7-1	铝-铜-镁三元相图 .....	90
§ 7-2	铝-铜-锰三元相图 .....	100
§ 7-3	铝-镁-硅三元相图 .....	110
	习题 .....	116
<b>第八章</b>	<b>铁合金三元系相图 .....</b>	<b>117</b>
§ 8-1	铁-碳-磷三元相图 .....	117
§ 8-2	铁-铬-碳三元相图 .....	122
§ 8-3	铁-碳-硅三元相图 .....	133
	习题 .....	134
<b>第九章</b>	<b>氧化物三元系相图 .....</b>	<b>135</b>
§ 9-1	CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 相图及应用 .....	135
§ 9-2	MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> 相图及应用 .....	140
§ 9-3	其他氧化物系三元相图及应用 .....	142
<b>附录</b>	<b>常用三元合金相图* .....</b>	<b>146</b>
§ 附-1	铁合金系 .....	146
1.	Fe-C-B 系 .....	146
2.	Fe-C-Mn 系 .....	148
3.	Fe-C-Mo 系 .....	149
4.	Fe-C-N 系 .....	150
5.	Fe-C-V 系 .....	152
6.	Fe-C-W 系 .....	153
7.	Fe-Cr-Co 系 .....	154
8.	Fe-Cr-Mo 系 .....	156
9.	Fe-Cr-Ni 系 .....	159
§ 附-2	铝合金系 .....	162
1.	Al-Cr-Fe 系 .....	162
2.	Al-Cr-Mn 系 .....	163
3.	Al-Cr-Si 系 .....	165
4.	Al-Cu-Fe 系 .....	166
5.	Al-Cu-Si 系 .....	167
6.	Al-Cu-Zn 系 .....	169

7. Al - Fe - Mn 系 .....	172
8. Al - Fe - Ni 系 .....	172
9. Al - Fe - Si 系 .....	174
10. Al - Mn - Mg 系 .....	175
11. Al - Mn - Si 系 .....	176
§ 附-3 镁合金系 .....	177
Mg - Al - Zn 系 .....	177
§ 附-4 钛合金系 .....	178
Ti - Sn - V 系 .....	178
§ 附-5 铜合金系 .....	179
1. Cu - Ni - Sn 系 .....	179
2. Cu - Ni - Zn 系 .....	181
3. Cu - Sb - Sn 系 .....	183
4. Cu - Sn - Zn 系 .....	184
§ 附-6 低熔点合金系 .....	185
1. Sn - Bi - Cd 系 .....	185
2. Pb - Bi - Cd 系 .....	185
3. Pb - Sn - Bi 系 .....	186
4. Pb - Sn - Cd 系 .....	186
5. Pb - Sn - Sb 系 .....	187
6. Sn - Sb - Cd 系 .....	189
<b>参考文献</b> .....	<b>192</b>

# 第一章 三元相图基础

## § 1-1 三元相图表示法

对于给定的合金系统,其存在状态取决于外界及内部两大类影响因素(系统变量)。外界变量包括温度、压力、电场、磁场等;内部变量则为组成该系统的各组元的相对量,即合金的成分。在通常情况下,压力维持在正常大气压,电场、磁场等其他外界影响因素或者不存在,或者可以忽略,所以影响合金系统状态的只有温度和成分两类变量。以此两类变量为坐标轴构成的几何图形就是合金系统状态图,简称合金相图,它表示了合金系中合金状态、温度、成分三者之间的关系。对给定的合金系统,若任意给出温度和成分值,必能在该系统相图中找到相应的一点,称为表象点。它反映了给定条件下合金的状态,如有几相存在?都是什么相?各相的成分是多少?各相的相对量又是多少?显然,温度和成分变量之间,任意一个有微小变动,都会使表象点变动,即合金状态改变。

### 一、三元相图成分表示法

对于A、B两组元组成的二元合金,由于 $A\% + B\% = 100\%$ 的限制,独立的成分变量只有一个,故二元相图上合金的成分通常用一条水平轴上的坐标值表示。

对于由A、B、C三组元组成的三元合金,由于 $A\% + B\% + C\% = 100\%$ 的限制,有两个独立的成分变量。因此,三元合金的成分已无法再用一条直线表示,而必须用两个成分坐标构成的二维平面来表示。

#### 1. 直接读出两个组元浓度的成分表示法

在A-B-C三元合金中,以A组元为原点引出两条轴AB和AC,构成一个二维平面,可表示合金的成分,称为成分平面。根据两个轴之间夹角的不同,可以有不同成分平面图形,如图1-1所示。它们的共同特点是,对于在成分平面中任意一点的合金,可立即读出该合金含B和C组元的浓度。如图中x点合金,含B组元为 $b\%$ ,含C组元为 $c\%$ ,但是第三组元A的浓度不能从图中直接得出,必须通过换算,即 $a\%A = 100\% - (b\%B + c\%C)$ 。

若取AB轴和AC轴的长度分别为100%,考虑到 $B\% + C\% \leq 100\%$ 的限制,所以对图1-1(a)和(b),合金的成分点一定落在三角形之内。仔细比较可以发现,图(c)和(d)分别是图(a)和(b)的扩展,因此,合金的成分点是不可能落在BC边之右上方的,即不能落在 $\triangle A'BC$ 区域之内。所以后两种成分平面表示法大多用在以A为主,而B和C量较少的情况下,例如三元合金以A为基,B和C是量较少的合金元素(即AB轴和AC轴只取到10%~20%B和10%~20%C的长度),这时人们更关心的是少量合金元素B和C都对合金状态的影响。因此,直接读出两组元浓度的成分表示法很适合于实际三元相图成分表示,例如,工业上常用的典型铝合金Al-Cu-Mg、Al-Cu-Mn、Al-Mg-Si等,是以Al为基,Cu、Mn、Mg、Si等为合金元素的合金;又如Fe-C-P、Fe-C-Si等铸铁,Fe-Cr-C不锈钢等典型铁合金,则是以Fe为基,C、



P、Si、Cr 等为合金元素或杂质元素的合金。它们的三元相图其成分常用图 1-1(c) 和 (d) 所示的方法来表示。

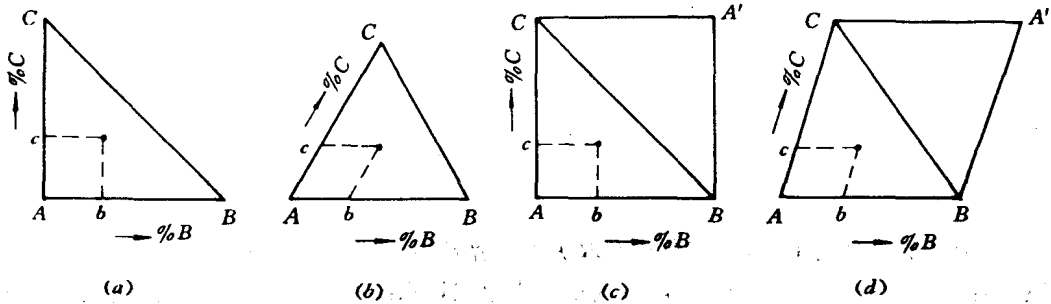


图 1-1 直接读出两组元浓度的成分表示法  
(a) 直角三角形 (b) 斜三角形 (c) 矩形 (d) 梯形

2. 直接读出三组元浓度的成分表示法——等边三角形表示法

取一等边三角形，令其三个顶角分别代表三个纯组元 A、B、C，三条边分别代表三个二元系 AB、BC 和 CA，如图 1-2 所示，则三元系中的任何成分可由三角形内的一点来代表。

等边三角形有两个重要的几何特性，据此，有两种不等的等边三角形成分表示法：

特性一，若从三角形中任意一点 O 画三条垂直于边的垂线，则三条垂线的总长度等于三角形的高，即  $Oa + Ob + Oc = h$ ，如图 1-2(a) 所示。如取  $h$  为 1，则三条垂线的长度  $Oa$ 、 $Ob$ 、 $Oc$  分别等于合金 O 中三组元的成分，即  $Oa\%A$ 、 $Ob\%B$  和  $Oc\%C$ 。这种表示法称为吉布斯三角形。

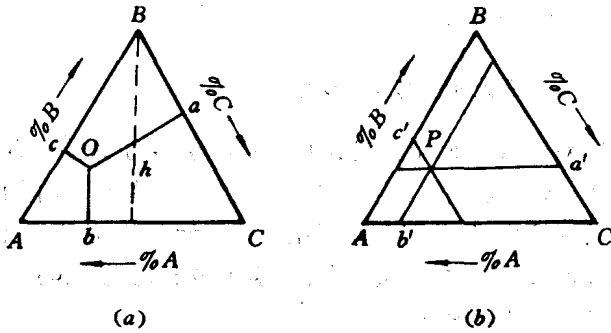


图 1-2 两种浓度等边三角形表示法  
(a) 吉布斯三角形 (b) 鲁斯澎三角形

特性二，若从三角形中任意一点 P 出发，画三条平行于三角形边的平行线  $Pa'$ 、 $Pb'$ 、 $Pc'$ ，则这三条平行线的长度之和等于三角形的边长，即  $Pa' + Pb' + Pc' = AB = AC = BC$ 。如取  $AB = 1$ ，则  $Pa' = A\%$ ， $Pb' = B\%$ ， $Pc' = C\%$ 。这种表示法称为鲁斯澎三角形。它比吉布斯三角形表示法更方便，故今后在不作特别说明时，所谓成分三角形均指鲁斯澎三角形。

现将成分三角形表示法及特性归纳如下：

- (1) 三角形的三个顶点分别表示 A、B、C、三个纯组元。
- (2) 三角形的三条边分别表示 A-B、B-C、C-A 简单二元合金的成分，凡是位于三角形边上的合金均是二元合金。
- (3) 位于三角形内任意一点的合金，都是三元合金。如图 1-3 中的 O 合金，其所含三组元的浓度分别为 a、b、c 线段长度。若设三角形边长为 100%，则线段长度 a、b、c 分别表示该合金中组元 A、B、C 的含量，即  $a\%A$ 、 $b\%B$  及  $c\%C$ 。

(4) 位于平行于三角形某一边的直线上的所有合金含其对角组元的浓度相同。如图 1-4 所示, 平行于 AC 的直线 A'C' 上的 P 与 Q 合金所含 B 组元的量相同, 即都含有 b% B。但它们含 A 与 C 组元的数量是不同的。

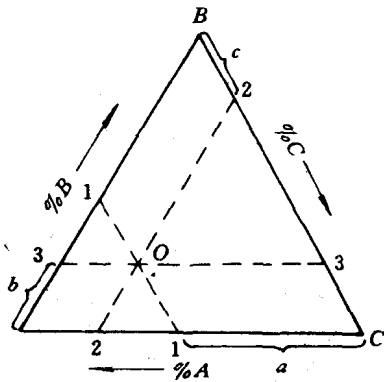


图 1-3 浓度三角形

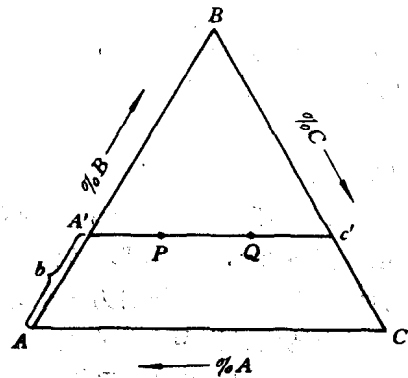


图 1-4 含 B 组元相等的直线

(5) 由三角形任一顶角向其对边引一条直线, 则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 1-5 所示, BD 线上的两个合金 E 与 F, 其分别含 A、C 两个组元的浓度比值相同, 即

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

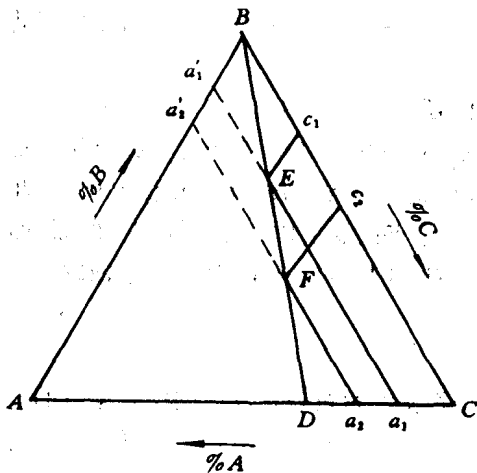


图 1-5  $\frac{A}{C} = \text{常数}$  的直线

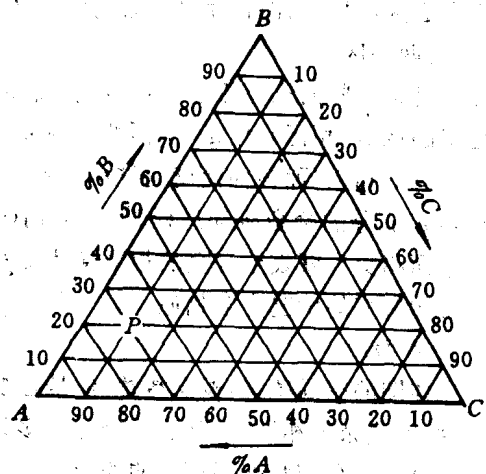


图 1-6 带网格的浓度三角形

实际三元合金相图的成分三角形都标上网格, 以便直接读出合金各组元的含量, 如图 1-6 所示。一般均沿顺时针方向标注组元的浓度, 如图中合金 P 的成分为 70% A、20% B、10% C。

2020/10/06

## 二、三元相图表示法

### 1. 立体图

三元相图与二元相图的差别,在于增加了一个成分变量,从而使相图成为一个三维的立体图形。

最常见的情况是以成分三角形为底面,在其三个顶点向上引三条垂直于成分平面的直线作为温度轴,构成一个外轮廓为正三棱柱体的三元合金相图。由于成分三角形每一条边代表一组相应的二元合金系,所以三棱柱体的三个侧面分别是三组二元相图。在棱柱体内部,则由一系列不同含义的空间曲面分隔出若干个空间相区。

图 1-7 为一种最简单的三元相图的立体图。 $A$ 、 $B$ 、 $C$  三种组元组成的成分三角形和温度轴构成了三棱柱体的框架。 $T_A$ 、 $T_B$ 、 $T_C$  分别为三个纯组元的熔点。由于这三个纯组元两两之间在液态和固态都能完全互溶,所以三个侧面都是简单的二元匀晶相图,而三组元在固态能完全互溶,可形成三元无限固溶体的相图,称为三元匀晶相图。在三元匀晶相图中,有两个不同含义的曲面,将相图分割成三个空间区域。处在上方的曲面称为液相面,它表明不同成分的合金开始凝固的温度,即液相面是由整个系统中所有合金的开始凝固温度集合而成。处在下方的曲面称为固相面,它表明不同成分的合金凝固终了温度,即固相面是由整个系统中所有合金的凝固终了温度集合而成。因此,在三元匀晶相图中,液相面之上必为液相区,固相面之下必为固相区,两个面所夹的空间区域则为液相和固相平衡共存区,称为两相区。

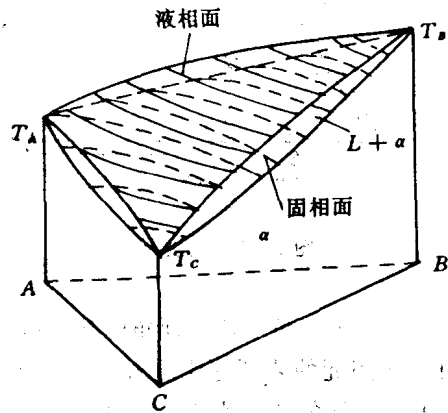


图 1-7 三元匀晶型相图

更复杂一些的三元相图中,除液相面和固相面外,还会存在其他含义的曲面,将空间分割出更多的区域(相区)。但是,下面的一条原则是普遍适用的:由一曲面隔开的两块空间一定是不同状态的相区,而该曲面就是这两种不同状态相互转变的临界温度,也称相变温度。因此在分析给定成分的合金冷却过程时,合金轴(通过给定成分点的温度轴)碰到每一个曲面(即与每一个面相交),就表示合金的相平衡状态发生一次改变。这与在二元相图中,合金轴碰到一曲线表示相转变的情况完全相似。

### 2. 截面图

立体图的空间感强,概念清楚。但是在纸面上用透视画法很难表示立体图中表象点的成分和温度,对复杂的相图(实际三元合金大多如此)要做到这一点就更为困难。为了能准确、清晰地描述合金成分与相变温度间的相应关系,总是力图把相图由空间模型变换成平面图形。

三维的三元合金相图包括三个自变量:两个成分变量,一个温度变量。欲将三维立体图形变成二维平面图形,须设法减少一个变量。一般有两种方法:第一,固定温度,只剩下两个成分变量;第二,固定一个成分,剩下温度和另一个成分变量。前者构成水平截面图;后者构成垂直截面图。

(1) 水平截面:水平截面就是以一定的温度水平面与三元立体图相截所得的平面图形。在

一个水平截面上,整个三元系都处于相同的温度,故常将水平截面称为等温截面。等温截面表示一定温度下合金状态随成分变化的规律。

图 1-8 为三元匀晶相图中以三个不同温度相截的示意图及相应的等温截面。由此可以看出等温截面带有共性的几个特点:

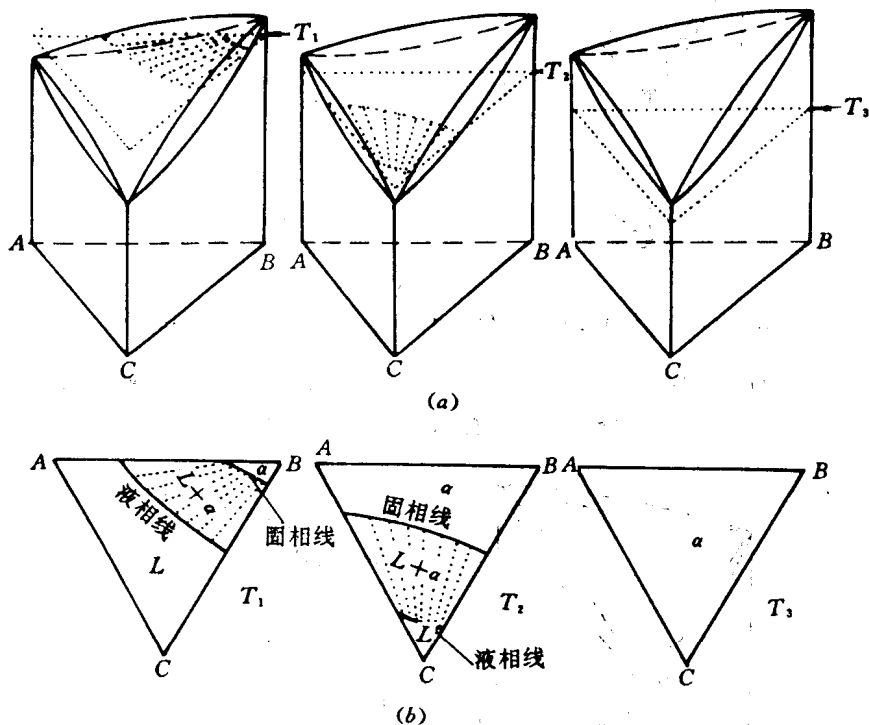


图 1-8 三元匀晶相图的三个等温截面截取位置及平面图形  
(a) 以三个不同温度的水平面与立体图相截 (b) 相应的三个等温截面图

第一,完整的等温截面的外廓应该与成分三角形一致。截面图中的各条曲线,相当于在这个温度所作的水平面与立体图中各曲面相截而得到的截痕(相贯线),它们肯定是水平曲线,故也称作等温线。

第二,与不同含义曲面相截得到的等温线也具有不同的含义。如图 1-8 中与液相面相截得到的等温线称为液相线,与固相面相截得到的称为固相线。因此,等温截面中是由各条曲线将不同相区分隔开。一条曲线的两侧必为不同的相区,而该曲线就表示了给定温度下两种相平衡状态相互转变的临界成分。

第三,等温温度不同,各条曲线的位置均发生变动,导致有的相区扩大,而有的缩小。这取决于立体图中各曲面随温度变化的走向。因此,所有温度的等温截面叠加起来便可恢复整个立体图形。可见,对于一定的三元系合金,给出的等温截面越多、越容易想象出空间模型的轮廓。

(2) 垂直截面:用垂直于成分三角形的竖直面与三元系立体图相截得到一个截面图,把它平摊在纸面上就得到三元相图的某一垂直截面图。通常,垂直截面有两种截取方法:一种是通过三棱柱的某一棱柱而截取的,如图 1-9 所示,因此这个截面的各表象点,其另两个棱柱组元的浓度具有相同的比例;另一种是平行于三角棱柱体的某一棱面而截取的,如图 1-10 所示,因

此这个截面上的各表象点,含该截面所对角的组元的浓度相同。

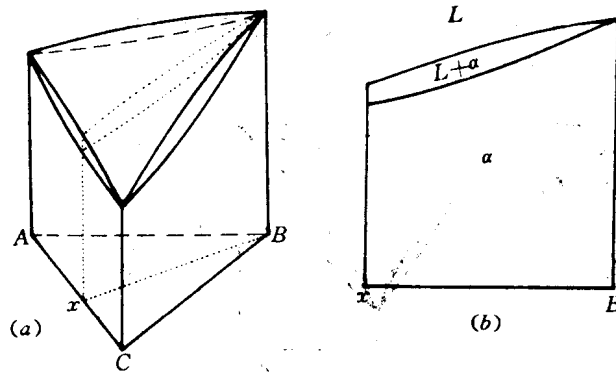


图 1-9 通过某一棱柱的截取方法(a)及相应的垂直截面图(b)

垂直截面图上的曲线也是由截面与立体图中各曲面相截而得到,这些曲线将截面分隔成不同的相区,而曲线表示不同成分合金相平衡状态转变的临界温度。

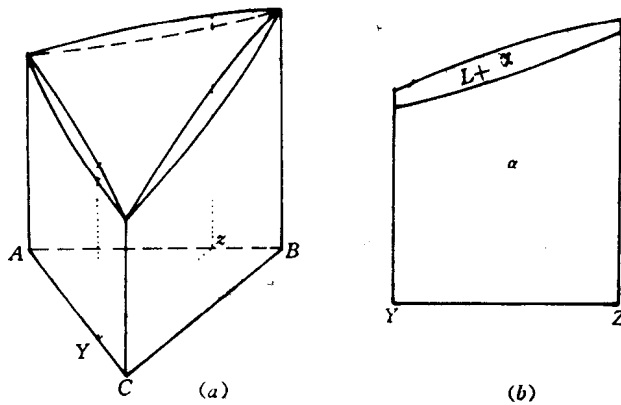


图 1-10 平行于某一棱面的截取方法(a)及相应的垂直截面图(b)

垂直截面图很像(但并不是)二元相图,所以被广泛使用,尤其是在研究给定成分的合金时,只需一个通过该成分点的垂直截面图,便能很方便地分析不同温度下该合金所处的状态及冷却过程中发生的所有转变,这一优点是等温截面图所不具备的。但是,在垂直截面上却不能得出几个平衡相的成分以及各相的相对量。换句话说,不能在垂直截面上应用下一节将要介绍的直线定律和重心定律,这又是它不如等温截面图的一点。

### 3. 投影图

把三元系立体相图中所有相区的交线都垂直投影到成分三角形中,便可得到三元相图的投影图。在对相图空间结构的特点有所了解的基础上,可以利用投影图分析合金加热和冷却过程中的转变。立体图较简单时,曲面相交的线或点较少,投影图也较简单,例如,图 1-7 所示的三元匀晶相图中,液相面和固相面在三棱柱体内无交线,所以它的投影图就是成分三角形。有时把一系列不同温度水平截面中的等温线同时投影到成分三角形中,这样得到的投影图叫等

温线投影图,如图 1-11 所示。实际上它是一系列等温截面的综合。对较复杂的相图,常常把不同含义的等温线分开投影到几个成分三角形上,以便分别讨论。

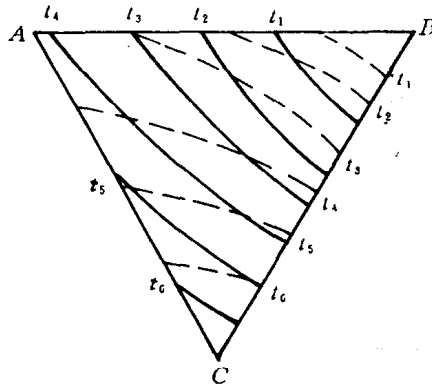


图 1-11 三元匀晶相图的等温线投影图示例

## § 1'-2 三元相图中的直线定律和重心定律

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配在一起,所得到的新合金的成分是多少?又如在研究合金相变时,由一个相转变为一个新相或分解为两个新相,那么新相和旧相的成分间有何关系?新相占合金的重量百分比各为多少?要解决上述问题,就要用直线定律或重心定律。

### 一、直线定律

直线定律可以运用在下列两种情况下:

第一种情况如图 1-12 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,则新合金  $R$  的位置一定处在连结  $P$ 、 $Q$  点的直线上。同时,原始  $P$  与  $Q$  合金的重量  $W_P$  与  $W_Q$  与截距  $RQ$  和  $PR$  呈反比关系,即

$$\frac{W_P}{W_Q} = \frac{RQ}{RP}$$

第二种情况如图 1-13 所示,如果合金  $R$  在某一温度处于  $\alpha + \beta$  两相平衡状态,则合金  $R$  的成分点也必定落在连结两个相成分点的直线上,并且,  $\alpha$  和  $\beta$  两个相的相对重量符合下式

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

而两个相占合金的重量百分比可用下式求出:

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

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

这就是三元合金相图中的直线定律,它与二元相图中应用的杠杆定律相似,故也可称为杠杆定律。

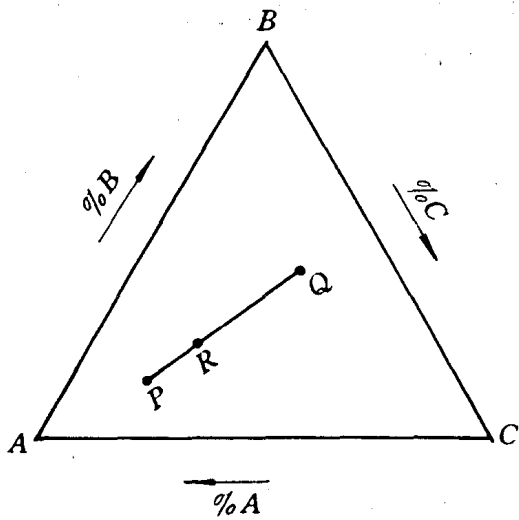


图 1-12 三元相图中直线定律

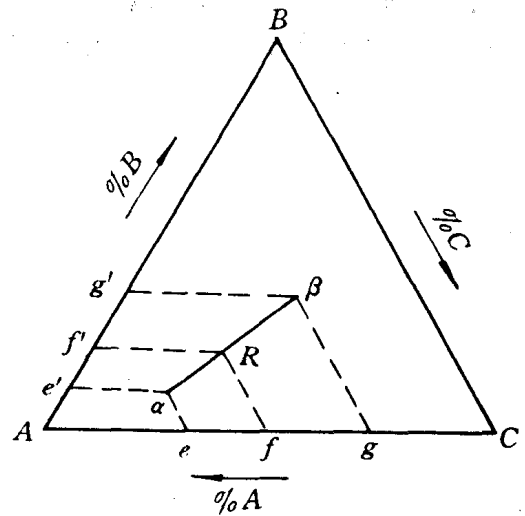


图 1-13 三元相图中直线定律的应用

直线定律证明如下: 设合金重量为  $W_R$ ,  $\alpha$  和  $\beta$  的重量分别为  $w_\alpha$ 、 $w_\beta$ , 则有

$$w_\alpha + w_\beta = W_R$$

根据成分表示法可知(参见图 1-13),  $\alpha$  相中含 A 组元的浓度为  $eC$ , 则  $\alpha$  相中 A 组元的重量为  $w_\alpha \cdot eC$ ; 同样,  $\beta$  相中含 A 组元的浓度为  $gC$ ,  $\beta$  相中 A 组元的重量为  $w_\beta \cdot gC$ ; 合金中 A 组元的浓度为  $fC$ , 合金中 A 组元的重量为  $W_R \cdot fC$ , 根据质量平衡关系,  $\alpha$  与  $\beta$  相中含 A 组元重量之和等于合金中 A 组元的重量, 即

$$w_\alpha \cdot eC + w_\beta \cdot gC = W_R \cdot fC$$

而  $W_R = w_\alpha + w_\beta$ , 故有

$$w_\alpha \cdot eC + w_\beta \cdot gC = (w_\alpha + w_\beta) \cdot fC$$

整理可得

$$w_\alpha(eC - fC) = w_\beta(fC - gC)$$

即

$$\frac{w_\alpha}{w_\beta} = \frac{(fC - gC)}{(eC - fC)}$$

而  $eC - fC = ef$ ,  $fC - gC = fg$ , 故上式变为

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

同理可证:

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

根据相似原理, 有如下关系:

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

因此可得出  $\frac{w_\alpha}{w_\beta} = \frac{R\beta}{Ra}$

对于给定成分的三元合金, 我们主要关心的是该合金在某一温度时的状态及相平衡关系,

这时,直线定律就应用在两相平衡时。无论知道两者之中哪个相的成分,便可利用直线定律求得另一个相的成分,并进而算出这两相的相对重量。

## 二、重心定律

如果一个三元合金  $R$  在某一温度处于  $\alpha + \beta + \gamma$  三相平衡状态,则该合金成分点必定处在这三相成分点组成的三角形的重心,如图 1-14 所示。而且,三个相的重量和合金的重量有如下关系

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

$$W_R \cdot Re = w_\beta \cdot \beta e$$

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

这就是重心定律。

根据上式可求各相的重量百分数:

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

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

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

重心定律也可应用于三个不同成分的合金熔配成一个新合金的问题,此时,三个旧合金的成分位于三角形顶点,而新合金的成分则位于该三角形的重量重心。

重心定律可由直线定律引伸得来,假设  $\beta$  和  $\gamma$  两相混合后,得到一个假想的合金相  $d$ ,则根据直线定理, $d$  点必定处在  $\beta\gamma$  直线上,且为该直线的重心(即  $\beta\gamma$  杠杆支点),这样进一步可设想原始合金  $R$  是由  $\alpha$  与  $d$  两相组成,则  $R$  点也必处在  $ad$  直线重心上。同理可以证明, $R$  也分别为  $\beta e$  和  $\gamma f$  的重心,因此  $R$  为三角形  $\alpha\beta\gamma$  的重量重心。应注意,在一般情况下, $R$  点并非三角形的几何重心(指三角形三条中线的交点),只有当  $\alpha, \beta, \gamma$  三个相的重量相等时,重量中心方与几何中心相重合。

除了用几何作图法求三个平衡相的相对量外,还可直接用代数法计算,它在解决合金熔配问题时更为方便。设现有三个已知成分的三元合金  $O, P, Q$ , 欲配制一个给定成分的新合金  $R$ 。现在的问题是,三个母合金的相对量各需多少才能配制出所要求的新合金。令:

$O$  合金中  $A, B, C$  组元的成分为  $x_A^O, x_B^O, x_C^O$ ;

$P$  合金中  $A, B, C$  组元的成分为  $x_A^P, x_B^P, x_C^P$ ;

$Q$  合金中  $A, B, C$  组元的成分为  $x_A^Q, x_B^Q, x_C^Q$ ;

$R$  合金中  $A, B, C$  组元的成分为  $X_A^R, X_B^R, X_C^R$ 。

再设新合金  $R$  的量为 1, 三个母合金的相对量分别为  $W_O\%, W_P\%$  和  $W_Q\%$ , 则  $W_O\% + W_P\% + W_Q\% = 1$ 。

根据质量平衡关系,三个母合金中某一组元的量之和应等于新合金中该组元的量,即

$$x_A^O \cdot W_O\% + x_A^P \cdot W_P\% + x_A^Q \cdot W_Q\% = X_A^R$$

$$x_B^O \cdot W_O\% + x_B^P \cdot W_P\% + x_B^Q \cdot W_Q\% = X_B^R$$

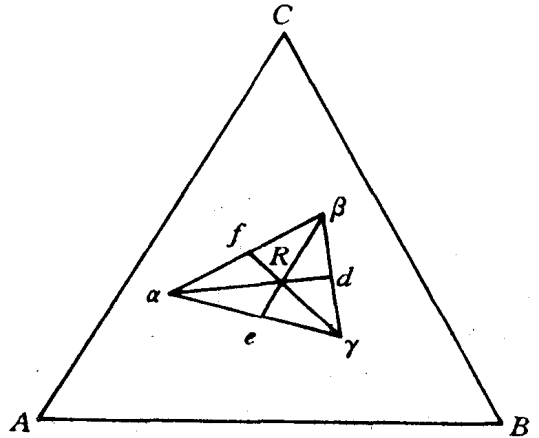


图 1-14 重心定律应用



$$x_C^O \cdot W_O\% + x_C^P \cdot W_P\% + x_C^Q \cdot W_Q\% = X_C^R$$

解这组联立方程得到

$$W_O\% = \frac{\begin{vmatrix} X_A^R & x_A^P & x_A^Q \\ X_B^R & x_B^P & x_B^Q \\ X_C^R & x_C^P & x_C^Q \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_A^O & x_A^P & x_A^Q \\ x_B^O & x_B^P & x_B^Q \\ x_C^O & x_C^P & x_C^Q \end{vmatrix}}, \quad W_P\% = \frac{\begin{vmatrix} x_A^O & X_A^R & x_A^Q \\ x_B^O & X_B^R & x_B^Q \\ x_C^O & X_C^R & x_C^Q \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_A^O & x_A^P & x_A^Q \\ x_B^O & x_B^P & x_B^Q \\ x_C^O & x_C^P & x_C^Q \end{vmatrix}}, \quad W_Q\% = \frac{\begin{vmatrix} x_A^O & x_A^P & X_A^R \\ x_B^O & x_B^P & X_B^R \\ x_C^O & x_C^P & X_C^R \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_A^O & x_A^P & x_A^Q \\ x_B^O & x_B^P & x_B^Q \\ x_C^O & x_C^P & x_C^Q \end{vmatrix}}$$

### § 1-3 三元相图的测定

三元合金相图的水平截面和垂直截面,形式上象是从立体模型上切截下来的。然而实际上并不是先有了立体相图再切截出截面图,倒是先测出平面图形——截面图,再使一系列截面图组合而成立体相图的。对多数实用的三元合金系来说,至今还没有建立完整的立体图形,而只是测定了可供实际使用的截面图和投影图。

测定三元合金相图的基本原理与二元相图相似。第一步,选取一系列不同成分的合金;第二步,通过热分析法、金相法、硬度法、磁性法、膨胀法、X射线衍射法等,测定所选合金的相变温度;第三步,将这些合金的同类相变温度点连接成面(通常多为曲面),从而构成相图。

测定时合金成分的选取有一定的规律,常选取若干“组”合金,每组中所有合金含某一组元的浓度相同。如图 1-15 所示,假定选取各组合合金的 A 组元含量分别为  $x_1\%$ 、 $x_2\%$ 、 $x_3\%$ 、 $\dots$ ,每一组中包括一系列 B、C 组元含量不同的若干合金。这样,每一组合金的成分便可用一个成分轴表示,这些成分轴分别位于成分三角形中平行 BC 边的一系列平行线上。这使得每一组合金相当于一个垂直截面。实测时,分别测定每一个垂直截面的图形(与二元相图测定完全相同),再将所有组(即所有选定的垂直截面)的图形组合而成立体相图。

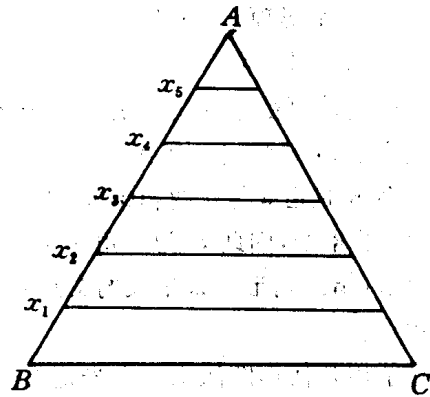


图 1-15 测定相图时合金成分的选取

显然,也可以使所选取的每一组合金中两种组元的含量之比固定。这样测出的垂直截面,其成分轴是过浓度三角形某一顶点的直线。

三元相图中的等温截面有其独特的作用。它不但可供直接使用,而且是建立三元相图投影图的基础。等温截面也可采用实测法测定,但比垂直截面的测定麻烦得多。通常是利用垂直截面中已经测定的数据来建立水平截面,属于简便易行的作图法。图 1-16 是利用垂直截面建立水平截面的示意图。

图中的四个垂直截面已经由实验测出。其中 A-C 截面和 B-C 截面是两个二元合金系,  $(A_1 + B_1) - C$  和  $(A_2 + B_2) - C$  截面中 A、B 两组元的含量比是定值。在这四个垂直截面中温度分别为  $t_1$  的等温线上,等温线与垂直截面中液相线的交点所对应的成分点 a、b、c、d 代表了在  $t_1$  温度开始凝固的合金成分;等温线与固相线的交点所对应的成分点 e、f、g、h 代表了在  $t_1$  温度