

# 第8章 三元相图

## 8.1 三元相图基础

三元相图的基本特点为：

- (1) 完整的三元相图是三维的立体模型。
- (2) 二元系中可以发生3相平衡转变。由相律可以确定二元系中的最大平衡相数为3，而三元系中的最大平衡相数为4。三元相图中的四相平衡区是恒温水平面。
- (3) 根据相律得知，三元系三相平衡时存在一个自由度，所以三相平衡转变是变温过程，反映在相图上，三相平衡区必将占有一定空间，不再是二元相图中的水平线。

## 8.11 三元相图成分表示方法

### 1. 等边成分三角形

图8.1为等边三角形表示法，三角形的三个顶点A，B，C分别表示3个组元，三角形的边AB，BC，CA分别表示3个二元系的成分坐标，则三角形内的任一点都代表三元系的某一成分。

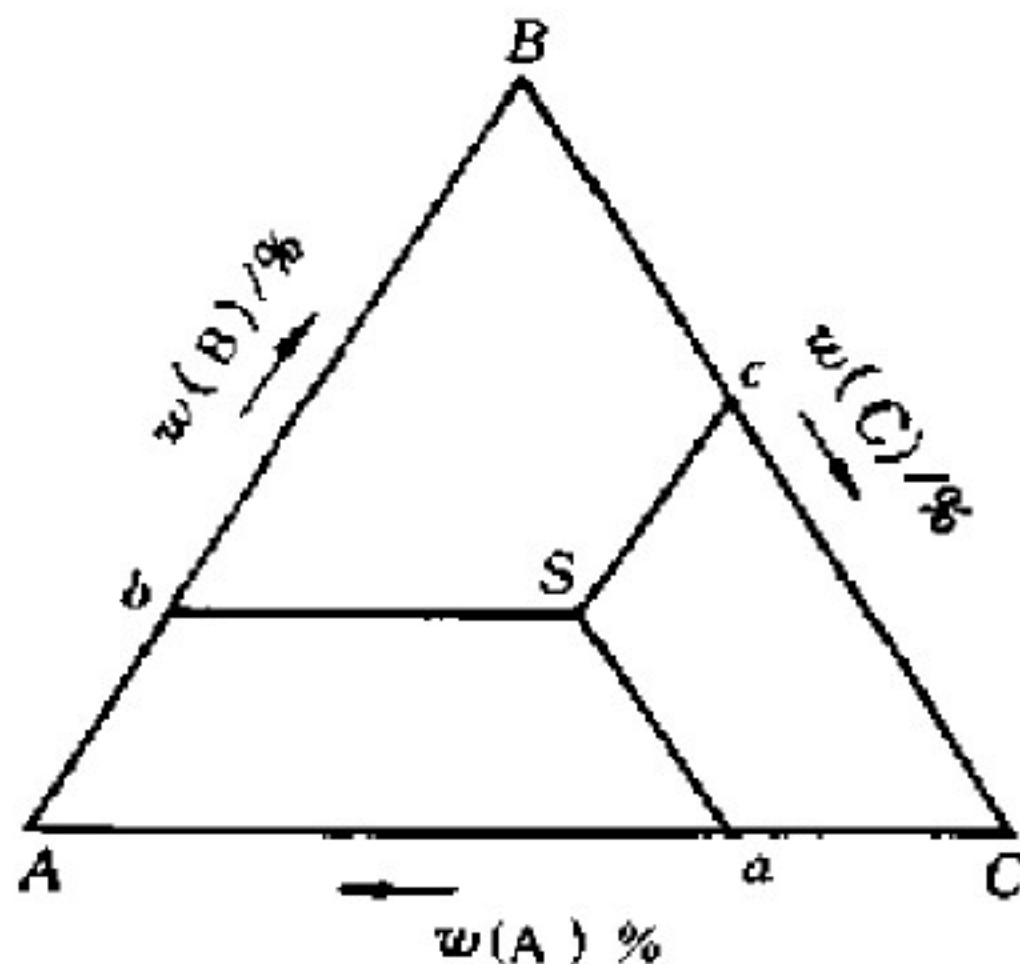


图 8.1 用等边三角形表示三元合金的成分



例如，三角形ABC内S点所代表的成分可通过下述方法求出：

设等边三角形各边长为100%，AB，BC，CA顺序分别代表B，C，A三组元的含量。由S点出发，分别向A，B，C顶角对应边BC，CA，AB引平行线，相交于三边的c，a，b点。根据等边三角形的性质，可得 $Sa + Sb + Sc = AB = BC = CA = 100\%$ ，

其中， $Sc = Ca = \omega_A / (\%)$ ， $Sa = Ab = \omega_B / (\%)$ ， $Sb = Bc = \omega_C / (\%)$ 。

于是，Ca，Ab，Bc线段分别代表S相中三组元A，B，C的各自质量分数。

反之，如已知3个组元质量分数时，也可求出S点在成分三角形中的位置。

**确定合金某组元（如B）成分的方法：**

通过合金成分点作B组元对边的平行线

与另两边中任一边相交于（如b点），则Ab长度就是B组元的成分

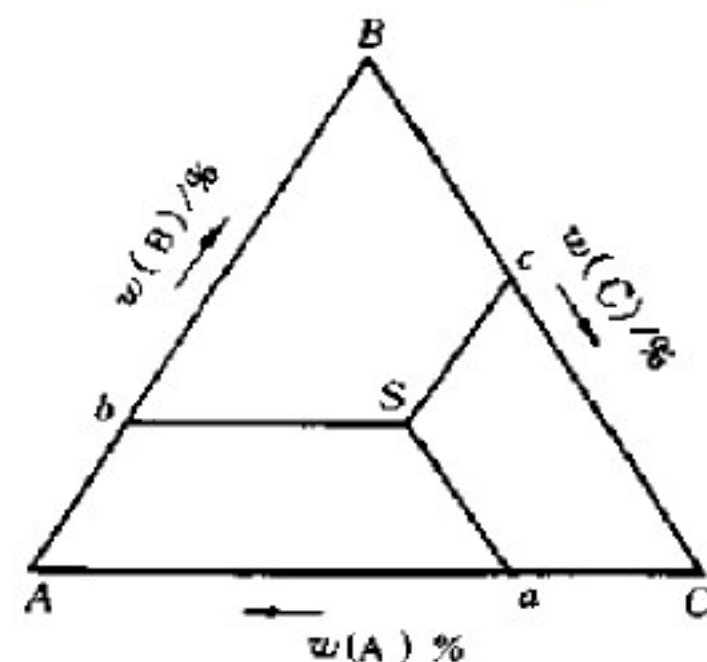
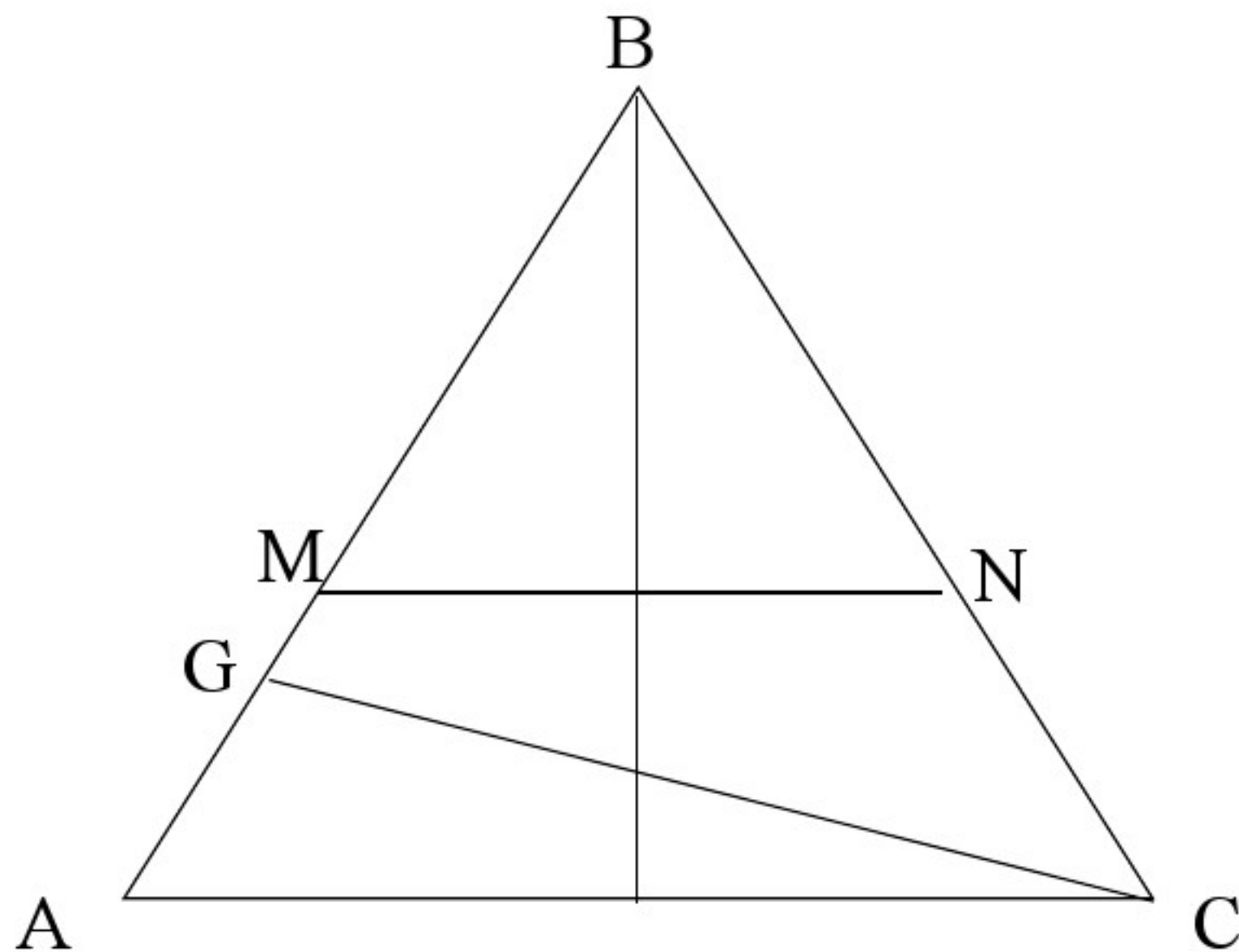


图 8.1 用等边三角形表示三元合金的成分

## 2. 浓度三角形具有如下一些特性





(1) 等含量规则——平行于三角形任一边的直线上所有合金中有一组元含量相同，该直线为直线所对顶角上的元素，如下图中的MN线上，B%之值恒定。（根据成分的确定方法）

(2) 等比例规则——通过三角形顶点的任何一直线上的所有合金，其直线两边的组元含量之比为定值，如图中CG线上的任何合金，A%与B%的比值为定值，即 $A\% / B\% = BG/GA$ 。

证明：在CG上任何一合金o，如下图所示，

过o点作 $MN \parallel AC$ ， $bp \parallel AB$ ，

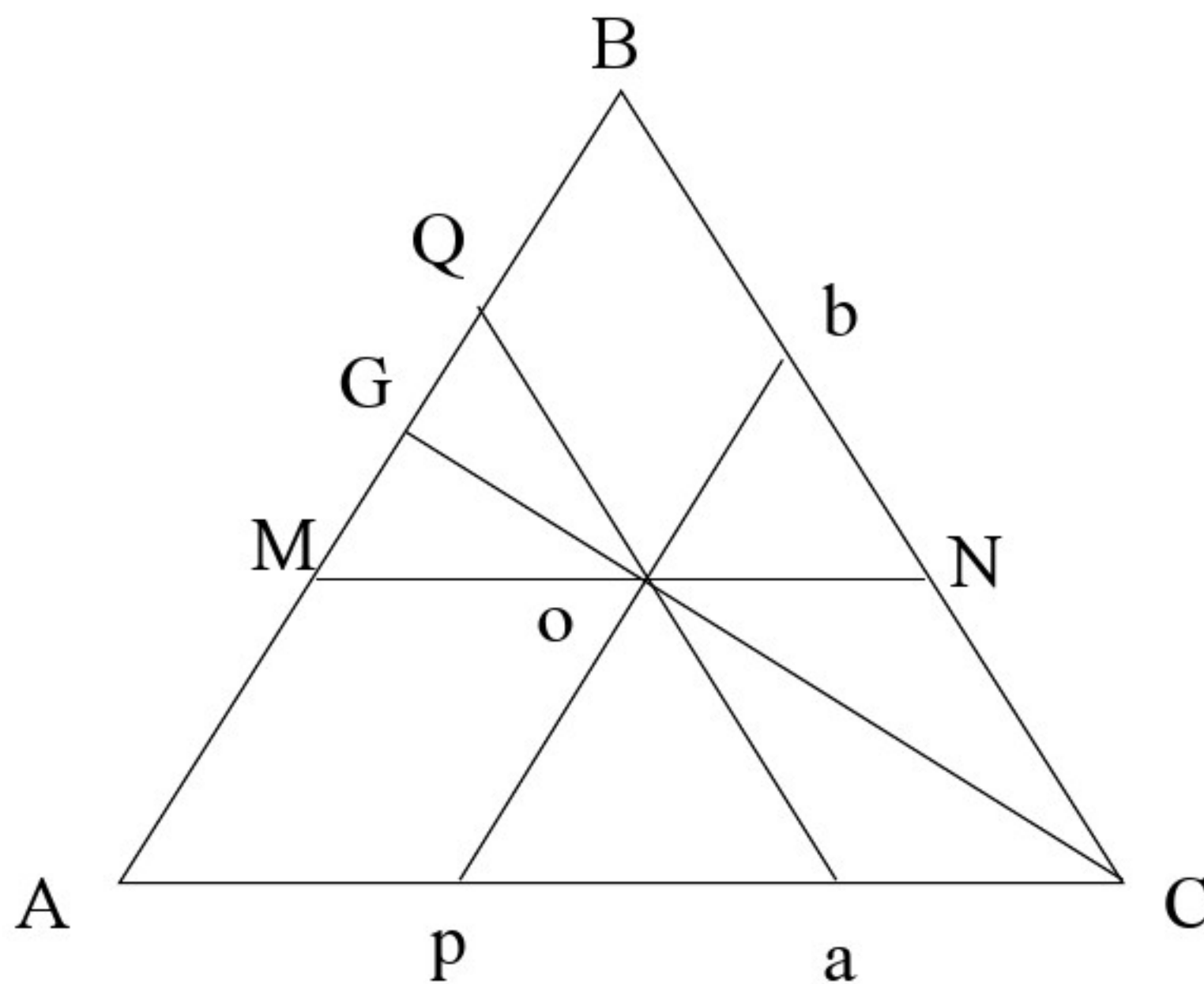
$aQ \parallel BC$ 。

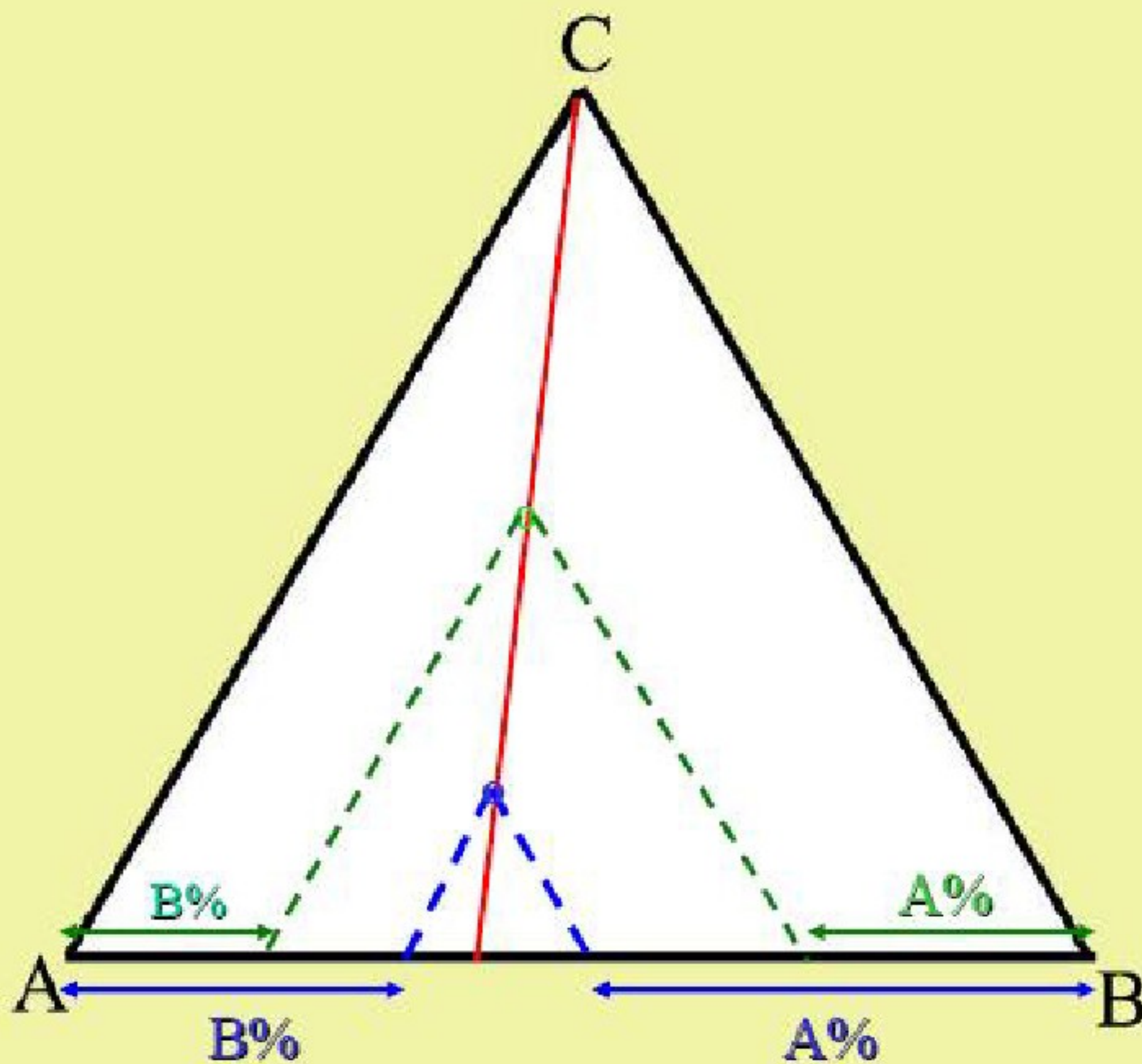
O合金成分:

$A\% / B\% = Ca/AM$  (定义)

$= ob/op$

$= BG/GA.$

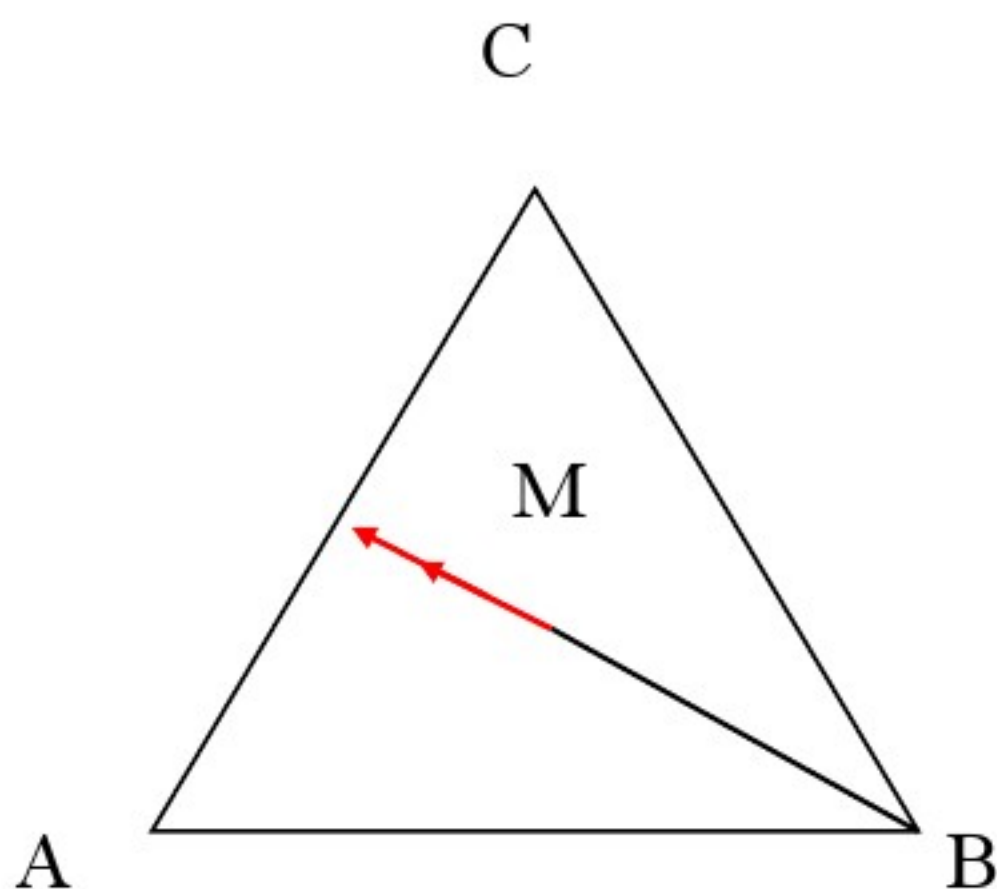






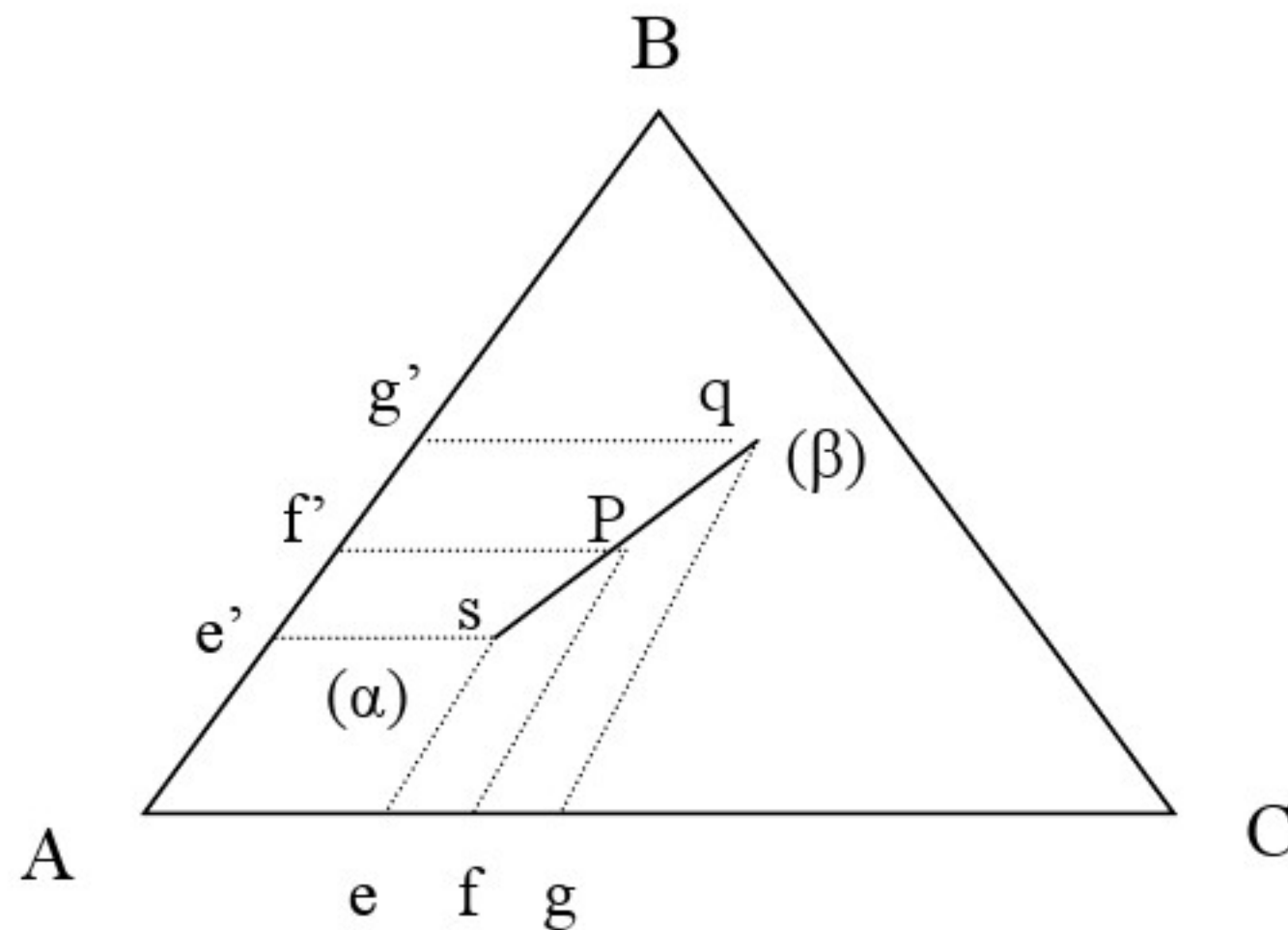
3) **推论：** 位于三角形高BH上任一点的合金，其两边组元的含量相等。

4) **背向规则——**从任一三元合金M中不断取出某一组元B，那么合金浓度三角形位置将沿BM的延长线背离B的方向变化，这样满足B量不断变化减少，而A、C含量的比例不变。





5) 直线定律——在一确定的温度下，当某三元合金处于两相平衡时，合金的成分点和两平衡相的成分点必定位于成分三角形中的同一条直线上。该规则成为直线定律。



证明如下：设合金P在某一温度下处于 $\alpha$ 相（s点）和 $\beta$ 相（q点）两相平衡， $\alpha$ 相和 $\beta$ 相中的B组元含量分别为 $A_e'$ 和 $A_g'$ 。两相中C、B两组元的质量之和应等于合金P中C、B两组元的质量之和。令合金P的质量为 $W_P$ ， $\alpha$ 相的质量为 $W_\alpha$ ， $\beta$ 相的质量为 $W_\beta$ ，则 $W_P = W_\alpha + W_\beta$ ，由于合金中的C、B组元的含量分别为 $A_f$ 和 $A_{f'}$ ，由C、B质量守恒分别的下两式：

$$\begin{aligned} & \begin{cases} W_P A_f = W_\alpha A_e + W_\beta A_g \rightarrow (W_\alpha + W_\beta) A_f = W_\alpha A_e + W_\beta A_g \\ W_P A_{f'} = W_\alpha A_{e'} + W_\beta A_{g'} \rightarrow (W_\alpha + W_\beta) A_{f'} = W_\alpha A_{e'} + W_\beta A_{g'} \end{cases} \\ & \Rightarrow \begin{cases} W_\alpha (A_f - A_e) = W_\beta (A_g - A_f) \\ W_\alpha (A_{f'} - A_{e'}) = W_\beta (A_{g'} - A_{f'}) \end{cases} \\ & \Rightarrow \frac{fg}{ef} = \frac{f'g'}{e'f'} \end{aligned}$$

所以，sPg三点必在一条直线上。

# 直线定律

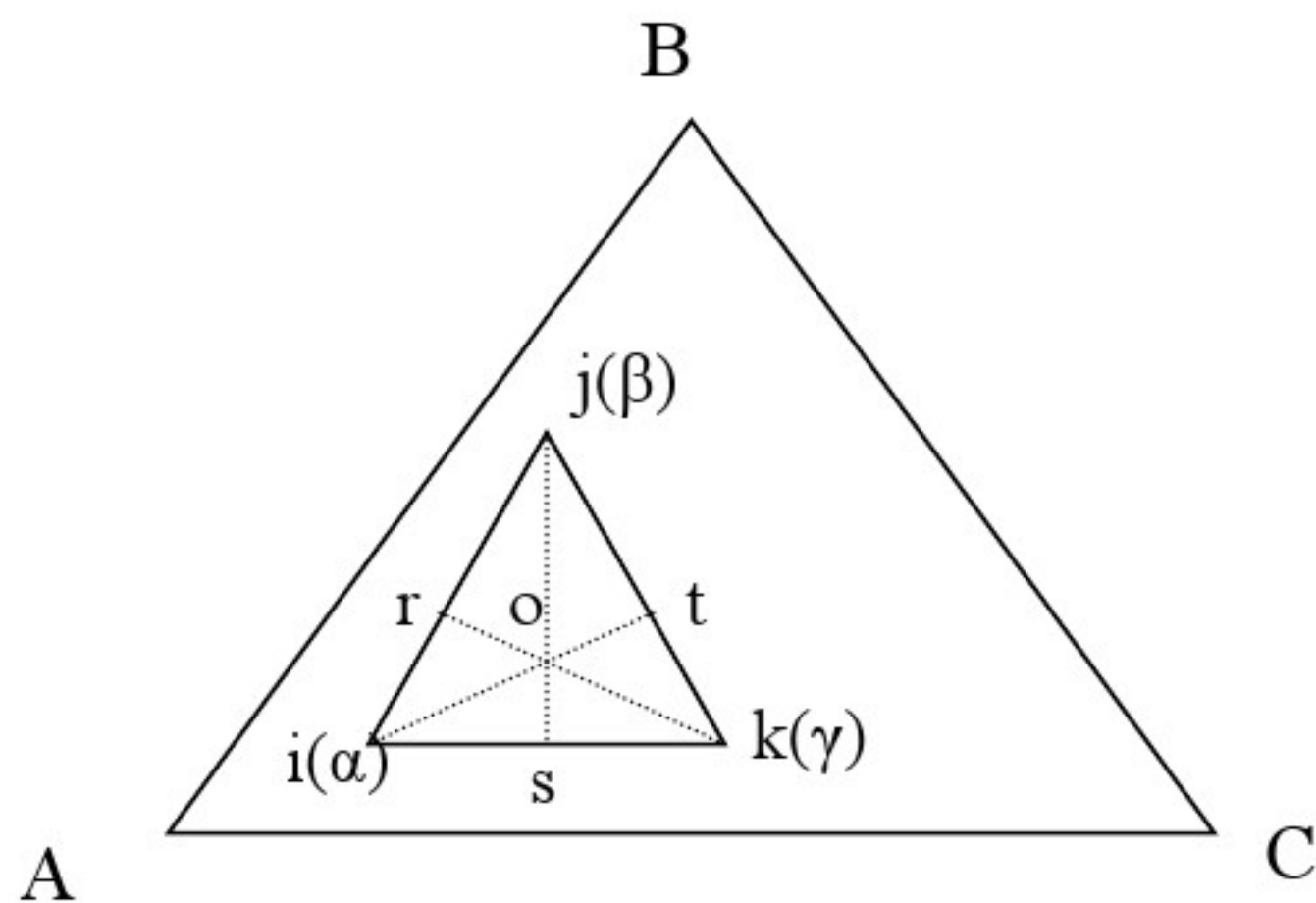
- 两条推论
- (1) 给定合金在一定温度下处于两相平衡时，若其中一个相的成分给定，另一个相的成分点必然位于已知成分点连线的延长线上。
- (2) 若两个平衡相的成分点已知，合金的成分点必然位于两个已知成分点的连线上。



6) 杠杆定律——由以上推导可得：

$$\alpha\% = \frac{fg}{eg} = \frac{qP}{qs}, \quad \beta\% = \frac{ef}{eg} = \frac{Ps}{qs}。$$

7) 重心法则



假设合金o在某一温度由 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 三相组成，则合金o的成分点一定在 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 三相成分点i、j、k组成的共扼三角形中。可以设想先把 $\alpha$ 和 $\beta$ 混合成一体，合金o便是由 $\gamma$ 相和这个混合体组成。按照直线法则，这个混合体的成分点应在ij连线上，同时也应该在ko连线的延长线上。满足这个条件的成分点就是ko延长线和ij直线的交点r。利用杠杆法则，可以计算出 $\gamma$ 相在合金中的百分含量：

$$\frac{W_{\gamma}}{W_o} \% = \frac{or}{kr} \times 100\%$$

同时可以导出 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相在合金中的百分含量：

$$\frac{W_{\alpha}}{W_o} \% = \frac{ot}{it} \times 100\%$$
$$\frac{W_{\beta}}{W_o} \% = \frac{os}{js} \times 100\%$$

上式表明，o点正好位于三角形ijk的质量重心，所以把它叫做三元系的重心法则。

8) 直接用代数法计算三个平衡相的相对含量.

合金O中A、B、C三组元的百分含量分别是:  $x_A$ 、 $x_B$ 、 $x_C$

$\alpha$ 相中 A、B、C 三组元的百分含量分别是:  $x_A^\alpha$ 、 $x_B^\alpha$ 、 $x_C^\alpha$

$\beta$ 相中 A、B、C 三组元的百分含量分别是:  $x_A^\beta$ 、 $x_B^\beta$ 、 $x_C^\beta$

$\gamma$ 相中 A、B、C 三组元的百分含量分别是:  $x_A^\gamma$ 、 $x_B^\gamma$ 、 $x_C^\gamma$

合金总量为 1, 设各相的含量分数为别是  $A^\alpha$ 、 $A^\beta$ 、 $A^\gamma$ , 则

$$A^\alpha + A^\beta + A^\gamma = 1$$

各相中某一组元的含量之和应该等于合金中这种组元的含量, 即

$$x_A^\alpha A^\alpha + x_A^\beta A^\beta + x_A^\gamma A^\gamma = x_A$$

$$x_B^\alpha A^\alpha + x_B^\beta A^\beta + x_B^\gamma A^\gamma = x_B$$

$$x_C^\alpha A^\alpha + x_C^\beta A^\beta + x_C^\gamma A^\gamma = x_C$$



联立方程，得到

$$A^\alpha = \begin{array}{c|ccc} & x_A & x_A^\beta & x_A^\gamma \\ & x_B & x_B^\beta & x_B^\gamma \\ & x_C & x_C^\beta & x_C^\gamma \\ \hline & x_A^\alpha & x_A^\beta & x_A^\gamma \\ & x_B^\alpha & x_B^\beta & x_B^\gamma \\ & x_C^\alpha & x_C^\beta & x_C^\gamma \end{array}$$

$$A^\beta = \begin{array}{c|ccc} & x_A^\alpha & x_A & x_A^\gamma \\ & x_B^\alpha & x_B & x_B^\gamma \\ & x_C^\alpha & x_C & x_C^\gamma \\ \hline & x_A^\alpha & x_A^\beta & x_A^\gamma \\ & x_B^\alpha & x_B^\beta & x_B^\gamma \\ & x_C^\alpha & x_C^\beta & x_C^\gamma \end{array}$$

$$A^\gamma = \begin{array}{c|ccc} & x_A^\alpha & x_A^\beta & x_A \\ & x_B^\alpha & x_B^\beta & x_B \\ & x_C^\alpha & x_C^\beta & x_C \\ \hline & x_A^\alpha & x_A^\beta & x_A^\gamma \\ & x_B^\alpha & x_B^\beta & x_B^\gamma \\ & x_C^\alpha & x_C^\beta & x_C^\gamma \end{array}$$

### 3. 成分的其它表示方法

#### a. 等腰成分三角形

当三元系中某一组元含量较少，而另两个组元含量较多时，合金成分点将靠近等边三角形的某一边。为了使该部分相图清晰地表示出来，可将成分三角形两腰放大，成为等腰三角形。如图8.3所示。

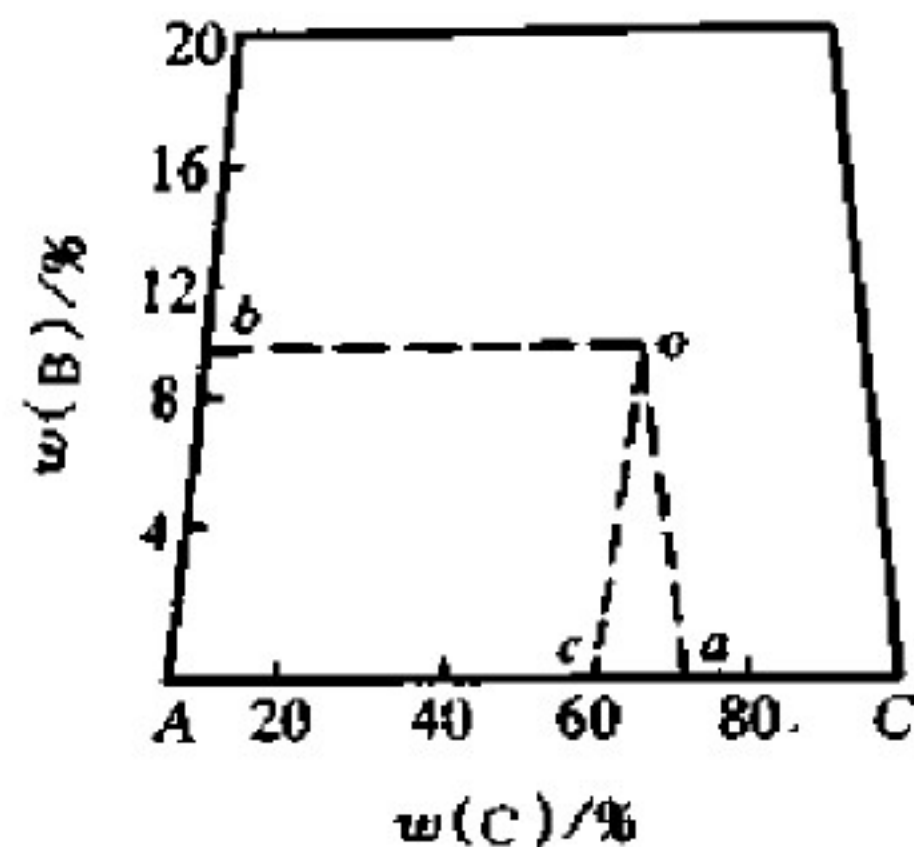


图 8.3 等腰成分三角形

## b. 直角成分坐标

当三元系成分以**某一组元为主**、其他两个组元含量很少时，合金成分点将靠近等边三角形某一项角。若采用直角坐标表示成分，则可使该部分相图清楚地表示出来。设直角坐标原点代表高含量的组元，则两个互相垂直的坐标则代表其他两个组元的成分。

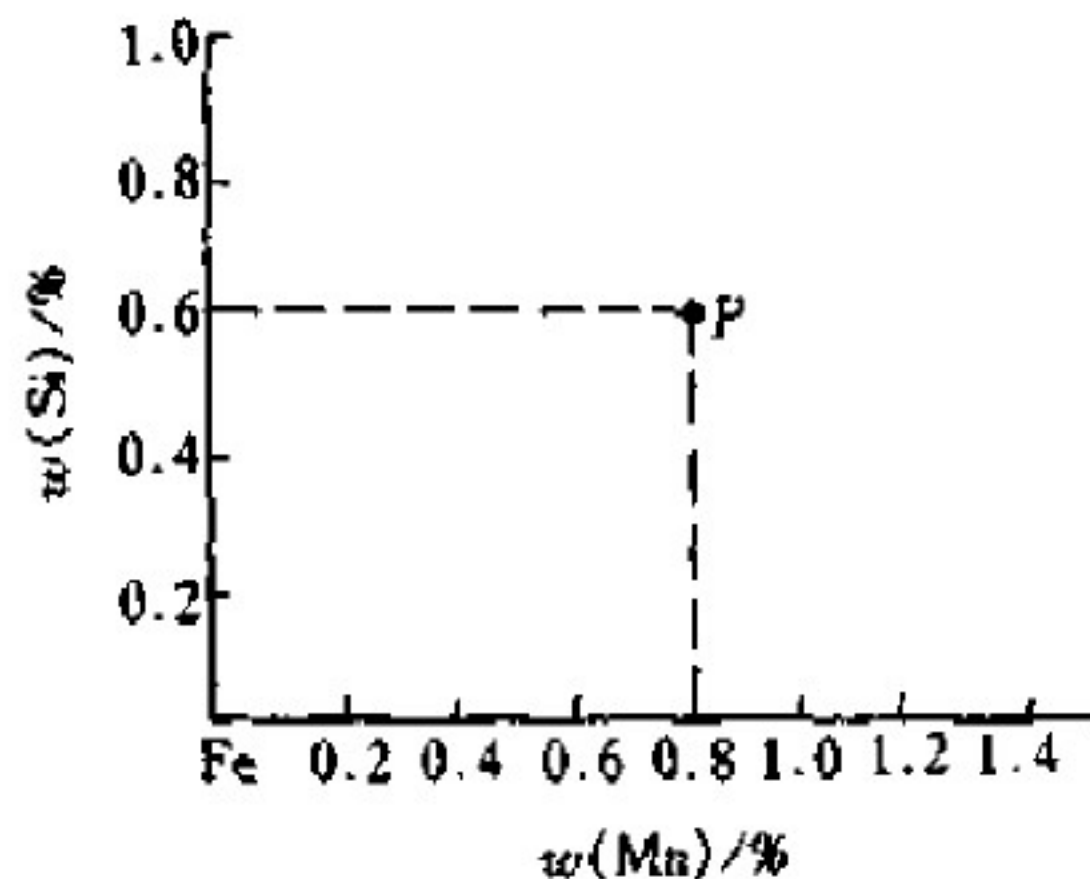


图 8.4 直角成分三角形



### C. 局部图形表示法

如果只需要研究三元系中一定成分范围内的材料，就可以在浓度三角形中取出有用的局部(见图 8.5)加以放大，这样会表现得更加清晰。

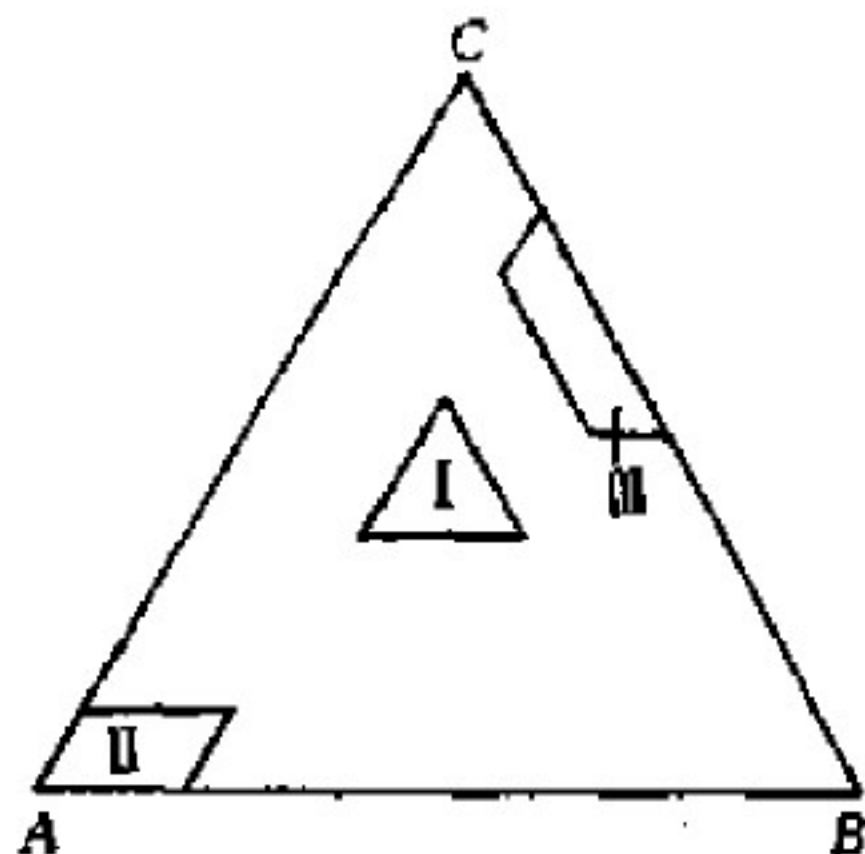


图 8.5 浓度三角形中的各种局部

## 8.2 三元匀晶相图

### 1. 相图的空间模型

如右图所示，三条二元匀晶相图的液相线和固相线分别连结成三元合金相的液相曲面和固相曲面。液相面以上区域为液相区，固相面以下区域为固相区，而两面之间为液、固两相共存的两相区。

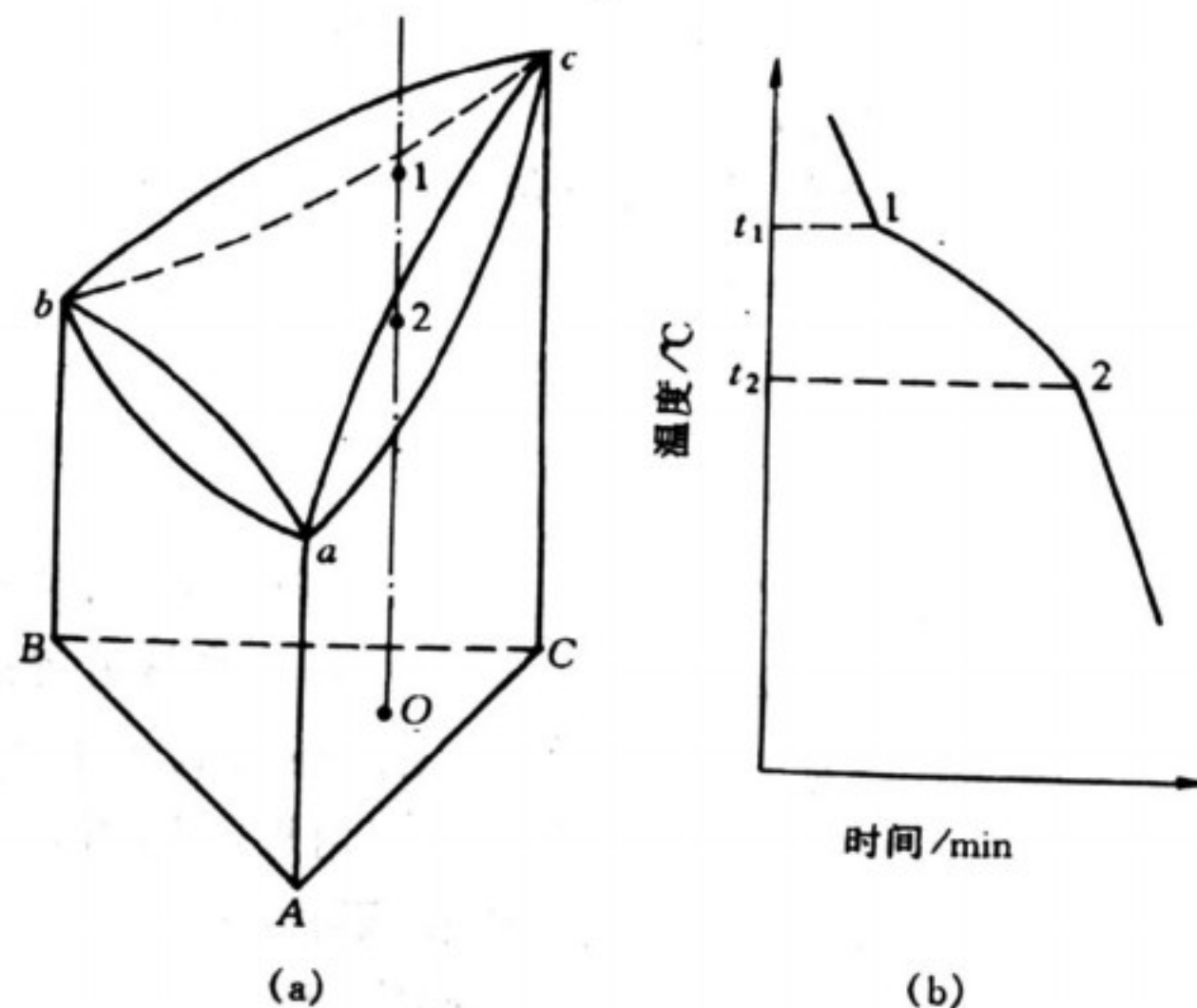


图 8.6 三元匀晶相图及合金的凝固  
(a) 相图 (b) 冷却曲线

## 2. 等温截面图

为便于研究，通常采用三元合金相图的等温截面图和变温截面图来分析合金的相变过程、各温度下的相变关系以及各相的相对含量等。下图则给出了三元匀晶相图的等温截面图。

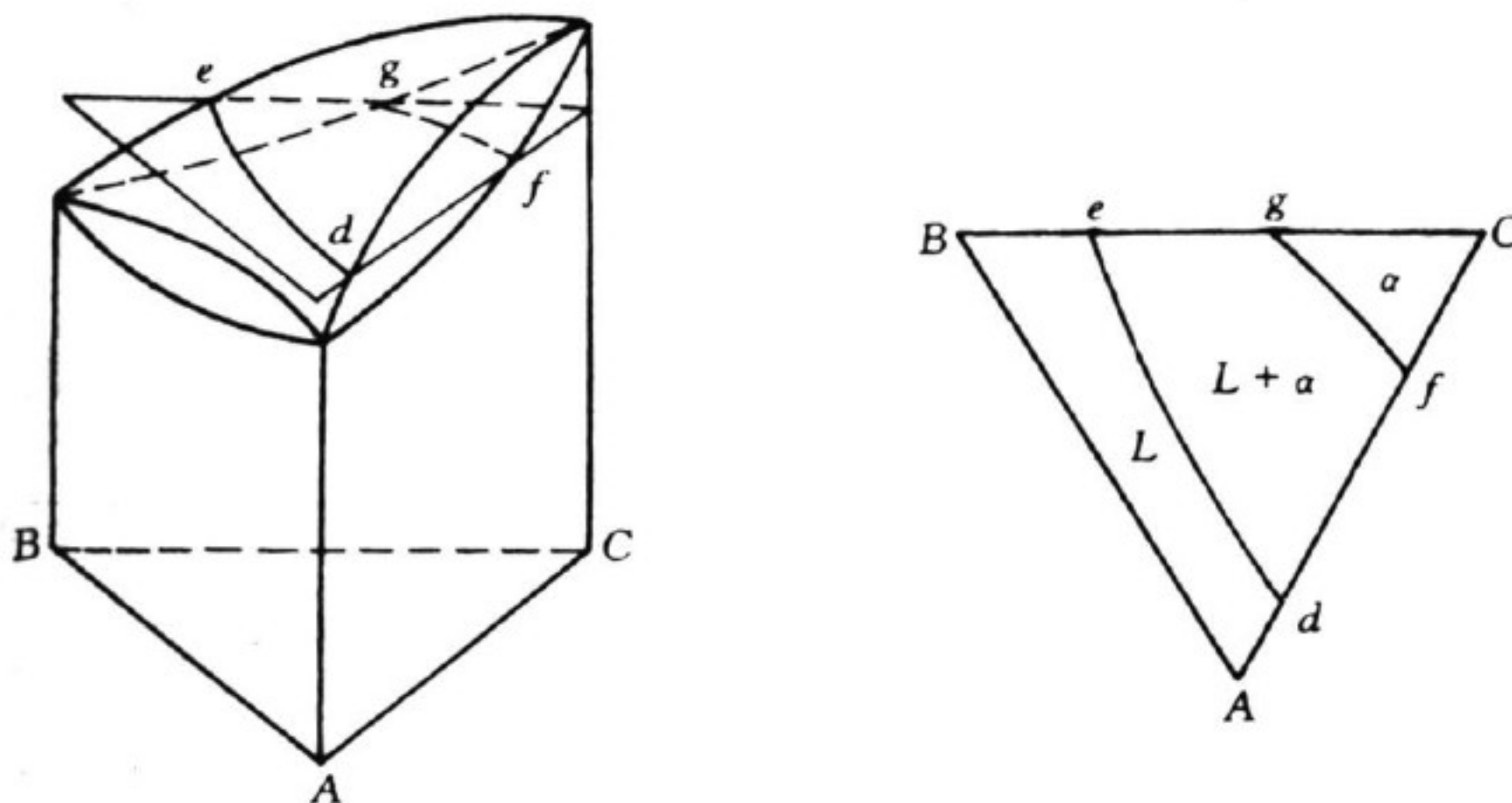


图 8.7 三元合金相图的水平截面图



等温截面图又称水平截面图，它是以某一恒定温度所作的水平面与三元相图立体模型相截的图形在成分三角形上的投影。

由图中可见，等温线将等温截面分割成液相区、固相区和液、固两相区。

根据相律，三元合金处于两相平衡是具有两个自由度，即

$$f = C - P + 1 = 3 - 2 + 1 = 2,$$

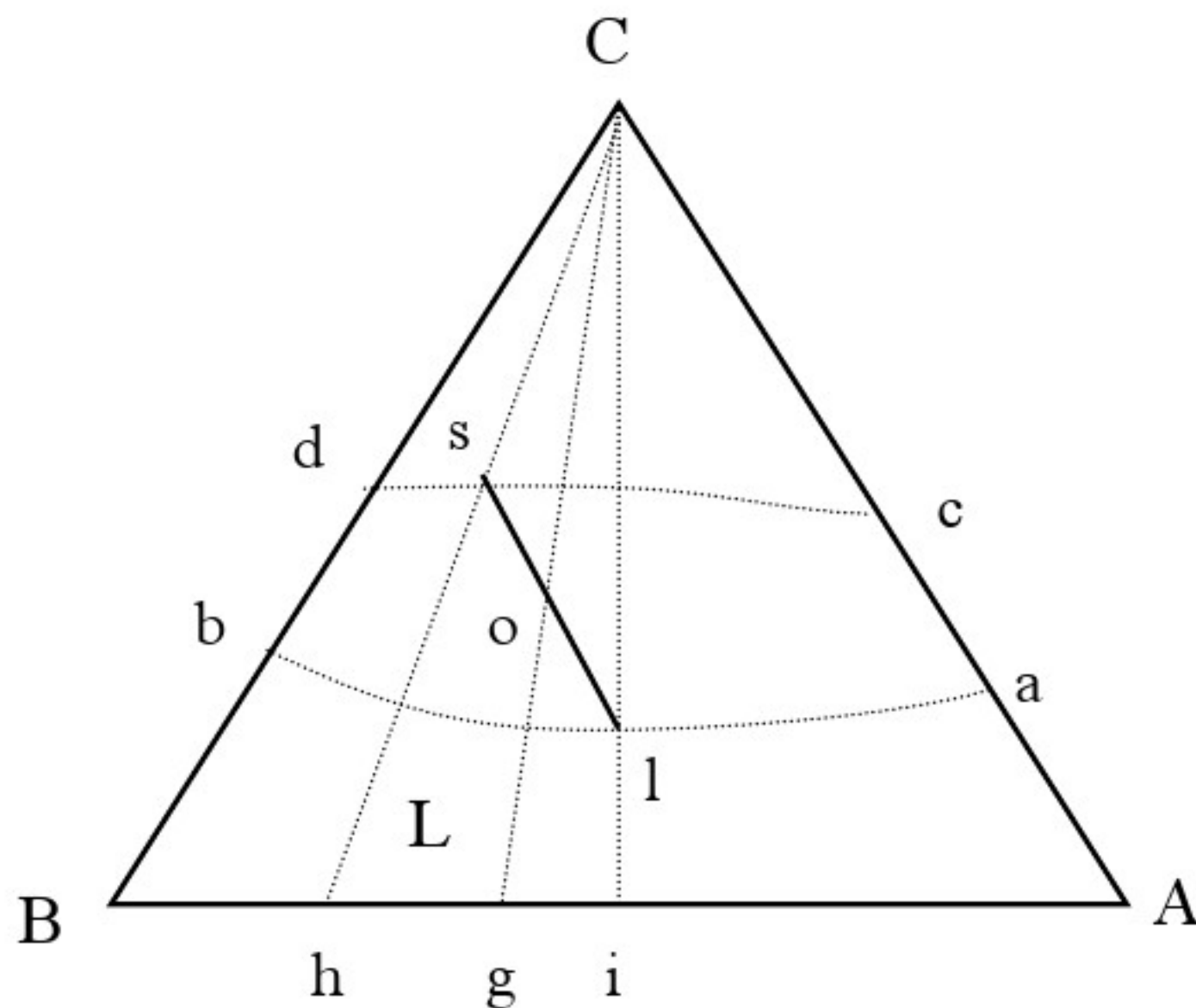
如果温度恒定，则 $f = C - P = 3 - 2 = 1$ ，故当温度恒定时，还存在一个自由度，即当一个平衡相的成分确定后，另一相的成分必然存在一定的对应关系。因此，在一定温度下，欲确定两个平衡相的成分，必须先用实验方法确定其中一相的成分，然后应用直线法则来确定另一相的成分。连接两平衡相对应成分的水平线称为连接线或共扼线。

连接线是共扼线，是一对处于平衡状态的液相和固相成分的连线，它是用实验方法测定的，必要时也可近似地画出。具有以下基本性质：

- 1) 在两相区内各条直线不能相交，否则不符合相律；
- 2) 连结线不通过顶点，连结线的液相端向低熔点组元方向偏一角度。

证明如下：假定

$T_C$  高于  $T_B$ ， $T_B$  高于  $T_A$





假定在图中，C组元熔点最高而A组元熔点最低，合金O在 $t_1$ 温度处于液、固两相平衡状态，则固相 $\alpha$ 中高熔点的B组元和低熔点的A组元浓度之比应该大于液相中这两组元的浓度比。根据二元匀晶相图可知，固相中高熔点的含量比液相中的高，而液相中低熔点组元的含量比固相中的高。因此得：

$$\begin{aligned} x_B^\alpha &> x_B^L, & x_A^\alpha &< x_A^L \\ \Rightarrow \frac{x_B^\alpha}{x_A^\alpha} &> \frac{x_B^L}{x_A^L}, & & \end{aligned} \quad (2)$$



图中ls线满足下列条件:

$$\frac{x_B^\alpha}{x_A^\alpha} = \frac{\overline{Ah}}{\overline{Bh}} \quad , \quad \frac{x_B^L}{x_A^L} = \frac{\overline{Ai}}{\overline{Bi}}$$

其中,

$$\overline{Ah} > \overline{Ai} \quad ,$$

$$\overline{Bh} < \overline{Bi}$$

所以前者之比大于后者之比, 满足不等式 (2) 。

而在Cg线上的合金不满足不等式 (2) , 因为:

$$\frac{x_B^\alpha}{x_A^\alpha} = \frac{x_B^L}{x_A^L} = \frac{\overline{Ag}}{\overline{Bg}}$$

- 3) 位于等温截面两相区中同一连接线上的不同成分合金，其两平衡相的成分不变，但相对含量各不相同。

另外，等温截面有两个作用：

- a) 表示在某温度下三元系中各种合金所存在的相态；
- b) 表示平衡相的成分，并可以应用杠杆定律计算平衡相的相对含量。



### 3. 合金的平衡凝固过程

如图8.6所示的相图中，成分为O点的合金，在液相面以上处于液态，当温度下降至与液相面相交于1时，开始结晶出 $\alpha$ ，并随着温度降低， $\alpha$ 相增多，L相减少，当温度降至与固相面相交于2时，则液相L全部结晶，合金呈单相 $\alpha$ 固溶体，如图8.6（b）所示。

根据以上分析，可以进一步讨论合金O的凝固过程。在凝固过程中，如下图所示，当固相和液相的成分分别沿着 $ss_1s_2\cdots O$ 和 $O1_11_2\cdots 1$ 曲线发生变化，**注意：**

- 1) 连接线一定通过合金成分点；
- 2) 随着温度的降低，连结线以原合金成分轴线为中心旋转并平行下移，旋转的方向是液相成分点逐渐向低熔点组元A方向偏转（这可从二元相图可知），形成了蝴蝶形的轨迹；
- 3) ，只有在知道凝固过程中某一相的成分变化情况之后（由相律可知），才能得出另一相的成分变化规律。



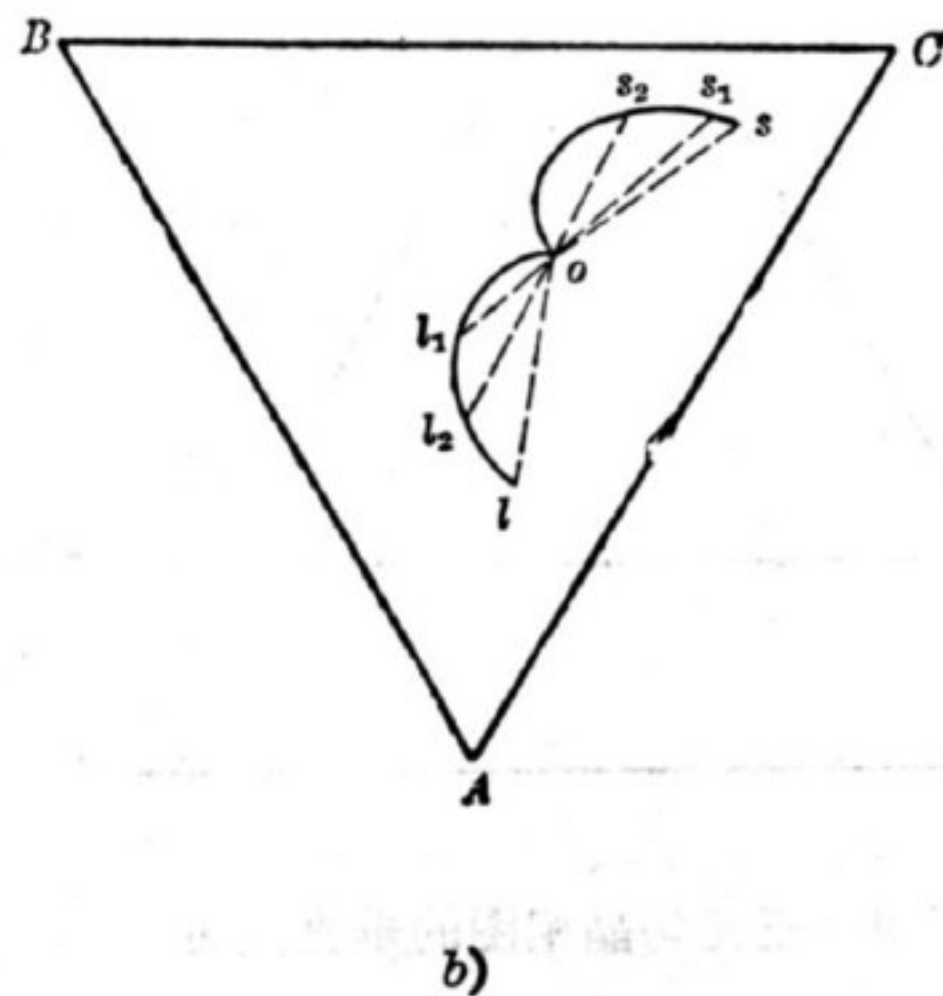
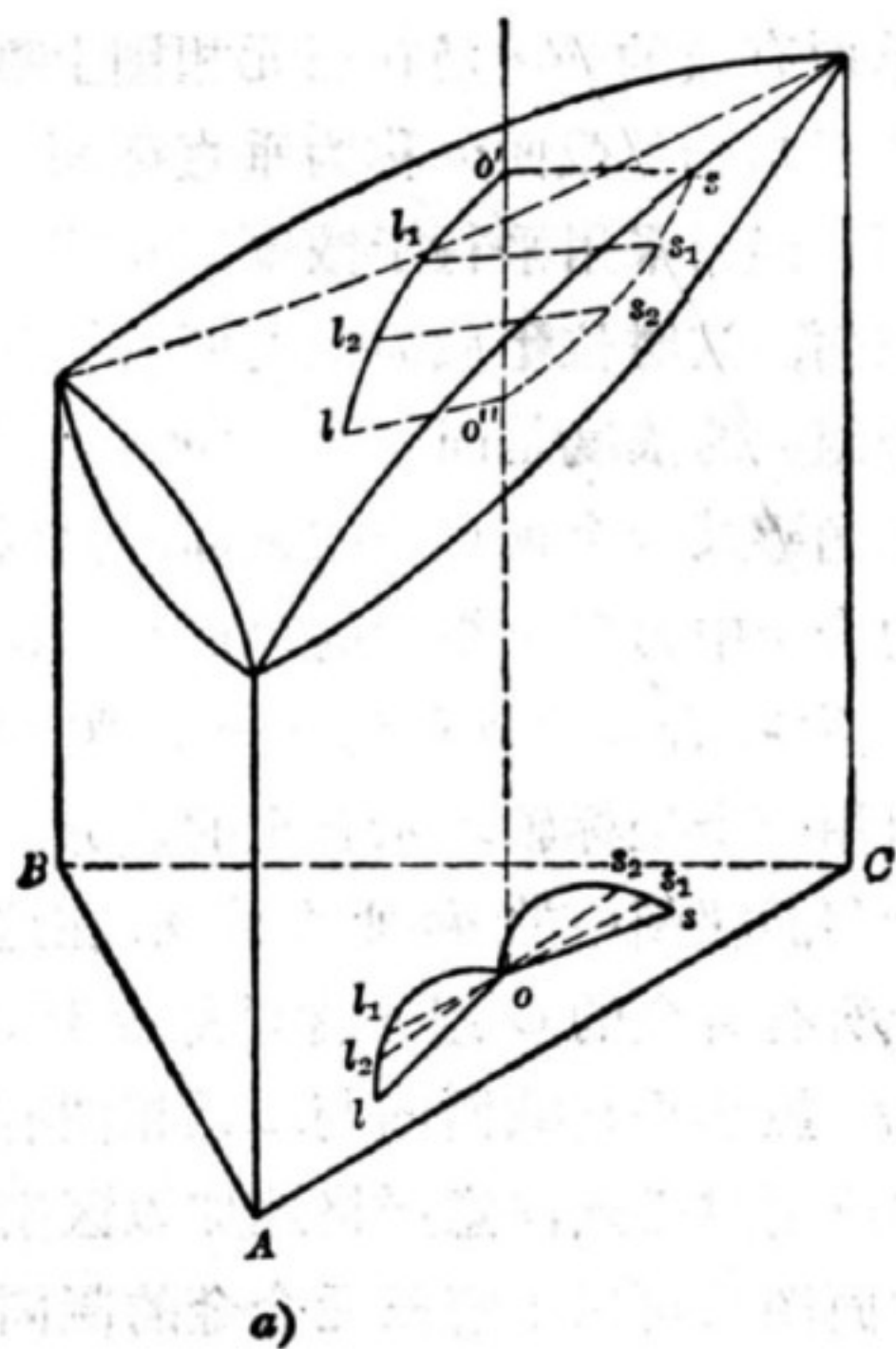
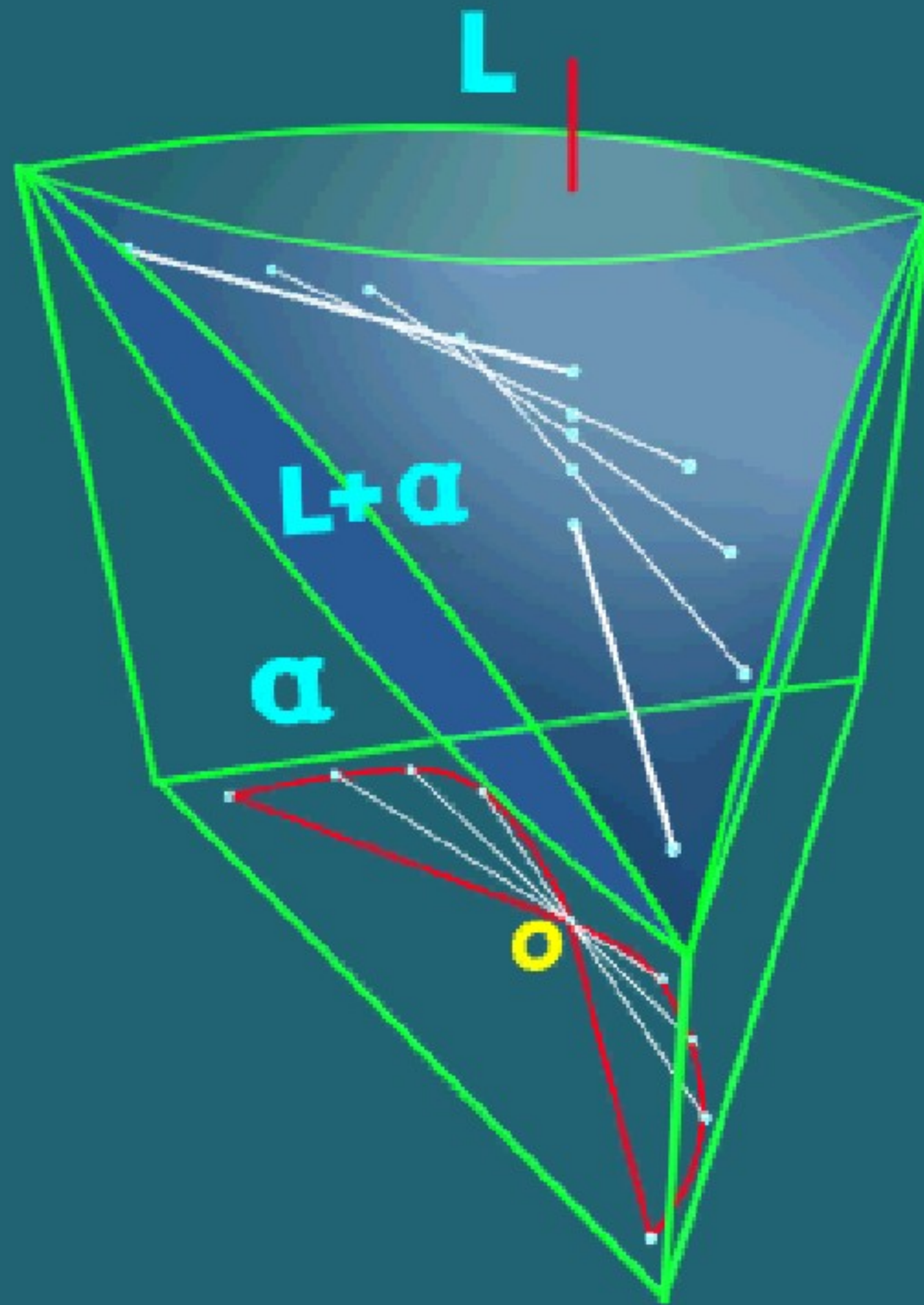


图 6-8 共轭线随温度变化的示意图及投影图



# 等温截面

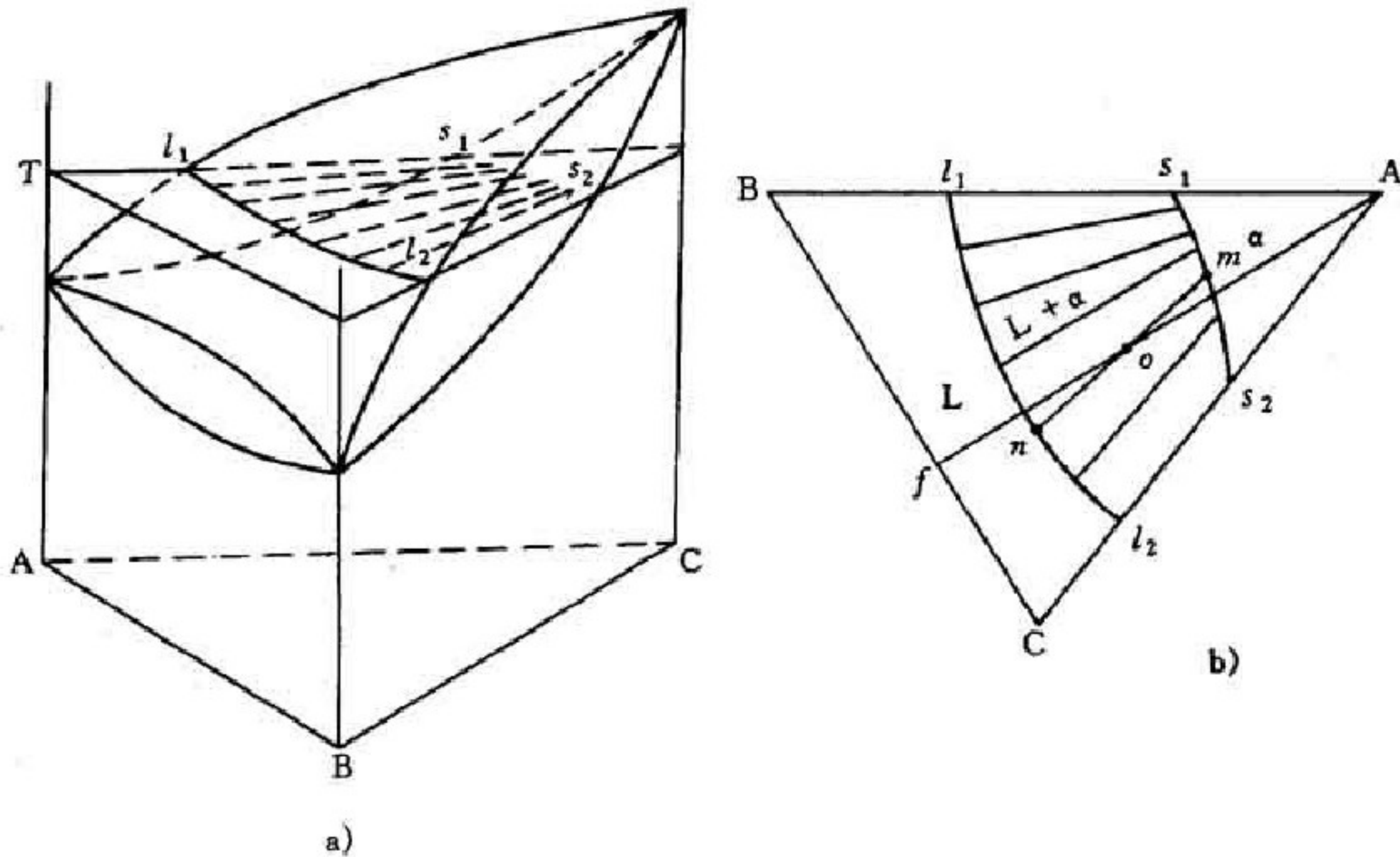


图 5-82 三元匀晶相图的等温截面

a) 在  $T$  温度作等温截面 b) 等温截面上的共轭连线



## 4. 变温截面（垂直截面）

固定一个成分变量并保留温度变量的截面图，必定与浓度三角形垂直，所以称为垂直截面，或称为变温截面。常用的垂直截面有两种：一种是通过浓度三角形的顶角，使其他两组元的含量比固定不变，如图8.8(a)的Ck垂直截面；另一种是固定一个组元的成分，其他两组元的成分可相对变动，如图8.8(a)的ab垂直截面。ab截面的成分轴的两端并不代表纯组元，而代表B组元为定值的两个二元系A+B和C+B。例如图8.8(b)中a点合金只含A和B组元，而b点合金只含B和C组元。注意：

在垂直截面中，二相区中液、固相线不是合金结晶过程中两相的成分变化的轨迹。因为三元合金在结晶过程中，液、固两相成分点的连接线随温度的变化不在一个平面内，连结线的投影是蝴蝶形轨迹。故一般不能在垂直截面运用连结线和确定两相的平衡成分和相对量，除非特殊的垂直截面，连接线始终在该截面内。



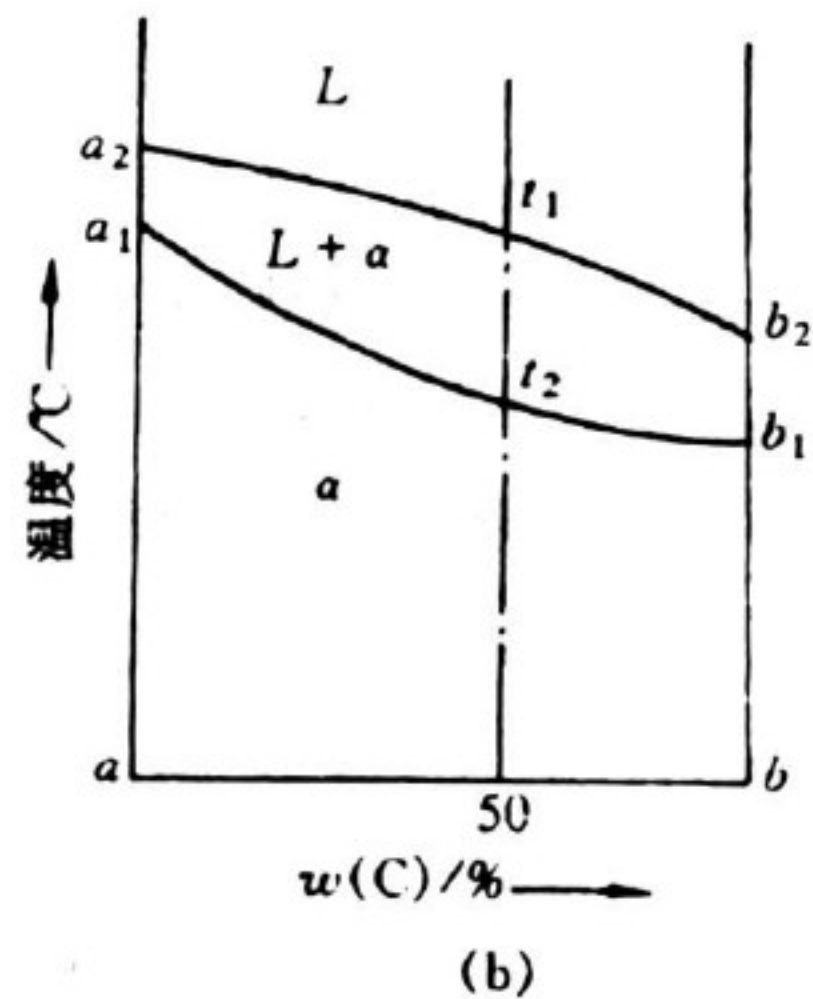
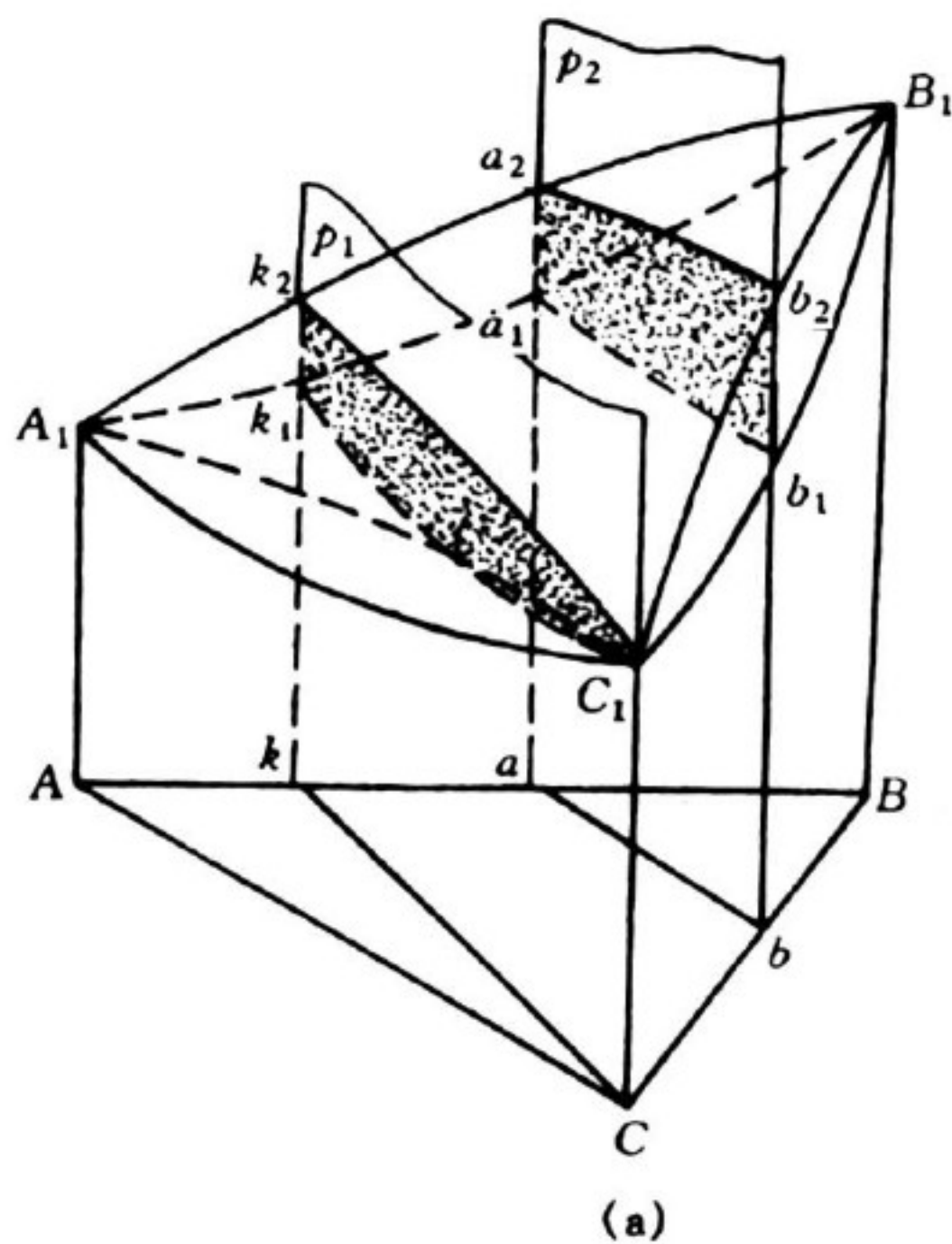


图 8.8 三元匀晶相图上的垂直截面

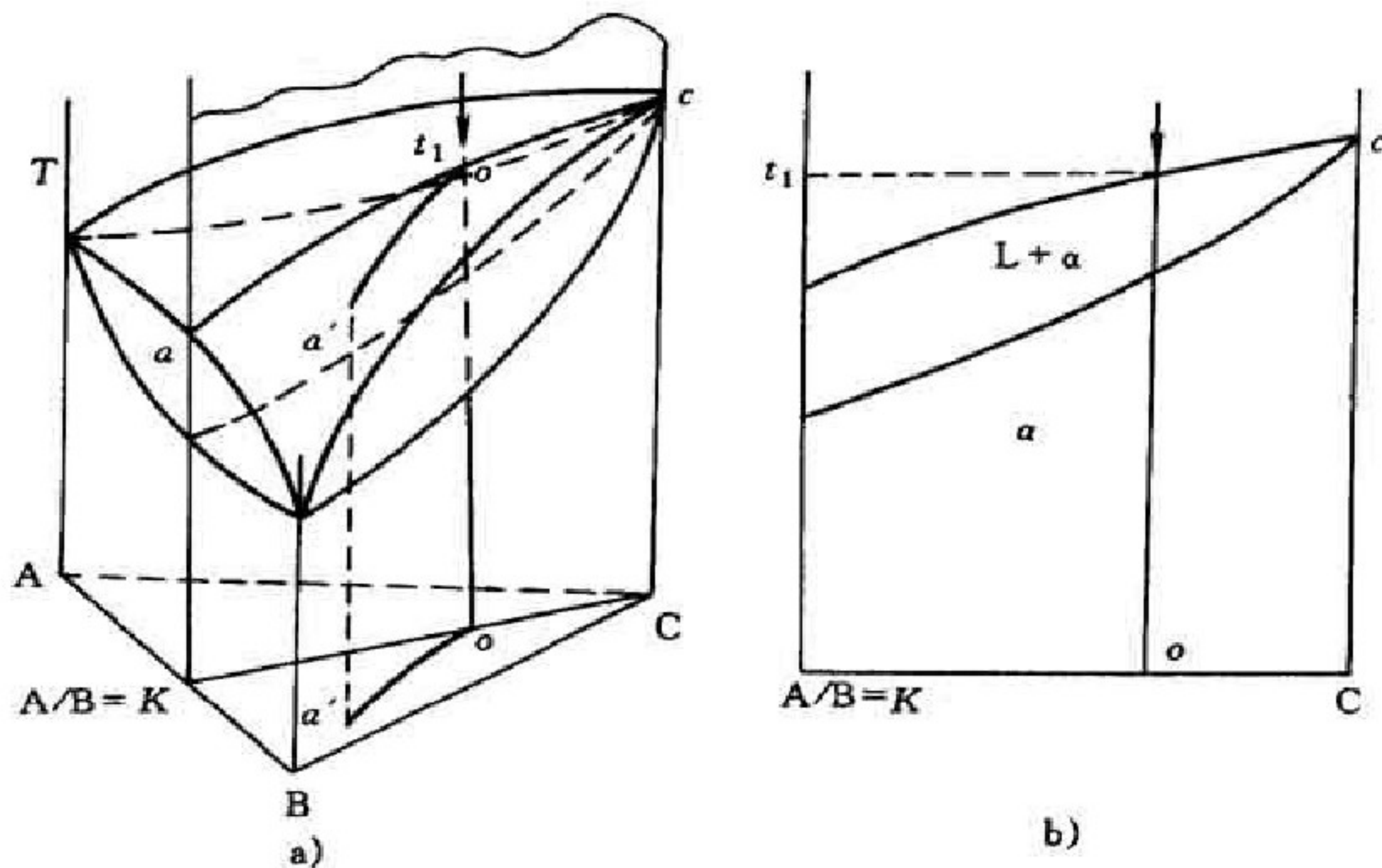


图 5-85 三元相图的变温截面  
(图 a 中  $A/B=K$  直线)  
a) 三元相图 b) 变温截面图



## 5. 三元相图的投影图

为了使复杂二元相图的投影图更加简单、明了，也可以根据需要只把一部分相界面的等温线投影下来。经常用到的是液相面投影图或固相面投影图。图8.9为三元匀晶相图的等温线投影图，其中实线为液相面投影，而虚线为固相面投影。

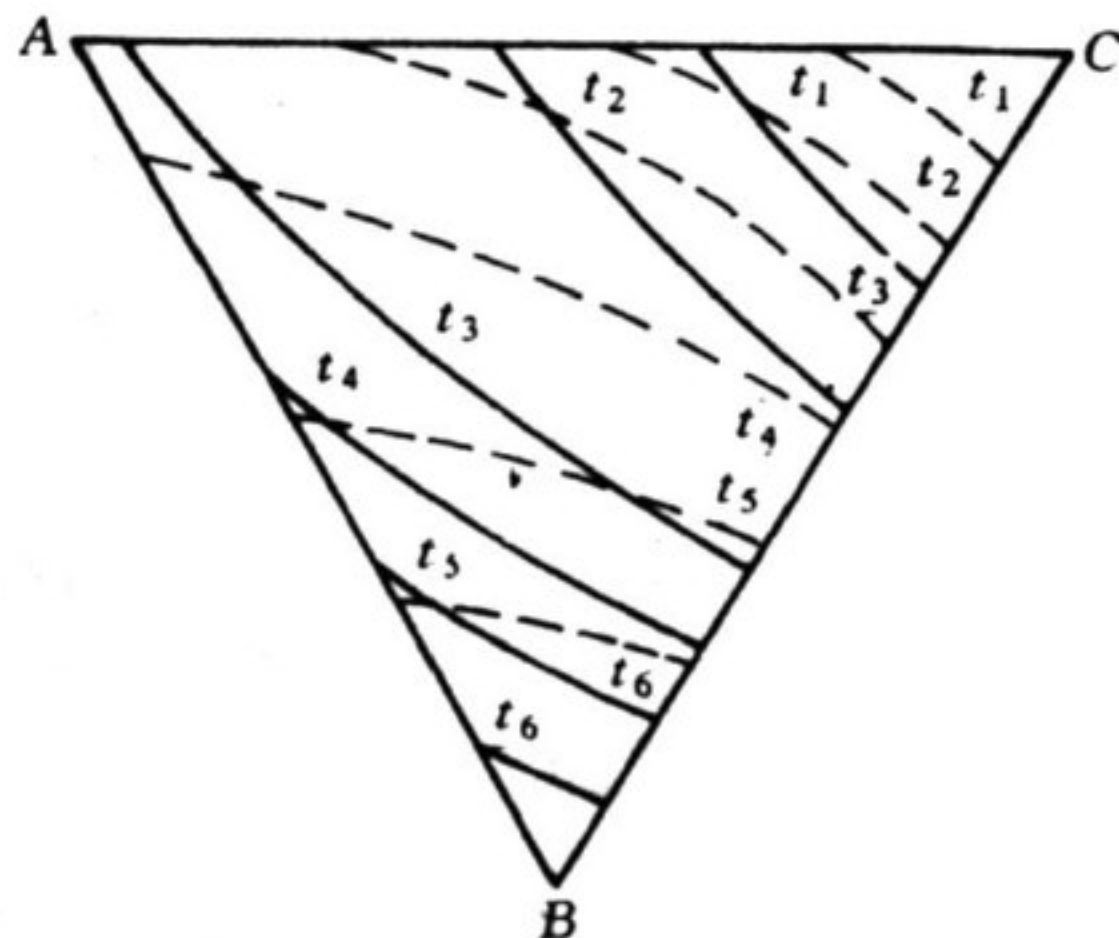


图 8.9 三元合金相图投影图示例

## 8.2 固态不溶解的三元共晶相图

### 1. 相图的空间模型

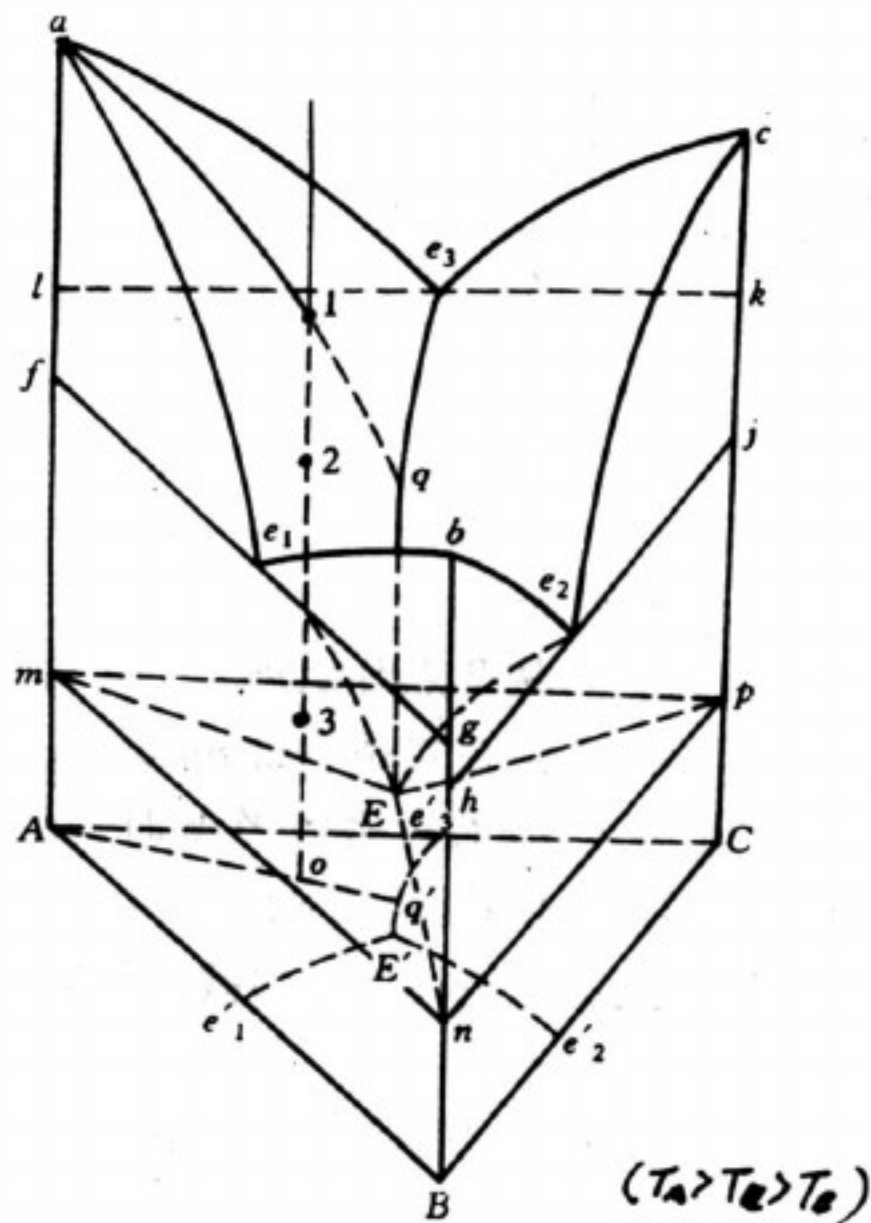


图 8.12 组元在固态完全不互溶的  
三元共晶相图

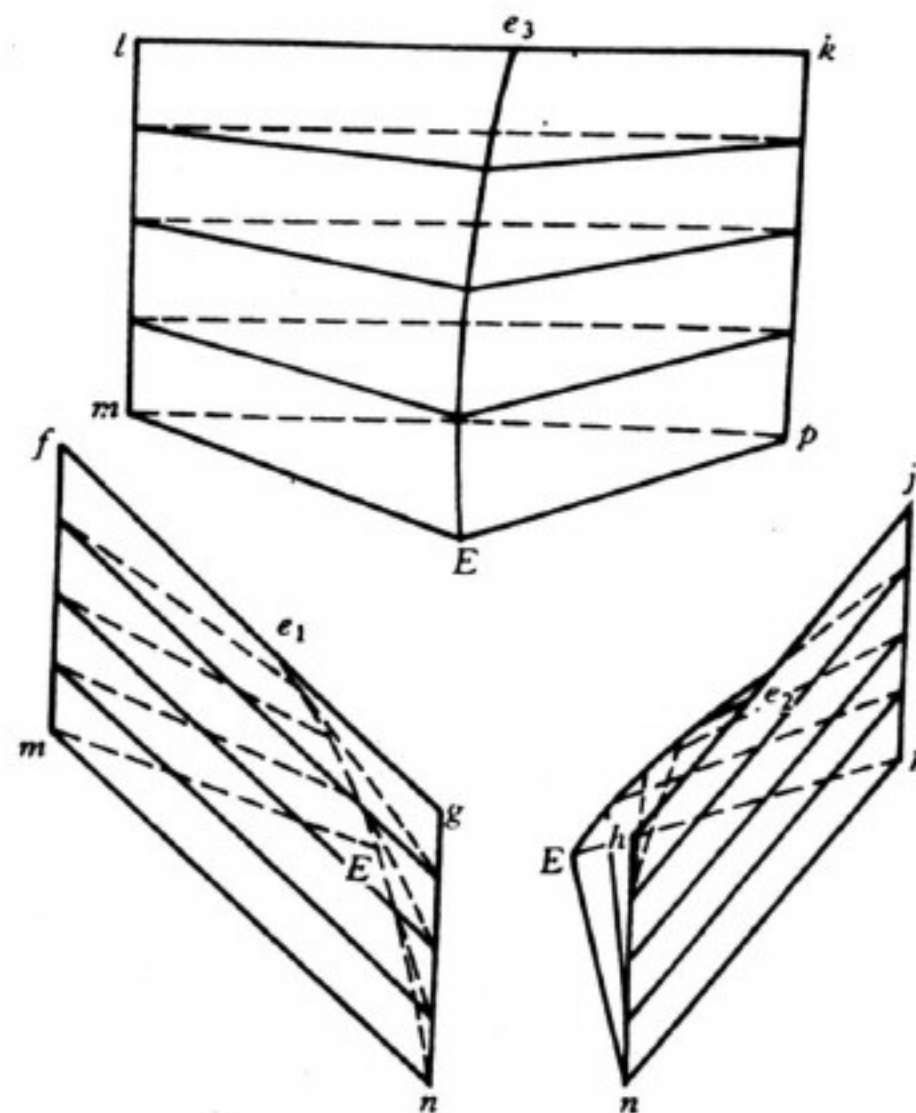


图 8.13 三相平衡区和两相共晶面



图8.  
模型。  
A、B  
三条共  
分别  
E 点为  
三相

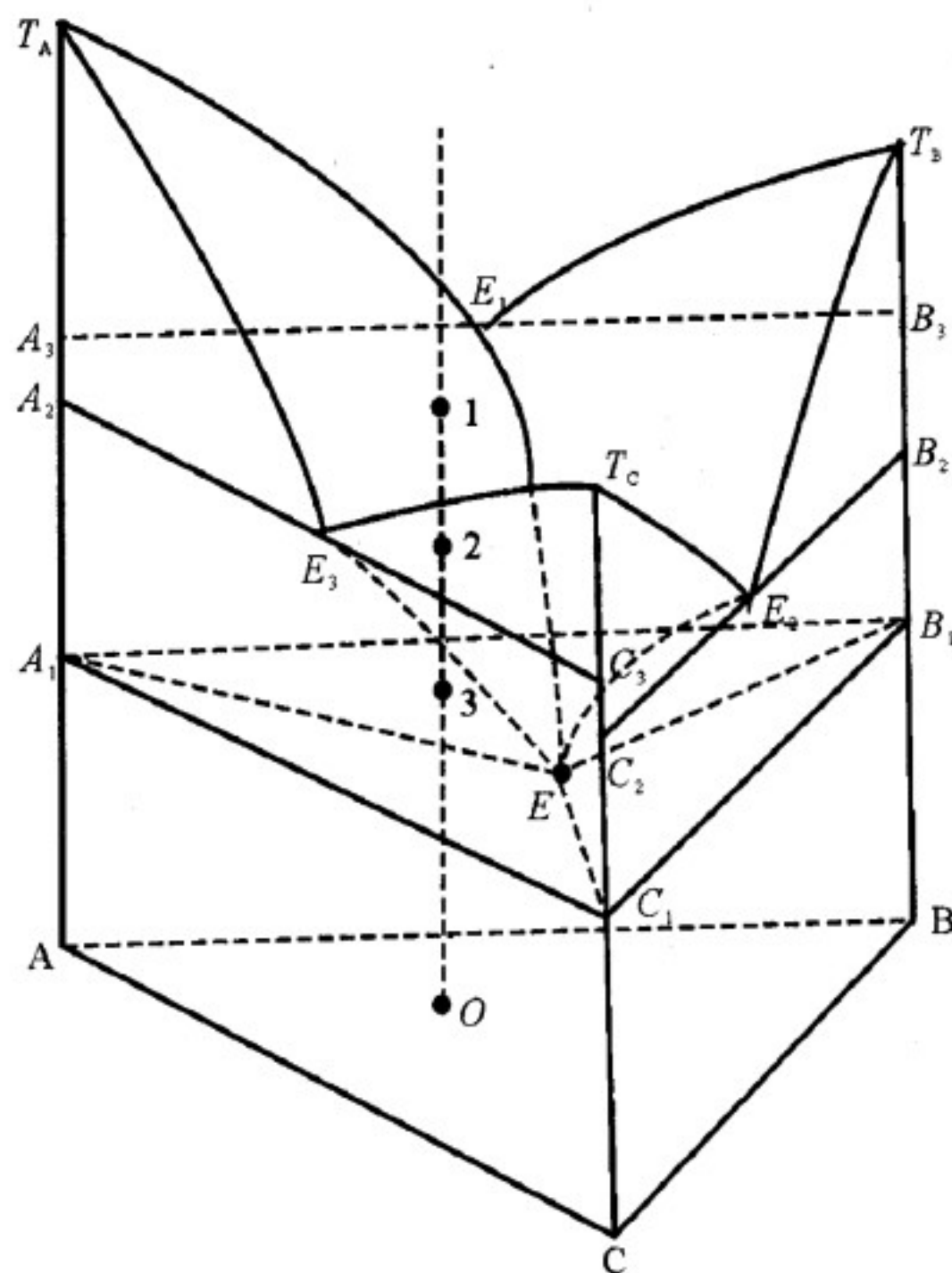


图 4-91 三元共晶相图

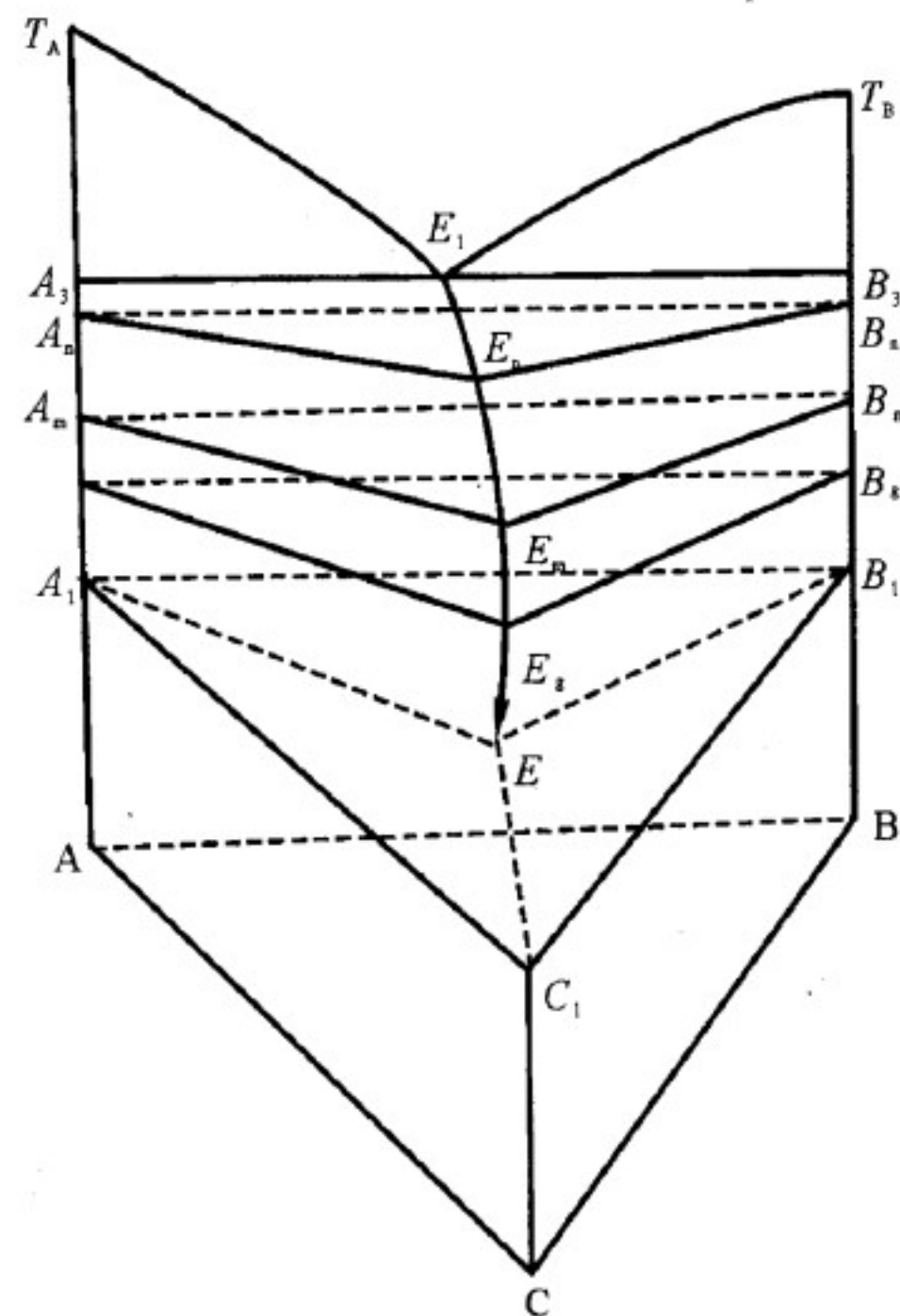


图 4-92 三相平衡区与两相平衡面



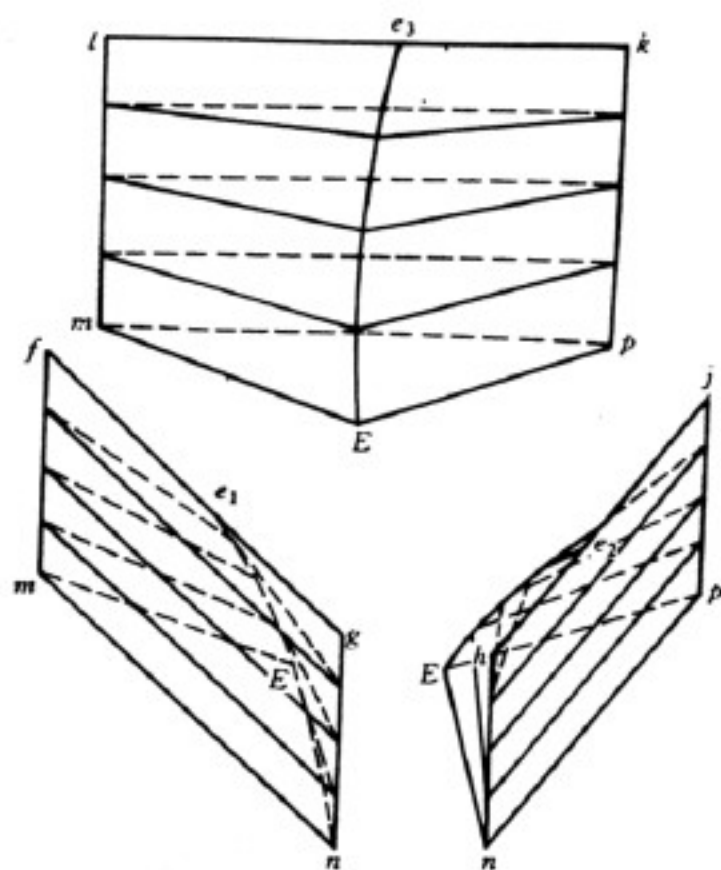


图 8.13 三相平衡区和两相共晶面

## 二元共晶转变的空间结构:

- 1) 二元共晶转变空间是三棱柱体，三条棱就是三条单变量线：即  $lm$ ， $e_3E$ ， $kp$ （成分随温度变化的线）；
- 2) 二元共晶的等温截面是由连接线构成的三角形，如连接线  $mE$ ， $Ep$ ， $mp$ ；
- 3) 三棱柱的封口线是二元合金的共晶转变线，如  $le_3k$ ；
- 4) 三棱柱的底面是二元共晶转变结束的终结面，它是一个三角形并与三元共晶开始转变面相重，若液相未耗尽还要进行三元共晶转变，如  $\triangle mEp$ ；
- 5) 二元共晶转变有两个开始面，如  $le_3Eml$  和  $kpEe_3k$ 。

## 2. 垂直截面图

$rs$ 和 $At$ 垂直截面如图8.14所示。注意：

1) 垂直截面图中的水平线不一定是恒温转变线，如两相区和三相区的水平线： $a'q'$ ，

而三相区之间的水平线是恒温转变线；

2)  $At$ 截面是一个特殊截面，结晶出的是纯组元A相，由直线法则可知， $a'q'$ 是连结线，故在该温度可求A和L两相的相对量。

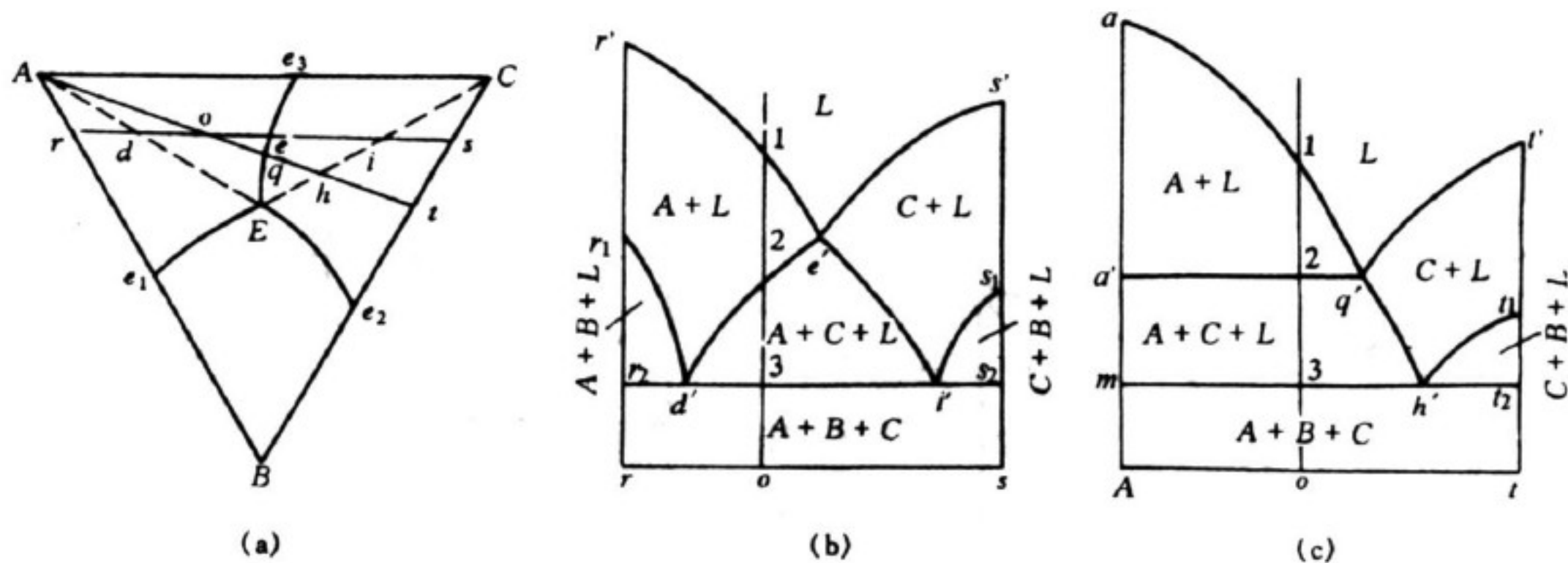


图 8.14 垂直截面图

(a) 浓度三角形 (b)  $rs$  截面 (c)  $At$  截面



8.15是该三元共晶相图在不同温度的水平截面。

- 1) 两相区和单相区之间的分界线是曲线
- 2) 两相区和三相区之间的分界线是直线，实际上是两个相区分界的联结线
- 3) 三相区是三角形

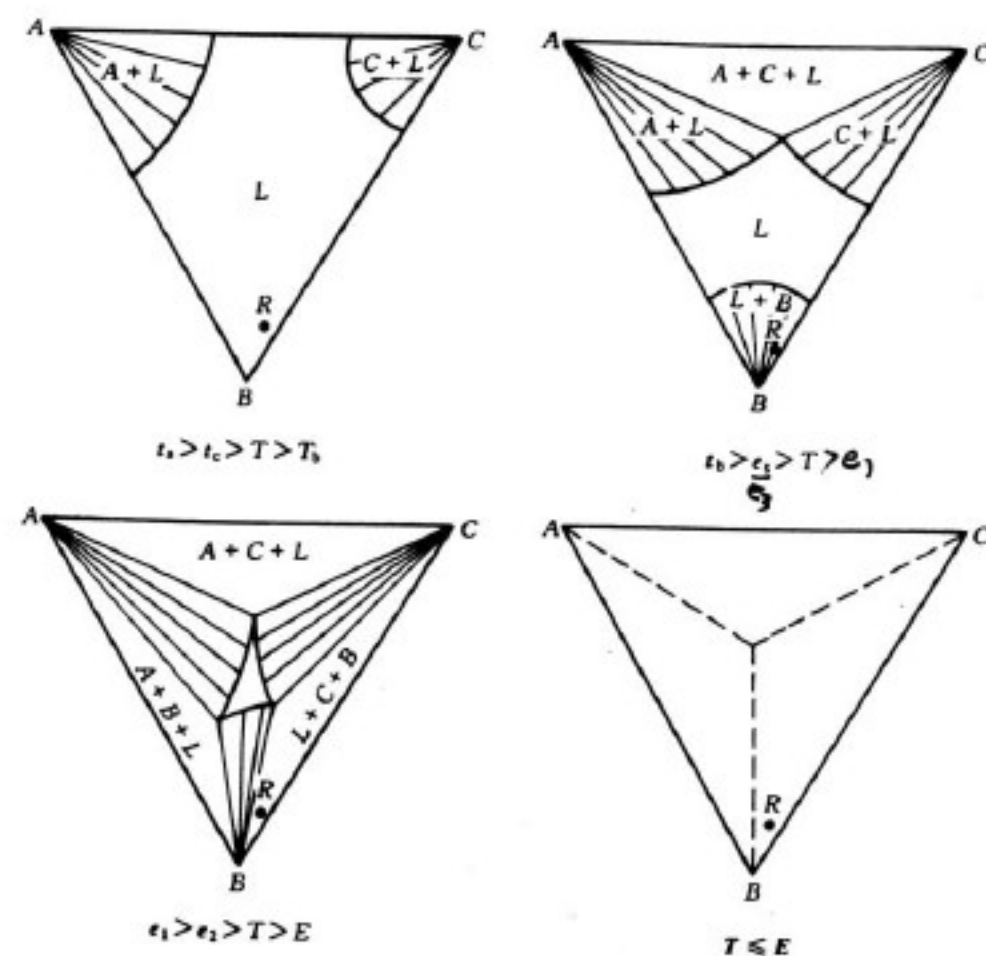


图 8.15 水平截面图



### 3. 投影图

图8. 16所示的投影图中，粗线 $e_1E$ ， $e_2E$ 和 $e_3E$ 是3条共晶转变线的投影，它们的交点是三元共晶点的投影。

利用这个投影图分析合金的凝固过程，不仅可以确定相变临界温度，还能确定相的成分和相对含量

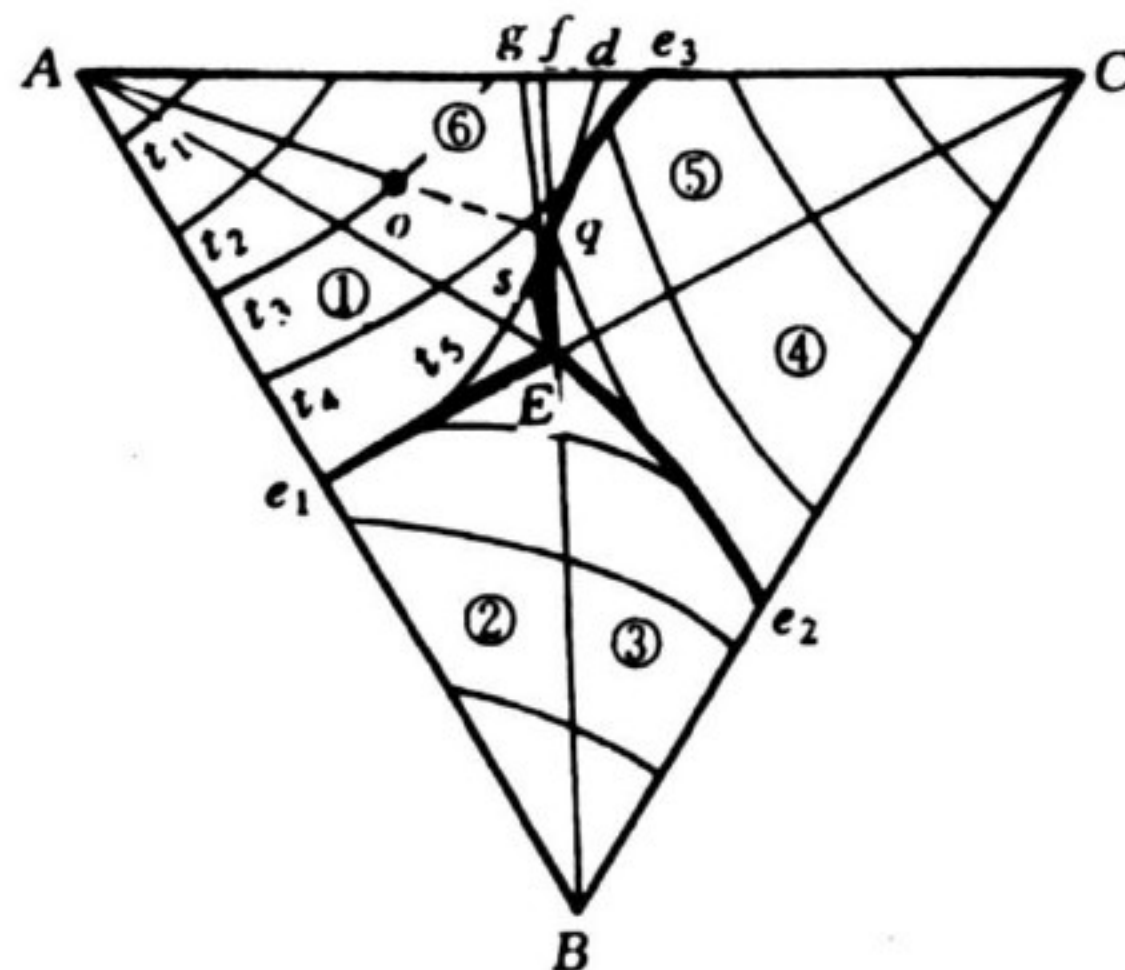


图 8.16 在固态完全不溶的  
三元共晶相图投影图

合金组织组成物的相对含量可以利用杠杆法则进行计算。如合金o刚要发生两相共晶转变时，液相成分为q，初晶A和液相L的质量分数为：

$$\omega_A = \frac{oq}{Aq} \times 100\%,$$

$$\omega_L = \frac{Ao}{Aq} \times 100\%。$$

合金o中两相共晶（A+C）和三相共晶（A+B+C）的质量分数应为：

$$\frac{\omega_{(A+C)}}{\omega_o} = \frac{Eq}{Ef} \times \frac{Ao}{Aq} \times 100\% \quad ,$$

$$\frac{\omega_{(A+B+C)}}{\omega_o} = \frac{qf}{Ef} \times \frac{Ao}{Aq} \times 100\% \quad 。$$



用同样的方法可以分析该合金系所有合金的平衡冷却过程及室温组织。位于投影图中各个区域的合金之室温组织列于表8.1中。

**表 8.1 固态完全不溶、具有共晶转变的三元合金系中典型合金的室温组织**

区 域	室 温 组 织
1	初晶 A + 二相共晶(A + B) + 三相共晶(A + B + C)
2	初晶 B + 二相共晶(A + B) + 三相共晶(A + B + C)
3	初晶 B + 二相共晶(B + C) + 三相共晶(A + B + C)
4	初晶 C + 二相共晶(B + C) + 三相共晶(A + B + C)
5	初晶 C + 二相共晶(A + C) + 三相共晶(A + B + C)
6	初晶 A + 二相共晶(A + C) + 三相共晶(A + B + C)
AE 线	初晶 A + 三相共晶(A + B + C)
BE 线	初晶 B + 三相共晶(A + B + C)
CE 线	初晶 C + 三相共晶(A + B + C)
$e_1E$ 线	二相共晶(A + B) + 三相共晶(A + B + C)
$e_2E$ 线	二相共晶(B + C) + 三相共晶(A + B + C)
$e_3E$ 线	二相共晶(A + C) + 三相共晶(A + B + C)
E 点	三相共晶(A + B + C)



## 4. 相区接触法则

三元相图也遵循二元相图同样的相区接触法则，即相邻相区的相数差1(点接触除外)，不论在空间相固、水平截面或垂直截面中都是这样。因此，任何单相区总是和两相区相邻；两相区不是和单相区相邻，就是和三相区相邻；而四相区一定和三相区相邻，这可在图8.12、图8.14和图8.15中清楚地看到。但应用相区接触法则时，对于立体图只能根据相区接触的面，而不能根据相区接触的线或点来判断；对于截面图只能根据相区接触的线，而不能根据相区接触的点来判断。另外，根据相区接触法，除截面截到四相平面上的相成分点(零变量点)外，截面图中每个相界线交点上必定有四条相界线相交，这也是判断截面是否正确几何法则之一。

## 8.3 固态有限互溶的三元共晶相图

### 1. 空间模型

组元在固态有限互溶的三元共晶相图的空间模型，如图8.17所示。

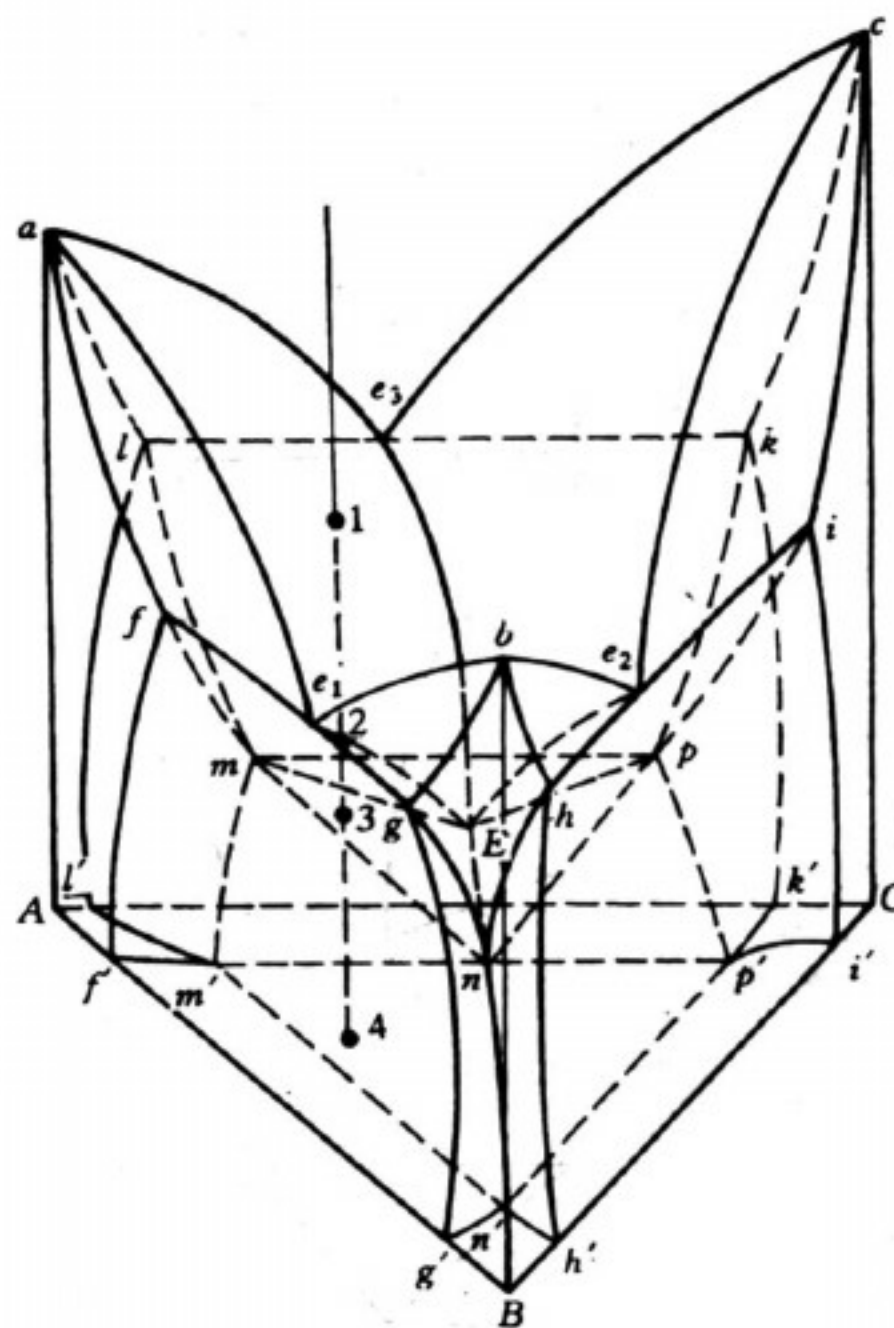


图 8.17 组元在固态有限溶解的共晶相图



## 1) 液相面和固相面

图中每个液、固两相平衡区和单相固溶体区之间都存在一个和液相面共扼的固相面，即

固相面afmla和液相面 $ae_1Ee_3a$ 共扼；

固相面bgnhb和液相面 $be_1Ee_2b$ 共扼；

固相面cipkc和液相面 $ce_2Ee_3c$ 共扼。

液相面表示开始结晶面，固相面表示结晶终结。



因此，组元间在固态有限互溶的三元共晶相图中主要存在五种相界面：3个液相面，**6个两相共晶转变起始面**，3个单相固相面，**3个两相共晶终止面(即为两相固相面)**，1个四相平衡共晶平面和3对共扼的固溶度曲面。它们把相图划分成六种区域，即液相区，3个单相固溶体区，3个液、固二相平衡区，3个固态两相平衡区，3个发生两相共晶转变的三相平衡区及1个固态三相平衡区。为便于理解，图8. 18单独描绘了三相平衡区和固态二相平衡区的形状。

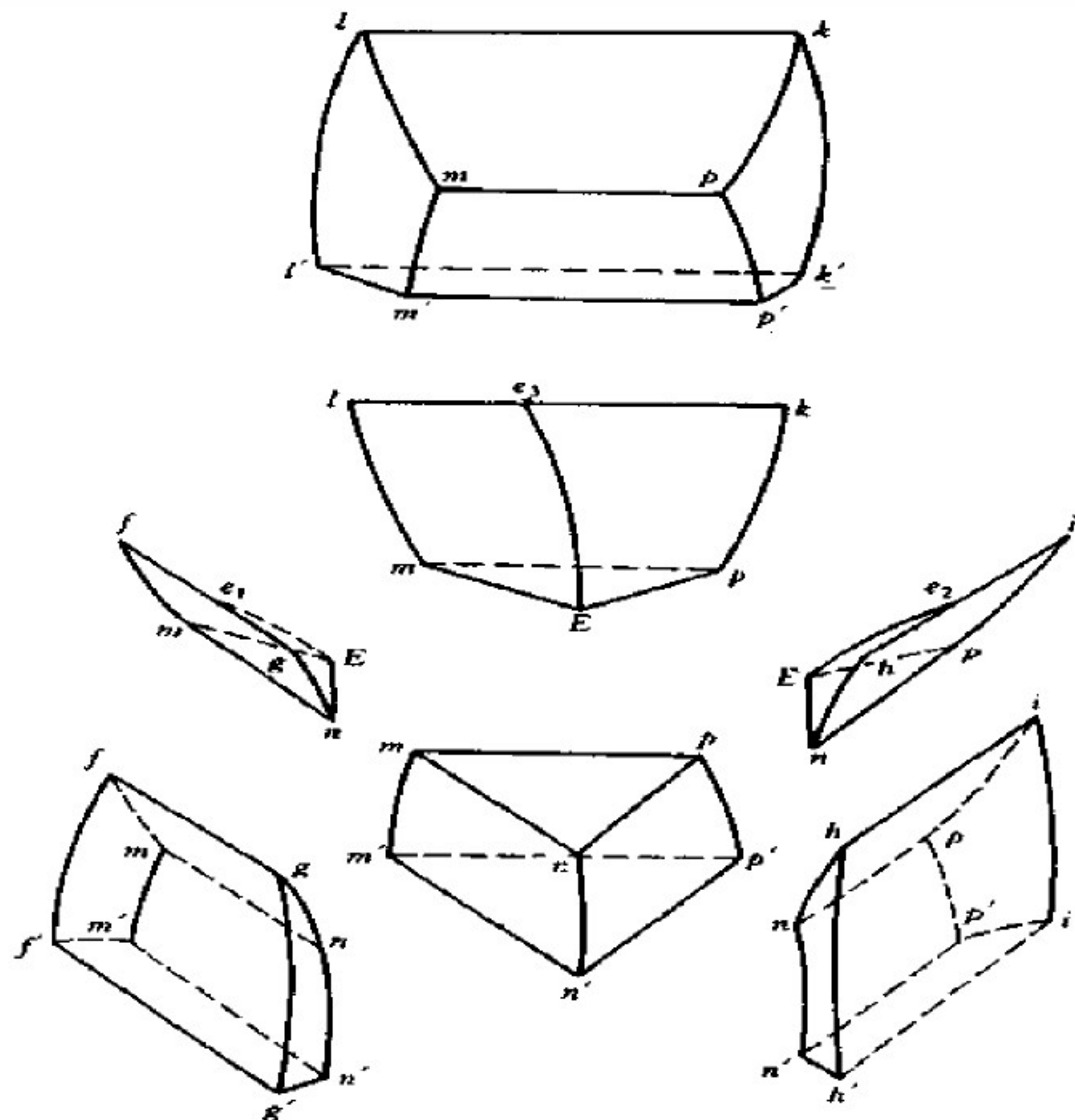
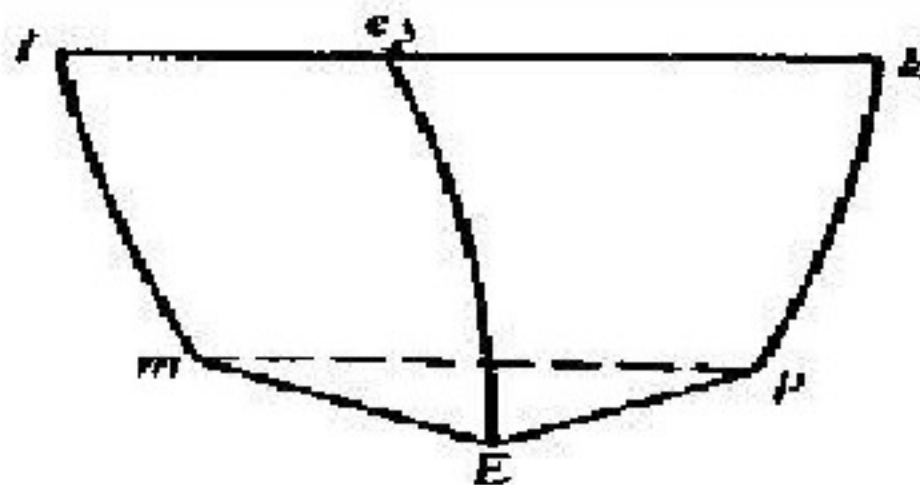


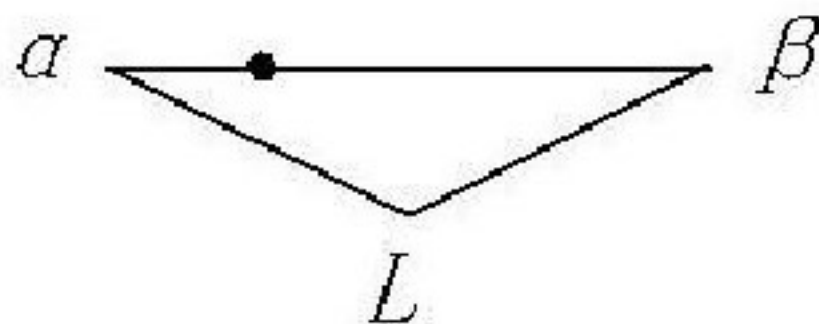
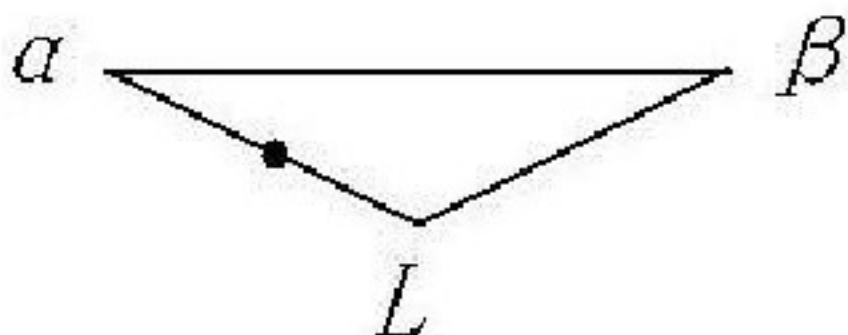
图 8.18 三元共晶相图的两相区和三相区





## 2)二元共晶转变的空间结构:

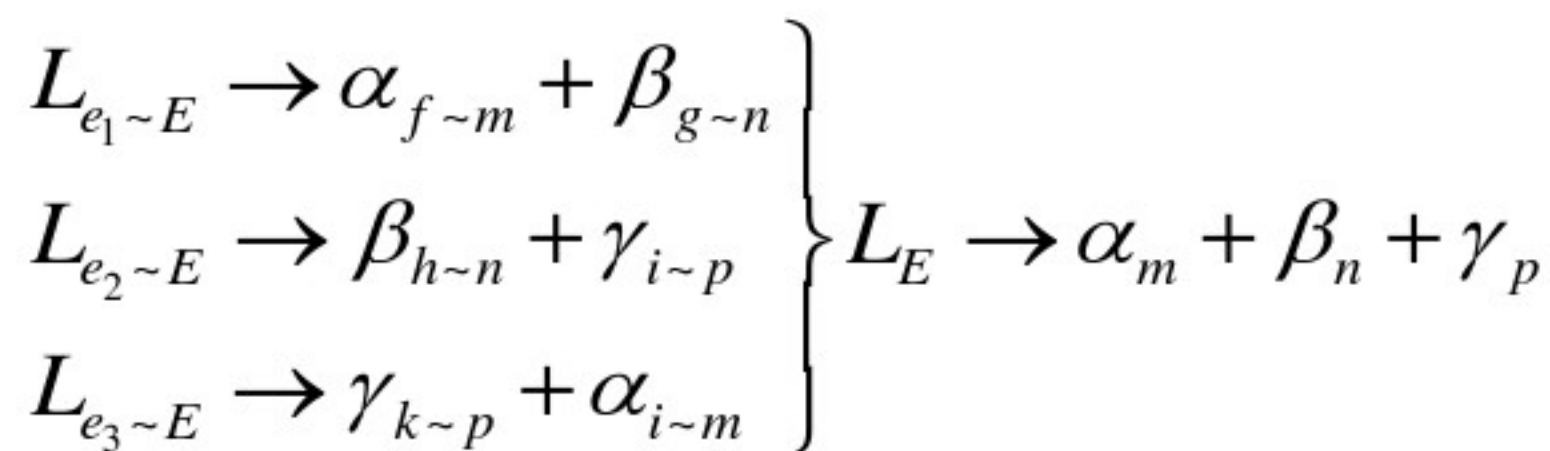
- 1) 二元共晶转变空间是三棱柱体，三条棱就是三条单变量线（某相成分随温度变化的线）；
- 2) 二元共晶的等温截面是由连接线构成的三角形；
- 3) 三棱柱的封口线是二元合金的共晶转变线；
- 4) 三棱柱的底面是二元共晶转变结束的终结面，它是一个三角形并与三元共晶开始转变面相重，若液相未耗尽还要进行三元共晶转变；
- 5) 二元共晶转变有二个开始面；
- 6) 二元共晶有一个侧向终结面，它是三相区和二相区（固相）的分界面。





### 3)三元共晶转变面

成分为E的液相在水平面mnp（三元共晶转变面）发生四相平衡的共晶转变：

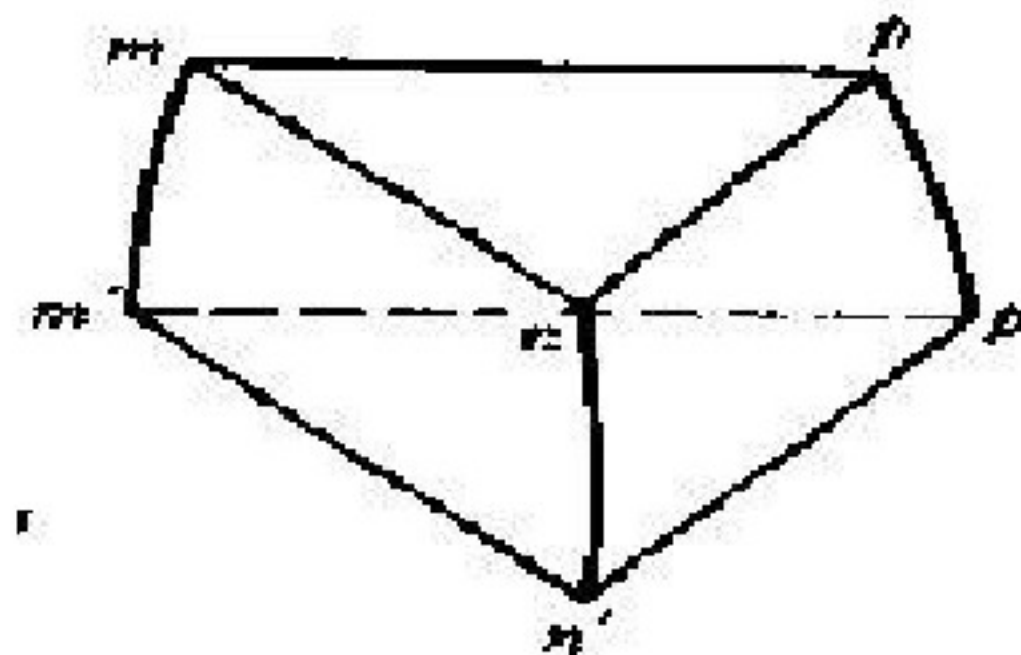


三元共晶转变前

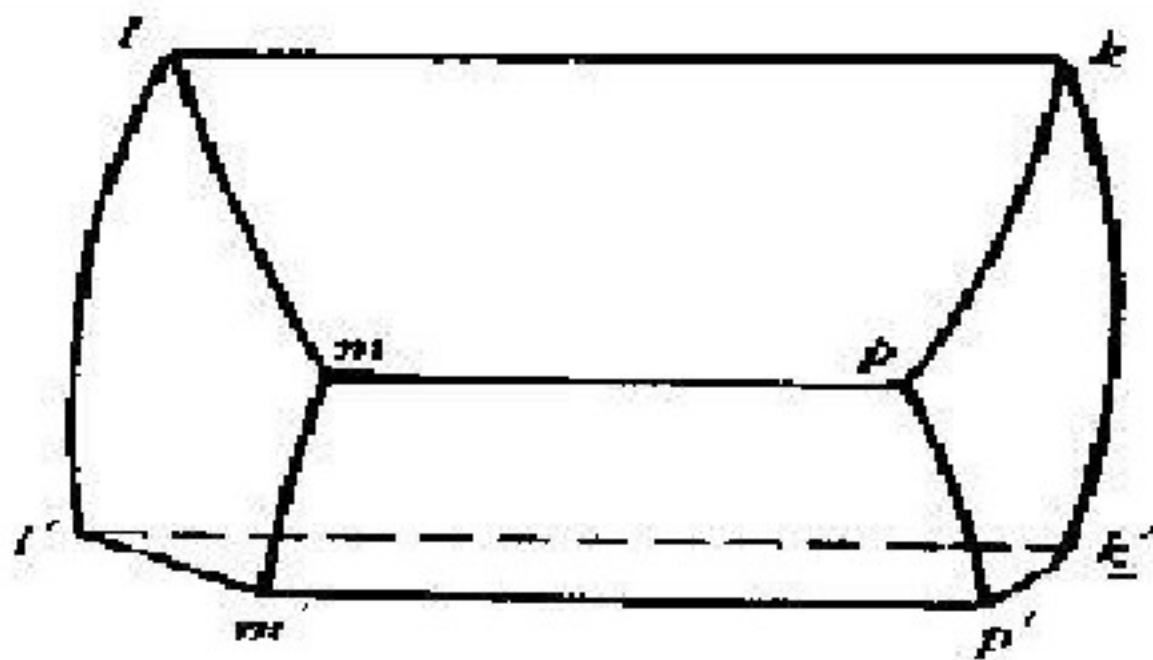
三元共晶转变后

#### 4) 三个固相平衡三棱台

- A) 三条棱为三条单变量线；也称同析线，即有一相同时析出另两相，从而由单相区直接进入三相区；
- B) 顶面与四相平衡面重合，底面与成分三角形重合；
- C) 三个侧面是三相区和两相区（均为固相）的分界面；
- D) 合金进入该相区后，随温度的下降，三相的相对量随之发生改变（由重心定理可知）。







## 5) 固溶体的溶解度曲面

有六个固溶度曲面；

每个固溶度曲面表示有由某个固溶体析出另外两个中的一个固溶体（表示为二次固溶体）；即它表示了单相区（固相）和两相区（固相）的分界面。

## 6) 单相区

A) 四个单相区：一个液相区+三个固相区；

B) 三个液相面之上为液相区 ‘

C) 一个单相区是由一个固相面和两个溶解度曲面构成。

## 2. 投影图

图8.19 为三元共晶相图的投影图。

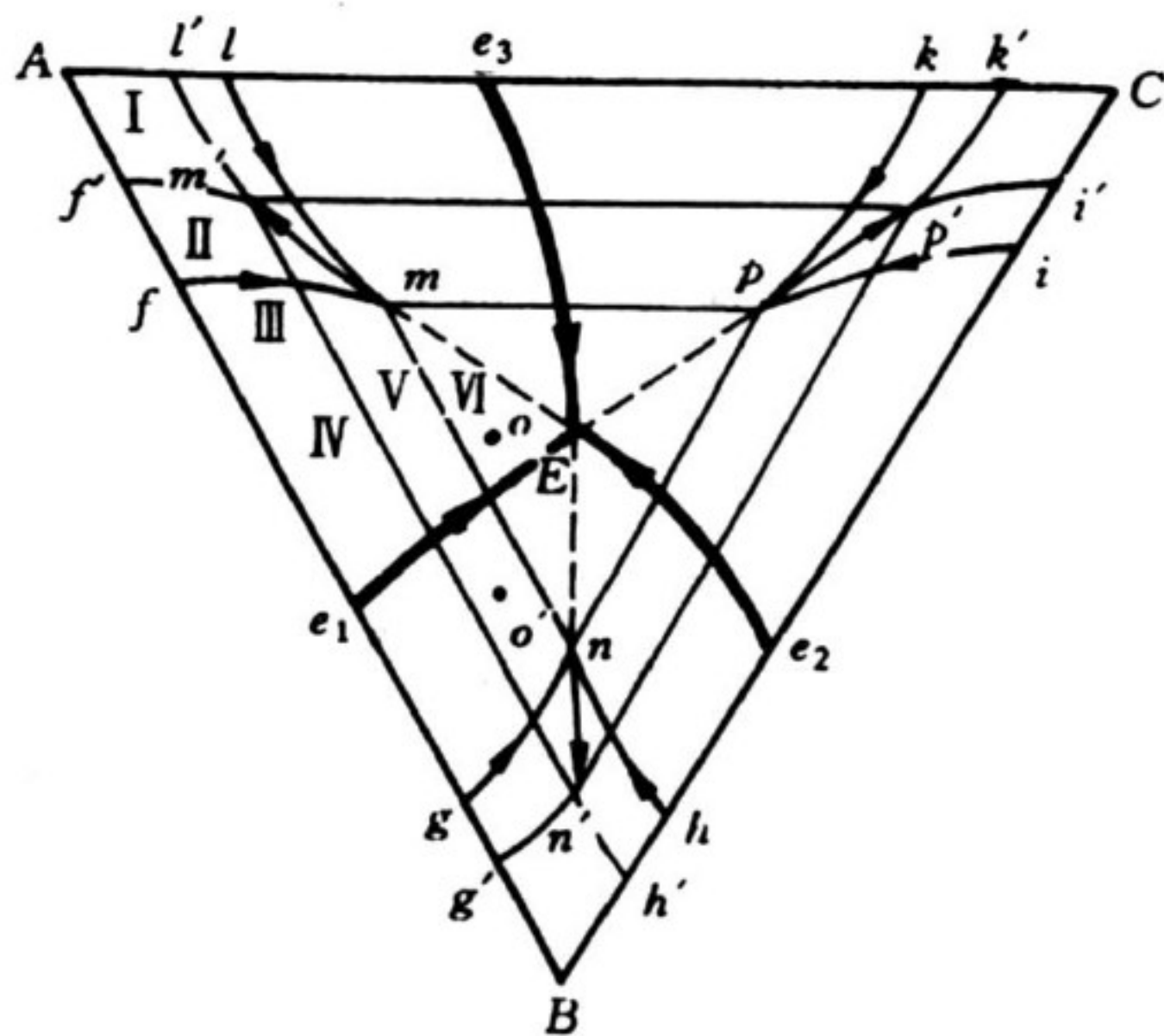


图 8.19 三元共晶相图的投影图



从图中可清楚看到3条共晶转变线的投影 $e_1E$ ,  $e_2E$  和 $e_3E$ 把浓度三角形划分成3个区域 $Ae_1Ee_3A$ ,  $Be_1Ee_2B$ 和 $Ce_2Ee_3C$ , 这是3个液相面的投影。

投影图中间的三角形 $mnp$ 为四相平衡共晶平面。

图8. 20为该三元共晶系四相平衡前后的三相浓度三角形。从图中可看到在四相平衡三元共晶转变之前可具有 $L \longrightarrow \alpha + \beta$ ,  $L \longrightarrow \beta + \gamma$ ,  $L \longrightarrow \gamma + \alpha$ 。而四相平衡共晶转变后进入三个固相平衡区。四相平衡时, 根据相律, 其自由度为零, 即平衡温度和平衡相的成分都是固定的, 故此四相平衡三元共晶转变面为水平三角形。反应相的成分点在3个生成相成分点连接的三角形内。

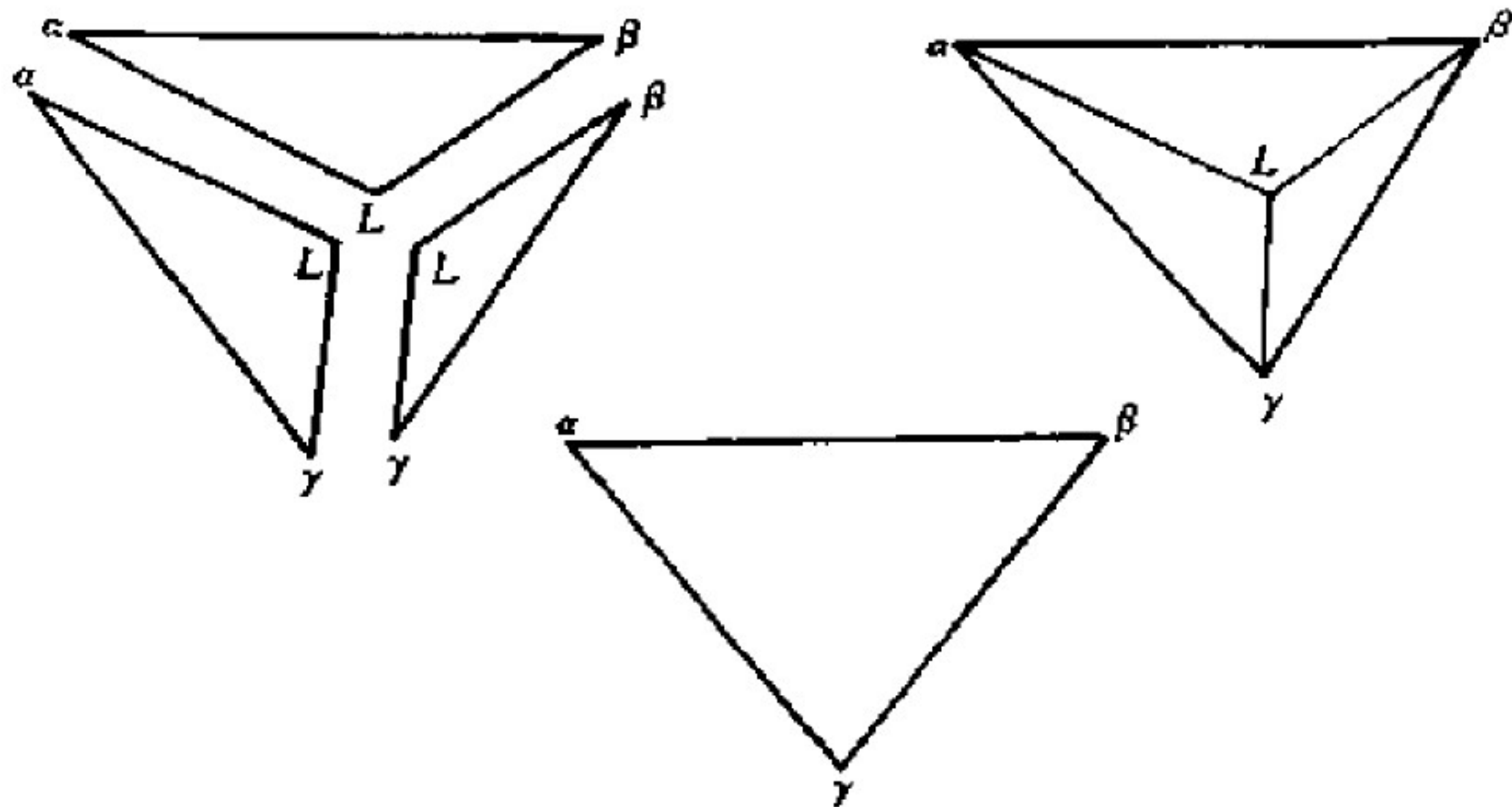


图 8.20 三元共晶系四相平衡前、后的三相浓度三角形



### 3. 截面图

图8. 21为该三元系的不同温度下的**水平截面**。由图中可看到它们的共同特点是：

(1)三相区都呈三角形。这种三角形是共扼三角形，3个顶点与3个单相区相连与这3个 顶点就是该温度下三个平衡相的成分点。

(2)三相区以三角形的边与两相区连接，相界线就是相邻两相区边缘的共扼线。

(3)两相区一般以两条直线及两条曲线作为周界。其中一条直线边与三相区相邻，一对共扼的曲线把组成这个两相区的两个单相区分隔开。

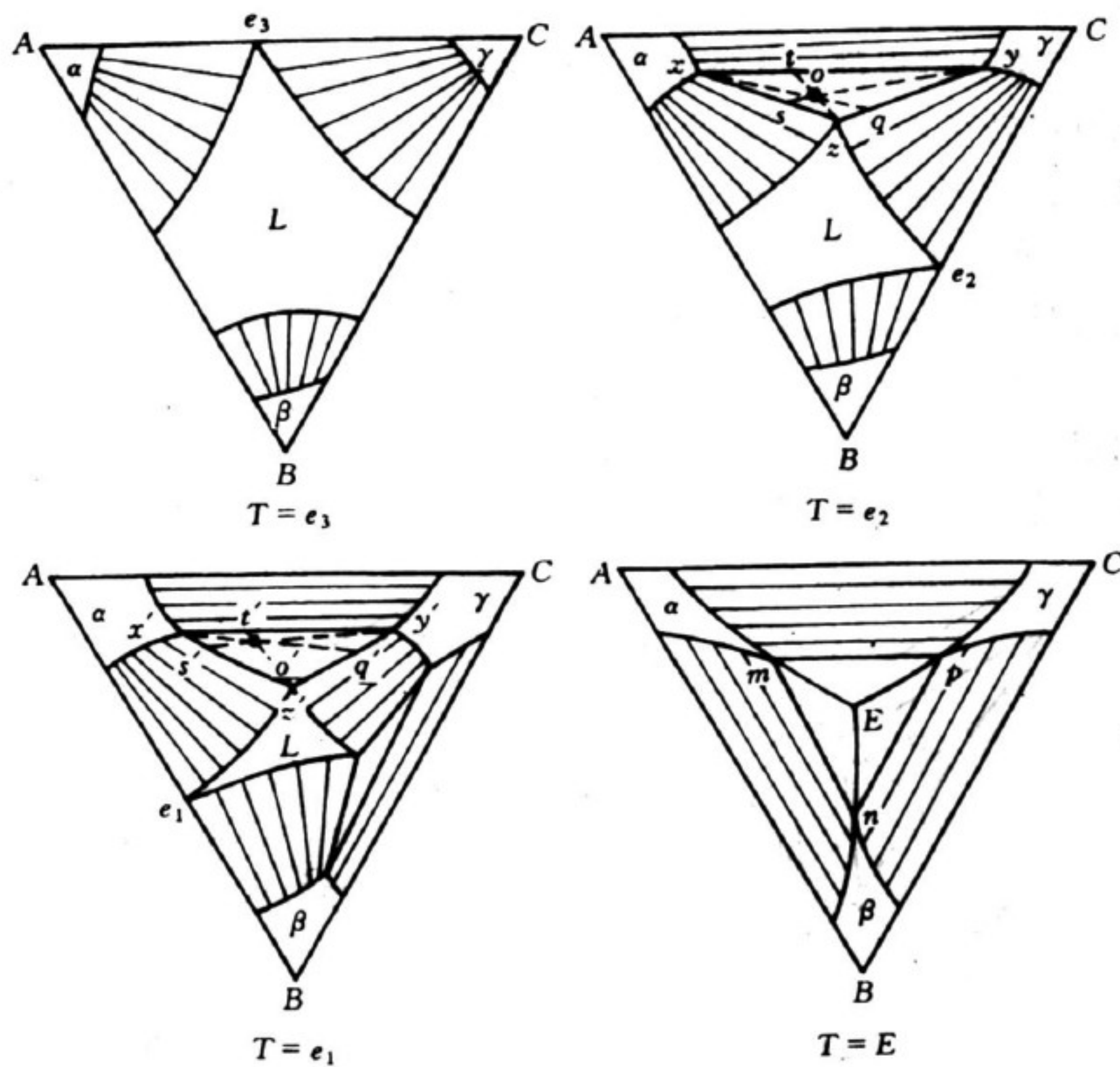


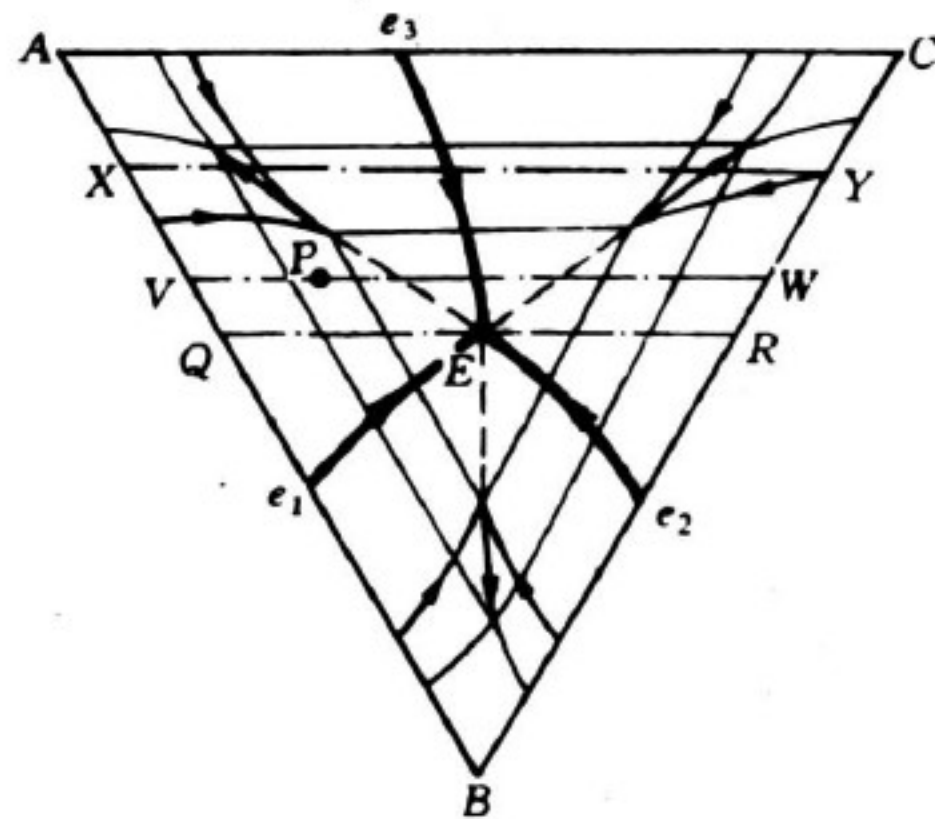
图 8.21 三元共晶相图的水平截面



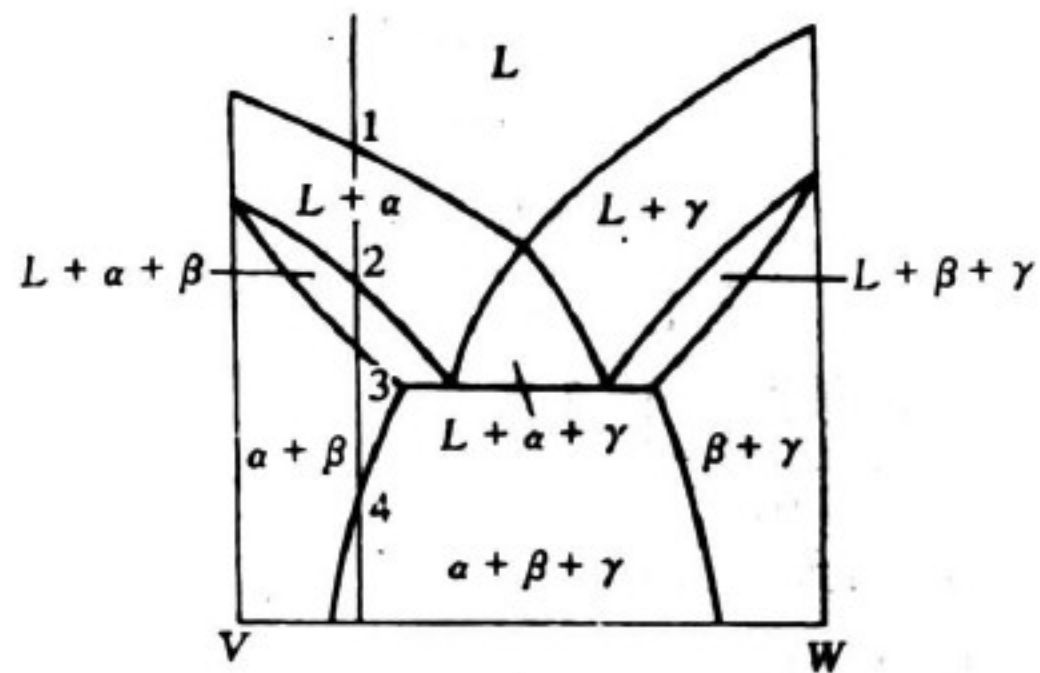
图8. 22为该相图的两种典型**垂直截面**，其中图(a)表示垂直截面在浓度三角形上相应位置，而图(b)为W垂直截面。凡截到四相平衡共晶平面时，在垂直截面中都形成水平线和顶点朝上的曲边三角形，呈现出共晶型四相平衡区和三相平衡区的典型特性。VW截面中就可清楚地看到四相平衡共晶平面及与之相连的4个三相平衡区的全貌。

图8. 22(c)为过E点的QR截面，这里，四相平衡共晶转变这里可一目了然地观察到。

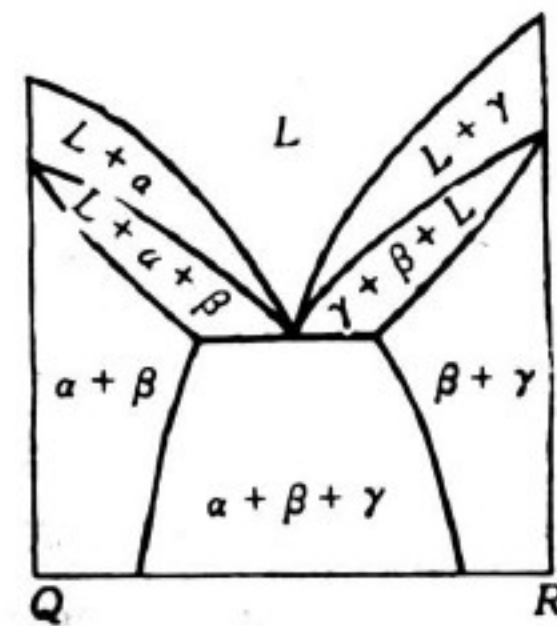




(a) 投影图



(b) VW 截面



(c) QR 截面

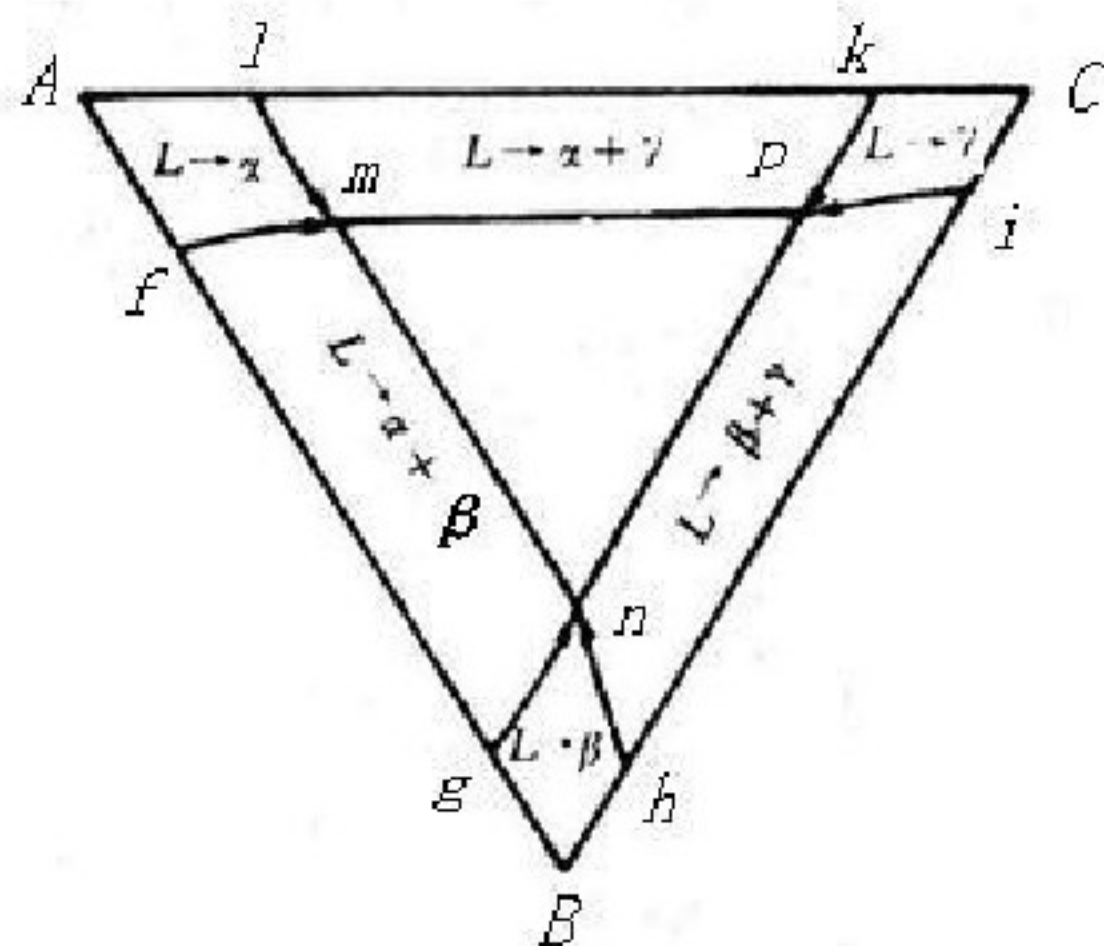
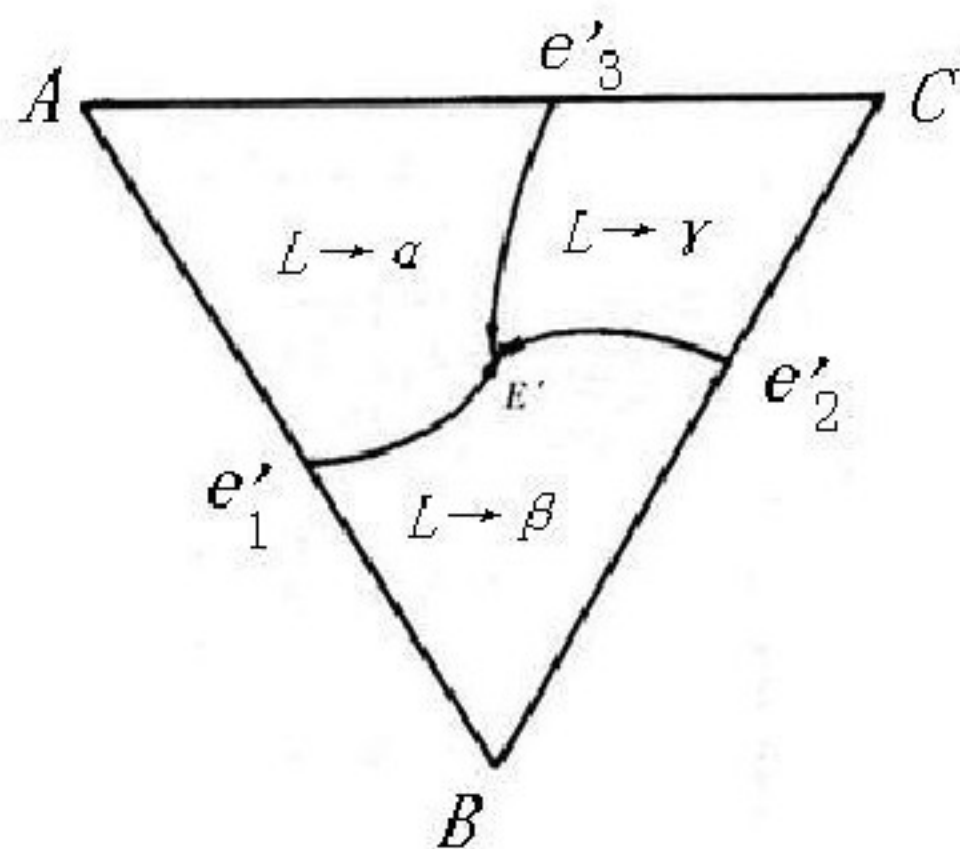
图 8.22 三元共晶相图的垂直截面

(a) 投影图 (b) QR 截面 (c) VW 截面

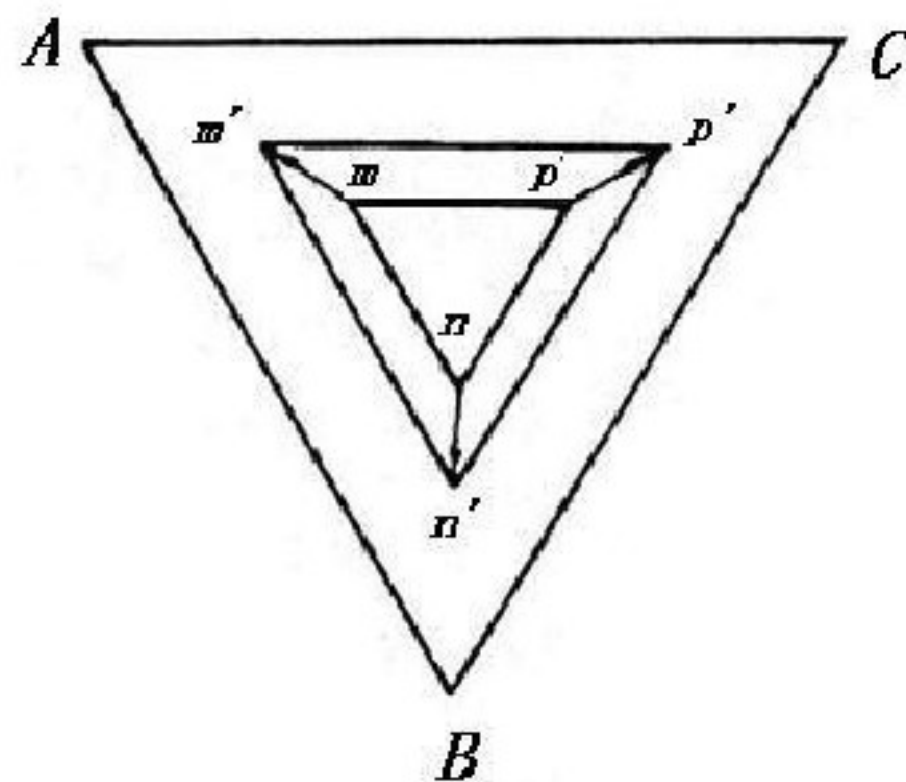
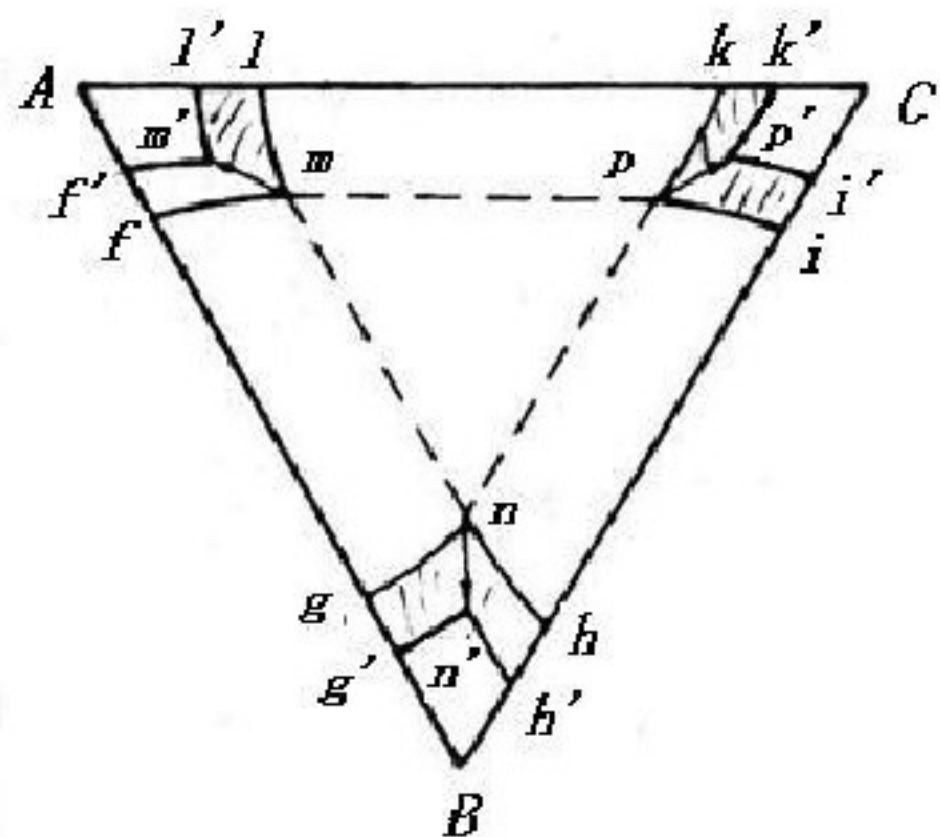




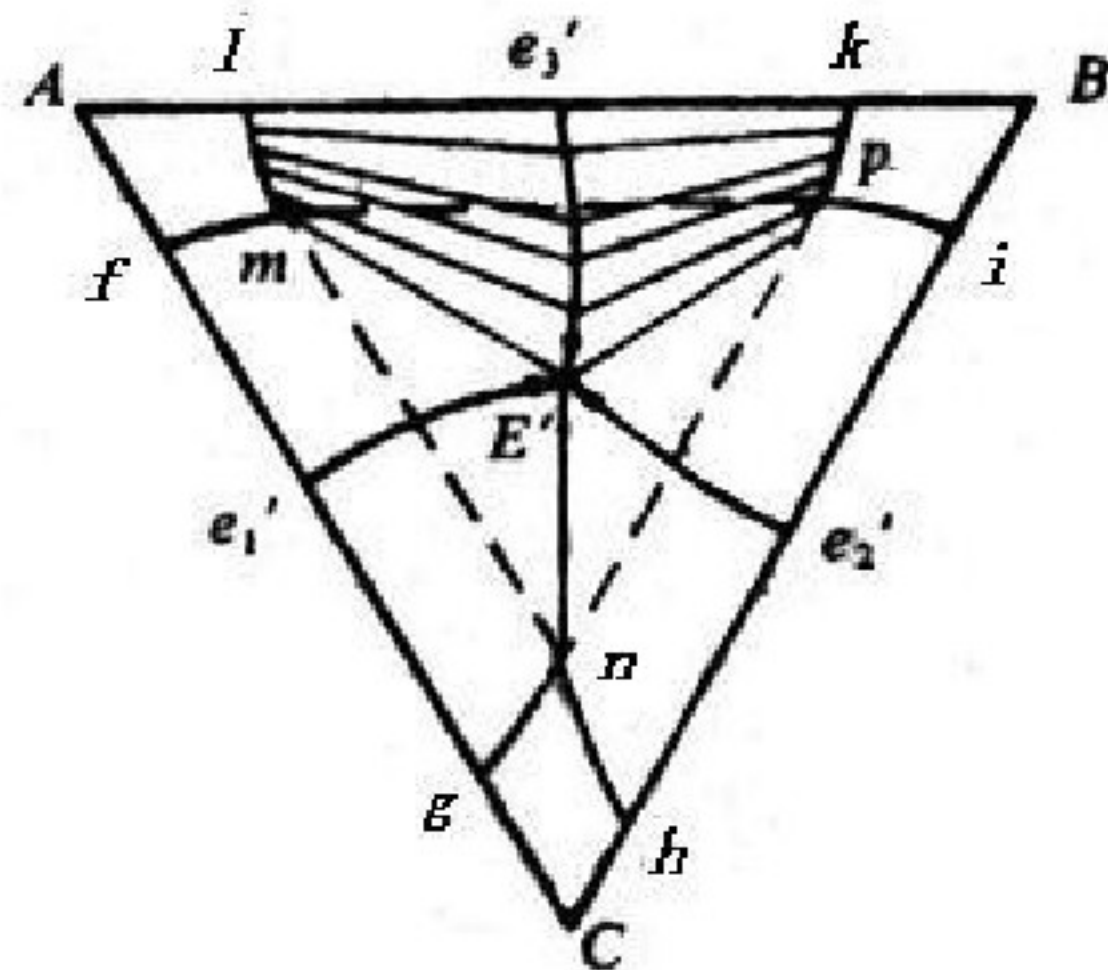
# 投影图的分解



# 投影图的分解



## 投影图的分解





## 合金的结晶过程和组织

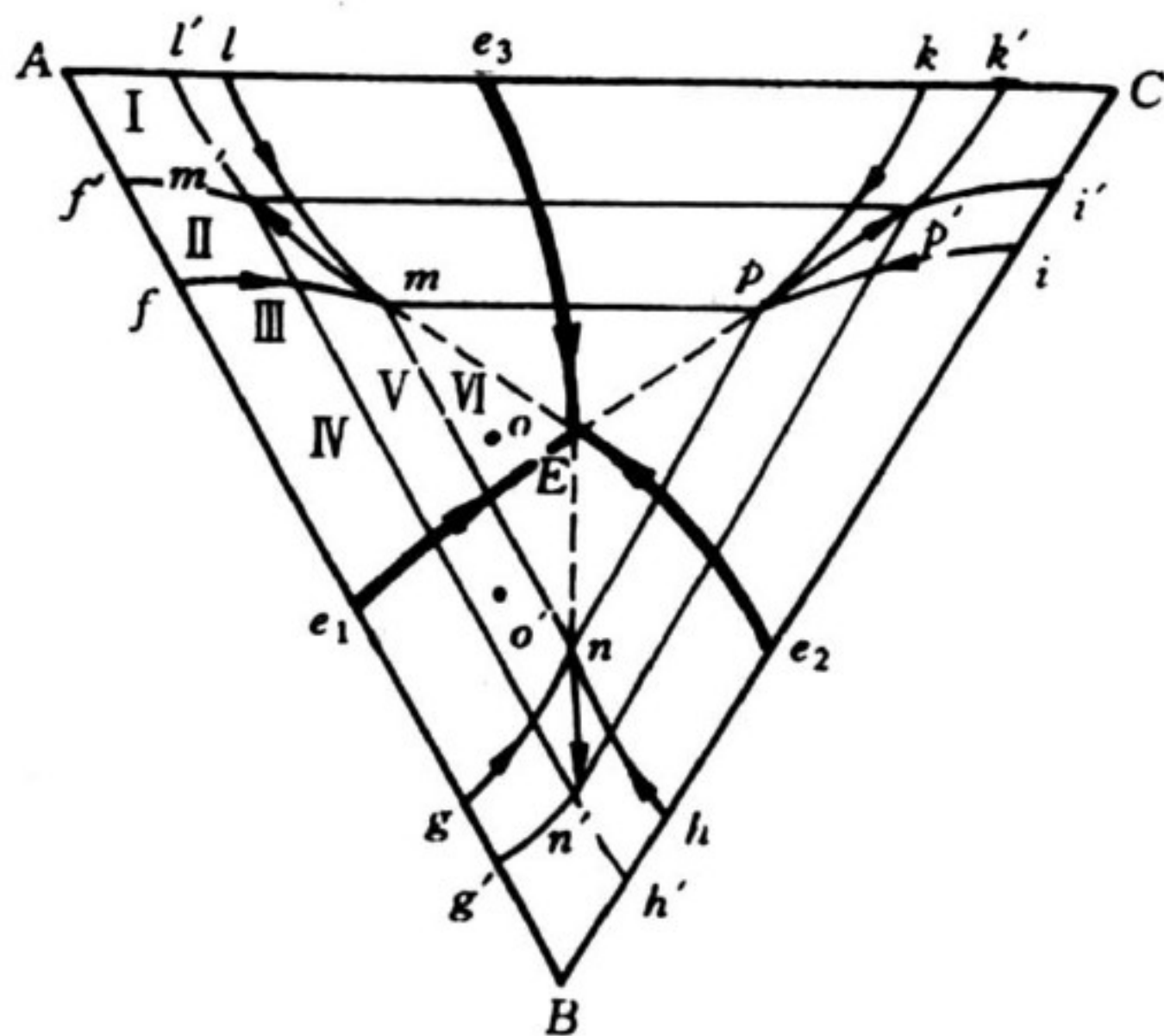


图 8.19 三元共晶相图的投影图

## 2.平衡凝固组织

a)以o合金(VI区) 为例说明凝固的过程和最终的平衡组织。

$L \rightarrow \alpha$  (碰到液相面)

$L \rightarrow \alpha + \beta$  (固相成分到达fm线, 液相成分到达e<sub>1</sub>E线)

$L \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$  (  $\alpha$ 固相成分沿fm线到达m点,  $\beta$ 固相成分沿gn线到达n点, 液相成分沿e<sub>1</sub>E到达E点)

$\alpha \rightarrow \beta_{II} + \gamma_{II}$   $\alpha$  相成分沿同析线mm'至m'

$\beta \rightarrow \alpha_{II} + \gamma_{II}$   $\beta$  相成分沿同析线nn'至n'

$\gamma \rightarrow \alpha_{II} + \beta_{II}$   $\gamma$  相成分沿同析线pp'至p'

平衡组织:  $\alpha + (\alpha + \beta) + (\alpha + \beta + \gamma) + \alpha_{II} + \beta_{II} + \gamma_{II}$

## b)其他典型合金的平衡组织

合金所在区	结 晶 过 程	室 温 组 织
I	$L \rightarrow \alpha$	$\alpha$
II	$L \rightarrow \alpha ; \alpha \rightarrow \beta_{II}$	$\alpha + \beta_{II}$
III	$L \rightarrow \alpha ; \alpha \rightarrow \beta_{II} ; \alpha \rightarrow \beta_{II} + \gamma_{II}$	$\alpha + \beta_{II} + \gamma_{II}$
IV	$L \rightarrow \alpha ; L \rightarrow \alpha + \beta ; \alpha \rightarrow \beta_{II} ; \beta \rightarrow \alpha_{II}$	$\alpha + (\alpha + \beta) + \beta_{II} + \alpha_{II}$
V	$L \rightarrow \alpha ; L \rightarrow \alpha + \beta ; \alpha \rightarrow \beta_{II} ; \beta \rightarrow \alpha_{II} ;$ $\alpha \rightarrow \beta_{II} + \gamma_{II} ; \beta \rightarrow \alpha_{II} + \gamma_{II}$	$\alpha + (\alpha + \beta) + \alpha_{II} + \beta_{II} + \gamma_{II}$
VI	$L \rightarrow \alpha ; L \rightarrow \alpha + \beta ; L \rightarrow \alpha + \beta + \gamma ;$ $\alpha \rightarrow \beta_{II} + \gamma_{II} ; \beta \rightarrow \alpha_{II} + \gamma_{II} ;$ $\gamma \rightarrow \alpha_{II} + \beta_{II}$	$\alpha + (\alpha + \beta) + (\alpha + \beta + \gamma)$ $+ \alpha_{II} + \beta_{II} + \gamma_{II}$
VII (在mE上的合金)	$L \rightarrow \alpha ; L \rightarrow \alpha + \beta + \gamma ; \alpha \rightarrow \beta_{II} + \gamma_{II} ;$ $\beta \rightarrow \alpha_{II} + \gamma_{II} ; \gamma \rightarrow \alpha_{II} + \beta_{II}$	$\alpha + (\alpha + \beta + \gamma)$ $+ \alpha_{II} + \beta_{II} + \gamma_{II}$