

# 钛的二元系相图

国防工业出版社

钛的二元系相图

75.719/63

75.719  
610

# 钛的二元系相图

葛志明 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书简要地介绍了五十六个钛的二元系的研究成果，推荐了四十九个钛的二元系相图。

本书可供从事钛合金工作的工人、工程技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

## 钛的二元系相图

葛志明 编

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 3<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 插页 1 63千字

1977年12月第一版 1977年12月第一次印刷 印数：0,001—3,700册

统一书号：15034·1606 定价：0.46元

## 编者的话

随着我国社会主义革命和社会主义建设事业的发展，在毛主席革命路线指引下，钛合金的科研、生产发展很快，在国民经济各个领域钛合金的应用日益广泛。为此我们编写了这本小册子，供有关人员参考。

本书简要地介绍了五十六个钛的二元系的研究成果，推荐了四十九个钛的二元系相图。资料的来源只限到1973年底前在公开书刊上发表的研究报告。

为便于读者利用书中引用的相图资料，书后还提供了四个附录。

由于编者知识水平和资料收集的局限性，书中可能有不少缺点和错误，请读者批评指正。

32331

# 目 录

1. Ti-Ag 系..... 5	32. Ti-Os 系.....50
✓ 2. Ti-Al 系..... 6	33. Ti-P 系.....52
3. Ti-As 系..... 9	34. Ti-Pb 系.....52
4. Ti-Au 系.....10	35. Ti-Pd 系.....53
5. Ti-B 系.....12	36. Ti-Pr 系.....55
6. Ti-Be 系.....14	37. Ti-Pt 系.....55
7. Ti-Bi 系.....15	38. Ti-Pu 系.....56
8. Ti-C 系.....16	39. Ti-Re 系.....58
9. Ti-Cd 系.....17	40. Ti-Rh 系.....59
10. Ti-Ce 系.....18	41. Ti-Ru 系.....60
11. Ti-Co 系.....19	42. Ti-S 系.....62
12. Ti-Cr 系.....21	43. Ti-Sb 系.....62
✓ 13. Ti-Cu 系.....22	44. Ti-Sc 系.....63
14. Ti-Er 系.....24	45. Ti-Se 系.....64
✓ 15. Ti-Fe 系.....25	✓ 46. Ti-Si 系.....65
16. Ti-Ga 系.....27	47. Ti-Sn 系.....67
17. Ti-Gd 系.....28	48. Ti-Ta 系.....69
18. Ti-Ge 系.....29	49. Ti-Te 系.....70
✓ 19. Ti-H 系.....30	50. Ti-Th 系.....71
20. Ti-Hf 系.....32	51. Ti-U 系.....72
21. Ti-In 系.....33	52. Ti-V 系.....73
22. Ti-Ir 系.....34	53. Ti-W 系.....75
23. Ti-La 系.....36	54. Ti-Y 系.....77
✓ 24. Ti-Mg 系.....36	✓ 55. Ti-Zn 系.....77
✓ 25. Ti-Mn 系.....37	56. Ti-Zr 系.....78
✓ 26. Ti-Mo 系.....39	参考资料.....80
27. Ti-N 系.....41	附录一 有关元素的物理性能.....87
28. Ti-Nb 系.....43	附录二 原子百分数与重量百分数的换算公式.....91
29. Ti-Nd 系.....44	附录三 晶体结构型式.....92
30. Ti-Ni 系.....45	附录四 元素周期表.....99
31. Ti-O 系.....48	

75.719  
610

# 钛的二元系相图

葛志明 编

5130/13



国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书简要地介绍了五十六个钛的二元系的研究成果，推荐了四十九个钛的二元系相图。

本书可供从事钛合金工作的工人、工程技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

## 钛的二元系相图

葛志明 编

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 3<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 插页 1 63千字

1977年12月第一版 1977年12月第一次印刷 印数：0,001— 3,700册

统一书号：15034·1606 定价：0.46元

## 编者的话

随着我国社会主义革命和社会主义建设事业的发展，在毛主席革命路线指引下，钛合金的科研、生产发展很快，在国民经济各个领域钛合金的应用日益广泛。为此我们编写了这本小册子，供有关人员参考。

本书简要地介绍了五十六个钛的二元系的研究成果，推荐了四十九个钛的二元系相图。资料的来源只限到1973年底前在公开书刊上发表的研究报告。

为便于读者利用书中引用的相图资料，书后还提供了四个附录。

由于编者知识水平和资料收集的局限性，书中可能有不少缺点和错误，请读者批评指正。

32331



# 目 录

1. Ti-Ag 系.....	5	32. Ti-Os 系.....	50
✓ 2. Ti-Al 系.....	6	33. Ti-P 系.....	52
3. Ti-As 系.....	9	34. Ti-Pb 系.....	52
4. Ti-Au 系.....	10	35. Ti-Pd 系.....	53
5. Ti-B 系.....	12	36. Ti-Pr 系.....	55
6. Ti-Be 系.....	14	37. Ti-Pt 系.....	55
7. Ti-Bi 系.....	15	38. Ti-Pu 系.....	56
8. Ti-C 系.....	16	39. Ti-Re 系.....	58
9. Ti-Cd 系.....	17	40. Ti-Rh 系.....	59
10. Ti-Ce 系.....	18	41. Ti-Ru 系.....	60
11. Ti-Co 系.....	19	42. Ti-S 系.....	62
12. Ti-Cr 系.....	21	43. Ti-Sb 系.....	62
✓ 13. Ti-Cu 系.....	22	44. Ti-Sc 系.....	63
14. Ti-Er 系.....	24	45. Ti-Se 系.....	64
✓ 15. Ti-Fe 系.....	25	✓ 46. Ti-Si 系.....	65
16. Ti-Ga 系.....	27	47. Ti-Sn 系.....	67
17. Ti-Gd 系.....	28	48. Ti-Ta 系.....	69
18. Ti-Ge 系.....	29	49. Ti-Te 系.....	70
✓ 19. Ti-H 系.....	30	50. Ti-Th 系.....	71
20. Ti-Hf 系.....	32	51. Ti-U 系.....	72
21. Ti-In 系.....	33	52. Ti-V 系.....	73
22. Ti-Ir 系.....	34	53. Ti-W 系.....	75
23. Ti-La 系.....	36	54. Ti-Y 系.....	77
✓ 24. Ti-Mg 系.....	36	✓ 55. Ti-Zn 系.....	77
✓ 25. Ti-Mn 系.....	37	56. Ti-Zr 系.....	78
✓ 26. Ti-Mo 系.....	39	参考资料.....	80
27. Ti-N 系.....	41	附录一 有关元素的物理性能.....	87
28. Ti-Nb 系.....	43	附录二 原子百分数与重量百分数的换算公式.....	91
29. Ti-Nd 系.....	44	附录三 晶体结构型式.....	92
30. Ti-Ni 系.....	45	附录四 元素周期表.....	99
31. Ti-O 系.....	48		

# 1. Ti-Ag 系

根据资料[1~4], Ti-Ag系相图的富钛部分表示在图1上。

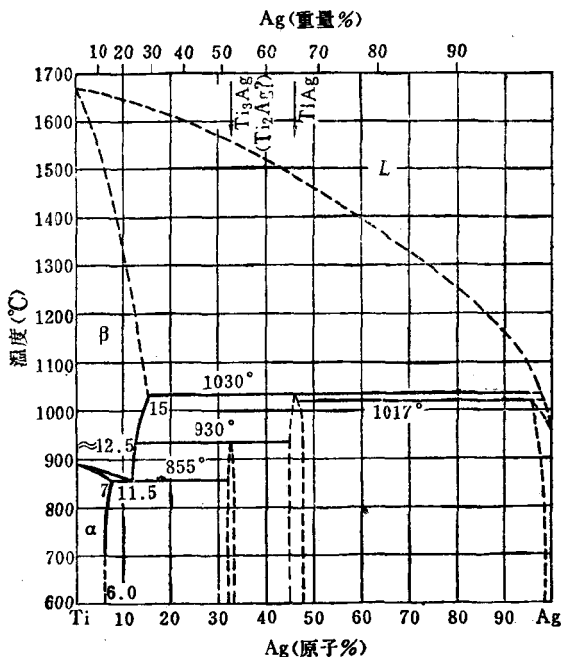


图1 Ti-Ag系相图 [1~4]

银降低钛的 $\alpha/\beta$ 相变温度,在855°C和11.5原子%Ag处, $\beta$ 相发生共析分解,生成 $\alpha + \text{Ti}_3\text{Ag}^{(2)}$ 或 $\alpha + \text{Ti}_2\text{Ag}^{(4)}$ 。银在 $\beta$ -Ti中的固溶度在1030°C时为15原子%,在 $\alpha$ -Ti中的固溶度在共析温度为7原子%,而700°C时则降到

6 原子%。

本系存在两个化合物,即  $\text{TiAg}$  和  $\text{Ti}_3\text{Ag}^{(2,3)}$  或  $\text{Ti}_2\text{Ag}^{(4)}$ , 它们都有一定的均相区。 $\text{TiAg}$  的熔点为  $1030^\circ\text{C}$ , 它是正方晶体, 晶格常数  $a = 2.90 \text{ \AA}$ ,  $c = 8.12 \text{ \AA}^{(4)}$ 。据资料[2]报导,  $\text{Ti}_3\text{Ag}$  的熔点为  $930^\circ\text{C}$ , 具有  $\text{CuAu}_3$  结构; 而资料[4]则认为, 此处是  $\text{Ti}_2\text{Ag}$ , 其熔点为  $945^\circ\text{C}$ , 它具有  $\text{MoSi}_2$  式的正方晶格,  $a = 2.95 \text{ \AA}$ ,  $c = 11.82 \text{ \AA}$ 。据测定,  $\text{TiAg}$  的显微硬度为  $123 \pm 10$  公斤/毫米<sup>2</sup>, 而  $\text{Ti}_2\text{Ag}$  的显微硬度是  $256 \pm 20$  公斤/毫米<sup>2</sup>。(4)。

## 2. Ti-Al 系

根据早期资料绘制的 Ti-Al 系相图的富钛部分有一个宽阔的  $\alpha$  相区, 达 36.5 原子% (24.5 重量%)  $\text{Al}^{(1,6)}$ 。但后来报导, 在这个区域可能存在金属化合物  $\text{Ti}_2\text{Al}^{(9)}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Al}$  和  $\text{Ti}_6\text{Al}^{(7)}$ 。近年来, 各国科研工作者对 Ti-Al 系相图的富钛部分, 进行了大量的研究, 并根据各自所得的试验资料 [8~15], 绘制了八种形式的相图, 见图 2。

依据资料[1, 15], 综合绘制的 Ti-Al 系相图示于图 3。在本系中, 有两个包析转变, 即  $1080^\circ\text{C}$  的  $\beta + \alpha_2 \rightleftharpoons \alpha$  和  $1240^\circ\text{C}$  的  $\beta + \gamma \rightleftharpoons \alpha_2$ , 以及三个包晶反应:  $1460^\circ\text{C}$  的  $L + \beta \rightleftharpoons \gamma$ ,  $1340^\circ\text{C}$  的  $L + \gamma \rightleftharpoons \text{TiAl}_3$  和  $665^\circ\text{C}$  的  $L + \text{TiAl}_3 \rightleftharpoons (\text{Al})$ 。

到目前为止, 被证明确实存在的化合物有  $\text{Ti}_3\text{Al}$  ( $\alpha_2$  相),  $\text{TiAl}$  ( $\gamma$  相) 和  $\text{TiAl}_3$ 。其中  $\text{Ti}_3\text{Al}$  是在  $1120^\circ\text{C}$  从  $\beta$  固溶体中形成的, 是  $\text{Mg}_3\text{Cd}$  型 ( $\text{DO}_{19}$ ) 的有序六方晶体<sup>(15)</sup>, 其晶格

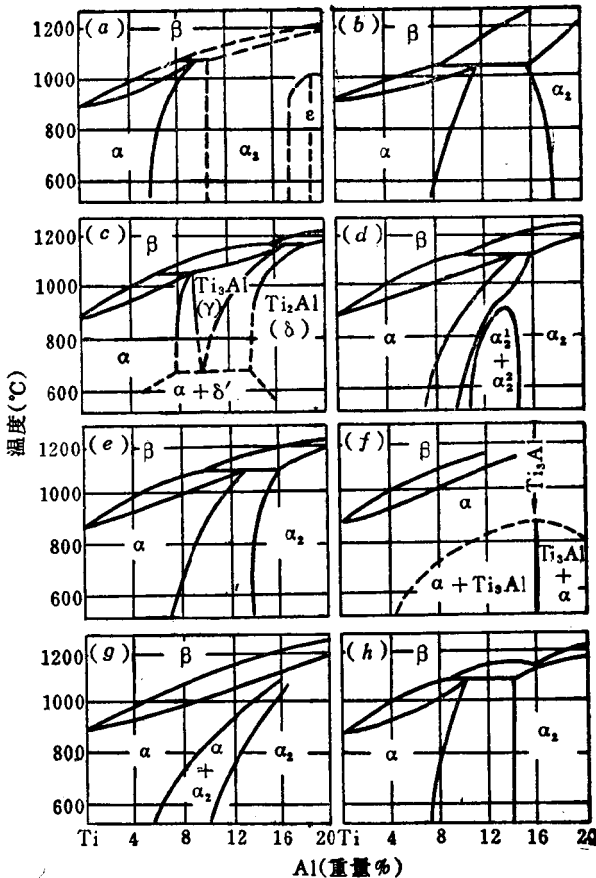


图 2 Ti-Al系相图的不同形式

- (a) — 资料[ 8 ]
- (b) — 资料[ 9 ]
- (c) — 资料[10]
- (d) — 资料[11]
- (e) — 资料[12]
- (f) — 资料[13]
- (g) — 资料[14]
- (h) — 资料[15]

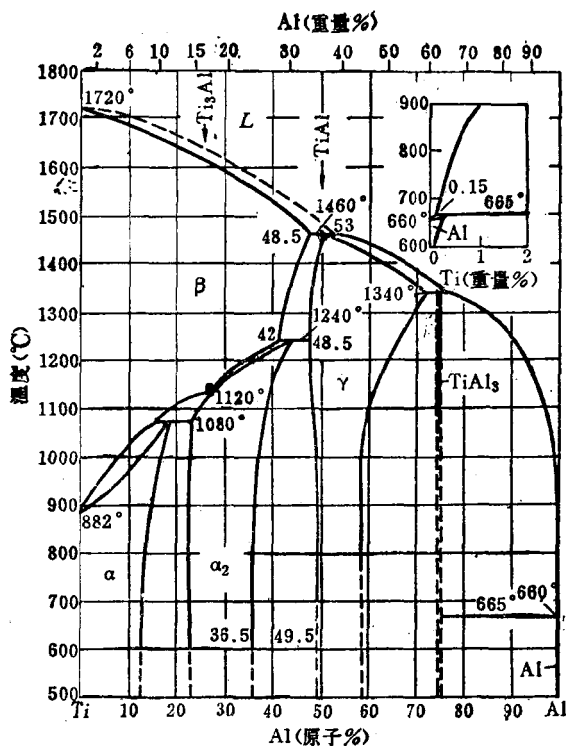


图3 Ti-Al系相图<sup>[1,16]</sup>

常数  $a = 5.783 \text{ \AA}$ ,  $c = 4.6543 \text{ \AA}$ ,  $c/a = 0.8047$ <sup>[13]</sup>。以 Ti<sub>3</sub>Al 为基的  $\alpha_2$  相的均相区从 14 重量% Al 到 24.5 重量% Al。化合物 TiAl 是 CuAu 型的面心正方晶体, 其  $c/a = 1.012 \sim 1.018$ , 以 TiAl 为基的  $\gamma$  相存在的区间为 33~46 重量% Al。TiAl<sub>3</sub> 是 DO<sub>22</sub> 式的正方晶体,  $a = 5.435 \text{ \AA}$ ,  $c = 8.591 \text{ \AA}$ ,  $c/a = 1.581$ <sup>[1]</sup>。

铝提高钛的  $\alpha/\beta$  相变温度。铝在  $\alpha$ -Ti 中的固溶度在

550°C时一般不超过7.5重量%Al,  $\alpha + \alpha_2$ 二相区存在的范围在1080°C时为11~14重量%Al, 在550°C时为7.5~14重量%Al<sup>[15]</sup>。对于铝在 $\alpha$ -Ti中的极限固溶度, 实验资料还不统一, 以600°C为例, 就有6重量%Al<sup>[8]</sup>、7重量%Al<sup>[9]</sup>、低于8重量%Al<sup>[12]</sup>, 等等。

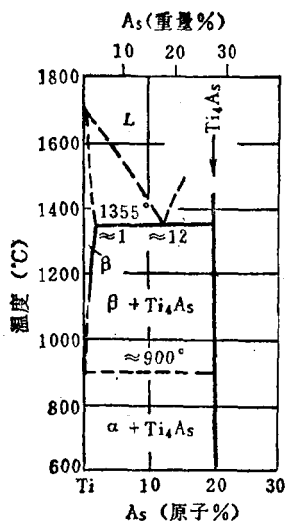
在合金的“组成-性能”图上, 相应于Ti<sub>3</sub>Al的名义成分, 在电阻和硬度曲线上都出现一个极小值(即奇异点), 这证明Ti<sub>3</sub>Al的存在。Ti<sub>3</sub>Al的比电阻为118微欧姆·厘米, 维氏硬度HV=250公斤/毫米<sup>2</sup>[16]。Ti<sub>3</sub>Al在1200°C可以锻造。TiAl的室温性能如下:  $\sigma_s = 28.1$ 公斤/毫米<sup>2</sup>,  $\delta_K = 10 \sim 15\%$ , 冲击功=4.6~6.9公斤·厘米; 950°C、20小时的持久强度为8.45公斤/毫米<sup>2</sup>; 断裂模数(Модуль разрушения)在1000°C时为70.3公斤/毫米<sup>2</sup>, 在1100°C时为35.2公斤/毫米<sup>2</sup>[17]。

### 3. Ti-As 系

资料[18]使用了纯度99.8%的钛和99.9%的砷, 合金用电弧炉熔炼, 试样在空气中退火, 用金相法测定了0~20原子%As的相图(图4)。

钛和Ti<sub>4</sub>As在1355±5°C和约12原子%As处形成共晶点。砷在 $\beta$ -Ti中的固溶度在共晶温度下最大, 约为1原子%As。砷提高钛的 $\alpha/\beta$ 相变温度, 约在900°C时, 有一个包析反应<sup>[18]</sup>。砷在镁还原法钛中的固溶度为0.26重量%<sup>[19]</sup>。

据资料[20]报导, TiAs有两种晶型, 一是NiAs式的六方晶体,  $a = 3.64 \text{ \AA}$ ,  $c = 6.15 \text{ \AA}$ ; 二是TiP式六方晶

图4 Ti-As系相图<sup>[18]</sup>

体,  $a = 3.65 \text{ \AA}$ ,  $c = 12.30 \text{ \AA}$ 。

#### 4. Ti-Au 系

综合资料[21, 22]的研究成果, Ti-Au 系相图示于图5。制备合金使用了碘化法钛和 99.99% 的金, 用电弧炉冶炼, 在  $1300 \sim 400^\circ\text{C}$  的一系列温度进行真空退火, 保温时间相应为  $4 \sim 720$  小时, 温度愈低, 时间愈长。

富钛合金在淬火时有马氏体转变, 在室温获得  $\beta$  组织的合金的最低含金量为 8.1 原子%。

$\beta$  相的共析分解发生在 4.4 原子% Au 和  $832.5 \pm 3.5^\circ\text{C}$

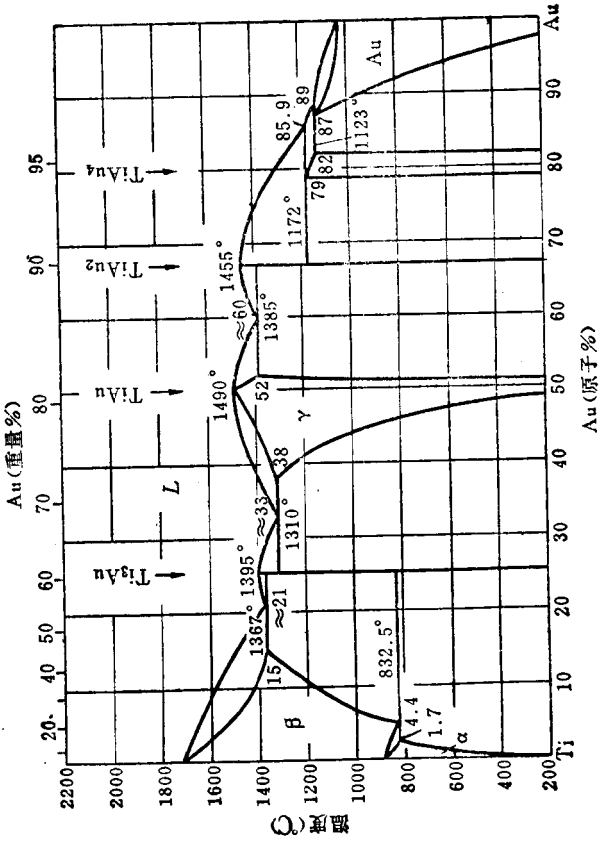


图 5 Ti-Au系相图 [21,22]



处。金在 $\beta$ -Ti中的最大固溶度在共晶温度为15原子%。在共析温度时,有1.7原子% Au溶于 $\alpha$ -Ti,而在400°C时为0.5原子% Au。

在约21原子% Au和1367°C时,发生共晶反应 $L \rightleftharpoons \beta + \text{Ti}_3\text{Au}$ ,金属化合物 $\text{Ti}_3\text{Au}$ 的熔点为1395°C,具有立方晶格, $a = 5.096 \text{ \AA}$ <sup>(23)</sup>。

共晶反应 $L \rightleftharpoons \text{Ti}_3\text{Au} + \text{TiAu}$ 发生在约33原子% Au和在1310°C时,而在约60原子% Au和在1385°C时则产生共晶反应 $L \rightleftharpoons \text{TiAu} + \text{TiAu}_2$ 。在79原子% Au和1172°C,包晶反应 $L + \text{TiAu}_2 \rightleftharpoons \text{TiAu}_4$ 的结果形成 $\text{TiAu}_4$ 。化合物 $\text{TiAu}$ 和 $\text{TiAu}_2$ 的熔点分别为1490°C和1455°C。

$\text{TiAu}$ ( $\gamma$ 相)有一宽阔的均相区,它是面心正方晶体。 $\text{TiAu}_2$ 具有 $\text{MoSi}_2$ 式的结构,是正方晶体, $a = 3.419 \text{ \AA}$ , $c = 8.514 \text{ \AA}$ , $c/a = 2.49$ 。 $\text{TiAu}_4$ 是 $\text{Ni}_4\text{W}$ 式的体心正方晶体结构,其均相区为79~82原子% Au。

本系 $\text{TiAu-Au}$ 部分的相图在资料[24]中有报导,与资料[22]的不同之处在于,代替 $\text{TiAu}_4$ 的是一个无均相区的 $\text{TiAu}_6$ ,它在1190°C由 $L + \text{TiAu}_2 \rightleftharpoons \text{TiAu}_6$ 产生。

## 5. Ti-B系

Ti-B系相图到34重量% B的部分表示在图6上<sup>(25)</sup>。本系的合金在 $1670 \pm 25^\circ\text{C}$ 和3.5重量% B处有一共晶反应 $L \rightleftharpoons \beta + \text{TiB}$ 。

所研究的部分发现了三个金属化合物: $\text{Ti}_2\text{B}$ 、 $\text{TiB}$ 和 $\text{TiB}_2$ 。其中最难熔的是 $\text{TiB}_2$ ,它有一个较宽的均相区,其熔