

湖南大学机械与运载工程学院资助出版图书



# 实用钎料合金 相图手册

虞觉奇 编

湖南大学机械与运载工程学院资助

# 实用钎料合金 相图手册

虞觉奇 编



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

实用钎料合金相图手册 / 虞觉奇编. —北京: 机械工业出版社, 2014.10

ISBN 978-7-111-47086-1

I. 实… II. 虞… III. 钎料—合金—金相学—图集 IV. TG425-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 131096 号

合金相图是以图的形式来描述平衡状态下, 合金的成分、温度、组织之间的相互关系。在生产实践中, 相图常常作为合金成分设计、铸造、压力加工、热处理、焊接等热加工方法制订工艺规程的重要依据, 钎料配方设计更是离不开合金相图。本书内容丰富, 讲解清晰易懂、便于实际应用。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 王 玉

责任校对: 殷 虹

印 刷: 藁城市京瑞印刷有限公司

版 次: 2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 214mm×275mm 1/16

印 张: 40

书 号: ISBN 978-7-111-47086-1

定 价: 169.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

# 前 言

钎料合金一般为多元合金、多相组织，其中一相往往是脆性相，而对钎料的性能要求，除使用上必须有满意的熔化特性和机械性能外，还必须具有良好的加工性能，有时对色泽也有要求，因此设计和制造优良的钎料合金，难度相当大。通常，开发一个新的钎料合金常用正交法，或优选法进行配方设计，再通过大量的试验和测试工作，才能初步确定一个新的配方，工作量巨大，开发周期长。

以合金相图为依据，从相图上可以读解所需合金的成分范围、相组成及相的相对量关系，由此可以大致估计出合金的性能，将大大减少研制工作量，缩短开发周期，因此用相图指导生产实际，具有极高的使用价值和经济价值。

21 世纪初我国出版了许多非常完整且重要的相图集：昆明理工大学戴永年院士主编的《二元合金相图集》，昆明贵金属研究所何纯孝教授等编著的《贵金属合金相图及化合物结构参数》，中南大学唐仁政、田荣璋教授编著的《二元合金相图及中间相晶体结构》，北京大学张启运、庄鸿寿教授编著的《三元合金相图手册》，北京有色金属研究总院郭青蔚教授总译审的《金属二元系相图手册》等，这些相图集是以组元数或以金属属性为主线进行编写的。本书根据钎料合金种类和被焊金属材料所含元素，作为选录合金相图的组元依据，以钎料合金研制的需要作为编写主线，选录相关的二元、三元、四元等合金系相图，既有普通常用的金属元素相图，也有贵金属和稀有金属元素的相图。

为了使更广泛的读者掌握相图使用要点，在书中简明地介绍了合金、相图及晶体结构最基本最实用的知识，内容叙述尽可能联系钎料研制实际；详尽地分析了 Cu-Zn、Cu-Sn、Ag-Cu-Zn 等复杂而钎料制造中最常用的合金相图；根据实践经验列举了相图应用实例。为了相图使用方便，本书尽可能选录以质量分数表达成分坐标的相图，对于组元的相对原子质量相差很大的相图，选录用摩尔分数表达成分坐标的相图。

本书在编写过程中承蒙张启运教授、何纯孝教授、刘安生教授、田荣璋教授的指导，致以衷心感谢；所有参考文献和相图原始参考文献的作者为本书编写创造了极为有利的条件，在此向各位作者致以衷心感谢。

本书出版得到广州钧益合丰有色金属合金有限公司张守利总经理的支持和帮助，尤其是得到机械工业出版社的大力支持，特此致以深切谢意。

编者以几十年从事钎料工作经验和使用相图心得编写此书，谨以此书奉献给有色金属工作者特别是钎焊行业工作者作为便于查阅的工具书。本书内容理论和实践性都比较强，编者虽竭尽所能，欲使编写联系实际，力求无误无错，但限于编者水平等原因，与所求仍有差距，书中不足之处，恳请读者批评指正。

湖南大学 虞觉奇于广州

2013 年 12 月

# 目 录

## 前言

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 第 1 章 合金相图的概念 .....                             | 1  |
| 1.1 合金及相图 .....                                 | 1  |
| 1.2 合金相图中常用的名词 .....                            | 1  |
| 1. 组元 .....                                     | 1  |
| 2. 合金系 .....                                    | 1  |
| 3. 合金中的相 .....                                  | 1  |
| 4. 相平衡 .....                                    | 1  |
| 5. 自由度 .....                                    | 1  |
| 6. 相律 .....                                     | 1  |
| 7. 液相线和固相线 .....                                | 2  |
| 8. 液相线和固相线的形状 .....                             | 2  |
| 1.3 合金中的相组成物 <sup>[4,15]</sup> .....            | 3  |
| 1. 固溶体 .....                                    | 3  |
| 2. 中间相 .....                                    | 3  |
| (1) 正常价化合物 .....                                | 4  |
| (2) 电子化合物 (Hume-Rothery 相) .....                | 4  |
| (3) 间隙相和间隙化合物 .....                             | 4  |
| (4) 拓扑密堆结构相 .....                               | 4  |
| 1.4 相图表示方法 .....                                | 5  |
| 1. 二元合金相图 .....                                 | 5  |
| 2. 三元合金相图 .....                                 | 5  |
| 1.5 三元合金相图的一些规则 .....                           | 5  |
| 1. 等含量规则 .....                                  | 5  |
| 2. 等比规则 .....                                   | 5  |
| 3. 等温截面 (水平截面) .....                            | 5  |
| 4. 多温截面 (垂直截面) <sup>[2,23]</sup> .....          | 6  |
| 5. 相接触规律 <sup>[2,15]</sup> .....                | 8  |
| 1.6 相图中组元或相的相对量计算 .....                         | 8  |
| 1. 二元合金相图的杠杆定律 (直线法则) .....                     | 8  |
| 2. 三元合金系水平截面中相的计算 .....                         | 9  |
| (1) 截线法则 .....                                  | 9  |
| (2) 三角形重心法则 .....                               | 9  |
| 1.7 相图的基本特征 .....                               | 10 |
| 1. 二元合金相图中三相共存的图型特征 .....                       | 10 |
| 2. 三元合金相图中四相平衡反应转变形式 .....                      | 11 |
| 1.8 利用三元合金相图的液相面分析液相<br>的凝固过程 .....             | 11 |
| 1. 三个组元固态时互不溶解的共晶型<br>相图 <sup>[6]</sup> .....   | 11 |
| 2. 三个组元固态时有限互溶的共晶型<br>相图 <sup>[2,6]</sup> ..... | 12 |
| 3. 两个二元包晶系一个二元共晶系<br>组成四相平衡的共晶型相图 .....         | 13 |
| 1.9 重点二元合金相图分析 .....                            | 15 |
| 1. Ag-Zn 系二元合金相图 .....                          | 15 |
| 2. Ag-Cd 系二元合金相图 .....                          | 16 |
| 3. Cu-Zn 系二元合金相图 .....                          | 18 |
| 4. Cu-Sn 系二元合金相图 .....                          | 20 |
| 1.10 相图应用实例 .....                               | 25 |
| 1. Cu-P-Sn 钎料配方设计 .....                         | 25 |
| 2. Ag60CuZnSn 钎料配方设计 .....                      | 27 |
| 第 2 章 金属晶体结构 .....                              | 30 |
| 1. 晶体结构 .....                                   | 30 |
| 2. 空间点阵 .....                                   | 30 |
| 3. 晶胞 .....                                     | 30 |
| 4. 晶系 .....                                     | 31 |
| 5. 点阵类型 .....                                   | 31 |
| 6. 每个晶胞的原子数 .....                               | 32 |
| 7. 原子位置 .....                                   | 32 |
| 8. 结构符号 .....                                   | 33 |
| 9. 结构典型 .....                                   | 33 |
| 10. 对称要素 .....                                  | 33 |
| (1) 晶体宏观对称要素 .....                              | 33 |
| (2) 晶体微观对称要素 .....                              | 33 |
| 11. 空间群国际符号 (Hermann-Mauguin<br>符号) .....       | 33 |
| 12. 晶面和晶向的密勒 (Miller) 指数 .....                  | 34 |
| 第 3 章 合金相图 .....                                | 36 |
| 3.1 引言 .....                                    | 36 |
| 3.2 二元系合金相图 <sup>[13]</sup> .....               | 37 |
| Ag-Al <sup>[7]</sup> .....                      | 37 |
| Ag-Au <sup>[7]</sup> .....                      | 37 |
| Ag-Be .....                                     | 38 |
| Ag-Bi <sup>[7]</sup> .....                      | 38 |
| Ag-C .....                                      | 39 |

|                                   |    |                                      |    |
|-----------------------------------|----|--------------------------------------|----|
| Ag-Ca .....                       | 39 | Al-Au .....                          | 61 |
| Ag-Cd .....                       | 40 | Al-B(1) .....                        | 61 |
| Ag-Ce .....                       | 40 | Al-B(2) <sup>[7]</sup> .....         | 62 |
| Ag-Co .....                       | 41 | Al-Be <sup>[7]</sup> .....           | 62 |
| Ag-Cr <sup>[7]</sup> .....        | 41 | Al-Bi <sup>[7]</sup> .....           | 62 |
| Ag-Cu <sup>[7]</sup> .....        | 42 | Al-Ca <sup>[7]</sup> .....           | 63 |
| Ag-Eu .....                       | 42 | Al-Cd <sup>[7]</sup> .....           | 63 |
| Ag-Fe (1) .....                   | 43 | Al-Ce .....                          | 64 |
| Ag-Fe (银侧) (2) .....              | 43 | Al-Co .....                          | 64 |
| Ag-Fe (铁侧) (3) .....              | 43 | Al-Cr(1) <sup>[7]</sup> .....        | 65 |
| Ag-Ga <sup>[7]</sup> .....        | 44 | Al-Cr(Al 侧) (2) <sup>[7]</sup> ..... | 66 |
| Ag-Ge <sup>[7]</sup> .....        | 44 | Al-Cu(1) <sup>[7]</sup> .....        | 67 |
| Ag-In <sup>[7]</sup> .....        | 45 | Al-Cu(2) <sup>[7]</sup> .....        | 68 |
| Ag-La .....                       | 45 | Al-Cu(3) <sup>[7]</sup> .....        | 69 |
| Ag-Li <sup>[7]</sup> .....        | 46 | Al-Dy .....                          | 70 |
| Ag-Mg .....                       | 46 | Al-Eu .....                          | 70 |
| Ag-Mn .....                       | 47 | Al-Fe(1) <sup>[7]</sup> .....        | 71 |
| Ag-Mo .....                       | 47 | Al-Fe(2) <sup>[7]</sup> .....        | 72 |
| Ag-Nd .....                       | 48 | Al-Ga <sup>[7]</sup> .....           | 72 |
| Ag-Ni .....                       | 48 | Al-Ge(1) <sup>[7]</sup> .....        | 73 |
| Ag-O <sup>[7]</sup> .....         | 49 | Al-Ge(2) <sup>[7]</sup> .....        | 73 |
| Ag-P(1) .....                     | 50 | Al-Hg <sup>[7]</sup> .....           | 74 |
| Ag-P(银侧) (2) <sup>[7]</sup> ..... | 50 | Al-In <sup>[7]</sup> .....           | 74 |
| Ag-Pb <sup>[7]</sup> .....        | 51 | Al-K .....                           | 75 |
| Ag-Pd <sup>[7]</sup> .....        | 51 | Al-La .....                          | 75 |
| Ag-Pr .....                       | 52 | Al-Li(1) .....                       | 76 |
| Ag-Pt <sup>[7]</sup> .....        | 52 | Al-Li(2) .....                       | 76 |
| Ag-Rh <sup>[7]</sup> .....        | 53 | Al-Mg(1) .....                       | 77 |
| Ag-Ru .....                       | 53 | Al-Mg(2) .....                       | 77 |
| Ag-S .....                        | 54 | Al-Mn(1) <sup>[7]</sup> .....        | 78 |
| Ag-Sb <sup>[7]</sup> .....        | 54 | Al-Mn(2) <sup>[7]</sup> .....        | 78 |
| Ag-Sc .....                       | 55 | Al-Mo .....                          | 79 |
| Ag-Se .....                       | 55 | Al-Na(1) <sup>[7]</sup> .....        | 79 |
| Ag-Si <sup>[7]</sup> .....        | 56 | Al-Na(2) <sup>[7]</sup> .....        | 80 |
| Ag-Sn <sup>[7]</sup> .....        | 56 | Al-Nb <sup>[7]</sup> .....           | 80 |
| Ag-Sr .....                       | 57 | Al-Nd .....                          | 81 |
| Ag-Te .....                       | 57 | Al-Ni(1) <sup>[7]</sup> .....        | 82 |
| Ag-Ti .....                       | 58 | Al-Ni(2) <sup>[7]</sup> .....        | 83 |
| Ag-V .....                        | 58 | Al-P .....                           | 83 |
| Ag-W .....                        | 59 | Al-Pb .....                          | 84 |
| Ag-Yb .....                       | 59 | Al-Pd <sup>[1]</sup> .....           | 84 |
| Ag-Zn .....                       | 60 | Al-Pr .....                          | 85 |
| Ag-Zr <sup>[7]</sup> .....        | 60 | Al-S .....                           | 85 |

|                               |     |                               |     |
|-------------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| Al-Sb .....                   | 86  | B-Mn .....                    | 108 |
| Al-Sc .....                   | 86  | B-Mo .....                    | 108 |
| Al-Se .....                   | 87  | B-Nb .....                    | 109 |
| Al-Si(1) <sup>[7]</sup> ..... | 87  | B-Ni <sup>[1]</sup> .....     | 109 |
| Al-Si(2) <sup>[7]</sup> ..... | 88  | B-Pd .....                    | 110 |
| Al-Sn .....                   | 88  | B-Si .....                    | 110 |
| Al-Sr .....                   | 89  | B-Sn .....                    | 111 |
| Al-Ta(1) .....                | 89  | B-Ti .....                    | 111 |
| Al-Ta(2) <sup>[7]</sup> ..... | 90  | B-V .....                     | 112 |
| Al-Ti(1) <sup>[7]</sup> ..... | 90  | B-W .....                     | 112 |
| Al-Ti(2) <sup>[7]</sup> ..... | 91  | B-Zn .....                    | 113 |
| Al-Yb .....                   | 91  | Be-Co(1) .....                | 113 |
| Al-Zn(1) <sup>[7]</sup> ..... | 92  | Be-Co(2) .....                | 114 |
| Al-Zn(2) <sup>[7]</sup> ..... | 92  | Be-Cr .....                   | 114 |
| Al-Zr(1) <sup>[7]</sup> ..... | 93  | Be-Cu(1) <sup>[7]</sup> ..... | 115 |
| Al-Zr(2) <sup>[7]</sup> ..... | 93  | Be-Cu(2) <sup>[7]</sup> ..... | 115 |
| As-Cu <sup>[7]</sup> .....    | 94  | Be-Nb .....                   | 116 |
| Au-Bi <sup>[7]</sup> .....    | 94  | Be-Ni .....                   | 116 |
| Au-Cd <sup>[7]</sup> .....    | 95  | Be-Pd .....                   | 117 |
| Au-Ce .....                   | 95  | Be-Si .....                   | 117 |
| Au-Co <sup>[7]</sup> .....    | 96  | Be-Ti .....                   | 118 |
| Au-Cu <sup>[7]</sup> .....    | 96  | Be-Zn .....                   | 118 |
| Au-Ga .....                   | 97  | Be-Zr .....                   | 119 |
| Au-Ge <sup>[7]</sup> .....    | 97  | Bi-Cd <sup>[7]</sup> .....    | 119 |
| Au-In <sup>[7]</sup> .....    | 98  | Bi-Ce <sup>[7]</sup> .....    | 120 |
| Au-La .....                   | 99  | Bi-Cu .....                   | 120 |
| Au-Li .....                   | 99  | Bi-Ga .....                   | 121 |
| Au-Nb .....                   | 100 | Bi-Ge .....                   | 121 |
| Au-Ni <sup>[7]</sup> .....    | 100 | Bi-In .....                   | 122 |
| Au-Pb .....                   | 101 | Bi-La .....                   | 122 |
| Au-Pd <sup>[7]</sup> .....    | 101 | Bi-Mg(1) <sup>[7]</sup> ..... | 123 |
| Au-Sb <sup>[7]</sup> .....    | 102 | Bi-Mg(2) <sup>[7]</sup> ..... | 123 |
| Au-Si <sup>[7]</sup> .....    | 102 | Bi-Mn .....                   | 124 |
| Au-Sn .....                   | 103 | Bi-Nb .....                   | 124 |
| Au-Ti .....                   | 103 | Bi-Pb <sup>[7]</sup> .....    | 125 |
| Au-Yb .....                   | 104 | Bi-Sb <sup>[7]</sup> .....    | 125 |
| Au-Zn .....                   | 104 | Bi-Si .....                   | 126 |
| B-Co .....                    | 105 | Bi-Sn <sup>[7]</sup> .....    | 126 |
| B-Cr .....                    | 105 | Bi-Zn <sup>[7]</sup> .....    | 127 |
| B-Cu <sup>[7]</sup> .....     | 106 | C-Co <sup>[7]</sup> .....     | 127 |
| B-Fe .....                    | 106 | C-Cr <sup>[7]</sup> .....     | 128 |
| B-Ga .....                    | 107 | C-Fe <sup>[7]</sup> .....     | 129 |
| B-Mg .....                    | 107 | C-Mn .....                    | 130 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| C-Mo <sup>[7]</sup>  | 130 |
| C-Nb                 | 131 |
| C-Ni <sup>[7]</sup>  | 131 |
| C-Si                 | 132 |
| C-Ti <sup>[7]</sup>  | 132 |
| C-V                  | 133 |
| C-W <sup>[7]</sup>   | 133 |
| C-Zr <sup>[7]</sup>  | 134 |
| Ca-Cu                | 134 |
| Ca-La                | 135 |
| Ca-Mg                | 135 |
| Ca-Sn <sup>[7]</sup> | 136 |
| Ca-Zn                | 136 |
| Cd-Ce                | 137 |
| Cd-Cu <sup>[7]</sup> | 137 |
| Cd-Fe                | 138 |
| Cd-Ga <sup>[7]</sup> | 138 |
| Cd-Ge                | 139 |
| Cd-In <sup>[7]</sup> | 139 |
| Cd-La                | 140 |
| Cd-Mg <sup>[7]</sup> | 140 |
| Cd-Mn                | 141 |
| Cd-Mo                | 141 |
| Cd-Ni <sup>[7]</sup> | 142 |
| Cd-O                 | 142 |
| Cd-P                 | 143 |
| Cd-Pb <sup>[7]</sup> | 143 |
| Cd-Sb                | 144 |
| Cd-Si                | 144 |
| Cd-Sn <sup>[7]</sup> | 145 |
| Cd-Sr                | 145 |
| Cd-Te                | 146 |
| Cd-Ti                | 146 |
| Cd-Zn <sup>[7]</sup> | 147 |
| Ce-Co                | 147 |
| Ce-Cr                | 148 |
| Ce-Cu                | 148 |
| Ce-Fe                | 149 |
| Ce-In                | 149 |
| Ce-Mg <sup>[7]</sup> | 150 |
| Ce-Mn                | 150 |
| Ce-Mo                | 151 |
| Ce-Nb                | 151 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| Ce-Ni                   | 152 |
| Ce-Pb                   | 152 |
| Ce-Sb                   | 153 |
| Ce-Si                   | 153 |
| Ce-Sn                   | 154 |
| Ce-Ti                   | 154 |
| Ce-V                    | 155 |
| Ce-Zn                   | 155 |
| Co-Cr <sup>[7]</sup>    | 156 |
| Co-Cu <sup>[7]</sup>    | 156 |
| Co-Fe                   | 157 |
| Co-Ga                   | 157 |
| Co-Ge                   | 158 |
| Co-In                   | 158 |
| Co-La                   | 159 |
| Co-Li                   | 159 |
| Co-Mg <sup>[7]</sup>    | 160 |
| Co-Mn                   | 160 |
| Co-Mo <sup>[7]</sup>    | 161 |
| Co-Nb <sup>[7]</sup>    | 161 |
| Co-Ni <sup>[7]</sup>    | 162 |
| Co-P                    | 162 |
| Co-Pb <sup>[7]</sup>    | 163 |
| Co-Pd(1)                | 163 |
| Co-Pd(2)                | 164 |
| Co-Pt                   | 164 |
| Co-Sb                   | 165 |
| Co-Si                   | 165 |
| Co-Sn                   | 166 |
| Co-Ti                   | 166 |
| Co-V                    | 167 |
| Co-W                    | 167 |
| Co-WC <sup>[21]</sup>   | 168 |
| Co-Zn <sup>[7]</sup>    | 168 |
| Co-Zr <sup>[7]</sup>    | 169 |
| Cr-Cu(1) <sup>[7]</sup> | 169 |
| Cr-Cu(2) <sup>[7]</sup> | 170 |
| Cr-Fe <sup>[7]</sup>    | 170 |
| Cr-Ga                   | 171 |
| Cr-Ge                   | 171 |
| Cr-La                   | 172 |
| Cr-Mn <sup>[7]</sup>    | 172 |
| Cr-Mo <sup>[7]</sup>    | 173 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| Cr-Nb                   | 173 |
| Cr-Ni                   | 174 |
| Cr-Pd <sup>[7]</sup>    | 174 |
| Cr-Pt                   | 175 |
| Cr-Sb                   | 175 |
| Cr-Si                   | 176 |
| Cr-Sn                   | 176 |
| Cr-Ti                   | 177 |
| Cr-V <sup>[7]</sup>     | 177 |
| Cr-W <sup>[7]</sup>     | 178 |
| Cr-Yb                   | 178 |
| Cr-Zn                   | 179 |
| Cr-Zr                   | 179 |
| Cu-Fe <sup>[7]</sup>    | 180 |
| Cu-Ga                   | 180 |
| Cu-Ge <sup>[7]</sup>    | 181 |
| Cu-H <sup>[7]</sup>     | 181 |
| Cu-In <sup>[7]</sup>    | 182 |
| Cu-Ir <sup>[7]</sup>    | 182 |
| Cu-La                   | 183 |
| Cu-Li                   | 183 |
| Cu-Mg <sup>[7]</sup>    | 184 |
| Cu-Mn <sup>[7]</sup>    | 184 |
| Cu-Nb <sup>[7]</sup>    | 185 |
| Cu-Ni <sup>[7]</sup>    | 185 |
| Cu-O(1) <sup>[7]</sup>  | 186 |
| Cu-O(2) <sup>[7]</sup>  | 187 |
| Cu-O(3) <sup>[7]</sup>  | 187 |
| Cu-P                    | 188 |
| Cu-Pb                   | 188 |
| Cu-Pd                   | 189 |
| Cu-Pr <sup>[7]</sup>    | 189 |
| Cu-Pt <sup>[7]</sup>    | 190 |
| Cu-Rh <sup>[7]</sup>    | 190 |
| Cu-S(1) <sup>[7]</sup>  | 191 |
| Cu-S(2) <sup>[7]</sup>  | 191 |
| Cu-S(3) <sup>[7]</sup>  | 192 |
| Cu-Sb(1) <sup>[7]</sup> | 192 |
| Cu-Sb(2) <sup>[7]</sup> | 193 |
| Cu-Se                   | 193 |
| Cu-Si(1) <sup>[7]</sup> | 194 |
| Cu-Si(2) <sup>[7]</sup> | 195 |
| Cu-Si(3) <sup>[7]</sup> | 195 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| Cu-Sn <sup>[7]</sup>    | 196 |
| Cu-Sr                   | 197 |
| Cu-Ti(1)                | 197 |
| Cu-Ti(2)                | 198 |
| Cu-V                    | 198 |
| Cu-W                    | 199 |
| Cu-Yb                   | 199 |
| Cu-Zn(1) <sup>[7]</sup> | 200 |
| Cu-Zn(2)                | 201 |
| Cu-Zr(1)                | 201 |
| Cu-Zr(2) <sup>[7]</sup> | 202 |
| Dy-Si                   | 202 |
| Fe-Ga                   | 203 |
| Fe-Ge                   | 203 |
| Fe-In                   | 204 |
| Fe-Ir <sup>[7]</sup>    | 204 |
| Fe-La                   | 205 |
| Fe-Li                   | 205 |
| Fe-Mg(1)                | 206 |
| Fe-Mg(2)                | 206 |
| Fe-Mn <sup>[7]</sup>    | 207 |
| Fe-Mo                   | 208 |
| Fe-N                    | 208 |
| Fe-Nb(1) <sup>[7]</sup> | 209 |
| Fe-Nb(2) <sup>[7]</sup> | 209 |
| Fe-Ni                   | 210 |
| Fe-O <sup>[7]</sup>     | 211 |
| Fe-P <sup>[7]</sup>     | 212 |
| Fe-Pb <sup>[7]</sup>    | 212 |
| Fe-Pd                   | 213 |
| Fe-Pt <sup>[7]</sup>    | 213 |
| Fe-S <sup>[7]</sup>     | 214 |
| Fe-Sb                   | 215 |
| Fe-Si                   | 215 |
| Fe-Sn                   | 216 |
| Fe-Ti <sup>[7]</sup>    | 217 |
| Fe-V(1)                 | 218 |
| Fe-V(2) <sup>[7]</sup>  | 218 |
| Fe-W                    | 219 |
| Fe-Zn(1) <sup>[7]</sup> | 219 |
| Fe-Zn(2) <sup>[7]</sup> | 220 |
| Fe-Zr                   | 220 |
| Ga-Ge                   | 221 |

|                            |     |                               |     |
|----------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| Ga-In .....                | 221 | Hf-Pd .....                   | 243 |
| Ga-La .....                | 222 | Hf-Rh .....                   | 243 |
| Ga-Li .....                | 222 | Hf-Ti <sup>[7]</sup> .....    | 244 |
| Ga-Mg <sup>[7]</sup> ..... | 223 | Hf-V <sup>[7]</sup> .....     | 244 |
| Ga-Mn .....                | 223 | Hf-W <sup>[7]</sup> .....     | 244 |
| Ga-Mo .....                | 224 | In-La .....                   | 245 |
| Ga-Nb .....                | 224 | In-Li .....                   | 245 |
| Ga-Ni .....                | 225 | In-Mg .....                   | 246 |
| Ga-Pb .....                | 225 | In-Mn .....                   | 246 |
| Ga-Pd .....                | 226 | In-Mo .....                   | 247 |
| Ga-Sb .....                | 226 | In-Nb .....                   | 247 |
| Ga-Si .....                | 227 | In-Ni .....                   | 248 |
| Ga-Sn .....                | 227 | In-P <sup>[7]</sup> .....     | 248 |
| Ga-Sr .....                | 228 | In-Pb <sup>[7]</sup> .....    | 249 |
| Ga-Ti .....                | 228 | In-Pd .....                   | 249 |
| Ga-V .....                 | 229 | In-S .....                    | 250 |
| Ga-Yb .....                | 229 | In-Sb .....                   | 250 |
| Ga-Zn .....                | 230 | In-Si .....                   | 251 |
| Ga-Zr .....                | 230 | In-Sn <sup>[7]</sup> .....    | 251 |
| Ge-In .....                | 231 | In-Sr .....                   | 252 |
| Ge-La .....                | 231 | In-V .....                    | 252 |
| Ge-Li .....                | 232 | In-Yb .....                   | 253 |
| Ge-Mg .....                | 232 | In-Zn <sup>[7]</sup> .....    | 253 |
| Ge-Mn(1) .....             | 233 | K-Na <sup>[7]</sup> .....     | 253 |
| Ge-Mn(2) .....             | 233 | K-Sb .....                    | 254 |
| Ge-Mo .....                | 234 | K-Sn .....                    | 254 |
| Ge-Nb .....                | 234 | K-Zn .....                    | 255 |
| Ge-Ni .....                | 235 | La-Mg .....                   | 255 |
| Ge-P .....                 | 235 | La-Mn .....                   | 256 |
| Ge-Pb .....                | 236 | La-Mo .....                   | 256 |
| Ge-Pd .....                | 236 | La-Nb .....                   | 257 |
| Ge-Sb .....                | 237 | La-Ni .....                   | 257 |
| Ge-Si .....                | 237 | La-Pb .....                   | 258 |
| Ge-Sn(1) .....             | 238 | La-S .....                    | 258 |
| Ge-Sn(2) .....             | 238 | La-Sb .....                   | 259 |
| Ge-Sr .....                | 239 | La-Sn(1) .....                | 259 |
| Ge-Ti .....                | 239 | La-Sn(2) <sup>[1]</sup> ..... | 260 |
| Ge-Zn .....                | 240 | La-Ti .....                   | 260 |
| Ge-Zr .....                | 240 | La-V .....                    | 261 |
| H-Ni .....                 | 241 | La-W .....                    | 261 |
| H-Zn .....                 | 241 | La-Zn .....                   | 262 |
| H-Zr .....                 | 242 | Li-Mg .....                   | 262 |
| Hf-Ni <sup>[7]</sup> ..... | 242 | Li-Mn .....                   | 263 |

|                         |     |                        |     |
|-------------------------|-----|------------------------|-----|
| Li-Mo                   | 263 | Mo-Ni <sup>[1]</sup>   | 287 |
| Li-Nb                   | 264 | Mo-O                   | 287 |
| Li-Pb                   | 264 | Mo-P                   | 288 |
| Li-Sb                   | 265 | Mo-Pb                  | 288 |
| Li-Sn                   | 265 | Mo-Pd                  | 289 |
| Li-Zn                   | 266 | Mo-Sb                  | 289 |
| Mg-Mn <sup>[7]</sup>    | 266 | Mo-Si <sup>[7]</sup>   | 290 |
| Mg-Mo                   | 267 | Mo-Ti                  | 290 |
| Mg-Nb                   | 267 | Mo-V <sup>[7]</sup>    | 291 |
| Mg-Ni <sup>[7]</sup>    | 268 | Mo-W <sup>[7]</sup>    | 291 |
| Mg-O                    | 268 | Mo-Zn                  | 292 |
| Mg-Pb <sup>[7]</sup>    | 269 | Mo-Zr <sup>[7]</sup>   | 292 |
| Mg-Sb <sup>[7]</sup>    | 269 | Na-Sb <sup>[7]</sup>   | 293 |
| Mg-Si <sup>[7]</sup>    | 270 | Na-Sn <sup>[7]</sup>   | 293 |
| Mg-Sn <sup>[7]</sup>    | 270 | Na-Zn                  | 294 |
| Mg-Sr <sup>[7]</sup>    | 270 | Nb-Ni                  | 294 |
| Mg-Ti                   | 271 | Nb-O                   | 295 |
| Mg-V                    | 271 | Nb-Pd                  | 295 |
| Mg-Yb                   | 272 | Nb-Re                  | 296 |
| Mg-Zn(1) <sup>[7]</sup> | 272 | Nb-Sb                  | 296 |
| Mg-Zn(2) <sup>[7]</sup> | 273 | Nb-Si                  | 297 |
| Mg-Zn(3) <sup>[7]</sup> | 273 | Nb-Sn <sup>[7]</sup>   | 297 |
| Mg-Zr <sup>[7]</sup>    | 273 | Nb-Ti <sup>[7]</sup>   | 298 |
| Mn-Mo                   | 274 | Nb-V <sup>[7]</sup>    | 298 |
| Mn-N                    | 274 | Nb-W <sup>[7]</sup>    | 299 |
| Mn-Nb                   | 275 | Nb-Zn <sup>[7]</sup>   | 299 |
| Mn-Ni(1) <sup>[7]</sup> | 276 | Nb-Zr                  | 300 |
| Mn-Ni(2)                | 277 | Ni-P                   | 300 |
| Mn-O                    | 277 | Ni-Pb <sup>[7]</sup>   | 301 |
| Mn-P                    | 278 | Ni-Pd <sup>[7]</sup>   | 301 |
| Mn-Pb                   | 278 | Ni-S <sup>[7]</sup>    | 302 |
| Mn-Pd <sup>[7]</sup>    | 279 | Ni-Sb                  | 303 |
| Mn-Sb                   | 279 | Ni-Si <sup>[7]</sup>   | 303 |
| Mn-Si <sup>[7]</sup>    | 280 | Ni-Sn <sup>[7]</sup>   | 304 |
| Mn-Sn                   | 281 | Ni-Ti                  | 305 |
| Mn-Sr                   | 281 | Ni-V <sup>[7]</sup>    | 305 |
| Mn-Ti <sup>[7]</sup>    | 282 | Ni-W                   | 306 |
| Mn-V                    | 283 | Ni-Zn <sup>[7]</sup>   | 306 |
| Mn-Yb                   | 283 | Ni-Zr                  | 307 |
| Mn-Zn(1) <sup>[7]</sup> | 284 | O-Pb(1) <sup>[7]</sup> | 307 |
| Mn-Zn(2) <sup>[7]</sup> | 285 | O-Pb(2)                | 308 |
| Mn-Zr <sup>[7]</sup>    | 286 | O-Sb                   | 308 |
| Mo-Nb <sup>[7]</sup>    | 286 | O-Si                   | 309 |

|                             |     |                               |     |
|-----------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| O-Sn .....                  | 309 | Rh-Sb .....                   | 330 |
| O-Ti .....                  | 310 | Rh-Si <sup>[15]</sup> .....   | 330 |
| O-V(1) .....                | 310 | Rh-Sn .....                   | 331 |
| O-V(2) <sup>[7]</sup> ..... | 311 | Rh-Ti .....                   | 331 |
| O-W .....                   | 311 | Rh-V .....                    | 332 |
| O-Zn .....                  | 312 | Rh-W .....                    | 332 |
| O-Zr .....                  | 312 | Rh-Zn .....                   | 333 |
| P-Pd <sup>[1]</sup> .....   | 313 | Rh-Zr .....                   | 333 |
| P-Sb .....                  | 313 | Ru-Sb .....                   | 334 |
| P-Si .....                  | 314 | Ru-Si .....                   | 334 |
| P-Sn <sup>[7]</sup> .....   | 314 | Ru-Ti .....                   | 335 |
| P-Ti .....                  | 315 | Ru-V .....                    | 335 |
| P-Zn .....                  | 315 | Ru-W <sup>[7]</sup> .....     | 336 |
| Pb-Pd .....                 | 316 | Ru-Zn .....                   | 336 |
| Pb-S <sup>[7]</sup> .....   | 316 | Ru-Zr .....                   | 337 |
| Pb-Sb <sup>[7]</sup> .....  | 317 | S-Sb .....                    | 337 |
| Pb-Si <sup>[7]</sup> .....  | 317 | S-Sn .....                    | 338 |
| Pb-Sn <sup>[7]</sup> .....  | 317 | S-Ti .....                    | 338 |
| Pb-Sr .....                 | 318 | S-Zn .....                    | 339 |
| Pb-Ti .....                 | 318 | Sb-Si .....                   | 339 |
| Pb-Zn <sup>[7]</sup> .....  | 319 | Sb-Sn <sup>[7]</sup> .....    | 340 |
| Pb-Zr .....                 | 319 | Sb-Sr .....                   | 340 |
| Pd-Rh <sup>[7]</sup> .....  | 319 | Sb-Ti .....                   | 341 |
| Pd-Ru <sup>[7]</sup> .....  | 320 | Sb-Zn(1) <sup>[7]</sup> ..... | 341 |
| Pd-Sb .....                 | 320 | Sb-Zn(2) <sup>[7]</sup> ..... | 342 |
| Pd-Si .....                 | 321 | Sb-Zn(3) .....                | 342 |
| Pd-Sn .....                 | 321 | Sb-Zr .....                   | 343 |
| Pd-Ti .....                 | 322 | Si-Sn .....                   | 343 |
| Pd-V <sup>[7]</sup> .....   | 322 | Si-Sr .....                   | 344 |
| Pd-W <sup>[7]</sup> .....   | 323 | Si-Ti .....                   | 344 |
| Pd-Zn .....                 | 323 | Si-V .....                    | 345 |
| Pd-Zr .....                 | 324 | Si-W .....                    | 345 |
| Pt-Rh <sup>[7]</sup> .....  | 324 | Si-Zn <sup>[7]</sup> .....    | 346 |
| Pt-Ru .....                 | 325 | Si-Zr .....                   | 346 |
| Pt-Sb .....                 | 325 | Sn-Sr .....                   | 347 |
| Pt-Si <sup>[1]</sup> .....  | 326 | Sn-Ti .....                   | 347 |
| Pt-Sn .....                 | 326 | Sn-V .....                    | 348 |
| Pt-Ti .....                 | 327 | Sn-Yb .....                   | 348 |
| Pt-V <sup>[7]</sup> .....   | 327 | Sn-Zn <sup>[7]</sup> .....    | 349 |
| Pt-W <sup>[7]</sup> .....   | 328 | Sn-Zr <sup>[7]</sup> .....    | 349 |
| Pt-Zn .....                 | 328 | Ti-V .....                    | 349 |
| Pt-Zr <sup>[7]</sup> .....  | 329 | Ti-W <sup>[7]</sup> .....     | 350 |
| Rh-Ru .....                 | 329 | Ti-Yb .....                   | 350 |

|                                                                 |     |                                                                      |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|----------------------------------------------------------------------|-----|
| Ti-Zn .....                                                     | 351 | Ag-Cd-Cu 系 300℃ 等温截面 <sup>[14]</sup> .....                           | 372 |
| Ti-Zr <sup>[7]</sup> .....                                      | 351 | Ag-Cd-Cu 系熔融平衡图 <sup>[14]</sup> .....                                | 372 |
| V-W .....                                                       | 352 | Ag-Cd-In 系 315℃ 部分等温截面 <sup>[15]</sup> .....                         | 373 |
| V-Yb .....                                                      | 352 | Ag-Cd-Sn 系液相面 <sup>[14]</sup> .....                                  | 373 |
| V-Zn .....                                                      | 353 | Ag-Cd-Sn 系 600℃ 等温截面 <sup>[14]</sup> .....                           | 374 |
| V-Zr <sup>[7]</sup> .....                                       | 353 | Ag-Cd-Sn 系 500℃ 等温截面 <sup>[14]</sup> .....                           | 374 |
| W-Yb .....                                                      | 354 | Ag-Cd-Zn 系液相面 <sup>[14]</sup> .....                                  | 374 |
| W-Zr <sup>[7]</sup> .....                                       | 354 | Ag-Cd-Zn 系 600℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                           | 375 |
| Yb-Zn .....                                                     | 355 | Ag-Cd-Zn 系 500℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                           | 375 |
| Yb-Zr .....                                                     | 355 | Ag-Cd-Zn 系 400℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                           | 376 |
| Zn-Zr <sup>[7]</sup> .....                                      | 356 | Ag-Cd-Zn 系 280℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                           | 376 |
| 3.3 三元系合金相图 <sup>[16]</sup> .....                               | 356 | Ag-Cd-Zn 系 200℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                           | 377 |
| Ag-Al-Cu 系液相面 .....                                             | 356 | Ag-Cd-Zn 系 $w(\text{Zn}) : w(\text{Cd})$                             |     |
| Ag-Al-Cu 系液相面 (Al 角) .....                                      | 357 | = 1 : 1 时的截面 <sup>[15]</sup> .....                                   | 377 |
| Ag-Al-Cu 系液相面 .....                                             | 357 | Ag-Cd-Zn 系 $w(\text{Ag}) : w(\text{Zn})$                             |     |
| Ag-Al-Ge 系液相面 .....                                             | 358 | = 1 : 1 时的截面 <sup>[15]</sup> .....                                   | 378 |
| Ag-Al-In 系液相面 <sup>[15]</sup> .....                             | 358 | Ag-Cu-Ce 系 500℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                           | 378 |
| Ag-Al-In 系 650℃ 等温截面 (不混溶区) <sup>[15]</sup> .....               | 359 | Ag-Cu-In 系液相面 <sup>[15]</sup> .....                                  | 379 |
| Ag-Al-In 系 143℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                      | 359 | Ag-Cu-In 系液相线投影 <sup>[15]</sup> .....                                | 379 |
| Ag-Al-Mg 系富 Mg 角的液相面 <sup>[15]</sup> .....                      | 360 | Ag-Cu-In 系低 In 含量的液相面 <sup>[15]</sup> .....                          | 380 |
| Ag-Al-Mg 系 400℃ 部分等温截面 <sup>[15]</sup> .....                    | 360 | Ag-Cu-In 系 676℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                           | 380 |
| Ag-Al-Mg 系伪二元系 <sup>[15]</sup> .....                            | 361 | Ag-Cu-In 系 505℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                           | 381 |
| Ag-Al-Mg 系 300℃ 部分等温截面 <sup>[15]</sup> .....                    | 361 | Ag-Cu-In 系 500℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                           | 381 |
| Ag-Al-Mg 系 200℃ 部分等温截面 <sup>[15]</sup> .....                    | 362 | Ag-Cu-In 系 $w(\text{In})=10\%$ 等值多温截面 <sup>[15]</sup> .....          | 382 |
| Ag-Al-Mn 系液相面 .....                                             | 362 | Ag-Cu-In 系 $w(\text{In})=20\%$ 等值多温截面 <sup>[15]</sup> .....          | 382 |
| Ag-Al-Pb 系液相面 .....                                             | 363 | Ag-Cu-Mg 系液相面 .....                                                  | 383 |
| Ag-Al-Si 系富 Al 区液相面 <sup>[15]</sup> .....                       | 363 | Ag-Cu-Mn 系液相面 .....                                                  | 383 |
| Ag-Al-Si 系 500℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                      | 364 | Ag-Cu-Ni 系液相面 .....                                                  | 384 |
| Ag-Al-Sn 系液相面 .....                                             | 364 | Ag-Cu-P 系部分液相面 <sup>[15]</sup> .....                                 | 384 |
| Ag-Al-Ti 系液相面 .....                                             | 365 | Ag-Cu-P 系 $x(\text{Ag})=2\%$ 等值多温截面 <sup>[15]</sup> .....            | 385 |
| Ag-Al-Zn 系液相面 .....                                             | 365 | Ag-Cu-P 系 $x(\text{P})=6\%$ 等值多温截面 <sup>[15]</sup> .....             | 385 |
| Ag-Al-Zn 系 300℃ (Al)+ $\epsilon$ 两相平衡连线方向 <sup>[15]</sup> ..... | 366 | Ag-Cu-P 系 $\text{Cu}_3\text{P}-\text{Ag}$ 伪二元系 <sup>[15]</sup> ..... | 386 |
| Ag-Al-Zn 系 (Al)-(Al)+ $\epsilon$ 界面等温线 <sup>[15]</sup> .....    | 366 | Ag-Cu-Cu <sub>3</sub> P 系液相面 <sup>[21]</sup> .....                   | 387 |
| Ag-Au-Cu 系液相面 .....                                             | 367 | Ag-Cu-Cu <sub>3</sub> P 系合金延长率与成分关系 <sup>[21]</sup> .....            | 387 |
| Ag-Au-Si 系液相面 .....                                             | 367 | Ag-Cu-Cu <sub>3</sub> P 系合金抗剪强度与成分关系 <sup>[21]</sup> .....           | 388 |
| Ag-Au-Sn 系液相面 (1) .....                                         | 368 | Ag-Cu-Sb 系液相面 .....                                                  | 388 |
| Ag-Au-Sn 系液相面 (2) .....                                         | 368 | Ag-Cu-Si 系液相面 .....                                                  | 389 |
| Ag-Bi-Sn 系液相面 .....                                             | 369 | Ag-Cu-Sn 系液相面 .....                                                  | 389 |
| Ag-Bi-Sn 系液相面 Sn 角细部 .....                                      | 369 | Ag-Cu-Sn 系 600℃ 部分等温截面 <sup>[15]</sup> .....                         | 390 |
| Ag-Bi-Zn 系液相面 .....                                             | 370 | Ag-Cu-Sn 系 500℃ 部分等温截面 <sup>[15]</sup> .....                         | 390 |
| Ag-Cd-Cu 系液相面 <sup>[14]</sup> .....                             | 370 | Ag-Cu-Sn 系 37℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                            | 391 |
| Ag-Cd-Cu 系 600℃ 等温截面 <sup>[14]</sup> .....                      | 371 | Ag-Cu-Ti 系液相面 <sup>[15]</sup> .....                                  | 391 |
| Ag-Cd-Cu 系 500℃ 等温截面 <sup>[14]</sup> .....                      | 371 | Ag-Cu-Ti 系 700℃ 等温截面 <sup>[15]</sup> .....                           | 392 |

|                                                           |     |                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------|-----|
| Ag-Cu-Zn 系液相面 <sup>[7]</sup> .....                        | 392 | Al-Cu-Zn 系 200℃等温截面 <sup>[7]</sup> .....        | 414 |
| Ag-Cu-Zn 系 600℃等温截面 <sup>[7]</sup> .....                  | 393 | Al-Cu-Zr 系液相面 .....                             | 415 |
| Ag-Cu-Zn 系 500℃等温截面 <sup>[14]</sup> .....                 | 393 | Al-Ge-Mg 系液相面 .....                             | 415 |
| Ag-Cu-Zn 系 350℃等温截面 <sup>[7]</sup> .....                  | 394 | Al-Ge-Mg 系 (Al 角) 液相面 .....                     | 416 |
| Ag-Cu-Zn 系熔融平衡图 <sup>[14]</sup> .....                     | 394 | Al-Ge-Si 系液相面 .....                             | 416 |
| Ag-Cu-Zn 系 $w(\text{Ag})=20\%$ 等值截面 <sup>[15]</sup> ..... | 395 | Al-Ge-Zn 系液相面 .....                             | 417 |
| Ag-Cu-Zn 系 $w(\text{Zn})=20\%$ 等值截面 <sup>[15]</sup> ..... | 395 | Al-Li-Mg 系液相面 .....                             | 417 |
| Ag-Cu-Zr 系液相面 .....                                       | 396 | Al-Li-Mn 系 (Al 角) 液相面 .....                     | 418 |
| Ag-In-Mg 系液相面 .....                                       | 396 | Al-Li-Si 系 (Al 角) 液相面 .....                     | 418 |
| Ag-In-Mg 系 280℃等温截面 <sup>[15]</sup> .....                 | 397 | Al-Li-Zn 系液相面 .....                             | 419 |
| Ag-In-Sn 系液相面 .....                                       | 397 | Al-Mg-Mn 系 (Al 角) 液相面 .....                     | 419 |
| Ag-Mg-Sn 系液相面 .....                                       | 398 | Al-Mg-Si 系液相面 .....                             | 420 |
| Ag-Mg-Zn 系 450℃等温截面 <sup>[15]</sup> .....                 | 398 | Al-Mg-Si 系 (Al 角) 液相面 .....                     | 420 |
| Ag-Mg-Zn 系 250℃等温截面 <sup>[15]</sup> .....                 | 399 | Al-Mg-Si 系液相面 <sup>[7]</sup> .....              | 421 |
| Ag-Sb-Sn 系液相面 .....                                       | 399 | Al-Mg-Si 系固相面 (富 Al) <sup>[7]</sup> .....       | 421 |
| Ag-Sb-Sn 系室温截面 <sup>[15]</sup> .....                      | 400 | Al-Mg-Si 系富 Al 区最大固溶浓度曲线 <sup>[7]</sup> .....   | 422 |
| Ag-Sn-Zn 系非平衡 Sn 角共晶区 <sup>[22]</sup> .....               | 400 | Al-Mg-Zn 系液相面 <sup>[7]</sup> .....              | 422 |
| Al-Be-Cu 系液相面 .....                                       | 401 | Al-Mg-Zn 系 (Al 角) 固相面 <sup>[7]</sup> .....      | 423 |
| Al-Be-Si 系液相面 (Al 角) .....                                | 401 | Al-Mg-Zn 系 (Al 角) 固溶浓度面 <sup>[7]</sup> .....    | 423 |
| Al-Be-Ti 系液相面 .....                                       | 402 | Al-Mg-Zn 系 335℃等温截面 <sup>[7]</sup> .....        | 424 |
| Al-Cd-Cu 系液相面 (Al-Cd 侧) .....                             | 402 | Al-Mg-Zn 系液相面 .....                             | 424 |
| Al-Cd-Sb 系液相面 .....                                       | 403 | Al-Mn-Ni 系液相面 .....                             | 425 |
| Al-Cd-Sn 系液相面 .....                                       | 403 | Al-Mn-Si 系液相面 <sup>[7]</sup> .....              | 425 |
| Al-Cd-Zn 系液相面 .....                                       | 404 | Al-Mn-Si 系 (Al 角) 460℃等温截面 <sup>[7]</sup> ..... | 426 |
| Al-Ce-Cu 系液相面 .....                                       | 404 | Al-Mn-Si 系 (Al 角) 固相面 .....                     | 426 |
| Al-Cr-Mn 系液相面 .....                                       | 405 | Al-Mn-Si 系液相面 .....                             | 427 |
| Al-Cu-Li 系液相面 .....                                       | 405 | Al-Mn-Sr 系液相面 .....                             | 427 |
| Al-Cu-Mg 系液相面 .....                                       | 406 | Al-Ni-Si 系液相面 .....                             | 428 |
| Al-Cu-Mg 系 (Al 角细部) .....                                 | 407 | Al-Ni-Si 系 (Ni 角) 液相面 .....                     | 428 |
| Al-Cu-Mn 系液相面 .....                                       | 407 | Al-Ni-Ti 系液相面 (1) .....                         | 429 |
| Al-Cu-Ni 系液相面 (1) .....                                   | 408 | Al-Ni-Ti 系液相面 (2) .....                         | 429 |
| Al-Cu-Ni 系液相面 (2) <sup>[7]</sup> .....                    | 408 | Al-Si-Zn 系液相面 .....                             | 430 |
| Al-Cu-Ni 系 900℃等温截面 <sup>[7]</sup> .....                  | 409 | Al-Sn-Zn 系液相面 .....                             | 430 |
| Al-Cu-Si 系液相面 <sup>[7]</sup> .....                        | 409 | Au-Sb-Si 系液相面 <sup>[15]</sup> .....             | 431 |
| Al-Cu-Si 系固相面 <sup>[7]</sup> .....                        | 410 | Au-Sb-Sn 系液相面 .....                             | 431 |
| Al-Cu-Sn 系液相面 .....                                       | 410 | Au-Si-Sn 系液相面 .....                             | 432 |
| Al-Cu-Sr 系液相面 .....                                       | 411 | Bi-Cd-Sn 系液相面 .....                             | 432 |
| Al-Cu-Ti 系液相面 .....                                       | 411 | Bi-Cd-Zn 系液相面 .....                             | 433 |
| Al-Cu-Zn 系液相面 (1) .....                                   | 412 | Bi-Cu-Zn 系液相面 .....                             | 433 |
| Al-Cu-Zn 系液相面 (2) <sup>[7]</sup> .....                    | 412 | Bi-In-Pb 系液相面 (1) .....                         | 434 |
| Al-Cu-Zn 系 700℃等温截面 <sup>[7]</sup> .....                  | 413 | Bi-In-Pb 系液相面 (2) .....                         | 434 |
| Al-Cu-Zn 系 550℃等温截面 <sup>[7]</sup> .....                  | 413 | Bi-In-Pb 系液相面 (3) .....                         | 435 |
| Al-Cu-Zn 系 350℃等温截面 <sup>[7]</sup> .....                  | 414 |                                                 |     |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| Bi-In-Sn 系液相面 (1) .....                                         | 435 |
| Bi-In-Sn 系液相面 (2) .....                                         | 436 |
| Bi-In-Zn 系液相面 .....                                             | 436 |
| Bi-Pb-Sn 系液相面 .....                                             | 437 |
| Bi-Pb-Zn 系液相面 .....                                             | 437 |
| Bi-Sb-Sn 系液相面 .....                                             | 438 |
| Bi-Sn-Zn 系液相面 .....                                             | 438 |
| Ca-Cu-Sn 系液相面 .....                                             | 439 |
| Cd-Cu-Sn 系液相面 .....                                             | 440 |
| Cd-Cu-Zn 系液相面 .....                                             | 440 |
| Cd-In-P 系液相面 .....                                              | 441 |
| Cd-In-Sn 系液相面 .....                                             | 441 |
| Cd-In-Zn 系液相面 .....                                             | 442 |
| Cd-Li-Mg 系液相面 .....                                             | 442 |
| Cd-Sn-Zn 系液相面 .....                                             | 443 |
| Ce-Mg-Zn 系液相面 .....                                             | 443 |
| Ce-Mg-Zn 系 (Mg 角) 液相面 .....                                     | 444 |
| Cu-In-Sn 系液相面 .....                                             | 444 |
| Cu-In-Sn 系 (In 角) 液相面 .....                                     | 445 |
| Cu-Mg-Zn 系液相面 .....                                             | 446 |
| Cu-Mg-Zn 系 (Zn 角) 液相面 .....                                     | 446 |
| Cu-Mn-Si 系液相面 .....                                             | 447 |
| Cu-Mn-Sn 系液相面 .....                                             | 448 |
| Cu-Mn-Sn 系 750℃ 等温截面 <sup>[9]</sup> .....                       | 448 |
| Cu-Mn-Sn 系 350℃ 等温截面 <sup>[9]</sup> .....                       | 449 |
| Cu-Mn-Zn 系液相面 .....                                             | 449 |
| Cu-Mn-Zn 系的等温液相线及 800℃、400℃、<br>360℃时的固溶范围 <sup>[9]</sup> ..... | 450 |
| Cu-Mn-Zn 系 20℃时的固溶范围 <sup>[9]</sup> .....                       | 450 |
| Cu-Ni-P 系液相面 .....                                              | 450 |
| Cu-Ni-Sn 系液相面 .....                                             | 451 |
| Cu-Ni-Sn 系 (Sn 角) 液相面 .....                                     | 452 |
| Cu-Ni-Sn 系 (Cu 角) 局部液相面 <sup>[7]</sup> .....                    | 452 |
| Cu-Ni-Sn 系 (Cu 角) 固相面 <sup>[7]</sup> .....                      | 453 |
| Cu-Ni-Sn 系 (Cu 角) 780℃ 等温截面 <sup>[7]</sup> .....                | 453 |
| Cu-Ni-Sn 系 700℃ 等温截面 <sup>[7]</sup> .....                       | 454 |
| Cu-Ni-Sn 系 300℃ 等温截面 <sup>[7]</sup> .....                       | 454 |
| Cu-Ni-Zn 系液相面 <sup>[7]</sup> .....                              | 455 |
| Cu-Ni-Zn 系 775℃ 等温截面 <sup>[7]</sup> .....                       | 455 |
| Cu-Ni-Zn 系 650℃ 等温截面 <sup>[7]</sup> .....                       | 456 |
| Cu-Ni-Zn 系低温等温截面 <sup>[7]</sup> .....                           | 456 |
| Cu-Ni-Zn 系液相面等温线投影图 <sup>[9]</sup> .....                        | 457 |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| Cu-Ni-Zn 系 800℃ 等温截面 <sup>[9]</sup> .....                            | 457 |
| Cu-Ni-Zn 系 400℃ 等温截面 <sup>[9]</sup> .....                            | 457 |
| Cu-Ni-Zn 系 20℃ 等温截面 <sup>[9]</sup> .....                             | 458 |
| Cu-P-Sn 系 (Cu 角) 等温截面 (1) <sup>[9]</sup> .....                       | 458 |
| Cu-P-Sn 系 (Cu 角) 等温截面 (2) <sup>[9]</sup> .....                       | 459 |
| Cu-P-Sn 系含 Sn 量固定含 P 量变化时<br>多温截面 <sup>[9]</sup> .....               | 460 |
| Cu-P-Sn 系含 P 量固定含 Sn 量变化时<br>多温截面 <sup>[9]</sup> .....               | 460 |
| Cu-P-Zn 系液相面 .....                                                   | 461 |
| Cu-Pb-Zn 系液相面 .....                                                  | 461 |
| Cu-Sb-Sn 系液相面 .....                                                  | 462 |
| Cu-Sb-Sn 系 (Sn 角) 液相面 .....                                          | 462 |
| Cu-Si-Zn 系液相面 .....                                                  | 463 |
| Cu-Si-Zn 系 (Cu 角) 固态相区图 <sup>[9]</sup> .....                         | 463 |
| Cu-Si-Zn 系 (Cu 角) Si 和 Zn 含量对<br>$\alpha$ 相区的影响 <sup>[3]</sup> ..... | 464 |
| Cu-Sn-Zn 系液相面 <sup>[7]</sup> .....                                   | 464 |
| Cu-Sn-Zn 系 (Cu 角) 500℃ 等温截面 <sup>[7]</sup> .....                     | 465 |
| Cu-Sn-Zn 系不同温度的等温截面 <sup>[9]</sup> .....                             | 465 |
| Cu-Sn-Zn 系含 Sn 量固定时的多温截面 <sup>[9]</sup> .....                        | 467 |
| Cu-Sn-Zn 系液相面 .....                                                  | 468 |
| Cu-Ti-Zn 系液相面 (Cu-Zn 边) .....                                        | 468 |
| Cu-Ti-Zr 系液相面 .....                                                  | 469 |
| In-Sb-Sn 系液相面 .....                                                  | 469 |
| In-Sb-Sn 系 (Sn 角) 液相面 .....                                          | 470 |
| In-Sb-Zn 系液相面 .....                                                  | 470 |
| In-Sn-Zn 系液相面 .....                                                  | 471 |
| 3.4 四元系合金相图 <sup>[15]</sup> .....                                    | 471 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 600℃ 等温截面 .....                                        | 471 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 500℃ 等温截面 .....                                        | 472 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=5\%$ 时的液相面 .....                         | 472 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=5\%$ 时的 600℃<br>等温截面 .....               | 473 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=5\%$ 时的 500℃<br>等温截面 .....               | 473 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=10\%$ 时的液相面 .....                        | 474 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=10\%$ 时的 600℃<br>等温截面 .....              | 474 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=10\%$ 时的 500℃<br>等温截面 .....              | 475 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=20\%$ 时的液相面 .....                        | 475 |

|                                                                                                                                              |     |                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=20\%$ 时的 $600^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....                                                                       | 476 | Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=40\%$ 时的 $250^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....     | 489 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=20\%$ 时的 $500^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....                                                                       | 476 | Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=20\%$ 和 $w(\text{Ag})=10\%$<br>时的等值截面 .....    | 489 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=5\%$ 和 $w(\text{Cu})=15\%$ 、<br>$w(\text{Cd})=15\%$ 及 $w(\text{Cd})=25\%$ 时的多温截面 ...                             | 477 | Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=40\%$ 和 $w(\text{Ag})=10\%$<br>时的等值截面 .....    | 490 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=5\%$ 和 $w(\text{Cu})=35\%$ 、<br>$w(\text{Ag})=35\%$ 及 $w(\text{Ag})=15\%$ 时的多温截面 ...                             | 477 | Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=20\%$ 和 $w(\text{Ag})=40\%$<br>时的等值截面 .....    | 490 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=5\%$ 和一定 Cd 含量时的<br>多温截面 .....                                                                                   | 478 | Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=20\%$ 和 $w(\text{Zn})=10\%$<br>时的多温截面 .....    | 491 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=10\%$ 和 $w(\text{Cu})=15\%$ 及<br>$w(\text{Cd})=10\%$ 或 $w(\text{Cd})=20\%$ 时的多温截面 ...                            | 478 | Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=20\%$ 和 $w(\text{Zn})=30\%$<br>时的等值截面 .....    | 491 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=10\%$ 和 $w(\text{Cu})=35\%$ 及<br>$w(\text{Ag})=35\%$ 或 $w(\text{Ag})=15\%$ 时的多温截面 ...                            | 479 | Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=20\%$ 和 $w(\text{Cu})=30\%$<br>时的等值截面 .....    | 492 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=10\%$ 和确定 Cd 含量时的<br>多温截面 .....                                                                                  | 479 | Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Ag})=35\%$ 和 $w(\text{Cu})=25\%$<br>时的等值截面 .....    | 492 |
| Ag-Cd-Cu-Sn 系 $w(\text{Sn})=20\%$ 和 $w(\text{Cd})=10\%$ 或<br>$w(\text{Cd})=20\%$ 、 $w(\text{Cu})=15\%$ 及 $w(\text{Ag})=15\%$<br>时的多温截面 ..... | 480 | Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Ag})=40\%$ 和 $w(\text{Cu})=15\%$<br>时的等值截面 .....    | 493 |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Ag})=10\%$ 时的液相面 .....                                                                                                | 480 | Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Ag})=45\%$ 和 $w(\text{Cu})=15\%$<br>时的等值截面 .....    | 493 |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=10\%$ 时的液相面 .....                                                                                                | 481 | Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Ag})=50\%$ 和 $w(\text{Cu})=15\%$<br>时的等值截面 .....    | 494 |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cu})=10\%$ 时的液相面 .....                                                                                                | 481 | Ag-Cu-Si-Zn 系 $w(\text{Si})=0.25\%$ 时的 $500^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....   | 494 |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Zn})=10\%$ 时的液相面 .....                                                                                                | 482 | Ag-In-Mg-Sn 系 $w(\text{Mg})=90.5\%$ 时的 $450^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....   | 495 |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Ag})=20\%$ 时的液相面 .....                                                                                                | 482 | Ag-In-Mg-Sn 系 $w(\text{Mg})=90.5\%$ 时的 $300^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....   | 495 |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Ag})=40\%$ 时的液相面 .....                                                                                                | 483 |                                                                            |     |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=20\%$ 时的液相面 .....                                                                                                | 483 |                                                                            |     |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=20\%$ 时的 $600^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....                                                                       | 484 |                                                                            |     |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=20\%$ 时的 $500^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....                                                                       | 484 |                                                                            |     |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=20\%$ 时的 $400^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....                                                                       | 485 |                                                                            |     |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=20\%$ 时的 $250^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....                                                                       | 485 |                                                                            |     |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cu})=20\%$ 时的液相面 .....                                                                                                | 486 |                                                                            |     |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Zn})=20\%$ 时的液相面 .....                                                                                                | 486 |                                                                            |     |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=40\%$ 时的液相面 .....                                                                                                | 487 |                                                                            |     |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=40\%$ 时的 $600^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....                                                                       | 487 |                                                                            |     |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=40\%$ 时的 $500^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....                                                                       | 488 |                                                                            |     |
| Ag-Cd-Cu-Zn 系 $w(\text{Cd})=40\%$ 时的 $400^\circ\text{C}$<br>等温截面 .....                                                                       | 488 |                                                                            |     |
|                                                                                                                                              |     | 第 4 章 相结构及简要注释 .....                                                       | 496 |
|                                                                                                                                              |     | 附录 .....                                                                   | 601 |
|                                                                                                                                              |     | 附录 A 元素周期表 <sup>[16]</sup> .....                                           | 601 |
|                                                                                                                                              |     | 附录 B 元素的物理性质 <sup>[4,13]</sup> .....                                       | 602 |
|                                                                                                                                              |     | 附录 C-1 液态金属的表面张力 <sup>[4]</sup> .....                                      | 608 |
|                                                                                                                                              |     | 附录 C-2 金属及合金的表面张力 <sup>[19]</sup> .....                                    | 609 |
|                                                                                                                                              |     | 附录 C-3 一些金属系统的表面张力 <sup>[20]</sup> .....                                   | 611 |
|                                                                                                                                              |     | 附录 D 主要金属元素的同素异构转变 <sup>[13]</sup> ...                                     | 612 |
|                                                                                                                                              |     | 附录 E 元素的共价半径和原子半径<br>(单位: $\times 10^2 \text{ pm}$ ) <sup>[16]</sup> ..... | 614 |
|                                                                                                                                              |     | 附录 F 元素的电负性 <sup>①[4]</sup> .....                                          | 615 |
|                                                                                                                                              |     | 附录 G 摩尔百分数与质量百分数的转换 ...                                                    | 616 |
|                                                                                                                                              |     | 附录 H 晶体结构类型、晶系、空间群 .....                                                   | 617 |
|                                                                                                                                              |     | 参考文献 .....                                                                 | 624 |

# 第 1 章 合金相图的概念

## 1.1 合金及相图

所谓合金是指两种或两种以上的金属元素或金属与非金属元素的熔合体，通常具有金属特性的物质。钎料绝大多数是合金，是由二元、三元、四元甚至更多元素熔合而成的合金，除纯铜以外，用纯金属作钎料的很少见。

相图是用来描述合金的状态与温度及成分之间关系的简明图形。在某一合金系中，欲知任一成分的合金在某一温度时的状态，只要在该相图上找出相应的标象点，根据标象点所在的位置，就可了解此时合金中存在哪些相，各相的成分及其相对量，再从各相的相对量及各相的性质，可估计该合金的大致性能，但相图不能确定一个合金的具体结构状态，如相结构、晶粒大小与形状、相的分布状况和弥散程度等。生产实践中相图常作为合金成分设计，铸造、压力加工、热处理、焊接等热加工方法制订工艺规程的重要依据，钎料合金配方设计更离不开合金相图。

## 1.2 合金相图中常用的名词

### 1. 组元

通常把组成合金的最简单、最基本而且能独立存在的物质称为组元。在大多数情况下，组元就是元素；但在所研究的合金系中，存在着既不分解也不发生任何化学反应的稳定化合物，在合金相图中也可看作是组元，如 Fe-C 系中的  $\text{Fe}_3\text{C}$ ，Cu-P 系中的  $\text{Cu}_3\text{P}$  等，都可视为一个组元。

### 2. 合金系

由两个或两个以上组元按不同比例配制成一系列成分的合金称为合金系；在钎料合金中如 Cu-P 系合金钎料、Ag-Cu-Zn 系合金钎料等。

### 3. 合金中的相

在合金中那些成分均匀、结构相同、性能相同，并有界面彼此分开的均匀组成部分，称为合金中的相。通常两组元熔合后能形成无限溶解的液体称为液相，是一个相。有时两组元熔化后不能无限溶解，形成两种互不相溶的两种液体并存状态，此时的液体称为两相。例如，Al-Pb 系、Fe-In 系、Fe-Pb 系，液态时都有两相共存现象。

### 4. 相平衡

相平衡是基于物理及化学的一个概念，它表示两个过程方向相反大小相等的一种状态。所以，相平衡是指合金系中，参与结晶或相变过程的各相之间的相对量和相的浓度不再改变时，所达到的一种状态。研究相平衡就是研究平衡体系中相的数目、状态、性质与各个变量之间的关系<sup>[1]</sup>。

### 5. 自由度

自由度是指在一个平衡系统中，保持相数目不变条件下，能独立变化的参变量数目。

### 6. 相律

相律是判别相平衡的一个定律。它表示平衡体系内的自由度、组元数和平衡相数三者之间的关系。其数学表达式如下

$$f = C - P + n \quad (1-1)$$

式中  $f$ ——自由度数；