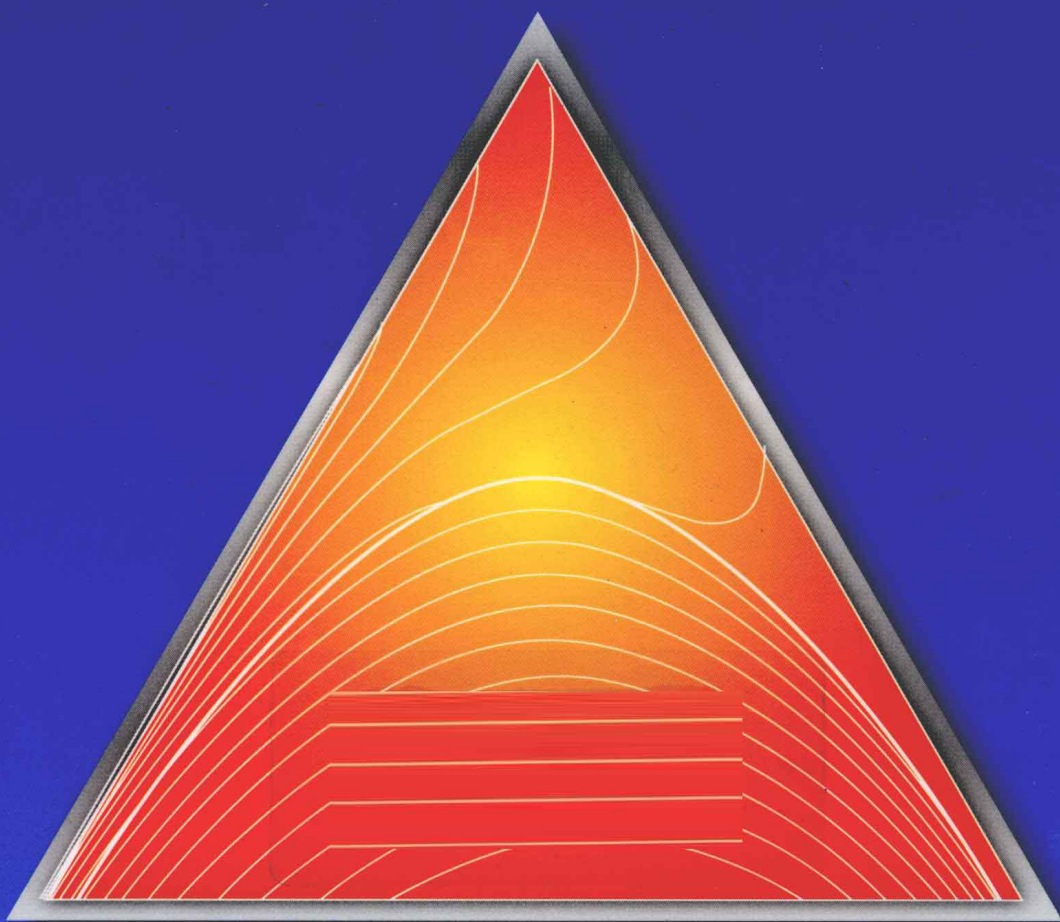


三元合金相图手册

张启运 庄鸿寿 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

三元合金相图手册

张启运 庄鸿寿 编

机械工业出版社

前 言

合金的相图是金属元素之间相互作用最生动和最详尽的几何学描述。包括其间一切物理和化学的反应平衡都会在相图上一一表露无遗。合金相图是化学、物理、冶金、材料、金属、热处理、焊接、铸造等领域所需的重要基础数据。

国内外的合金相图集已有多达 20 种以上版本出版。二元合金相图之中最权威的首推 T. B. Massalski 主编的《二元合金相图集》(Binary Alloy Phase Diagrams), 1990 年出了第 2 版, 约 3000 页, 分三卷。此手册不但数据搜集丰富, 相图表达清晰, 多数相图还经过可靠性评估, 而且所有相图的组成坐标均采用摩尔分数和质量分数两张图对比列出, 对于理论研究和实际应用最为方便。国内由戴永年主编的《二元合金相图集》则有收集最为齐全的优点, 相图的数量高达 2167 幅之多, 对于已发表过的二元相图少有遗漏。至于三元合金相图集, 则以 1995 年美国 P. Villars 等人编辑出版的《三元合金相图手册》(Hand Book of Ternary Alloy Phase Diagrams) 最为权威, 目前出版有 10 卷之多, 超过 13000 页。这一手册内容数据丰富, 包括同一体系多个作者发表的并不一致的相图也都一一并列; 液相限 (liquidus) 投影、等温及多温截面、零变点 (invariant points) 的化学反应以及体系中所出现中间相的晶体学数据都有详尽的叙述, 非常适用于科研和实践的需要。但是这一手册部头过大, 数据编辑复杂, 作为工作中随时查阅用并不方便, 尤其书价昂贵, 国内只有极个别的单位有这一手册的引进。

除部分贵金属的体系以外, 国内尚未见有系统的三元合金相图集编纂出版, 对科研和技术实践的需要来说实属一大缺失, 因此编辑一本以三元合金为主要内容, 便于查阅的相图集, 实属必要之举。

三元合金相图包括液相限的投影和固相中的反应。这些资料浩如烟海, 全面地重新独立搜集、编辑和整理出版三元合金的相图集, 是一项工程浩大, 难于实施的工作。现在我们以现有资料为基础进行摘编、重组, 订正和重绘了有关的相图, 与此同时, 充分查阅了近 20 年来的文献资料, 进行了补充, 也极力关注并收集了国人的一些工作, 组成了现在这本《三元合金相图手册》, 希望它能有益于国内科技界的研究和实践工作的需要。

考虑到多层次读者的需要, 将本书分成为 3 篇: 第 1 篇是合金相图概论, 采用简单、易读的语言概略叙述了必要的相图基础, 希望对那些对相图比较生疏的读者有所帮助, 以便他们能够比较方便地运用本书。第 2 篇是三元合金相图集, 共收集了近千幅三元相图液相限的投影, 液相限是相图中最生动、最重要的部分, 这里排除了多温 and 等温截面图以及零变点 (invariant points) 化学反应等数据。这一方面缘于精练版面和篇幅的考虑, 另一方面也是由于读者如果对第 1 篇的内容有相当的理解, 再结合侧边的二元相图, 常可估绘出三元系固相中大致的相关关系, 也不难自行写出零变点的化学反应方程。第 3 篇是元素的物理、化学和力学参数, 这些数据对相图的实践分析有很重要的意义。在这里将元素有关数据以填入周期表的方式表达出来, 不但查阅方便, 更有利于观察元素性质之间的相互辩证

关联。

由于计算机技术的发展，近十余年来的文献中，根据热力学基本参数进行相图的计算已渐成趋势，这对优化实验相图起了很好的作用。但是不同作者由于所用计算方法和程序的不同，基础数据取舍的相异，描绘出同一体系的相图，往往有很大的差别。归根到底，计算相图的可靠确立，需要有足够实验数据的佐证。本书在某些体系缺乏实验相图资料的情况下，也收集了部分有关的计算相图，作为必要时的参考。

为了更便于实用，特别统一了本书中相图的规格，所有三角相图顶端到底边的距离都严格调整为100mm，这样使用者就能用米尺方便地直接量出任何状态点的组成而不需另行换算。

本书的相图绝大多数采用摩尔分数的三角坐标表达。由于多方搜集来的相图坐标表达方式不一，书中已经尽量将相图转换成统一的格式，但是相图组成坐标的全面转换不是很容易做到的，因此不少相图只好直接采用了原文献的组成坐标，这样就既有摩尔分数坐标和质量分数坐标的相图，又有三角坐标和直角坐标的相图。我们对克服这一缺点的能力有限，只好向读者表达歉意了，也同时希望读者能注意相图组成单位的标注，以免应用时引起混乱。

书中，无论对相图原理的诠释还是对相图数据的整理和表达，编者都已竭尽所能，力求准确、清晰和无误，但限于编者的学识和编辑技术的水平，书中不足、不当和错误之处仍然在所难免，衷心希望读者能够不吝指教，以便今后得以及时修正。

编者要感谢卢洁红硕士和张雷硕士，他们在为本手册搜集资料的过程中付出了巨大的努力。

编者特别要向国家自然科学基金委员会的陈荣教授、北京科技大学的姜建壮教授和昆明贵金属研究所的刘泽光研究员表示衷心的感谢，他们对本手册的编辑出版给予了热情的鼓励、支持和帮助。

编 者

目 录

前言

第 1 篇 合金相图概论

第 1 章 相图中的一些基本概念和术语	1
1.1 相	1
1.2 体系	1
1.3 相平衡	1
1.4 组元	2
1.5 体系的自由度	2
1.6 体系的液相限和固相限	2
1.7 结线、相区、相边界和相图	3
1.8 结晶过程	3
第 2 章 单元系相图	4
第 3 章 二元系相图	5
3.1 简单二元低共熔系	6
3.2 固相完全互溶的二元系	8
3.3 固相中组元间有限互溶的二元系	9
3.3.1 转熔型固相有限互溶的二元系	9
3.3.2 低共熔型固相有限互溶的二元系	10
3.4 有新化合物或新中间相生成的二元系	11
3.4.1 生成同分熔化化合物 (congruent melting compound) 的二元系	11
3.4.2 生成异分熔化化合物 (incongruent melting compound) 的二元系	12
3.4.3 化合物降温反而分解的二元系	13
3.5 液相分层的二元系	13
3.5.1 二组元间有低共熔或转熔反应而同时液相又分层的二元系	14
3.5.2 二组元间有化合物生成而化合物熔化时分解为两个液相的二元系	15
3.5.3 一个固相组元熔化时与另一固相组元相互间完全没有作用, 同时液相也分层的二元系	15
3.6 二元系中固相反应平衡的滞后	16
3.7 组元有多晶转变点和固相中有固相相反应的二元系	17
3.7.1 只有一个组元具有多晶转变点的二元系	17
3.7.2 两个组元都有多晶转变点的二元系	19
3.7.3 固溶体相冷却过程中有新化合物相产生的二元系	21
3.7.4 连续固溶体冷却过程中分裂为有限固溶的二元系	21
3.8 二元系相图总结	22
3.8.1 再述相区的定义和构成	22
3.8.2 二元系中三相平衡水平线的化学反应性质	22
3.8.3 二元系相图的副分 (biangulation)	23
3.8.4 相区边界规则	24
3.9 相图的实验构筑	24
3.9.1 热分析方法	24
3.9.2 差热分析 (DTA) 和示差扫描量热 (DSC) 法	26
3.9.3 目测变温法 (visual polythermometric method)	27
3.9.4 相边界的淬冷法判定	28
3.9.5 组成-性质图法	28
3.9.6 相图研究方法总结	29
第 4 章 三元系相图	30
4.1 三元立体相图的投影和组成的表达	30
4.1.1 怎样读取三元相图坐标的组成?	31
4.1.2 怎样将三元相图中某状态点的摩尔分数组成坐标转换为质量分数组成坐标?	32
4.1.3 怎样将三元相图中某点的质量分数组成坐标转换为摩尔分数组成坐标?	32
4.1.4 其它形式的相图坐标	33
4.2 三元简单低共熔系相图	33
4.3 侧边二元系具有连续固溶体的三元系相图	37
4.4 二元系侧边为连续固溶体和有限固溶体混合的三元系	39
4.4.1 一个侧边是低共熔型的有限固溶体而另两个侧边都是连续固溶体的三元系	39
4.4.2 两个侧边是低共熔型的有限固溶体而只有一个侧边是连续固溶体的三元系	40
4.4.3 两个侧边是转熔型的有限固溶体而另一个侧边是连续固溶体的三元系	41
4.4.4 两个侧边分别是低共熔型和转熔	

型的有限固溶体而另一个侧边		并且有双转熔反应的三元系	54
是连续固溶体的三元系	43	4.7 液相分层的三元系	56
4.5 三个侧边都是二元低共熔型有限		4.7.1 在一个组元液相限初晶区上有	
固溶体的三元系相图	44	液相分层的三元系	56
4.6 有化合物生成的三元系	46	4.7.2 液相分层跨在两个组元	
4.6.1 有同分熔化化合物生成的三元系		液相限初晶区上的三元系	59
和三元系的副分 (triangulation)	46	4.8 三元系相图总结	61
4.6.2 一个侧边二元系有异分熔化		4.8.1 相区的形成	61
化合物生成的三元系	47	4.8.2 三元相图中零变点的化学	
4.6.3 两个侧边二元系都有异分		平衡反应	61
熔化化合物生成的三元系	50	4.8.3 再议三元相图结晶过程的	
4.6.4 体系内部有异分熔化化合物生成并且		几何学诠释和涵义	63
有两个 P 点和一个 E 点的三元系	52	4.8.4 获取三元合金相图的实验方法	64
4.6.5 体系内部有异分熔化化合物生成			

第 2 篇 三元合金相图集

Ag - Al - Cu (1)	66	Ag - Bi - S	81
Ag - Al - Cu (2)	66	Ag - Bi - Sb	81
Ag - Al - Cu (3)	67	Ag - Bi - Sn	82
Ag - Al - Ge	67	Ag - Bi - Sn (Sn - Br 侧细部)	82
Ag - Al - In	68	Ag - Bi - Tl	83
Ag - Al - Mg	68	Ag - Bi - Zn	83
Ag - Al - Mn	69	Ag - Cd - Cu	84
Ag - Al - Pb	69	Ag - Cd - Mg	84
Ag - Al - Si	70	Ag - Cd - S	85
Ag - Al - Sn	70	Ag - Cd - Sn	85
Ag - Al - Ti	71	Ag - Cd - Te	86
Ag - Al - Zn	71	Ag - Cd - Zn	86
Ag - As - Ga	72	Ag - Ce - La	87
Ag - As - Pb	72	Ag - Co - Pd	87
Ag - As - S	73	Ag - Cr - Pd	88
Ag - As - Se	73	Ag - Cu - Fe	88
Ag - Au - Bi	74	Ag - Cu - Gd	89
Ag - Au - Cu	74	Ag - Cu - Ge (1)	89
Ag - Au - Ge	75	Ag - Cu - Ge (2)	90
Ag - Au - Ni	75	Ag - Cu - In (1)	90
Ag - Au - Pb	76	Ag - Cu - In (2)	91
Ag - Au - Pd	76	Ag - Cu - In (In 角)	91
Ag - Au - Pt	77	Ag - Cu - In (3)	92
Ag - Au - Sb	77	Ag - Cu - Mg	92
Ag - Au - Si	78	Ag - Cu - Mn	93
Ag - Au - Sn (1)	78	Ag - Cu - Ni	93
Ag - Au - Sn (2)	79	Ag - Cu - P	94
Ag - Au - Te	79	Ag - Cu - Pb	94
Ag - Bi - Cu	80	Ag - Cu - Pd	95
Ag - Bi - Pb	80	Ag - Cu - Sb	95
		Ag - Cu - Se	96

Ag - Cu - Si	96	Al - As - P	121
Ag - Cu - Sn (1)	97	Al - As - Sb	121
Ag - Cu - Sn (2)	97	Al - Au - Sn	122
Ag - Cu - Sn (Sn 角)	98	Al - B - C	122
Ag - Cu - Te	98	Al - B - Co	123
Ag - Cu - Ti	99	Al - B - Ge	123
Ag - Cu - Zn	99	Al - B - Ni	124
Ag - Cu - Zr (1)	100	Al - B - Ti (Al 角)	124
Ag - Cu - Zr (2)	100	Al - B - Ti	125
Ag - Dy - Sb	101	Al - Ba - Cu	125
Ag - Fe - S	101	Al - Ba - La	126
Ag - Fe - Si	102	Al - Ba - La (Ba 角)	126
Ag - Ga - In	102	Al - Ba - Nd	127
Ag - Ga - Sn	103	Al - Ba - Si	127
Ag - Ga - Te	103	Al - Ba - Sr	128
Ag - Ge - S	104	Al - Ba - Yb	128
Ag - Ge - Se	104	Al - Be - Cu	129
Ag - Ge - Si	105	Al - Be - Mg	129
Ag - Ge - Te	105	Al - Be - Mn	130
Ag - Hg - Pb	106	Al - Be - Si	130
Ag - Hg - Sn	106	Al - Be - Ti	131
Ag - In - Mg	107	Al - Bi - Cu	131
Ag - In - Sn	107	Al - Bi - Mg	132
Ag - Mg - Ni	108	Al - Bi - Mg (Mg 角)	132
Ag - Mg - Pd	108	Al - Bi - Pb	133
Ag - Mg - Sn	109	Al - Bi - Sb	133
Ag - Mn - Pd	109	Al - Bi - Sn	134
Ag - Ni - Pd	110	Al - C - Co	134
Ag - Ni - Sn	110	Al - C - Fe	135
Ag - Pb - S	111	Al - C - Mo	135
Ag - Pb - Sb	111	Al - C - Ni	136
Ag - Pb - Se	112	Al - C - Rh	136
Ag - Pb - Sn	112	Al - C - Si	137
Ag - Pb - Sn (Pb 角细部)	113	Al - Ca - Mn	137
Ag - Pb - Te	113	Al - Ca - Si	138
Ag - Pb - Zn	114	Al - Ca - Zn (1)	138
Ag - Pd - Pt	114	Al - Ca - Zn (2)	139
Ag - Pd - Sn	115	Al - Cd - Cu	139
Ag - S - Sb	115	Al - Cd - Mg	140
Ag - Sb - Se	116	Al - Cd - Mn	140
Ag - Sb - Sn	116	Al - Cd - Sb	141
Ag - Sb - Te	117	Al - Cd - Sn	141
Ag - Se - Sn	117	Al - Cd - Zn	142
Ag - Se - Ti	118	Al - Ce - Cu	142
Ag - Sn - Te	118	Al - Ce - Mg	143
Ag - Te - Ti	119	Al - Co - Cu	143
Al - As - Ga	120	Al - Co - Fe	144
Al - As - In	120	Al - Co - Mg	144

Al - Co - Mn	145	Al - Ga - Ge	169
Al - Co - Ni	145	Al - Ga - Mg	169
Al - Co - Si	146	Al - Ga - P	170
Al - Co - Ti	146	Al - Ga - Sb	170
Al - Co - U	147	Al - Ga - Sn	171
Al - Co - Zn	147	Al - Ga - Zn	171
Al - Cr - Fe	148	Al - Ge - Mg (Al 角)	172
Al - Cr - Mg	148	Al - Ge - Mg	172
Al - Cr - Mn	149	Al - Ge - Nb	173
Al - Cr - Ni	149	Al - Ge - Si	173
Al - Cr - Pt	150	Al - Ge - Sn	174
Al - Cr - Re	150	Al - Ge - Zn	174
Al - Cr - Si	151	Al - Hf - Ni	175
Al - Cr - Ti	151	Al - In - P	175
Al - Cr - Zn	152	Al - In - Sb	176
Al - Cr - Zr	152	Al - In - Sn	176
Al - Cu - Dy	153	Al - La - Mg	177
Al - Cu - Er	153	Al - Li - Mg	177
Al - Cu - Fe	154	Al - Li - Mn	178
Al - Cu - Ge	154	Al - Li - Si	178
Al - Cu - In	155	Al - Li - Zn	179
Al - Cu - Li	155	Al - Li - Zr	179
Al - Cu - Mg	156	Al - Mg - Mn	180
Al - Cu - Mg (Al 角)	156	Al - Mg - Pb	180
Al - Cu - Mn	157	Al - Mg - Sb	181
Al - Cu - Ni	157	Al - Mg - Si	181
Al - Cu - Ni (Al 角)	158	Al - Mg - Si (Al 角)	182
Al - Cu - Sb	158	Al - Mg - Sm	182
Al - Cu - Si	159	Al - Mg - Sn	183
Al - Cu - Sn	159	Al - Mg - Sr (1)	183
Al - Cu - Sr	160	Al - Mg - Sr (2)	184
Al - Cu - Ti	160	Al - Mg - Tl	184
Al - Cu - Zn	161	Al - Mg - Zn	185
Al - Cu - Zr	161	Al - Mn - Ni	185
Al - Fe - Mg	162	Al - Mn - Pd	186
Al - Fe - Mg (Al 角)	162	Al - Mn - Si	186
Al - Fe - Mn	163	Al - Mn - Sr	187
Al - Fe - Mn (Al 角)	163	Al - Mn - Ti	187
Al - Fe - Ni	164	Al - Mn - U	188
Al - Fe - P	164	Al - Mn - V	188
Al - Fe - Pd	165	Al - Mn - Zn	189
Al - Fe - S	165	Al - Mo - Ni	189
Al - Fe - Si (1)	166	Al - Mo - Si	190
Al - Fe - Si (2)	166	Al - Mo - Ti	190
Al - Fe - Si (Al 角)	167	Al - Mo - U (1)	191
Al - Fe - Ti	167	Al - Mo - U (2)	191
Al - Fe - U	168	Al - Na - Si	192
Al - Fe - Zn	168	Al - Nb - Ni (Ni 角)	192

Al - Nb - Ni	193	As - Cd - Ni	217
Al - Nb - Ti (1)	193	As - Cd - S	217
Al - Nb - Ti (2)	194	As - Cd - Te	218
Al - Nd - Sr	194	As - Co - Ni	218
Al - Ni - Re	195	As - Cu - Ga	219
Al - Ni - Ru	195	As - Cu - Pb	219
Al - Ni - Ru (Al 角)	196	As - Cu - Se	220
Al - Ni - Si (Al 角)	196	As - Cu - Sn	220
Al - Ni - Si	197	As - Fe - Ni	221
Al - Ni - Si (Ni 角)	197	As - Fe - S	221
Al - Ni - Sn	198	As - Ga - Ge	222
Al - Ni - Ta	198	As - Ga - In	222
Al - Ni - Ti (1)	199	As - Ga - P	223
Al - Ni - Ti (2)	199	As - Ga - Sb	223
Al - Ni - U	200	As - Ga - Se	224
Al - Ni - V	200	As - Ga - Si	224
Al - Ni - W	201	As - Ga - Sn	225
Al - Ni - Zn	201	As - Ga - Te	225
Al - P - Sb	202	As - Ga - Zn	226
Al - P - Si	202	As - Ge - P	226
Al - Pb - Sb	203	As - Ge - Te	227
Al - Pb - Zn	203	As - In - P	227
Al - Ru - Ti	204	As - In - Pb	228
Al - Sb - Si	204	As - In - Sb	228
Al - Sb - Y	205	As - In - Se	229
Al - Si - Sn	205	As - In - Sn	229
Al - Si - Sr	206	As - In - Te	230
Al - Si - Ti	206	As - In - Zn	230
Al - Si - U	207	As - Pb - Sn	231
Al - Si - V	207	As - S - Sm	231
Al - Si - Y	208	As - S - Yb	232
Al - Si - Zn	208	As - S - Zn	232
Al - Sn - Zn	209	As - Sb - Se	233
Al - Ta - Ti	209	As - Se - Zn	233
Al - Th - U	210	As - Si - Sn	234
Al - Ti - V	210	As - Sn - Te	234
Al - Y - Zn	211	As - Sn - Zn	235
As - Au - Ga	211	As - Te - Ti	235
As - Au - S	212	As - Te - Zn	236
As - Au - Se	212	Au - Be - Si	236
As - Au - Te	213	Au - Bi - Hg	237
As - Bi - Ga	213	Au - Bi - S	237
As - Bi - In	214	Au - Bi - Sb (1)	238
As - Bi - Sn	214	Au - Bi - Sb (2)	238
As - C - Fe	215	Au - Bi - Se	239
As - Cd - Ga	215	Au - Bi - Si	239
As - Cd - Ge	216	Au - Bi - Sn	240
As - Cd - In	216	Au - Bi - Te	240

Au - Bi - Zn	241	B - Co - Nb	265
Au - Cd - Sn	241	B - Co - Sb	265
Au - Cd - Te	242	B - Co - V	266
Au - Cd - Zn	242	B - Co - Zr	266
Au - Co - Cu	243	B - Cr - Ni	267
Au - Co - Pd	243	B - Fe - Mn	267
Au - Co - Sn	244	B - Fe - Nd	268
Au - Co - Sn (Au - Sn 側)	244	B - Fe - Ni	268
Au - Cu - Fe	245	B - Fe - S	269
Au - Cu - Ge	245	B - Ge - Ni	269
Au - Cu - Ni	246	B - Hf - Mo	270
Au - Cu - Pb	246	B - Hf - Ni	270
Au - Cu - Pd	247	B - Hf - Si	271
Au - Cu - Si	247	B - Hf - Ti	271
Au - Fe - Ni	248	B - Hf - Zr	272
Au - Ga - Sn	248	B - In - Ni	272
Au - Ge - Sb (1)	249	B - Mg - Ni	273
Au - Ge - Sb (2)	249	B - Mn - Ni	273
Au - Ge - Si	250	B - Mo - Ni	274
Au - Ge - Sn	250	B - Mo - Ni (Ni 角)	274
Au - Ge - Te	251	B - Mo - W	275
Au - In - Pb	251	B - Nb - Ti	275
Au - In - Sb	252	B - Ni - Sb	276
Au - In - Sn	252	B - Ni - Si	276
Au - Ni - Pd	253	B - Ni - Sn	277
Au - Ni - Sn	253	B - Ni - Ta	277
Au - Ni - Zn	254	B - Ni - Ti	278
Au - Pb - Se	254	B - Ni - V	278
Au - Pb - Si	255	B - Ni - Zn	279
Au - Pb - Sn	255	B - Ni - Zr	279
Au - Pb - Te	256	B - Re - Si	280
Au - Pt - Sn	256	B - Ti - Zr	280
Au - Sb - Se	257	Be - Co - Fe	281
Au - Sb - Si	257	Be - Co - Ni	281
Au - Sb - Sn	258	Be - Cr - Ni	282
Au - Sb - Te	258	Be - Cu - Fe	282
Au - Se - Sn	259	Be - Cu - Ni	283
Au - Si - Sn	259	Be - Fe - P	283
Au - Si - Te	260	Be - Fe - Si	284
Au - Sn - Te	260	Bi - Ca - Mg	284
B - C - Cr	261	Bi - Cd - Hg	285
B - C - Si	261	Bi - Cd - In	285
B - C - Ti	262	Bi - Cd - Pd	286
B - Ca - Ni	262	Bi - Cd - S	286
B - Co - Fe	263	Bi - Cd - Sb	287
B - Co - Ga	263	Bi - Cd - Se	287
B - Co - In	264	Bi - Cd - Sn	288
B - Co - Mo	264	Bi - Cd - Te	288

Bi - Cd - Tl	289	Bi - Sm - Te	313
Bi - Cd - Zn	289	Bi - Sn - Zn	313
Bi - Cu - Mg	290	Bi - Te - Tl	314
Bi - Cu - Ni	290	Bi - Te - Zn	314
Bi - Cu - S	291	C - Co - Cr	315
Bi - Cu - Sb	291	C - Cr - Fe	315
Bi - Cu - Zn	292	C - Cr - V	316
Bi - Fe - S	292	C - Fe - Mo	316
Bi - Fe - Te	293	C - Fe - Ni	317
Bi - Ga - Hg	293	C - Fe - W	317
Bi - Ga - P	294	C - Hf - W	318
Bi - Ga - Sb	294	C - Hf - Zr	318
Bi - Ga - Te	295	C - In - Ni	319
Bi - Ge - Te	295	C - Mn - Ni	319
Bi - Hg - Pb	296	C - Mo - Nb	320
Bi - Hg - Sn	296	C - Mo - Si	320
Bi - Hg - Tl	297	C - Mo - Ta	321
Bi - Hg - Zn	297	C - Mo - Ti	321
Bi - In - P	298	C - Mo - U	322
Bi - In - Pb (1)	298	C - Nb - Ni	322
Bi - In - Pb (2)	299	C - Nb - Ta	323
Bi - In - Pb (3)	299	C - Nb - Ti	323
Bi - In - S	300	C - Nb - V	324
Bi - In - Sb	300	C - Ni - P	324
Bi - In - Sn (1)	301	C - Ni - Pb	325
Bi - In - Sn (2)	301	C - Ni - Ti	325
Bi - In - Zn	302	C - Ni - W	326
Bi - La - Te	302	C - Ni - Y	326
Bi - Mg - Pb	303	C - Pd - Si	327
Bi - Mg - Sn	303	C - Pt - U	327
Bi - Mg - Zn	304	C - Pu - U	328
Bi - Mn - Pb	304	C - Si - Ti	328
Bi - Mn - Sb	305	C - Ta - Ti	329
Bi - Nd - Te	305	C - Ta - W	329
Bi - Ni - Sn	306	C - Ta - Zr	330
Bi - Pb - Sb	306	C - Ti - V	330
Bi - Pb - Sn	307	C - U - W	331
Bi - Pb - Te	307	C - W - Zr	331
Bi - Pb - Zn	308	Ca - Ce - Mg	332
Bi - S - Sb	308	Ca - Cu - Mg	332
Bi - S - Se	309	Ca - Cu - Sn	333
Bi - S - Sn	309	Ca - Fe - P	333
Bi - S - Te	310	Ca - Fe - S	334
Bi - S - Tl	310	Ca - Fe - Si	335
Bi - Sb - Sn	311	Ca - Li - Mg	336
Bi - Sb - Te	311	Ca - Mg - Ni	336
Bi - Se - Sn	312	Ca - Mg - Si	337
Bi - Se - Zn	312	Ca - Mg - Sn	337

Ca - Mg - Sr	338	Cd - Te - Tl	362
Ca - Mg - Zn (1)	338	Cd - Te - Zn	362
Ca - Mg - Zn (2)	339	Ce - Co - Fe	363
Ca - Mn - Si	339	Ce - Co - Pu	363
Cd - Cr - Se	340	Ce - Co - Pu (Ce 角)	364
Cd - Cu - Sn	340	Ce - Cu - Pu	364
Cd - Cu - Zn	341	Ce - Cu - Zr	365
Cd - Ga - Hg	341	Ce - La - Mg	365
Cd - Ga - Pb	342	Ce - Mg - Mn (Mg 角)	366
Cd - Ga - Sb	342	Ce - Mg - Y	366
Cd - Ge - P	343	Ce - Mg - Zn	367
Cd - Ge - S	343	Ce - Mg - Zn (Mg 角)	367
Cd - Ge - Sb	344	Ce - Nd - Ni	368
Cd - Ge - Se	344	Co - Cr - Fe	368
Cd - Ge - Sn	345	Co - Cr - Mo	369
Cd - Ge - Te	345	Co - Cr - Ni	369
Cd - Hg - Na	346	Co - Cr - Ti	370
Cd - Hg - Pb	346	Co - Cu - Fe	370
Cd - Hg - Zn	347	Co - Cu - Ni	371
Cd - In - Na	347	Co - Cu - Pd	371
Cd - In - P	348	Co - Cu - S	372
Cd - In - S	348	Co - Fe - Gd	372
Cd - In - Sb	349	Co - Fe - Mn	373
Cd - In - Sn	349	Co - Fe - Mo	373
Cd - In - Te	350	Co - Fe - Ni	374
Cd - In - Tl	350	Co - Fe - P	374
Cd - In - Zn	351	Co - Fe - Pd	375
Cd - Li - Mg	351	Co - Fe - S	375
Cd - Mg - Pb	352	Co - Fe - Sb	376
Cd - Mg - Tl	352	Co - Fe - Si	376
Cd - Mg - Zn	353	Co - Fe - Sn	377
Cd - P - Sb	353	Co - Fe - Ta	377
Cd - P - Zn	354	Co - Fe - U	378
Cd - Pb - Sb	354	Co - Fe - V	378
Cd - Pb - Sn	355	Co - Fe - W	379
Cd - Pb - Te	355	Co - Fe - Zn	379
Cd - Pb - Tl	356	Co - Ge - Te	380
Cd - Pb - Zn	356	Co - Mn - Pd	380
Cd - S - Sn	357	Co - Mn - U	381
Cd - S - Tl	357	Co - Mo - Ni	381
Cd - Sb - Se	358	Co - Mo - W	382
Cd - Sb - Sn (1)	358	Co - Ni - Pd	382
Cd - Sb - Sn (2)	359	Co - Ni - U	383
Cd - Sb - Zn	359	Co - Ni - V	383
Cd - Se - Sn	360	Co - Ni - W	384
Cd - Se - Tl	360	Co - Pd - S	384
Cd - Sn - Tl	361	Co - Sb - Te	385
Cd - Sn - Zn	361	Co - Sn - Te	385

Co - Te - Ti	386	Cu - Fe - Ti	410
Cr - Cu - Fe	386	Cu - Fe - Zr	411
Cr - Cu - Hf	387	Cu - Ga - Se	411
Cr - Cu - Mo	387	Cu - Ge - Li	412
Cr - Cu - Ni	388	Cu - Ge - Mn	412
Cr - Cu - Pd	388	Cu - Ge - Te	413
Cr - Cu - Se	389	Cu - In - Ni	413
Cr - Cu - Ti	389	Cu - In - Se (1)	414
Cr - Cu - Zr	390	Cu - In - Se (2)	414
Cr - Fe - Mn	391	Cu - In - Sn	415
Cr - Fe - Mo	391	Cu - In - Sn (In 角)	415
Cr - Fe - Ni	392	Cu - Mg - Ni	416
Cr - Fe - P	392	Cu - Mg - Pb	416
Cr - Fe - S	393	Cu - Mg - Sb	417
Cr - Fe - Si	393	Cu - Mg - Si	417
Cr - Fe - Ti	394	Cu - Mg - Sn	418
Cr - Fe - W	394	Cu - Mg - Ti	418
Cr - Hf - Ni	395	Cu - Mg - Zn	419
Cr - Mo - Nb	395	Cu - Mg - Zn (Zn 角)	419
Cr - Mo - Ni	396	Cu - Mn - Ni	420
Cr - Mo - W	396	Cu - Mn - Si	420
Cr - Mo - Zr	397	Cu - Mn - Sn	421
Cr - Nb - Ni	397	Cu - Mn - Zn	421
Cr - Nb - Ti	398	Cu - Mo - Ni	422
Cr - Nb - U	398	Cu - Nb - Ni	422
Cr - Ni - Pd	399	Cu - Nb - Si	423
Cr - Ni - Re	399	Cu - Nb - Sn	423
Cr - Ni - Ru	400	Cu - Ni - P	424
Cr - Ni - Sc	400	Cu - Ni - Pb	424
Cr - Ni - Ta	401	Cu - Ni - Pd	425
Cr - Ni - Ti	401	Cu - Ni - Pt	425
Cr - Ni - V	402	Cu - Ni - S	426
Cr - Ni - W	402	Cu - Ni - Si	426
Cr - Ta - Zr	403	Cu - Ni - Sn	427
Cr - Ti - V	403	Cu - Ni - Sn (Sn 角)	427
Cr - Ti - Zr	404	Cu - Ni - Ti	428
Cr - V - Zr	404	Cu - Ni - V	428
Cr - W - Zr	405	Cu - Ni - W	429
Cs - K - Na	405	Cu - Ni - Zn	429
Cu - Fe - Mn	406	Cu - Ni - Zr	430
Cu - Fe - Mo	406	Cu - P - Sn	430
Cu - Fe - Ni	407	Cu - P - Zn	431
Cu - Fe - P	407	Cu - Pb - S	431
Cu - Fe - Pb	408	Cu - Pd - S	432
Cu - Fe - Pd	408	Cu - Pb - Zn	432
Cu - Fe - S	409	Cu - S - Ti	433
Cu - Fe - Sb	409	Cu - Sb - Sn	434
Cu - Fe - Si	410	Cu - Sb - Sn (Sn 角细部)	434

Cu - Se - Sn	435	Ga - Ge - P	459
Cu - Si - Te	435	Ga - Ge - Pt	460
Cu - Si - Ti	436	Ga - Ge - Se	460
Cu - Si - Zn	436	Ga - Ge - Sn	461
Cu - Sn - Te	437	Ga - Hg - S	461
Cu - Sn - Zn	438	Ga - Hg - Zn	462
Cu - Ti - Zn	438	Ga - In - P	462
Cu - Ti - Zr	439	Ga - In - Sb	463
Fe - Ge - S	439	Ga - In - Sn	463
Fe - Mg - Si	440	Ga - Mn - Te	464
Fe - Mn - Ni	440	Ga - Ni - Te	464
Fe - Mn - P	441	Ga - P - Sb	465
Fe - Mn - Se	441	Ga - P - Si	465
Fe - Mn - Si	442	Ga - P - Sn	466
Fe - Mn - Ti	442	Ga - P - Te	466
Fe - Mn - U	443	Ga - P - Zn	467
Fe - Mo - Ni	443	Ga - Pb - Se	467
Fe - Mo - P	444	Ga - Pt - Sb	468
Fe - Mo - Si	444	Ga - S - Te	468
Fe - Nb - P	445	Ga - S - Ti	469
Fe - Nb - Si	445	Ga - Sb - Se	469
Fe - Nb - Zr	446	Ga - Sb - Sm	470
Fe - Ni - P	446	Ga - Sb - Sn	470
Fe - Ni - Pb	447	Ga - Sb - Te	471
Fe - Ni - Pd	447	Ga - Sb - Zn	471
Fe - Ni - S	448	Ga - Se - Te	472
Fe - Ni - Si	448	Ga - Se - Yb	472
Fe - Ni - Sn	449	Ga - Si - Sn	473
Fe - Ni - Ti	449	Ga - Sn - Zn	473
Fe - Ni - W	450	Ga - Sn - Zn (Ga 角细部)	474
Fe - P - Si	450	Ga - Te - Yb	474
Fe - P - Sn	451	Gd - Mg - Y	475
Fe - P - Ti	451	Ge - In - Sb	475
Fe - P - Zr	452	Ge - In - Se	476
Fe - Pt - S	452	Ge - In - Te	476
Fe - Rh - S	453	Ge - Nb - Ti	477
Fe - S - Sb	453	Ge - P - S	477
Fe - S - Si	454	Ge - Pb - Si	478
Fe - S - Zn	454	Ge - Ru - Si	478
Fe - Sb - Si	455	Ge - S - Te	479
Fe - Si - Sn	455	Ge - S - Ti	480
Fe - Si - Ti (1)	456	Ge - Sb - Se	481
Fe - Si - Ti (2)	456	Ge - Sb - Si	481
Fe - Si - V	457	Ge - Sb - Sn	482
Fe - Si - W	457	Ge - Sb - Te (1)	482
Fe - Si - Zn	458	Ge - Sb - Te (2)	483
Fe - Ti - V	458	Ge - Se - Te	483
Fe - Ti - W	459	Ge - Se - Ti	484

Ge - Si - Sn	485	Mg - Ni - Zn	509
Ge - Te - Tl	485	Mg - Pb - Sb	509
Hf - Si - Ti	486	Mg - Pb - Sn (1)	510
Hg - In - Na	486	Mg - Pb - Sn (2)	510
Hg - In - Sn	487	Mg - Pr - Y	511
Hg - K - Na	487	Mg - Sb - Si	511
Hg - Na - Tl	488	Mg - Sb - Sn	512
Hg - Pb - Sn	488	Mg - Sm - Zn	512
Hg - Pb - Tl	489	Mg - Sn - Zn	513
Hg - Pb - Zn	489	Mg - Sr - Zn	513
Hg - S - Tl	490	Mg - Tl - Zn	514
Hg - Se - Tl	490	Mg - Y - Zn	514
Hg - Sn - Tl	491	Mn - Ni - Pd	515
Hg - Sn - Zn	491	Mo - Nb - Si	515
Hg - Te - Tl	492	Mo - Nb - V	516
Hg - Tl - Zn	492	Mo - Ni - Ti	516
In - Na - Pb	493	Mo - Ni - V	517
In - P - Sb	493	Mo - Pu - U	517
In - Pb - S	494	Mo - Si - Tl	518
In - Pb - Sb	494	Na - S - Sb	518
In - Pb - Se	495	Na - Sb - Se	519
In - Pb - Se (Se 角)	495	Na - Sb - Te	519
In - Pb - Sn	496	Nb - Re - Ta	520
In - Pd - Sb	496	Nb - Si - Ti (1)	520
In - S - Se	497	Nb - Si - Ti (2)	521
In - S - Te	497	Ni - Pb - Te	521
In - Sb - Se	498	Ni - Pd - Pt	522
In - Sb - Sn	498	Ni - Pd - S	522
In - Sb - Sn (Sn 角)	499	Ni - Pt - S	523
In - Sb - Te	499	Ni - Rh - S	523
In - Sb - Tl	500	Ni - S - Sb	524
In - Sb - Zn	500	Ni - Sb - Te	524
In - Se - Sn	501	Os - Re - Ru	525
In - Se - Te	501	P - Si - Zn	525
In - Sn - Tl	502	Pb - S - Se	526
In - Sn - Zn	502	Pb - S - Sn	526
La - Mg - Ni (Mg 角)	503	Pb - S - Te	527
La - Mg - Ni	503	Pb - S - Tl	527
La - Mg - Si	504	Pb - Sb - Sn	528
La - Mg - Zn	504	Pb - Sb - Te	528
Li - Mg - Sn (1)	505	Pb - Sb - Zn	529
Li - Mg - Sn (2)	505	Pb - Se - Sn	529
Li - Mn - Si	506	Pb - Se - Te	530
Mg - Nd - Pr	506	Pb - Se - Tl	530
Mg - Nd - Zn	507	Pb - Sn - Sr	531
Mg - Nd - Y	507	Pb - Sn - Te	531
Mg - Ni - Pd	508	Pb - Sn - Zn	532
Mg - Ni - Y	508	Pb - Te - Tl	532

Pb - Te - Zn	533	Si - Ti - Zr	536
Pr - S - U	533	Sn - Te - Ti	536
Pt - Pu - Rh	534	Sn - Ti - V	537
Sb - Sn - Te	534	Th - Ti - Zr	537
Sb - Sn - Zn	535	Th - U - Zr	538
Si - Ti - W	535		

第 3 篇 元素的物理、化学和力学参数

表 1 元素名称和相对原子质量	540	表 6 元素的密度和线胀系数	545
表 2 元素的晶体构型、熔点和沸点	541	表 7 元素的比热容和热导率	546
表 3 元素的共价半径和原子半径	542	表 8 元素的电阻率和超导温度	547
表 4 元素的电负性	543	三元合金相图索引	548
表 5 元素的熔盐电动势	544		

第 1 篇

合金相图概论

第 1 章 相图中的一些基本概念和术语

1.1 相

相的概念可以表述为：体系中化学性质和物理性质都均匀的部分。相和这个均匀部分的质量或体积无关。不同的相之间有界面隔开，例如水是一个相，食盐（ NaCl ）是另一个相。如果把少量食盐溶解在水中，形成不饱和的水溶液——盐水。这个盐水还是一个相，因为这是 H_2O 、 Na^+ 、 Cl^- 混匀的一个整体，溶液内各个部分的化学和物理性质都是一样的。如果盐加得过多，在某个温度下溶解达到平衡以后，还剩下一些固态的盐不能完全溶解，那么这个体系就是：饱和盐水 + NaCl 两个相。也就是相的数目是 2。在合金体系中情况完全相似，只不过温度更高，也不透明，难于直观罢了。

1.2 体系

把欲研究的各种物质孤立在一一定的范围之内（例如利用密闭的容器），不和范围外各种因素发生关系，以便能研究范围以内不同条件下相的关系。这范围以内的物质和条件就形成了“体系”（system）。

1.3 相平衡

热力学研究的体系中，相和相之间在一定的温度和压力下达到平衡时的相关系（phase relation）常称之为“相平衡”（phase equilibrium）。所谓平衡，是指两个相（或多个相）之间交互作用速率相等时的相关系。例如食盐在纯水中溶解饱和时，固相的盐和液相的饱和溶液达到平衡。这时固态的盐溶入溶液里的速率和溶液里的 NaCl 沉积出固态盐的速率相等，达到一种动态的平衡，溶液的宏观浓度不再随时间的延长