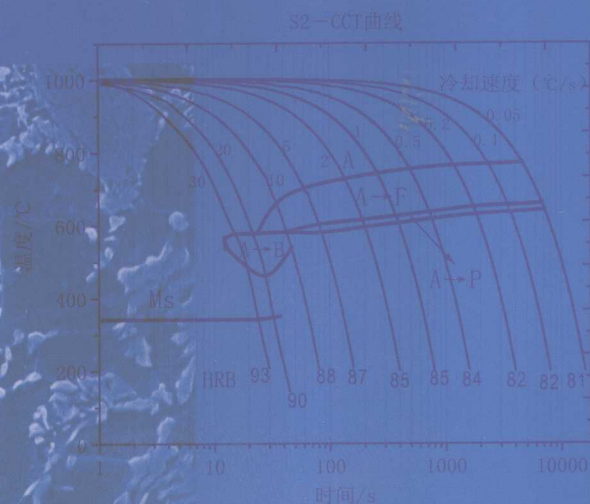
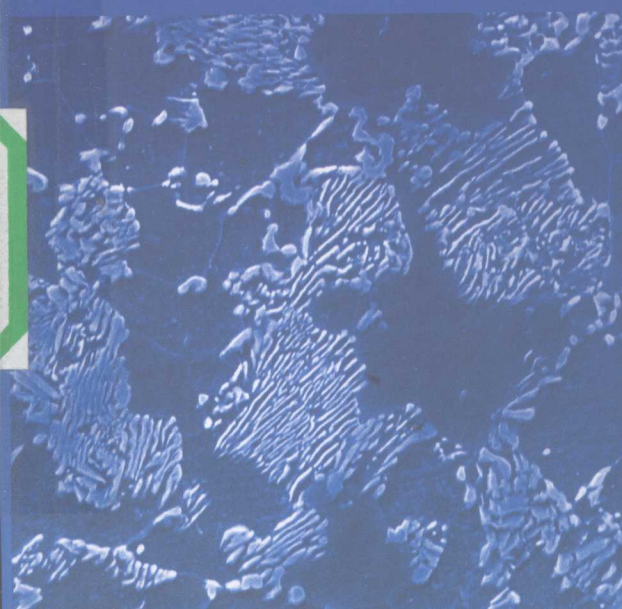


金属材料 CCT 曲线 测定及绘制

JINSHU CAILIAO CCT QUXIAN
CEDING JI HUIZHI

徐光 王巍 张鑫强 付立铭 编著



化学工业出版社

武汉科技大学材料与冶金学院、钢铁冶金与
资源利用省部共建教育部重点实验室资助

金属材料 CCT 曲线 测定及绘制

JINSHU CAILIAO CCT QUXIAN
CEDING JI HUIZHI



化学工业出版社

· 北京 ·

张益善 李海英

元 90.80 : 价 定

本书介绍了金属材料相变的基础知识、连续冷却转变曲线 (CCT 曲线) 的测定方法、绘制步骤、绘制 CCT 曲线应注意的问题、CCT 曲线实例等。

本书详细介绍了钢铁材料 CCT 曲线的测定方法和绘制步骤, 同时, 书中提供了大量的作者绘制好的 CCT 曲线和相应的金属相图, 可为读者制定金属加工工艺和热处理工艺提供指导。

本书适宜从事冶金、金属材料成形与控制相关专业的工程技术人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料 CCT 曲线测定及绘制/徐光等编著. 北京:
化学工业出版社, 2009.7
ISBN 978-7-122-05587-3

I. 金… II. 徐… III. 金属材料-奥氏体转变-转变曲线 IV. TG151.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 071515 号

责任编辑: 邢 涛
责任校对: 徐贞珍

文字编辑: 冯国庆
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张 12¼ 字数 268 千字 2009 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

前 言

钢的连续冷却转变曲线 (Continuous Cooling Transformation Curves, 简称 CCT 曲线), 是制定金属加工工艺、热处理工艺等的重要依据。研制新钢种、优化轧制工艺制度、确定轧后冷却制度、制定钢的热处理工艺等都需要参考所加工钢种的 CCT 曲线。因此, CCT 曲线是金属材料加工、生产、研究等工作中经常用到的基础资料, 钢铁生产技术人员、金属材料及加工专业的科研人员和广大师生都会用到 CCT 曲线。

现有的文献是直接给出某个钢种的 CCT 曲线, 或者讲解 CCT 曲线的原理, 但都没有解释如何通过实验绘制新钢种的 CCT 曲线。因此, 金属材料及加工专业相关技术人员、高等院校的师生遇到的问题是: 如何通过实验测定及绘制新钢种的 CCT 曲线。针对这一现状, 编者在实际科研工作的基础上, 对 CCT 曲线的绘制进行了深入地研究, 并撰写了本书。

本书详细介绍了与 CCT 曲线绘制有关的金属学基础知识、CCT 曲线的绘制过程和方法以及编者绘制的部分合金钢钢种的 CCT 曲线。

读者阅读完本书后, 能对 CCT 曲线的绘制有比较清晰的了解, 并能够开始动手绘制 CCT 曲线。

本书的出版得到武汉科技大学材料与冶金学院、钢铁冶金与资源利用省部共建教育部重点实验室的支持, 在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限, 书中不足之处, 恳请读者批评指正。

徐 光

2009 年 4 月

目 录

第 1 章 金属和合金的固态结构	1
1.1 晶体学基础	1
1.1.1 晶体中的空间点阵	1
1.1.2 晶胞	2
1.1.3 晶系	3
1.1.4 布拉菲点阵	3
1.2 金属和合金的晶体结构	4
1.2.1 金属的典型结构模型	4
1.2.2 晶格的致密度	5
1.2.3 晶格间隙	6
1.3 金属和合金的相结构	8
1.3.1 固溶体	9
1.3.2 金属间化合物	11
1.4 铁碳合金中常见的相	13
1.4.1 铁和铁的碳化物	13
1.4.2 铁碳合金的基本相、基本组织及其性能	16
第 2 章 金属和合金的二元相图	33
2.1 相图的基本知识	33
2.1.1 相平衡条件和相律	33
2.1.2 相图的表示方法	34
2.2 二元匀晶相图	35
2.3 二元共晶相图	36
2.4 二元包晶相图	36
2.5 其他类型的二元相图	37
2.5.1 形成化合物的二元相图	37
2.5.2 具有偏晶、熔晶、合晶转变的二元相图	37
2.5.3 具有固态转变的二元相图	38
2.5.4 复杂二元相图的分析方法	38
2.6 铁碳相图	39
第 3 章 钢在加热时的转变	42
3.1 钢的奥氏体化	42
3.1.1 共析钢的奥氏体形成过程	42

3.1.2	影响奥氏体形成速度的因素	44
3.1.3	非共析钢的奥氏体形成过程	47
3.2	等温与连续加热时奥氏体形成的特点	47
3.2.1	奥氏体等温形成的特点	47
3.2.2	连续加热和快速加热时奥氏体形成的特点	49
3.3	奥氏体晶粒度及其影响因素	51
3.3.1	奥氏体晶粒度	52
3.3.2	影响奥氏体晶粒度的因素	54
第4章	钢在冷却过程中的转变	56
4.1	针状铁素体转变	56
4.1.1	形核机制	56
4.1.2	长大机制	57
4.2	珠光体转变	57
4.2.1	珠光体转变机制	57
4.2.2	先共析转变和伪共析转变	62
4.2.3	珠光体转变动力学	65
4.3	马氏体转变	71
4.3.1	马氏体转变的主要特征	71
4.3.2	马氏体相变热力学	73
4.3.3	马氏体相变机制	74
4.4	贝氏体相变	77
4.4.1	贝氏体相变的基本特征	77
4.4.2	贝氏体相变机制	78
4.4.3	贝氏体相变动力学	83
第5章	金属及合金中的扩散	87
5.1	扩散机理	87
5.1.1	扩散定律	87
5.1.2	原子运动和扩散系数	88
5.1.3	扩散机理	89
5.1.4	扩散的驱动力	92
5.2	影响扩散的因素	93
5.2.1	温度的影响	93
5.2.2	金属晶体结构对扩散系数的影响	93
5.2.3	合金元素对扩散的影响	95
第6章	奥氏体转变曲线的影响因素	96
6.1	合金元素的影响	96
6.1.1	碳的影响	96
6.1.2	硅的影响	98
6.1.3	锰的影响	99
6.1.4	铬的影响	99

6.1.5 镍的影响	100
6.1.6 钒的影响	101
6.1.7 钛的影响	101
6.1.8 铝的影响	102
6.1.9 钴的影响	102
6.1.10 铜的影响	102
6.2 偏析的影响	102
6.3 奥氏体晶粒度的影响	102
6.4 奥氏体受应力和形变的影响	103
6.5 加热和冷却速度的影响	103
6.6 奥氏体晶粒度对相变点的影响	103
6.7 形变对奥氏体转变曲线的影响	105
6.8 加热和冷却速度对相变点的影响	110
第7章 碳钢热膨胀曲线与相变量的关系模型	114
7.1 概述	114
7.2 模型的导出	114
7.3 模型的验证	117
7.4 模型对各影响因素的敏感度	118
7.5 总结	118
第8章 CCT曲线测定方法及设备	119
8.1 CCT曲线测量原理	119
8.1.1 膨胀法	119
8.1.2 磁性法	120
8.1.3 差热分析法	121
8.1.4 金相法	122
8.2 常用实验设备	122
8.2.1 热模拟实验设备	122
8.2.2 金相组织检验设备	138
第9章 膨胀法测量CCT曲线的注意事项	142
9.1 临界点的确定	142
9.2 膨胀曲线分析	143
9.3 各组织含量的确定	144
第10章 膨胀法测量CCT曲线的一般步骤	146
10.1 膨胀曲线的测绘	146
10.1.1 确定试验方案	146
10.1.2 试样要求	146
10.1.3 试验结果记录	146
10.2 金相及硬度检验	146
10.3 临界点的确定及相变类型的判别	147
10.4 确定组织转变量	147

10.5 CCT 曲线的绘制	147
第 11 章 CCT 曲线绘制实例	149
11.1 膨胀曲线的测绘	149
11.1.1 试样制备	149
11.1.2 试验工艺	149
11.1.3 试验结果	150
11.2 金相检验	151
11.3 硬度检验	153
11.4 临界点的确定及转变类型的判别	153
11.5 CCT 曲线的绘制	154
第 12 章 部分合金钢 CCT 曲线图集	155
12.1 A36-1 钢的连续冷却转变曲线图	155
12.2 A36-2 钢的连续冷却转变曲线图	156
12.3 B1 钢的连续冷却转变曲线图	158
12.4 HQ590A 钢的连续冷却转变曲线图	160
12.5 K3 钢的连续冷却转变曲线图	161
12.6 K4 钢的连续冷却转变曲线图	163
12.7 S4 钢的连续冷却转变曲线图	164
12.8 S6 钢的连续冷却转变曲线图	166
12.9 S11 钢的连续冷却转变曲线图	167
12.10 B2 连续冷却转变 (CCT) 图	169
12.11 D32 连续冷却转变 (CCT) 图	170
12.12 DQSK-1 连续冷却转变 (CCT) 图	171
12.13 DQSK-2 连续冷却转变 (CCT) 图	172
12.14 K2 连续冷却转变 (CCT) 图	173
12.15 K6 连续冷却转变 (CCT) 图	175
12.16 S1 连续冷却转变 (CCT) 图	176
12.17 S3 连续冷却转变 (CCT) 图	177
12.18 S5 连续冷却转变 (CCT) 图	177
12.19 S7 连续冷却转变 (CCT) 图	179
12.20 S8 连续冷却转变 (CCT) 图	180
12.21 S10 连续冷却转变 (CCT) 图	180
附录	182
参考文献	183

第 1 章 金属和合金的固态结构

1.1 晶体学基础

金属在固态下通常都是晶体，为了便于研究金属原子在空间分布的规律和进行晶体结构分析，本节先介绍一些有关晶体的一般概念。

1.1.1 晶体中的空间点阵

晶体的基本特征是质点在空间排列的规则性。这些质点既可以是组成物质的同类或异类单原子（离子、分子），也可能是等同的原子集团。

实际晶体的结构，通常是指组成质点的具体分布情况（其中每个质点不仅围绕一定的平衡位置进行热振动，而且存在局部不规则排列的缺陷）。显然，不同金属的晶体结构是各种各样的，但即使是晶体结构类型基本一定的同一金属，也将由于形成条件和所经历的加工过程不同而存在着实际晶体结构的差别。

为便于了解晶体中原子（离子、分子或原子团等质点）排列的规律性，往往将实际晶体结构简化为完整无缺的理想晶体，即认为每个质点是不动的，且没有局部排列不规则的缺陷。若将其中每个原子或原子团抽象为纯几何点，则可得到一个由无数几何点在三维空间规则排列的阵列。这种阵列称为空间点阵，而这些抽象的几何点称为阵点或结点。空间点阵的主要特征是每个阵点在空间分布必须具有完全相同的环境，即任意一个阵点与相邻阵点的几何关系同另一个阵点的情况相一致。为便于描述空间点阵的图形，可用许多平行的直线将所有阵点连接起来，于是构成一个三维几何格架，称为空间格子，如图 1-1 所示。在一个给定的空间点阵中，各阵点的空间几何位置是固定的，但通过阵点的平行直线及其所连成的空间格子，则可因人为的连接方法不同而有許多形式，所以，阵点是构成空间点阵的基本要素。

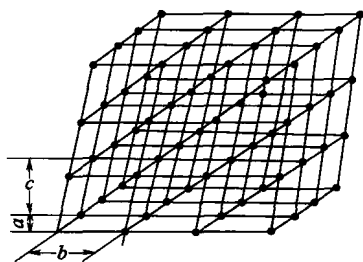


图 1-1 空间点阵的三维几何格架

应指出，空间点阵主要用于描述理想晶体中原子等质点排列的规律性，其阵点并不完全反映组成晶体的质点的实际分布，而仅具几何意义。若组成晶体的质点是单个原子，当用几何点表示晶体中质点的具体排列情况时，则由此所构成的空间排列，称为晶体点阵，与此相应，上述空间格子，则称为晶格。如图 1-2(a)~(c) 所示为三种

不同的晶体点阵，它们共同遵循的排列规律可用如图 1-2(d) 所示的空间点阵来描述，即不同的晶体点阵可以归属于同一种空间点阵。如果空间点阵中每个阵点代表一个单原子的位置，则空间点阵与晶体点阵两者意义相一致，该情况适于大多数金属晶体结构。因此，在讨论有关问题时，多以晶体点阵为主。

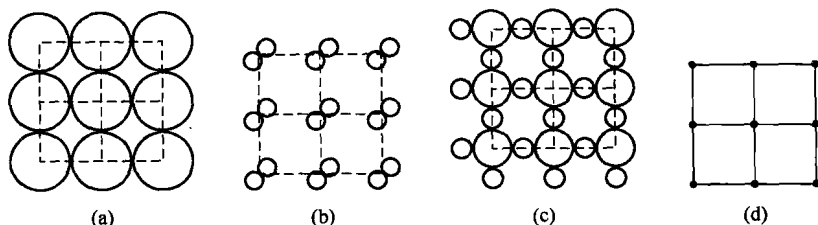


图 1-2 同属一种空间点阵的几种不同晶体点阵

1.1.2 晶胞

为了说明晶体阵点在空间排列的规律和特点，可在点阵中选取一个具有代表性的基本单元（即组成晶体点阵的最小的平行六面体）作为点阵的组成单元，通称为晶胞（严格划分，组成空间点阵的为原胞或单胞）。图 1-1 中用加粗线标出的平行六面体即代表该点阵的晶胞。由于各阵点具有相同的周围环境特征，所以，若连接点阵中任意两个阵点，其矢量的始端放到第三个阵点时，则此矢量的终端必定落到第四个阵点上。故晶体点阵及其周期重复性可视为晶胞沿其三个相邻的棱边在三维方向上平移扩展的结果。

同一晶体点阵因连接阵点的方式不同，可存在不同的晶格形式。其中若根据组成晶胞的最小平行六面体选取原则，则可得到如图 1-3 所示的不同形状与大小的晶胞。此外，选取晶胞的原则还应注意尽可能反映出该点阵的几何对称性。在不考虑对称性情况下，通常所选晶胞多为八个顶角标有阵点的平行六面体，称为简单晶胞。然而，为了更好地表现出点阵的高度对称性，也可在平行六面体的中心（体心）、六个面的中心（面心）或上下底面中心（底心）选取一个阵点的晶胞，称为复杂晶胞。

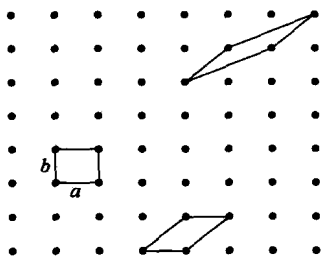


图 1-3 在点阵中选取晶胞

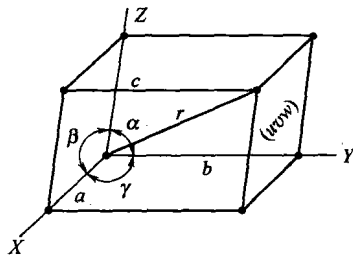


图 1-4 晶胞、晶轴与基矢

通常选定晶胞角上某个阵点为参考坐标原点（习惯上多取晶胞后左下角阵点），从该点出发的三个棱边为坐标轴 X 、 Y 、 Z （称为晶轴），则此晶胞及其所属点阵类型即可由三个棱边长度 a 、 b 、 c （点阵常数）和各晶轴间的夹角 α 、 β 、 γ 六个参数（点阵参数）表达出来，如图 1-4 所示。倘若采用三个点阵矢量 a 、 b 、 c 为晶胞基矢来描

述，将更为简便。如任选一个阵点为原点，则晶体点阵中任何阵点的位置矢量便可由式(1-1) 确定。

$$r_{uvw} = ua + vb + wc$$

(1-1)

式中 r_{uvw} ——从原点到某一阵点的矢量（在三个晶轴上分矢量之和）；

u, v, w ——沿三个点阵矢量的平移量，即该阵点的坐标。

于是，利用点阵矢量的平移便可确定空间点阵的类型。

1.1.3 晶系

在晶体学中，通常是按晶系划分晶体的类别。由于晶系是以空间点阵类型划分，而后者可通过晶胞的点阵参数加以描述。所以，不同晶系主要取决于晶胞三个基矢的长度 $a、b、c$ 及其夹角 $\alpha、\beta、\gamma$ 的不同组合形式。并不涉及原子排列的具体情况。归纳结果，所有晶体按点阵参数可分别属于七个晶系之中，见表 1-1。

表 1-1 晶系

序号	晶 系	点阵参数特征	举 例
1	三斜晶系	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	K_2CrO_7
2	单斜晶系	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \gamma = 90^\circ \neq \beta$	$\beta-S, CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	正交晶系(斜方)	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\alpha-S, Fe_3, Ga$
4	六方晶系	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Zn, Mg, Cd
5	菱方晶系(三角)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	As, Sb, Bi
6	正方晶系(四方)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\beta-Sn, TiO_2$
7	立方晶系	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Fe, Cr, Cu, Ag, Au

1.1.4 布拉菲点阵

布拉菲 (A. Bravais) 证明，在七个晶系中除包括七种简单晶胞和各自通过平移组成的空间点阵类型外，根据每个阵点具有相同周围环境和点阵的周期性等特征，运用三个点阵常数为单位矢量进行基矢平移，尚可形成体心、面心、底心等七个复杂晶胞，并组成具有高度对称性的空间点阵。这十四种空间点阵被称为布拉菲点阵，见表 1-2。十四种布拉菲点阵的晶胞如图 1-5 所示。

表 1-2 十四种布拉菲点阵类型

序号	点阵类型	晶 系	序号	点阵类型	晶 系
1	简单三斜	三斜	8	简单六方	六方
2	简单单斜	单斜	9	简单菱方	菱方(三角)
3	底心单斜		10	简单正方	正方(四方)
4	简单正交	正交	11	体心正方	
5	底心正交		12	简单立方	立方
6	体心正交		13	体心立方	
7	面心正交		14	面心立方	

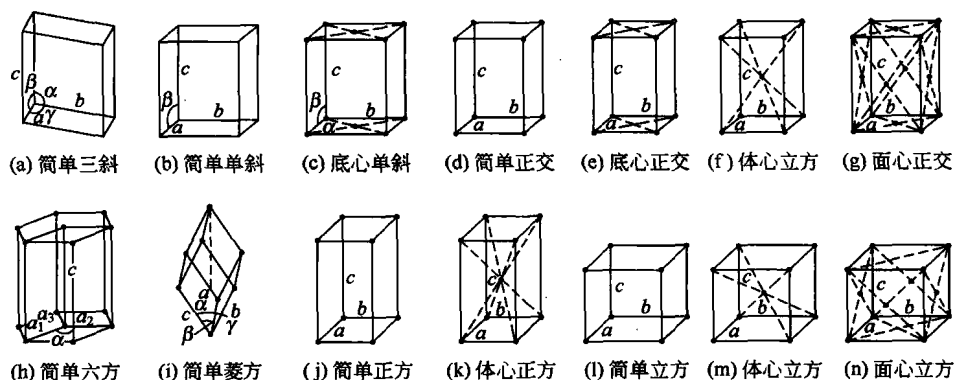


图 1-5 十四种布拉菲点阵的晶胞

在常见金属如铁、铬、铜、铝等晶体结构中，体心立方与面心立方点阵是金属原子结合的主要形式。

在某些金属如镁、锌等所具有的密排立方晶体结构中，由于位处其晶胞内的原子与晶胞角上的原子周围环境不同，故不能列为一种空间点阵。如将晶胞角上的一个原子与其内部的邻近原子共同组成一个阵点，即可归属于简单六方点阵。

1.2 金属和合金的晶体结构

所谓合金就是由两种或两种以上的金属元素或金属元素与非金属元素经过不同工艺过程制成的具有金属特性的物质。工业上应用最广泛的金属材料都是合金，例如碳钢和铸铁是以铁与碳为主要元素经熔炼而合成的合金，而黄铜则是铜和锌组成的合金。和纯金属相比，合金种类繁多，成本低廉，更主要的是合金所达到的性能不仅在强度、硬度、耐磨性等力学性能方面比纯金属高许多，而且在电、磁、化学稳定性等物理、化学方面的性能也毫不逊色，因此，从古到今人们都在生产和使用各种各样的合金材料。

通常把组成合金的最简单、最基本，能够单独存在的物质称为组元。组元大多数情况下是金属或非金属元素，但在研究范围内既不发生分解又不发生任何化学反应的稳定化合物也可称为组元。根据组成合金组元数目的多少，合金可分为二元合金、三元合金和多元合金。合金可以按所含元素的名称命名，例如上面提到的碳钢和铸铁又称铁碳合金，黄铜又称铜锌合金等。

合金有优异的性能主要取决于它的组织，而组织主要取决于其组成组元的性质及相互作用等，所以为了掌握合金的组织 and 性能以及它们之间的相互关系，就必须首先研究合金的固态相结构及其性质。

1.2.1 金属的典型结构模型

最常见的金属晶体结构有面心立方结构 (fcc)、体心立方结构 (bcc) 和密排六

方结构 (hcp)，在自然界中，约有 90% 以上的金属晶体都属这三种密排的晶格形式。

1.2.1.1 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞如图 1-6 所示，八个顶点和晶胞中心各有一个原子，因其晶格常数 $a=b=c$ ，故通常只用一个常数 a 即可表示。由图 1-6 可见，这种晶胞在其立方体对角线方向上的原子是彼此紧密相互接触排列着的，故由该对角线长度 $\sqrt{3}a$ 上所分布的原子数目（共 2 个），可计算出其原子半径的尺寸为 $r=(\sqrt{3}/4)a$ 。在这种晶胞中，因每个顶点上的原子是同时属于周围 8 个晶胞所共有，故实际上每个体心立方晶胞中仅包含有： $(1/8) \times 8 + 1 = 2$ 个原子。属于这种晶格的金属有铁 ($<912^\circ\text{C}$ ， $\alpha\text{-Fe}$)、铬 (Cr)、钼 (Mo)、钨 (W)、钒 (V) 等。

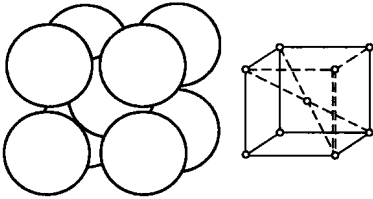


图 1-6 体心立方晶格的晶胞

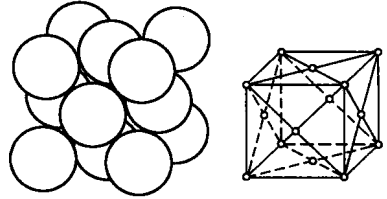


图 1-7 面心立方晶格的晶胞

1.2.1.2 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞如图 1-7 所示，是由 8 个原子为顶点的立方体，但在立方体的每一面的中心还各有 1 个原子。在这种晶胞中，每个面的对角线上各原子彼此相切，因而其原子半径的尺寸应为 $r=(\sqrt{2}/4)a$ ，又因每一面心位置上的原子是同时属于两个晶胞所共有，故每个面心立方晶胞中包含有 $(1/8) \times 8 + (1/2) \times 6 = 4$ 个原子。属于这种晶格的金属有铝 (Al)、铜 (Cu)、镍 (Ni)、铅 (Pb) 等。

1.2.1.3 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞如图 1-8 所示，与简单六方晶胞不同，它不仅在由 12 个原子构成的简单六方体的上下两个六方面的中心各有 1 个原子，而且在两个六方面之间还有 3 个原子。密排六方晶格的晶格常数比值 $c/a \approx 1.633$ 。属于这种晶格的金属有铍 (Be)、镁 (Mg)、锌 (Zn)、锡 (Sn) 等。

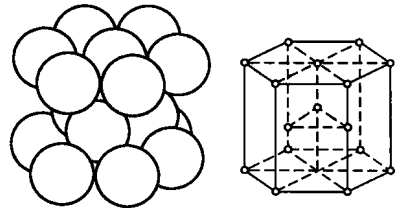


图 1-8 密排六方晶格的晶胞

除以上三种晶格以外，少数金属还具有其他类型的晶格，但一般很少遇到。

1.2.2 晶格的致密度

所谓晶格的致密度，是指其晶胞中所包含的原子占有的体积与该晶胞体积之比。例如，在体心立方晶格中，每个晶胞含有 2 个原子，原子半径 $r=(\sqrt{3}/4)a$ ，晶胞体积为 a^3 ，故体心立方晶格的致密度为： $2 \times (4/3) \pi r^3 / a^3 = 2 \times 4 \pi (\sqrt{3}a/4)^3 / (3a^3) = 0.68$ ，即晶格中有 68% 的体积被原子所占据，其余为空隙。同样可求出面心立方及密排六方晶格的致密度均为 0.74，而简单立方晶格的致密度则仅为 0.52。

此外，在定性评定晶体中原子排列的紧密程度时，还应用“配位数”这一概念。所谓配位数，即指晶格中任一原子周围所紧邻的最近且等距离的原子数。显然，配位数越大，原子排列也就越紧密。据此定义，体心立方晶格的配位数应为 8，这从晶胞体心位置上的那个原子很容易看出来。当然，这对体心立方的任一顶点上的原子也应毫无例外。因为，如上所述，立方体每个顶点上的原子都是同时属于它周围 8 个晶胞所共有，即它周围 8 个晶胞中每个体心的原子与它都是最近邻且等距的。与此类似，可求出面心立方与密排六方晶格的配位数均为 12。三种典型金属晶格的各种数据列于表 1-3。由表列数据可见，不论从致密度或配位数来看，面心立方和密排六方晶格的原子排列都是最紧密的。

表 1-3 三种典型金属晶格的数据

晶格类型	晶胞中的原子数	原子半径	配位数	致密度
体心六方	2	$(\sqrt{3}/4)a$	8	0.68
面心立方	4	$(\sqrt{2}/4)a$	12	0.74
密排六方	6	$a/2$	12	0.74

1. 2. 3 晶格间隙

从晶体致密度的分析可以看出，金属晶体存在许多间隙，这种间隙对金属的性能、合金相结构和扩散、相变等都有重要影响。

1. 2. 3. 1 面心立方结构中的晶格间隙

面心立方结构中有两种类型的间隙，其一为八面体间隙，即 6 个原子组成一个由 {111} 面构成的八面体，此八面体的中心就是一个间隙的中心，八面体间隙的中心分别位于体心位置和每个棱边的中点，如图 1-9(a) 所示。这样，可以计算出在每个面心立方晶胞中所含有的八面体间隙数为 $1+12\times 1/4=4$ 个。如果在八面体间隙中心安放一个原子刚性球，则可容纳的最大刚性球半径称为八面体间隙半径。根据计算，在面心立方结构中八面体间隙半径 $r_b=0.414r_a$ [图 1-10(a)]。

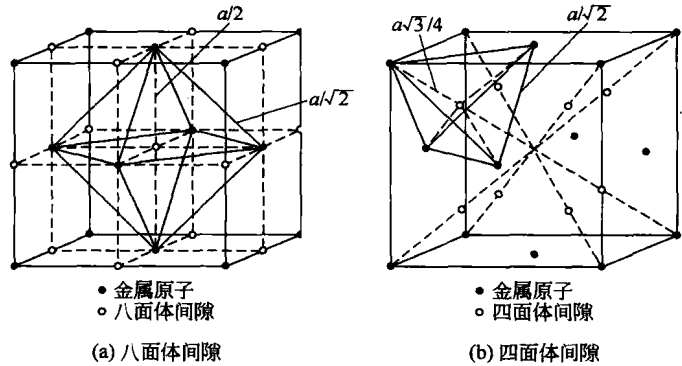


图 1-9 面心立方结构中的晶格间隙

在面心立方结构中还存在另外一种四面体间隙，即间隙中心位于一个四面体中

心，此四面体是由 1 个顶角原子和 3 个相邻面心原子所构成，其每个面均为 $\{111\}$ 。该四面体间隙中心的坐标为 $[1/4, 1/4, 1/4]$ 及其等效位置，所以每个面心立方晶胞内有 8 个四面体间隙 [图 1-9(b)]。每个四面体间隙半径 $r_b = 0.225r_a$ [图 1-10(b)]。

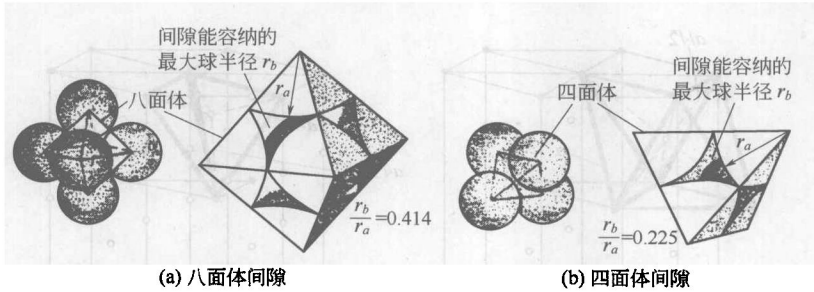


图 1-10 面心立方结构中间隙的刚性球模型

1.2.3.2 体心立方结构中的晶格间隙

在体心立方结构中，同样存在两种类型的间隙，其中 6 个原子组成一个由 $\{110\}$ 面构成的八面体，八面体间隙的中心分别位于每个面的面心位置和每个棱边的中点，如图 1-11(a) 所示。因此，在每个体心立方晶胞中含有 $6 \times 1/2 + 12 \times 1/4 = 6$ 个八面体间隙。在体心立方结构中，八面体间隙是不对称的。在图 1-11(a) 中，A、B 两原子之间的距离等于点阵常数 a ，原子 C、D 以及 E、F 之间的距离为 $\sqrt{2}a$ 。如果根据 (100) 方向 AB 长度来计算， $r_b = 0.154r_a$ ，而如果根据 (110) 方向 CD、EF 长度来计算，则 $r_b = 0.663r_a$ 。实际上，若在此八面体间隙位置容纳异类原子，则必须按最小间隙半径考虑，故一般取八面体间隙半径为 $r_b = 0.154r_a$ 。

体心立方晶体中的四面体间隙如图 1-11(b) 所示。四面体的每个面均为 $\{110\}$ 面，四面体间隙的中心位于 $[1/2, 1/4, 0]$ 及其等效位置，每个体心立方晶胞内有 $24 \times 1/2 = 12$ 个四面体间隙。每个四面体间隙半径 $r_b = 0.291r_a$ 。

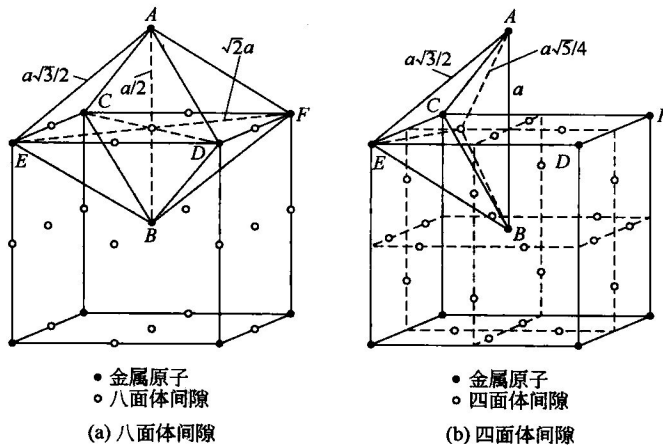


图 1-11 体心立方结构中的晶格间隙

1. 2. 3. 3 密排六方结构中的晶格间隙

在密排六方结构中，间隙的类型、大小与面心立方结构相同。八面体间隙数目与单胞原子数相同，间隙半径为 $r_b=0.414r_a$ ，四面体间隙数目与单胞原子数之比为 2：1。间隙半径为 $r_t=0.225r_a$ ，如图 1-12 所示。

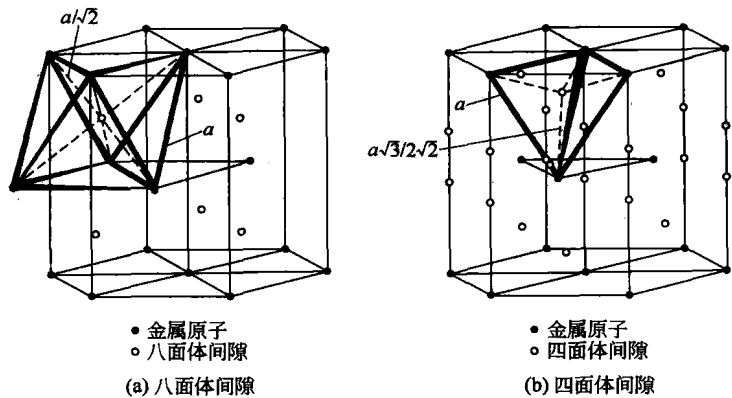


图 1-12 密排六方结构中的晶格间隙

三种典型金属晶体结构中的四面体和八面体间隙的数目及尺寸大小列于表 1-4 中。

表 1-4 三种典型金属晶体中的晶格间隙

晶 体 结 构	间隙类型	间隙数目	间隙尺寸(r_b/r_a)
面心立方(fcc)	四面体间隙	8	0. 225
	八面体间隙	4	0. 414
体心立方(bcc)	四面体间隙	12	0. 291
	八面体间隙	6	0. 154
密排六方(hcp) ($c/a=1. 633$)	四面体间隙	12	0. 225
	八面体间隙	6	0. 414

1. 3 金属和合金的相结构

在金属或合金中，凡化学成分相同、晶体结构相同并与其他部分有界面分开的均匀组成部分称之为相。如纯金属熔点以上为液相，结晶过程中液相、固相共存，结晶完毕后是单一的固相。合金结晶后是由晶粒构成，若合金是由成分、结构相同的同一种晶粒构成，各晶粒之间虽有界面分开，但仍属同一种相；若合金是由成分、结构不同的几种晶粒构成，则它们分属不同的几种相。合金的组织是指肉眼或借助于显微镜所观察到的合金的相组成及相的数量、形态、大小、分布特征。组织可以由一种相组成，也可以由多种相组成。合金的组织不同，其性能也不相同。如含锌 30% 的铜锌合金是单相合金，一般称为单相黄铜；含锌 40% 的铜锌合金的组织 α 相和 β 相组成，称为双相黄铜。

固态合金中的相，按其晶格结构的基本属性可分为固溶体和金属间化合物两大类。

1.3.1 固溶体

合金结晶时若组元相互溶解所形成的固相晶体结构与组成合金的某一组元相同，则这类固相称为固溶体。固溶体中含量较多的组元称为溶剂，含量较少的组元称为溶质。固溶体的晶格类型与溶剂组元的晶体结构相同。固溶体用 α 、 β 、 γ 、 δ 等符号表示，并称为 α 固溶体、 β 固溶体等。A、B组元组成的固溶体也可表示为A(B)，其中A为溶剂，B为溶质。例如铜锌合金中锌溶入铜中形成的固溶体一般用 α 表示，亦可表示为Cu(Zn)。

1.3.1.1 固溶体的分类

(1) 按照溶质原子在溶剂晶格中的配置情况即所占的位置，可将固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。

① 置换固溶体 置换固溶体是指溶质原子占据了溶剂原子晶格中的某些节点位置而形成的固溶体，如图1-13(a)所示。

② 间隙固溶体 溶质原子溶入溶剂晶格间隙所形成的固溶体称之为间隙固溶体，如图1-13(b)所示。形成此类固溶体的溶质原子是半径很小的非金属元素，而溶剂元素多是过渡族元素。如碳素钢中的铁素体、奥氏体等。一般情况下，当溶质原子半径与溶剂原子半径之比小于0.59时，容易形成间隙固溶体，两者大小相当时则易形成置换固溶体。

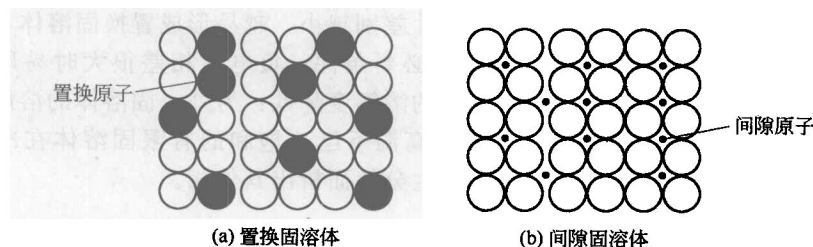


图 1-13 固溶体结构示意图

(2) 按溶质原子在溶剂中的溶解能力，还可将固溶体分为有限固溶体和无限固溶体。

① 有限固溶体 固溶体中溶质的含量即为固溶体的浓度，用质量分数或摩尔分数表示。在一定温度和压力下，溶质在溶剂中的极限浓度即为溶质在固溶体中的溶解度。通常固溶体的溶解度是有限的，这类固溶体称为有限固溶体。

② 无限固溶体 溶质以任意比例溶入溶剂，即溶质溶解度可达100%，则固溶体为无限固溶体，也称连续固溶体。

(3) 按溶质原子在固溶体中分布的规律性，固溶体分为有序固溶体和无序固溶体两种。

① 有序固溶体 少数合金在一定条件下，溶质原子会以一定比例按一定规律分布在溶剂晶格结点上，这种固溶体称为有序固溶体。