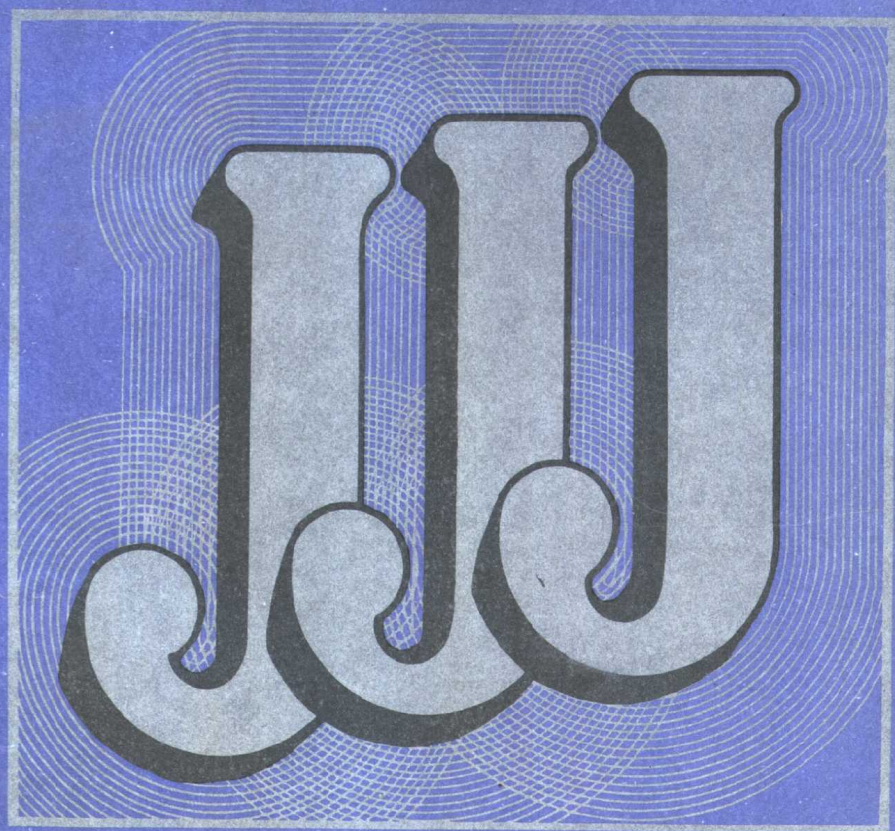


国家机械工业委员会统编

# 高级热处理工艺学

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHULILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

7-0

8.10(7)

机械工人技术理论培训教材

---

# 高级热处理工艺学

国家机械工业委员会统编

机械工业出版社

本书共分八章。内容包括金属学基础知识；热处理原理；典型工件（如机床、汽车拖拉机、轴承、齿轮、锻件、凿岩机具及有色金属等零件）热处理；淬火变形与裂纹；热处理质量检验；热处理工艺制定；热处理车间设备及平面布置；热处理新工艺、新设备。

本书由成都量具刀具厂郑紫薇编写，由东方电机厂黄淼昌、李益湘、王同保审稿。

## 高级热处理工艺学

国家机械工业委员会统编

责任编辑：王明贤

责任校对：贾立萍

封面设计：林胜利 方芬

版式设计：张世琴

责任印制：张俊民

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·新华书店经销

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张9<sup>1</sup>/<sub>2</sub>·字数202千字

1988年11月北京第一版·1988年11月北京第一次印刷

印数 00,001-23,500 ·定价：3.50元

ISBN 7-111-01151-1/TG·292

## 前 言

1981年,原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》,确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此,组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划,教学大纲(试行)》,编写了相应的教材,有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作,初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况,取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准(通用部分)》进行了全面修订,原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求,而且缺少高级部分;编写的教材,由于时间仓促、经验不足,在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此,原机械工业部根据新《标准》,重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》(初、中、高级),于1987年3月由国家机械工业委员会颁发,并根据培训计划、大纲的要求,编写了配套教材148种。

这套新教材的编写,体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神,坚持了文化课为技术基础课服务,技术基础课为专业课服务,专业课为提高操作技能和分析解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上,力求以基本概念和原理为主,突出针对性和实用性,着重讲授基本

知识,注重能力的培养,并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发,努力做到理论联系实际,通俗易懂,具有工人培训教材的特色,同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接,便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂、长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位,组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人,在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际,谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员,各地的组织领导者,以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意!

编好,出好这套教材不容易;教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误,我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题,及时提出批评和指正,以便再版时修订,使其更完善,更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会  
技工培训教材编审组

1987年11月

## 本工种需学习下列课程

**初级：**机械识图、电工常识、初级热处理工艺学

**中级：**中级热处理工艺学

**高级：**高级热处理工艺学

为便于企业开展培训，国家机械工业委员会教育局和机械工业出版社还组织编写出版了与以上教材配套的习题集，并摄制出版了机械识图、电工常识电视教学录像片。

# 目 录

## 前言

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一章 金属学基础知识 .....            | 1   |
| 第一节 合金的相结构 .....             | 1   |
| 第二节 金属的晶体缺陷 .....            | 10  |
| 第三节 金属的扩散现象 .....            | 16  |
| 第四节 金属的机械性能 .....            | 22  |
| 第五节 金属的塑性变形及再结晶 .....        | 31  |
| 复习题 .....                    | 43  |
| 第二章 热处理原理 .....              | 45  |
| 第一节 奥氏体的形成 .....             | 45  |
| 第二节 钢的过冷奥氏体转变及其应用 .....      | 59  |
| 第三节 钢的贝氏体转变 .....            | 78  |
| 第四节 淬火钢在回火时的转变 .....         | 84  |
| 复习题 .....                    | 92  |
| 第三章 典型工件热处理 .....            | 98  |
| 第一节 机械零件的热处理 .....           | 98  |
| 第二节 齿轮热处理 .....              | 108 |
| 第三节 大件热处理 .....              | 120 |
| 第四节 轴承热处理 .....              | 132 |
| 第五节 弹簧及紧固件热处理 .....          | 146 |
| 第六节 工具热处理 .....              | 155 |
| 第七节 汽车拖拉机零件热处理和钻探机具热处理 ..... | 172 |
| 第八节 有色金属热处理 .....            | 181 |
| 复习题 .....                    | 194 |
| 第四章 淬火变形与裂纹 .....            | 195 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 第一节 淬火内应力 .....                  | 195        |
| 第二节 淬火变形 .....                   | 199        |
| 第三节 淬火裂纹 .....                   | 212        |
| 第四节 淬火变形与防止裂纹的方法 .....           | 216        |
| 复习题 .....                        | 224        |
| <b>第五章 热处理质量及检验 .....</b>        | <b>225</b> |
| 第一节 热处理质量检验内容 .....              | 225        |
| 第二节 材料冶金缺陷对热处理质量的影响 .....        | 228        |
| 第三节 热处理质量检验规程 .....              | 234        |
| 复习题 .....                        | 250        |
| <b>第六章 热处理工艺的制定 .....</b>        | <b>251</b> |
| 第一节 热处理工艺制定 .....                | 251        |
| 第二节 材料与工艺的选用 .....               | 259        |
| 复习题 .....                        | 263        |
| <b>第七章 热处理车间设备的确定与平面布置 .....</b> | <b>264</b> |
| 第一节 热处理车间设备的选定 .....             | 264        |
| 第二节 热处理厂房 .....                  | 267        |
| 第三节 热处理车间平面布置 .....              | 268        |
| 复习题 .....                        | 270        |
| <b>第八章 新工艺、新设备 .....</b>         | <b>271</b> |
| 第一节 真空热处理 .....                  | 271        |
| 第二节 激光热处理 .....                  | 273        |
| 第三节 形变热处理 .....                  | 275        |
| 第四节 离子注入 .....                   | 276        |
| 第五节 气相沉积 .....                   | 277        |
| 复习题 .....                        | 278        |
| <b>附录 .....</b>                  | <b>279</b> |
| 一、常用调质钢的淬透性 .....                | 279        |
| 二、温度值换算 .....                    | 280        |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 三、应力单位及其换算 .....                    | 281 |
| 四、热处理常用法定计量单位与英美制<br>计量单位换算关系 ..... | 283 |
| 五、中、外常用钢号对照表 .....                  | 284 |

## 第一章 金属学基础知识

金属与合金的性能主要决定于化学成分、组织与结构。成分不同，组织与结构不同，其性能也不相同。通过金属学基础知识的学习，将使我们了解金属和合金的化学成分、加工工艺、组织结构与性能的关系。

### 第一节 合金的相结构

工业上使用的金属材料，绝大多数是合金，因为合金比纯金属有着更高的强度和硬度，有的还具有某些特殊的物理和化学性能，如强磁性及抗腐蚀性等，因此合金的应用更为广泛。

合金中由于相结构的不同而具有不同的性能。通常合金具有单相结构，也有的是多相结构。合金的结构可分为固溶体和中间相两大类。

#### 一、固溶体

在固态下，组成合金的一种元素溶入另一种元素的晶格（点阵）中所组成的晶体叫固溶体。在固溶体中，含量少的叫溶质，含量多的叫溶剂，因此，还可以这样理解，固溶体是指溶质溶入溶剂的晶格中而仍保持溶剂晶格类型的一种金属晶体叫固溶体。它是合金相结构中的重要相结构。因为实际使用的金属材料大多数是单相固溶体合金，或以固溶体为基的多相合金。

根据溶质原子溶入溶剂中所占据的位置不同，固溶体可以分为下列几种类型。

1. 置换固溶体 溶质原子溶入溶剂晶格中，替代了溶剂原子的位置而组成的固溶体叫置换固溶体，其示意图见图1-1a。在合金钢中大多数合金元素都能组成置换固溶体，如Mn、Si、Cr、Ni、W、V、Ti等。

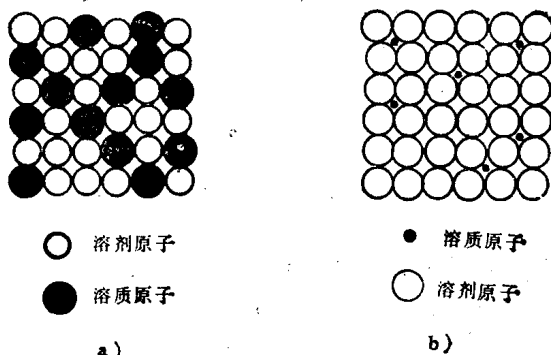


图1-1 固溶体结构示意图

a) 置换固溶体 b) 间隙固溶体

根据溶质原子在溶剂中的不同溶解度、置换固溶体又可分为：

(1) 无限固溶体 溶质原子能以任何比例溶入溶剂中所形成的固溶体叫无限固溶体。形成无限固溶体时，溶剂原子被连续置换的示意图见图1-2所示。

形成无限固溶体时，组元的晶格类型要相同，元素的原子半径要相似，物理化学性能要相近才有可能。对以铁为基

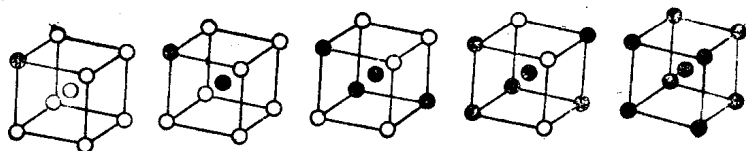


图1-2 形成无限固溶体时溶剂原子被连续置换示意图

的固溶体，只有当铁和其它元素的原子半径差小于8%时才能形成无限固溶体（在晶格类型相同时）。对铜来说，如果原子半径相对差小于10~11%时才能形成无限固溶体。

（2）有限固溶体 溶质原子溶入溶剂中的量是有限制的，这种固溶度有限的固溶体叫有限固溶体。溶质原子溶入溶剂中的最大极限量叫固溶度。影响固溶度的因素有：

1) 晶格类型 晶格不同，溶解度有限，如W、Cr、Mo、V、Nb、Ta、Zr等元素是体心立方晶格，它们在体心立方晶格的 $\alpha$ -Fe中的溶解度大于在面心立方晶格的 $\gamma$ -Fe中的溶解度，而具有面心立方晶格的Co、Ni、Cu、Au、Pt等在具有面心立方晶格的 $\gamma$ -Fe中的溶解度比在 $\alpha$ -Fe中大。

2) 原子尺寸 溶质与溶剂原子尺寸差别越大则溶解度越小。大多数合金中，当溶剂原子与溶质原子的半径差大于14~15%时，只能形成有限固溶体，对铁合金来说大于8%时就形成有限固溶体，铜合金是大于10~11%。这是因为溶剂与溶质原子尺寸差别大，晶格的畸变就大，畸变能的增高使晶格处于不稳定状态，再溶入溶质时，溶质原子就会与溶剂原子形成新相，而使溶解不能再进行而只能组成有限固溶体。

3) 组元的电化性 组元的负电性相近，就容易形成无限固溶体，反之，负电性相差愈大则溶解度愈小，如元素周期表中左边的铁与右边的非金属元素硫与磷，它们的负电性差别大，因此磷在铁中的溶解度最大为2.55%，硫为0.02%。

4) 电子浓度 价电子数与原子数之比叫电子浓度。电子浓度有一极限值，体心立方晶格是1.48，面心立方晶格是1.36。当溶入元素是一价时，它的电子浓度小于上述极限值则组成无限固溶体，溶入元素的原子价越高，电子浓度超过

上述极限值则形成有限固溶体。价数越高溶解度越小。如以Cu为基的Cu-Zn合金中，能溶入的Zn（二价）是39%，溶入Al（三价）时则只有9.8%。

5) 温度 一般合金元素溶入固溶体时，随温度的升高而增加，当高温时达到饱和的有限固溶体在冷却时会析出新相来。例如Fe-Fe<sub>3</sub>C合金中，600℃时碳的溶入量是0.008%，727℃时0.0218%，1148℃时2.11%，冷却时则析出新相Fe<sub>3</sub>C。

根据溶质原子在溶剂晶格中排列的规律性，置换固溶体又可分为有序固溶体和无序固溶体两种。

有序固溶体：当溶质原子有规律地替代溶剂原子的位置时，我们称之为有序化，有序排列的固溶体叫有序固溶体，或称超结构，其示意图见图1-3a。

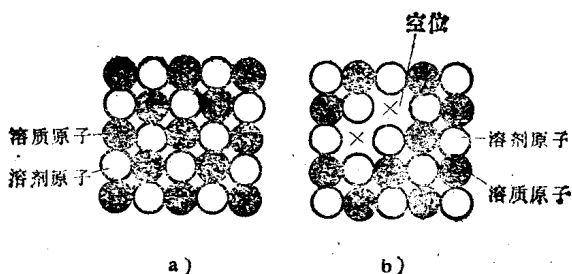


图1-3 固溶体结构示意图

a) 置换有序固溶体 b) 缺位固溶体

一般原子的排列是无规律地，随意分布的，但在一定温度下，在一定的成分范围内，有利于原子的扩散而成为有序排列时，就能形成有序固溶体。原子排列有序化使合金的性能发生变化，如塑性和电阻下降，硬度和脆性增加，有的还改变了磁性，如Ni<sub>3</sub>Mn在无序时是顺磁性的，有序时则是铁磁性。

的，含Mn量大于17%时，退火能使合金成强磁性。

无序固溶体：合金中原子溶入溶剂中是任意的、无规律的随机分布所组成的固溶体叫无序固溶体。但完全无序是很少有的，一般多表现为高温无序，低温有序。如Cu-Zn(黄铜)合金的 $\beta$ 黄铜是高温无序，低温有序，其晶体排列示意图见图1-1a。

2. 间隙固溶体 溶质原子溶入溶剂晶格间隙中形成的固溶体叫间隙固溶体，如图1-1b所示。由于间隙固溶体溶质原子是溶入溶剂晶格的间隙中，所以溶质原子太大就不容易溶入，因此通常能形成间隙固溶体的溶质原子半径一般都是小于 $1 \times 10^{-10} \text{m}$ 的非金属元素。如氢为 $0.46 \times 10^{-10} \text{m}$ 、氧为 $0.60 \times 10^{-10} \text{m}$ 、氮为 $0.74 \times 10^{-10} \text{m}$ 、碳为 $0.77 \times 10^{-10} \text{m}$ 、硼为 $0.97 \times 10^{-10} \text{m}$ ，当这些元素的原子半径与溶剂的原子半径之比小于0.59时，才能形成间隙固溶体。当溶剂元素的晶格不同溶入量也不同。如碳在铁中的溶解度是：当是面心立方晶格的 $\gamma\text{-Fe}$ 时，溶入量最大为2.11%，是体心立方晶格的 $\alpha\text{-Fe}$ 时，溶入量最大为0.0218%。这是因为 $\gamma\text{-Fe}$ 原子间的最大间隙为 $0.52 \times 10^{-10} \text{m}$ ，碳原子半径为 $0.77 \times 10^{-10} \text{m}$ ，当铁原子稍偏离点阵位置时，碳就进入间隙中，而 $\alpha\text{-Fe}$ 的间隙小，碳不容易进入，因而溶解度小。碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 与 $\alpha\text{-Fe}$ 中的溶入位置见图1-4。

间隙固溶体的溶解度永远是有限的，因为溶质的溶入使晶格增大，发生畸变，溶入越多，畸变越大，畸变能增大，晶格不稳定，而使溶入过程停止。此外，溶入量与温度有关，高温时溶入量大，低温时小。如氢在 $\gamma\text{-Fe}$ 中，高温时溶入量大，冷却时，溶入量小要析出，而使钢出现了“白点”。

3. 缺位固溶体 溶质原子在溶剂中的排列不是完整的，

334697

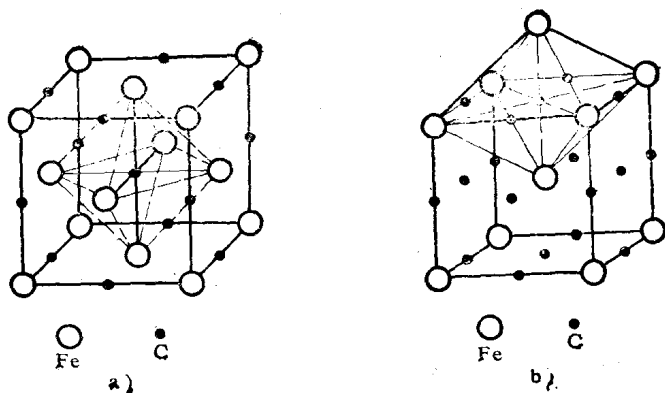


图1-4 碳在铁晶格间隙中位置

a) 碳在 $\gamma$ -Fe中的间隙位置 b) 碳在 $\alpha$ -Fe中的间隙位置

而是总有“空位，”未填满，(见图1-3b)，这样的固溶体叫缺位固溶体，缺位固溶体多出现在以化合物为基的固溶体中。

固溶体的性能：固溶体中因溶质原子的溶入而强化，称固溶强化。当溶入量不大时，性能变化不大，随着溶入量的增加，强化效果越大。对置换固溶体来说，如果溶入元素的原子半径小则晶格缩小，反之增大，而间隙固溶体则总是增大的。晶格常数的变化量与强化效果有对应关系，所以固溶体的性能随溶质浓度的增加，强度硬度增高，塑性韧性下降，电阻率、磁矫顽力增加。固溶体的性能可以用调节溶质的溶入量及原子半径大小的选择来控制，以达到既有高的强度硬度，又有足够的塑性韧性。正因如此，实际使用的金属材料，绝大多数是以固溶体为基的金属材料。

## 二、中间相

以化合物为基的固溶体称为中间相。它是一种化合物相，组成这种化合物相的成分是处在A与B两组元各自溶入对方

晶格中的最大溶解度之间，所以叫中间相。目前，已发现的中间相，数以千计，但根据形成时控制因素不同，大致可以分为受负电因素控制的正常价化合物、受原子尺寸因素控制的间隙相和间隙化合物、拓扑密堆相以及受电子因素控制的电子化合物等几大类。大多数中间相的价电子可以自由运动，它们的原子结合也有金属键的结合方式，因此中间相具有金属性能。

1. 正常价化合物 由负电性差别大的元素所组成，组成化合物的组元的原子数，比较符合化合价规律，故称为正常价化合物。它们的组成化学分子式可以用 $AB$ 、 $A_2B$ 及 $AB_2$ 来表示，如 $ZnS$ 、 $MnS$ 、 $SiC$ 、 $AlN$ 、 $Mg_2Si$ 、 $AuAl_2$ 等，这类化合物的性能是硬而脆。

2. 电子化合物 或称电子相。它是一种可以用电子浓度来控制的中间相。这种化合物可以在一定的浓度区间内存在，因此它的组成没有严格的化学比，不能用一定的化学式来表示。组成元素的原子价与原子数之比称电子浓度。电子浓度不同，相结构也不同，如 $\beta$ 黄铜 $CuZn$ 的电子浓度为 $3/2$ ，是体心立方晶格， $\gamma$ 黄铜 $Cu_5Zn_8$ 的电子浓度是 $21/13$ ，是复杂立方晶格， $\epsilon$ 黄铜 $CuZn_3$ 的电子浓度为 $7/4$ ，结构为密排六方晶格。由于电子化合物原子之间的结合是金属键结合，所以具有强的金属性能，如高熔点、高硬度、塑性低、能导电。因此，它不能作金属材料用，只能作为合金的强化相。

3. 受原子尺寸因素控制的中间相 这类中间相有简单结构与复杂结构两种类型。下面分述如下：

(1) 间隙相 是一种具有简单结构的间隙化合物。它的晶格与组元晶格不同，组成间隙相的组元A与B原子半径比小于0.9（或半径差 $>41\%$ ），它们的组合分子式可用 $AB$ 、

$A_2B$ 、 $A_4B$ 、 $AB_2$ 表示，钢中常见的有 $Fe_4N$ 、 $Fe_2N$ 、 $VC$ 、 $TiC$ 、 $WC$ 、 $VC_2$ 等， $VC$ 的晶格见图1-5。

当形成间隙相的两组元的原子半径差 $<15\%$ 时，可以形成无限固溶体。如 $TiC-VC$ 、 $TiC-NbC$ 等。 $>15\%$ 时则溶解度很小。另外，这类间隙相还能进一步溶解组元，形成缺位固溶体。如 $TiC$ 中缺碳而多溶入 $Ti$ 形成 $Ti_2C$ ，在 $VC$ 中缺碳而形成 $V_4C$ 。有的则是缺金属元素，如缺铁而多溶入氮的 $Fe_4N$ 。因此，在 $Fe-N$ 相图上氮可在 $5.7\sim 6.1\%$ 的成分范围内变动，见图1-6中的 $\gamma$ 相区。

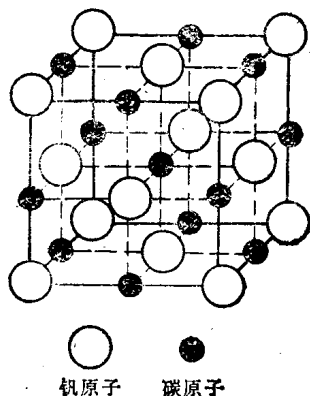


图1-5 碳化钽晶体结构

(2) 间隙化合物 这类化合物组成的特点是A与B组元的原子半径比 $>0.59$  (或半径差 $>30\sim 41\%$ )时才能形成，具有复杂的晶体结构，如 $Fe_3C$ 其晶体结构见图1-7所示，还有 $Cr_{23}C_6$ 、 $Cr_7C_3$ 、 $Fe_4W_2C$ 、 $FeB$ 、 $Fe_2B$ 等，这类化合物可以被

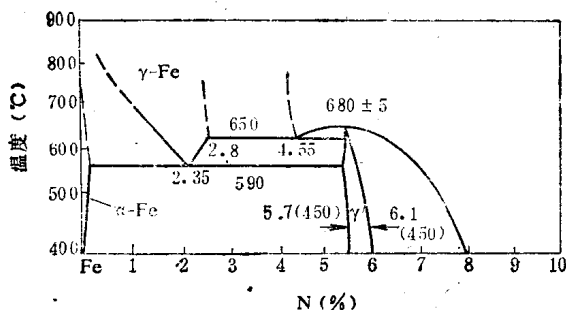


图1-6  $Fe-N$ 合金相图