

# 硼 钢

冶 金 工 业 出 版 社

# 硼 钢

本溪钢铁公司第一炼钢厂 编

冶金工业出版社

## 内 容 提 要

本书综合地讨论了硼钢金属学问题，论述了硼在钢中的作用与硼钢生产原理；介绍了硼钢的性能和特点；基本上总结了我国硼钢生产与使用的经验。也适当介绍了国外硼钢发展的概况。内容密切结合生产实际，是推广硼钢生产与应用的参考资料。

本书可供从事硼钢生产与应用的技术人员和工人阅读，也可供有关的科研、设计、教学等部门参考。

## 硼 钢

本溪钢铁公司第一炼钢厂 编

(限 国 内 发 行)

\*

冶 金 工 业 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张 20 3/4 字数 494 千字

1977年11月第一版 1977年11月第一次印刷

印数 00,001~4,350册

统一书号：15062·3280 定价（科三）1.65元

## 序 言

建国以来，在毛主席无产阶级革命路线指引下，我国冶金工业战线广大职工，坚持“独立自主、自力更生”的伟大方针，走自己工业发展道路，在建立和发展适合我国资源条件的合金钢体系方面，取得了很大成就。硼钢的发展就是其中的一例。

用微量硼合金化的结构钢，人们习惯地称之为硼钢。结构钢中含有微量的硼，能显著地提高钢的淬透性，改善钢的断裂韧性。微量硼加入耐热钢和合金中能强化晶界提高热强性。硼钢广泛地应用在机械制造（如汽车、拖拉机、船舶和机床等）、桥梁建筑、电力和石油等工业部门。

关于硼在钢中的作用问题，七十年前就有人研究过，但实际在钢中的应用还是三十年代后期的事。第二次世界大战期间，为了节约其他战略资源，硼钢得到了迅速的发展。

早在五十年代，我国就开始了硼钢的研究工作。大跃进期间，硼钢受到冶金、机械等部门的高度重视。一九五八年，我们用电弧炉成功地炼出了我国第一炉工业硼钢钢水。灿烂的钢花，闪射出毛主席革命路线的万丈光芒。数百辆用硼钢构件装配的解放牌汽车，满载着汽车材料革命的丰硕成果，疾驶在祖国的社会主义大道上。这批汽车在全国各地区试用，行驶十余年之久。事实证明，硼钢零件的使用寿命赶上或超过了原用铬钢的水平。这是一曲毛主席“独立自主、自力更生”光辉思想的胜利凯歌。

为了适应我国冶金工业迅速发展的需要，我厂编写了《硼钢》一书。《硼钢》着重于总结我国硼钢生产和使用的经验。遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，书中引用了一些国外文献的理论观点和数据，也适当地介绍了一些国外硼钢的发展情况。

在本书编写过程中，曾到冶金工厂、机械工厂、科研机关和高等院校等四十多个单位进行了调查研究，许多兄弟单位提供了大量资料和生产实验数据。在书稿审查过程中，又得到了二十几个单位的工人、技术人员、科研人员以及有关院校教师的热情帮助，在此表示衷心的感谢。

由于我们的政治水平和业务能力所限，书中不当之处在所难免，希望广大读者批评指正。

编 者

一九七五年九月

# 目 录

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| <b>第一篇 硼钢金属学概论</b> .....               | 1  |
| 第一章 硼及Fe-B-C相图.....                    | 1  |
| 第一节 硼及其化合物.....                        | 1  |
| 第二节 Fe-B平衡相图.....                      | 2  |
| 第三节 Fe-B-C三元相图.....                    | 3  |
| 第四节 硼对Fe-Fe <sub>3</sub> C二元相图的影响..... | 8  |
| 第五节 硼在铁和钢中存在的形式.....                   | 8  |
| 第六节 硼在钢生产中的用途.....                     | 10 |
| 第二章 硼对奥氏体分解动力学及晶粒长大倾向的影响.....          | 11 |
| 第一节 硼对亚共析钢奥氏体分解动力学的影响.....             | 11 |
| 第二节 硼对共析钢珠光体形成的影响.....                 | 13 |
| 第三节 硼对过冷奥氏体中温转变的影响.....                | 14 |
| 第四节 硼对奥氏体晶粒长大倾向的影响.....                | 16 |
| 第五节 硼对低碳0.5%Mo钢的强化.....                | 17 |
| <b>第二篇 硼在钢中的作用</b> .....               | 20 |
| 第一章 硼在钢中的淬透性效应.....                    | 20 |
| 第一节 淬透性的概念.....                        | 20 |
| 第二节 硼在钢中淬透性作用的特点.....                  | 22 |
| 第三节 硼的硬化因子.....                        | 23 |
| 第四节 硼含量对钢淬透性的影响.....                   | 26 |
| 第五节 钢中碳含量对硼合金化效果的影响.....               | 28 |
| 第六节 奥氏体化温度对硼钢淬透性的影响.....               | 30 |
| 第七节 提高和恢复硼作用效果的特殊热处理.....              | 31 |
| 第八节 在高温长时加热以后硼的失效现象.....               | 32 |
| 第九节 硼在钢中淬透性作用原因的讨论.....                | 33 |
| 第十节 硼合金化的技术经济效果.....                   | 35 |
| 第二章 硼对钢和合金性能的影响.....                   | 37 |
| 第一节 硼对结构钢机械性能的影响.....                  | 37 |
| 第二节 硼对钢断裂韧性( $K_{IC}$ )和缺口拉伸强度的影响..... | 39 |
| 第三节 硼对不锈钢性能的影响.....                    | 39 |
| 第四节 硼对耐热钢和耐热合金性能的影响.....               | 40 |
| 第五节 硼在耐热合金中作用的机理.....                  | 43 |
| 第六节 硼对钢表面性能的影响.....                    | 45 |
| 第七节 硼对钢工艺性能的影响.....                    | 46 |
| <b>第三篇 “硼相”和“硼脆”</b> .....             | 48 |
| 第一章 关于“硼相”的组成与形成.....                  | 48 |

|                      |                              |     |
|----------------------|------------------------------|-----|
| 第一节                  | “硼相”的金相特征·····               | 48  |
| 第二节                  | “硼相”的组成·····                 | 50  |
| 第三节                  | “硼相”的形成·····                 | 53  |
| 第二章                  | “硼相”沉淀动力学·····               | 58  |
| 第一节                  | 等温过程“硼相”沉淀动力学曲线·····         | 58  |
| 第二节                  | 连续冷却过程“硼相”沉淀动力学曲线·····       | 61  |
| 第三节                  | “硼相”沉淀动力学曲线讨论·····           | 64  |
| 第四节                  | 碳对“硼相”沉淀量和沉淀速度的影响·····       | 67  |
| 第五节                  | “硼相”沉淀对奥氏体转变的影响·····         | 67  |
| 第三章                  | “硼脆”及其解决途径·····              | 69  |
| 第一节                  | “硼脆”的概念和实例·····              | 69  |
| 第二节                  | 解决“硼脆”的途径·····               | 71  |
| <b>第四篇 硼铁合金及硼钢生产</b> | ·····                        | 76  |
| 第一章                  | 硼铁合金·····                    | 76  |
| 第一节                  | 硼铁合金的生产·····                 | 76  |
| 第二节                  | 硼铁合金牌号·····                  | 78  |
| 第二章                  | 硼钢的冶炼·····                   | 81  |
| 第一节                  | 硼钢的冶炼特点·····                 | 81  |
| 第二节                  | 炼钢方法与工艺对硼在钢中收得率及对钢性能的影响····· | 82  |
| 第三节                  | 电弧炉冶炼硼钢工艺·····               | 88  |
| 第四节                  | 平炉及平炉-电炉混合冶炼硼钢工艺·····        | 90  |
| 第五节                  | 转炉及转炉-电炉混合冶炼硼钢工艺·····        | 91  |
| 第六节                  | 硼钢浇注工艺·····                  | 92  |
| 第三章                  | 脱氧、定氮元素的残留量对硼钢性能的影响·····     | 93  |
| 第一节                  | 氮对硼钢淬透性的影响·····              | 93  |
| 第二节                  | 铝对硼钢淬透性的影响·····              | 94  |
| 第三节                  | 钛对硼钢性能的影响·····               | 95  |
| 第四节                  | 锆对硼钢性能的影响·····               | 97  |
| 第五节                  | 硅钙合金添加量对硼钢淬透性的影响·····        | 98  |
| 第四章                  | 硼钢的热加工·····                  | 99  |
| 第一节                  | 硼对热加工性能的影响·····              | 99  |
| 第二节                  | 热加工工艺对硼钢性能的影响·····           | 99  |
| <b>第五篇 硼的分析</b>      | ·····                        | 101 |
| 第一章                  | 化学分析·····                    | 101 |
| 第一节                  | 概述·····                      | 101 |
| 第二节                  | 一些基本概念的讨论·····               | 102 |
| 第三节                  | 溶样问题·····                    | 103 |
| 第四节                  | 硼的分离方法·····                  | 104 |
| 第五节                  | 硼定量分析的空白值·····               | 105 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第六节 测定钢中微量硼的几种分光光度法 .....                                               | 105 |
| 一、姜黄素法 .....                                                            | 105 |
| 二、HPTA 法 .....                                                          | 111 |
| 三、次甲基蓝-1,2二氯乙烷萃取分光光度法 .....                                             | 113 |
| 第七节 高硼钢中硼的容量法测定 .....                                                   | 117 |
| 第八节 硼钢中微量硼的相定量分析 .....                                                  | 118 |
| 第二章 光谱分析 .....                                                          | 122 |
| 第一节 测定钢中硼的光谱法 .....                                                     | 122 |
| 第二节 载体分馏法 (I) .....                                                     | 122 |
| 第三节 载体分馏法 (II) .....                                                    | 125 |
| <b>第六篇 硼钢与铬钢性能对比</b> .....                                              | 126 |
| 第一章 调质钢: 40MnB 与 40Cr .....                                             | 126 |
| 第一节 概述 .....                                                            | 126 |
| 第二节 40MnB钢成分设计 .....                                                    | 126 |
| 第三节 淬透性与机械性能 .....                                                      | 127 |
| 第四节 热处理工艺性能 .....                                                       | 134 |
| 第五节 切削加工及冷敏性能 .....                                                     | 140 |
| 第六节 40MnB钢的应用 .....                                                     | 142 |
| 第二章 渗碳钢: 20Mn(2)TiB与18CrMnTi .....                                      | 145 |
| 第一节 20Mn(2)TiB钢的成分设计 .....                                              | 145 |
| 第二节 淬透性和机械性能 .....                                                      | 145 |
| 第三节 热处理工艺性能 .....                                                       | 146 |
| 第四节 渗碳后的机械性能 .....                                                      | 149 |
| 第五节 零件生产的工艺性能 .....                                                     | 153 |
| 第六节 齿轮性能 .....                                                          | 155 |
| 第七节 齿轮寿命 .....                                                          | 157 |
| <b>第七篇 主要硼钢钢种</b> .....                                                 | 164 |
| 第一章 调质硼钢 .....                                                          | 164 |
| 第一节 碳素硼钢 35B 40B 45B 50B .....                                          | 164 |
| 第二节 锰硼钢 40MnB 45MnB .....                                               | 172 |
| 第三节 锰(钨、钼、钒、硅)硼钢 40MnWB 40MnMoB 40MnVB 42MnVB<br>34Mn2MoB 42SiMnB ..... | 178 |
| 第四节 铬锰(钨、钼、钒)硼钢 40CrB 40CrMnB 40CrMnMoVBA<br>18CrMnMoB .....            | 192 |
| 第二章 渗碳级硼钢 .....                                                         | 207 |
| 第一节 锰(钛、钒、钼)硼钢 20MnTiB 20MnVB 20MnMoB 25MnTiBR<br>15MnVB .....          | 207 |
| 第二节 锰2(钒、钼、钛)硼钢 20Mn2B 20Mn2VB 30Mn2MoTiB .....                         | 231 |
| 第三节 硅锰(钨、钼、钒、钛)硼钢 20SiMnVB 22SiMnWMoTiB .....                           | 238 |

|                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 第四节 铬锰(钼、钒)硼钢 20CrMnB 20CrMnMoVB .....                                     | 245        |
| 第三章 硼弹簧钢 55Si2MnB 55SiMnVB 60Si2MnBR .....                                 | 251        |
| 第四章 锅炉用硼钢 12MoWVBR 12Cr2MoWVTiB 13Cr3Mo VSiTiB<br>13SiMnWVB 14MnMoVB ..... | 265        |
| <b>第八篇 常用渗碳硼钢热处理变形实例 .....</b>                                             | <b>276</b> |
| 第一章 20MnTiB钢汽车齿轮热处理变形实例 .....                                              | 276        |
| 第二章 20MnVB钢汽车齿轮热处理变形实例 .....                                               | 289        |
| 第三章 20SiMnVB钢拖拉机齿轮热处理变形实例 .....                                            | 293        |
| 第四章 25MnTiBR钢拖拉机齿轮热处理变形实例 .....                                            | 296        |
| <b>第九篇 国外硼钢概况 .....</b>                                                    | <b>299</b> |
| 第一章 国外硼钢应用概况 .....                                                         | 299        |
| 第一节 含硼低合金高强度钢 .....                                                        | 299        |
| 第二节 硼钢在汽车、拖拉机工业方面的应用 .....                                                 | 302        |
| 第三节 硼钢在紧固件生产中的应用 .....                                                     | 303        |
| 第四节 硼钢在其它方面的应用 .....                                                       | 310        |
| 第二章 国外硼钢钢号及发展趋势 .....                                                      | 313        |
| 第一节 国外硼钢钢号 .....                                                           | 313        |
| 一、一些国家工业标准中的硼钢 .....                                                       | 313        |
| 二、硼钢的选用方法 .....                                                            | 320        |
| 三、硼钢一些重要工艺性能举例 .....                                                       | 321        |
| 第二节 国外硼钢发展趋势 .....                                                         | 324        |

# 第一篇 硼钢金属学概论

## 第一章 硼及 Fe-B-C 相图

### 第一节 硼及其化合物

硼在化学元素周期表中位于第二周期，是第ⅢA族的第一个元素。它和氮、氧都有很强的亲和力，并能与硫、碳化合。硼与某些金属（如钛等）化合生成极硬的硼化物。

结晶硼的最大特点是显微硬度高。根据测定数据，其显微硬度可达5000公斤/毫米<sup>2</sup>。

硼的良好物理性能之一是能吸收中子。石墨中有百万分之一的硼就足能阻碍或完全停止铀—石墨核子反应堆的链锁反应。

为了进一步了解硼元素的性质，下面我们列出它的基本物理性能和化学性能。

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 原子量                     | 10.82 |
| 原子半径 (Å)                | 0.97  |
| 比重 (克/厘米 <sup>3</sup> ) | 2.34  |
| 熔点 (°C)                 | 2600  |
| 沸点 (°C)                 | 3500  |
| 熔化热 (卡/克)               | 265   |
| 蒸发热 (卡/克)               | 4155  |

加热能提高硼的化学活性。硼与氧能生成一氧化六硼 (B<sub>6</sub>O) 和三氧化二硼 (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)；与氮生成氮化硼 (BN)，与碳也能生成碳化硼 (BC)、碳化二硼 (B<sub>2</sub>C)、碳化四硼 (B<sub>4</sub>C) 和碳化六硼 (B<sub>6</sub>C) 等多种碳化物，以及和某些金属生成各种不同成份的金属硼化物。诸如：TiB<sub>2</sub>，Ti<sub>2</sub>B<sub>5</sub>，NbB<sub>2</sub>，ZrB<sub>2</sub>，VB<sub>2</sub>，W<sub>2</sub>B，W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>，Mg<sub>3</sub>B<sub>2</sub>，Ni<sub>3</sub>B<sub>3</sub>以及Fe<sub>2</sub>B和FeB等。其中某些化合物引起了人们极大的注意，如B<sub>4</sub>C的特点是显微硬度极高，根据测得的数据，高达4950公斤/毫米<sup>2</sup>。因而B<sub>4</sub>C在磨料工业上和硬质合金生产中都得到了广泛的应用。

在温度为800°C时，硼元素就可直接与氮化合生成氮化硼 (BN)。纯氮化硼呈白色粉末状，其结构为六方晶格，与石墨晶格相似。这种化合物的熔点为2730°C。氮化硼易于进行热压制。

金属硼化物在工业上同样也大有用途。化学元素周期表中ⅣB、ⅤB、ⅥB各族难熔过渡金属 (Ti、Zr、V、Nb、Ta、Cr、Mo、W) 的硼化物具有熔点高，硬度大，导电性强以及电阻温度系数低等特点。表 1-1-1 中列举了某些难熔硼化物的特点。

金属硼化物不但在硬度方面而且在化学稳定性 (其中包括耐高温氧化) 方面，与相应的金属碳化物相比，都更高些。

| 硼化物类别                      | TiB <sub>2</sub> | ZrB <sub>2</sub> | CrB <sub>2</sub> | MoB <sub>2</sub> | TaB <sub>2</sub> |
|----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 显微硬度 (公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | 3400             | 2200             | 1800             | 1380             | 2537             |
| 熔点 (°C)                    | 2900             | 2990             | 1950             | 2250             | 3000             |

## 第二节 Fe-B 平衡相图

图 1-1-1 是根据到目前为止比较可靠的测定数据绘制的微量硼含量的 Fe-B 系平衡相图。

在 Fe-B 系平衡相图中,就  $\gamma$ -区而言,具有同 Fe-C 平衡相图  $\gamma$ -相区相类似的较大的固溶极限;对于  $\alpha$ -相区来说,这里  $\text{Fe}_2\text{B}$  的出现,相当于 Fe-C 平衡相图中的  $\text{Fe}_3\text{C}$ 。在此,这种硼化物的析出,并不与 Fe-C 系的共析反应相对应,而是呈包析反应出现。

硼实际上降低铁的  $A_4$  点,提高其  $A_3$  点(在硼含量超过 0.001% 时),从而缩小  $\gamma$ -相

区;并由于中间化合物  $\text{Fe}_2\text{B}$  的出现而限制了封闭  $\gamma$ -相圈的形成。

硼对  $A_3$  点的作用与低铬在 Fe-Cr 系中的作用相似。在硼含量小于 0.001% 时,使  $A_3$  点随硼含量的增加而降低,致使  $\alpha-(\alpha+\gamma)$  相界有一最低点。此点的温度为 835°C,硼含量为 0.001%。另外,在硼含量为 0.0081% 及温度为 910°C 处存在一个包析转变点。

从相图中可以看出,在 700°C 以下时,硼在  $\alpha$ -Fe 中的溶解度小于 0.0004%,910°C 时为 0.0081%。在  $\gamma$ -Fe 中的溶解度从 910°C 时的 0.0021% 到 1149°C 时的 0.02%。图中对于液体下的异相平衡尚不够明确。有人根据 Fe-B-C 三元系显微组织研究,观察了 Fe-B 二元系的组织,认为  $\delta$ -Fe 作为初晶

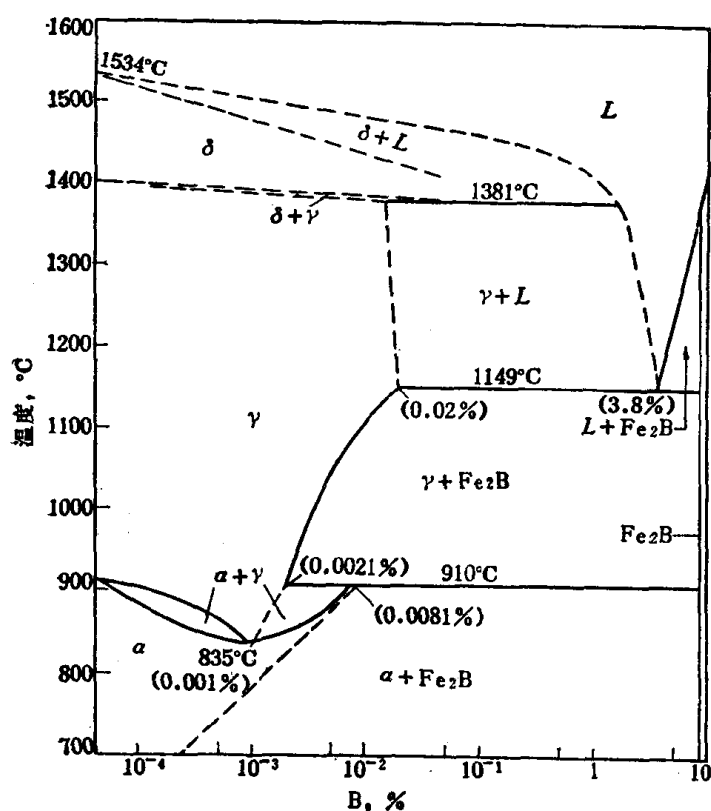


图 1-1-1 微量硼含量的铁硼系平衡相图

析出后,存在  $\delta\text{-Fe} \rightleftharpoons L + \gamma\text{-Fe}$  的再溶反应。

图 1-1-2 所示为硼含量约到 20% 的 Fe-B 系平衡相图。在硼含量为 3.8% 处有一共晶点,其共晶温度为 1149°C。铁和硼形成两种即使在高温也极为稳定的中间化合物,即含硼量为 8.84% 的  $\text{Fe}_2\text{B}$  和含硼量为 16.25% 的  $\text{FeB}$ 。前者是体心正方晶格 ( $a=5.109\text{Å}$ ,  $c=4.249\text{Å}$ ,  $c/a=0.832$ ),后者则属于正交晶系 ( $a=4.061\text{Å}$ ,  $b=5.506\text{Å}$ ,  $c=2.952\text{Å}$ );

其中FeB 并有高温和低温两种晶型。

### 第三节 Fe-B-C 三元相图

Fe-B-C 系是非常有意义的三元系。首先,硼在铁中只能微量固溶,而且固溶形式是能够形成置换式和间隙式两种固溶体。其次,硼在  $\text{Fe}_3\text{C}$  中能够置换碳而大量固溶,成为含硼渗碳体  $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 。在  $1000^\circ\text{C}$  时,  $\text{Fe}_3\text{C}$  中可有 80% (原子) 的碳被硼所置换。此外,在 Fe-B-C 三元系中存在着在 Fe-C 及 Fe-B 每个二元系中都不存在的  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  型的化合物  $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$ 。

关于 Fe-B-C 三元系相图,至今已有不少实验研究。报导了  $1100^\circ\text{C}$ ,  $1000^\circ\text{C}$ ,  $950^\circ\text{C}$ ,  $900^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$ ,  $700^\circ\text{C}$  及  $427^\circ\text{C}$  下的平衡关系。

在 Fe-B-C 三元系中,做为初晶相的有  $\delta\text{-Fe}$ 、 $\gamma\text{-Fe}$  和分子式为  $\text{Fe}_2\text{B}$  的硼化物以及用  $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$  表示的含硼渗碳体四个相。

但在固相平衡中,还存在另一个相,即硼与碳原子比差不多为 1 的三元化合物  $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$ 。

图 1-1-3 中给出了三元系的典型组织。

在 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  侧的初晶  $\text{Fe}_3\text{C}$  如照片 (a) 所示,为针状。但随硼在  $\text{Fe}_3\text{C}$  中置换固溶量的增加,如照片 (b) 所示,变为块状构成网络。照片 (c) 是 Fe-4%B-0.1% C 合金的组织,初晶  $\text{Fe}_2\text{B}$  呈独特的角板状。照片 (d) 是 Fe-2%B-1% C 合金的组织,显示出初晶  $\gamma\text{-Fe}$  和共晶物 ( $\gamma\text{-Fe} + \text{Fe}_2\text{B}$ ) 的组织。照片 (e) 为 Fe-4%B-2% C 合金的组织。可以看出,在初晶  $\text{Fe}_2\text{B}$  周围,由于包晶反应而生成的  $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 。因此,可以推断,共晶反应  $L \rightleftharpoons \text{Fe}_2\text{B} + \text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$  在某一范围内变为包晶反应  $L + \text{Fe}_2\text{B} \rightleftharpoons \text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$  (图 1-1-4 的 GH 间)。照片 (f) 给出了三元包晶点附近的组织,为  $\gamma\text{-Fe} + \text{Fe}_2\text{B} + \text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 。图 1-1-4 是根据实验结果绘制的 Fe-B-C 三元系状态图。

Fe-B-C 三元系在不同温度下的平衡关系示于图 1-1-5。图中 (b) 表明,在  $700^\circ\text{C}$  时与铁素体平衡的相为  $\text{Fe}_2\text{B}$ 、 $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$  及  $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 。在  $950^\circ\text{C}$  时 [图中 (c)], 与奥氏体平衡的相亦为  $\text{Fe}_2\text{B}$ 、 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$  及  $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$ 。不过在此温度下,  $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$  存在的范围很窄,一般不易观察到。根据用热力学计算方法推断,  $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$  的消失温度约为  $970^\circ\text{C}$ 。在  $1000^\circ\text{C}$  下与奥氏体平衡的只有  $\text{Fe}_2\text{B}$  和  $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$  两个相 [图 (d)]。图 (a) 是  $427^\circ\text{C}$  时的三元相图, 这里有趣的是  $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$  这个相不只是在高温而且在低温下也不稳定而消失了。从  $1100^\circ\text{C}$  (e) 的相图可以看出, Fe-C 系中由于加了硼,亚稳定的渗碳体被稳定了。不仅仅是  $\gamma\text{-Fe}$  相,就是液相也和  $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$  (做为稳定相) 平衡。这一点和众所周知的

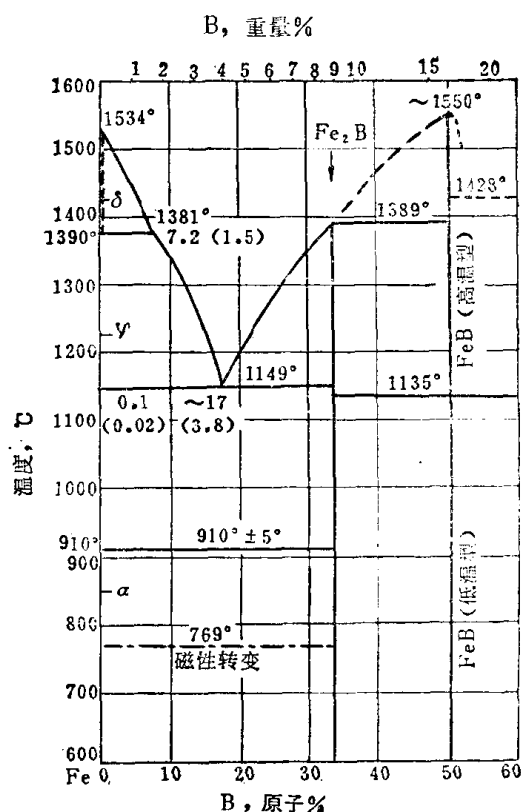
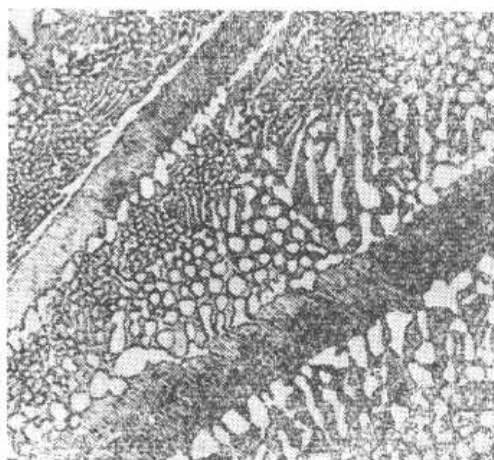
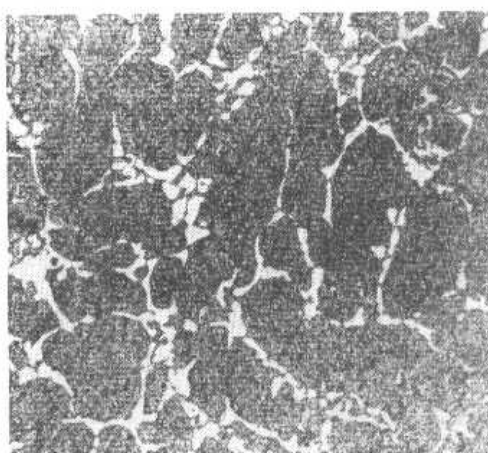


图 1-1-2 铁硼系平衡相图



(a) Fe-0.5%B-4%C 合金  
初晶渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}$

$\times 180 \times \frac{1}{2}$



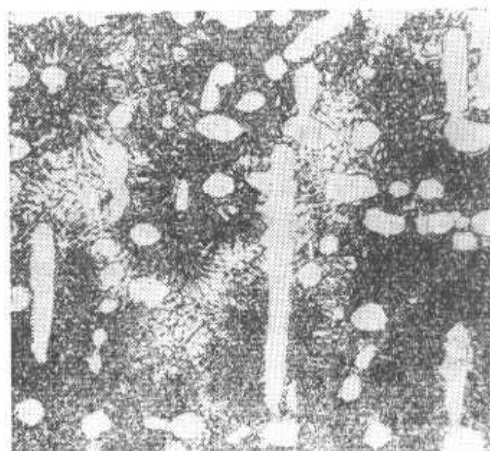
(b) Fe-2%B-2%C 合金  
初晶含硼渗碳体  $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$

$\times 180 \times \frac{1}{2}$



(c) Fe-4%B-0.1%C 合金  
初晶硼化物  $\text{Fe}_2\text{B}$  + 共晶组织  $\gamma - \text{Fe} + \text{Fe}_2\text{B}$

$\times 180 \times \frac{1}{2}$



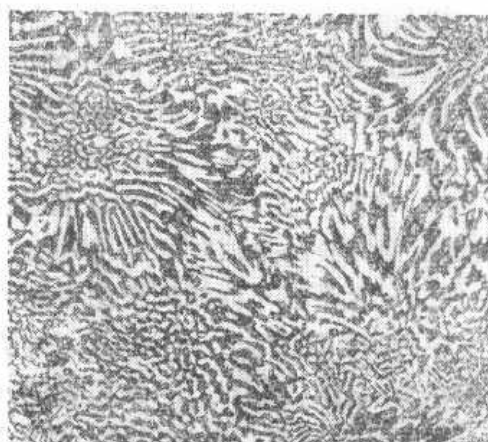
(d) Fe-2%B-1%C 合金初晶  
 $\gamma - \text{Fe}$  + 共晶组织  $\gamma - \text{Fe} + \text{Fe}_2\text{B}$

$\times 180 \times \frac{1}{2}$



(e) Fe-4%B-2%C 合金初晶硼化物  
“ $\text{Fe}_2\text{B}$ ” + 包晶组织 “ $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$ ”

$\times 180 \times \frac{1}{2}$



(f) Fe-3%B-1%C 合金三元包晶组织  
 $\gamma - \text{Fe} + \text{Fe}_2\text{B} + \text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$

$\times 180 \times \frac{1}{2}$

图 1-1-3 Fe-B-C三元系的典型组织

铸铁中的硼能显著地阻止石墨化是一致的。

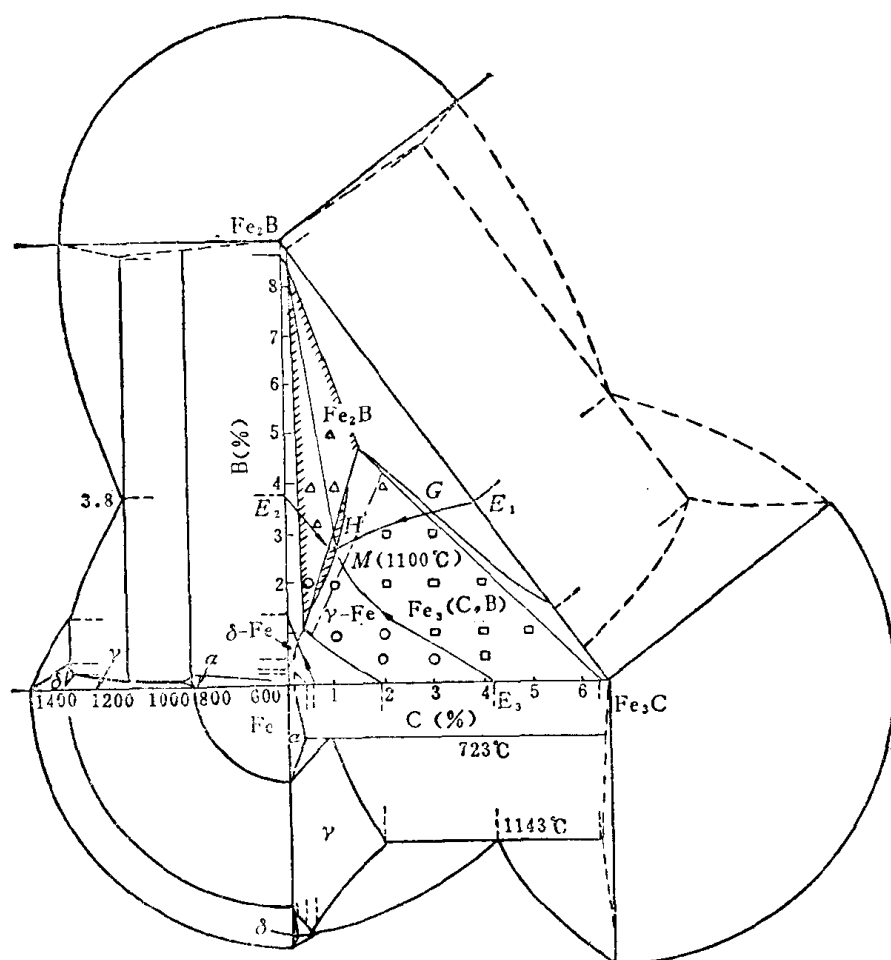


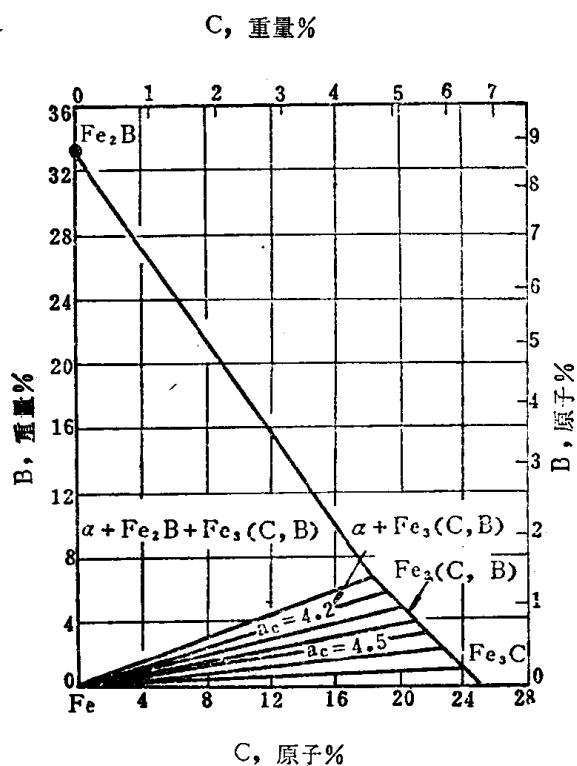
图 1-1-4 Fe-B-C三元系状态图

对Fe-B-C三元系中硼化物 $\text{Fe}_2\text{B}$ 和碳硼化物 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 及 $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$ 的研究指出， $\text{Fe}_2\text{B}$ 是体心正方晶格， $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$ 与 $\text{M}_{23}\text{C}_6$ 型的碳化物结构相同，为面心立方晶格，而 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 则属于正交晶系。

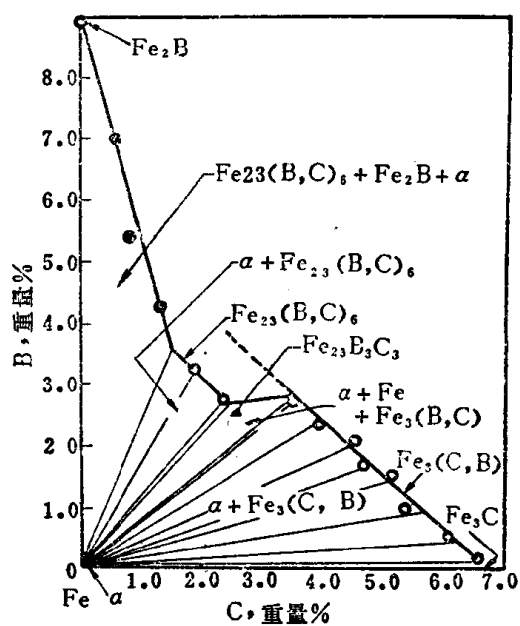
根据实验结果，可以把这些硼化物及碳硼化物的特点概括如下：

- (1)  $\text{Fe}_2\text{B}$ 中几乎不固溶碳；
- (2) 硼在 $\text{Fe}_3\text{C}$ 中置换碳而固溶形成 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ ，在950°C时，硼在 $\text{Fe}_3\text{C}$ 中最多置换到4.8%B；而在1000°C时则为5.3%B；
- (3) 在Fe-B-C系中出现的碳硼化物 $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$ ，约在970°C以上不稳定而消失；相反，约在600°C以下也因不稳定而不能存在。

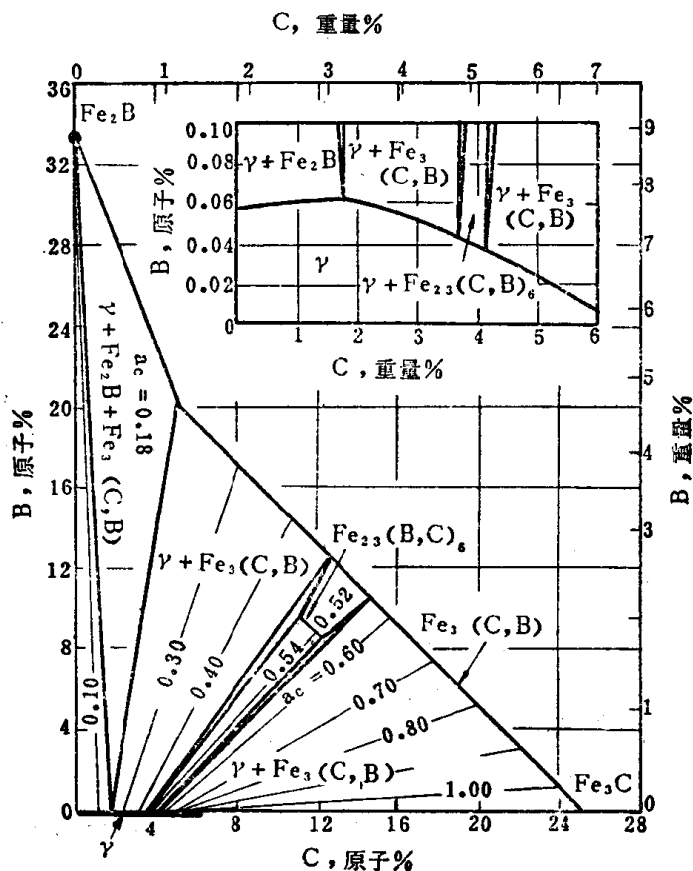
应该指出的是，在Fe-B-C系合金中，若加入微量的铬(0~1%)和钼(0.2%)时，则将对这些硼化物和碳硼化物发生一定的影响。加铬时，在700°C下和铁素体平衡的相，随着添加量的增加， $\text{Fe}_2\text{B}$ 的存在范围向高碳侧扩大。可以认为，添加铬有稳定 $\text{Fe}_2\text{B}$ 的倾向。随着合金中铬量的增加，使得在950°C时 $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$ 的存在区域也随之扩大；这种倾向在添加钼时更为明显。加0.2%Mo， $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$ 的存在区域比加1%Cr时更为宽。碳硼化物 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 是固态反应生成的相，添加微量铬或钼时，即使在更高的温度也能存在。



(a) 427℃时的Fe-B-C三元相图



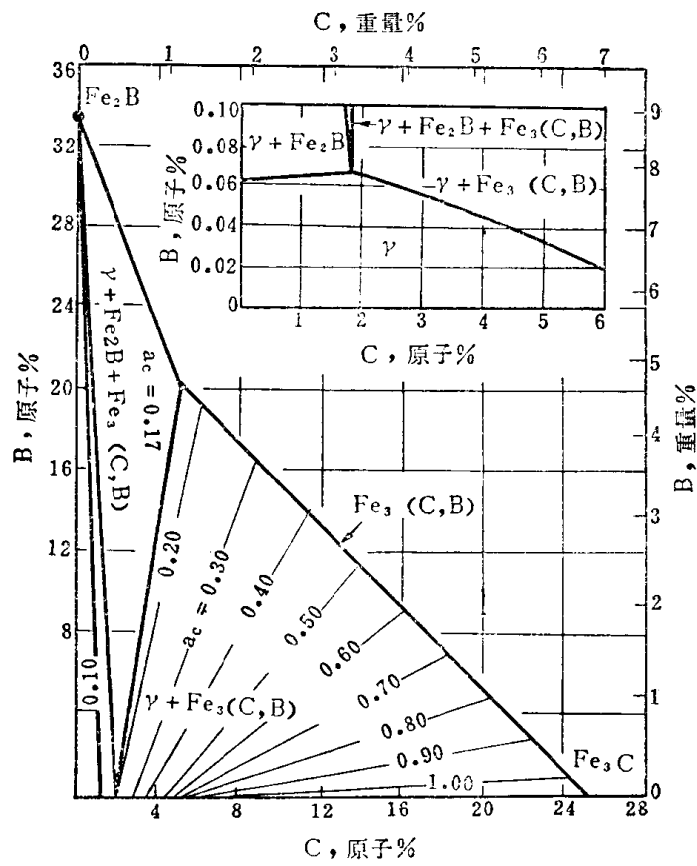
(b) 700℃时的Fe-B-C三元相图



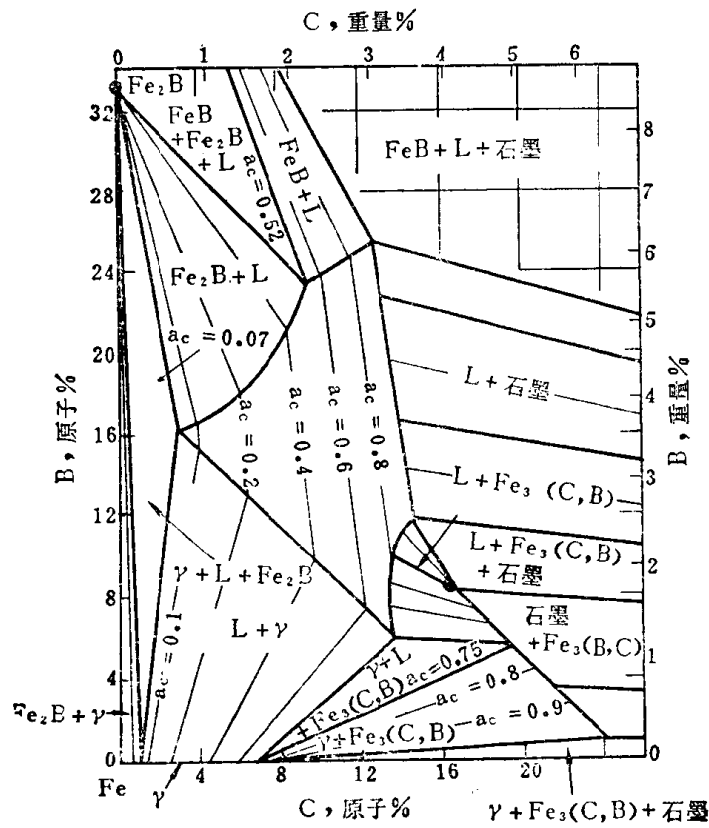
(c) 950℃时的Fe-B-C三元相图

图 1-1-5 在不同温度下

- 注：① 图中  $a_c$  为碳的活度；  
 ② 书中元素含量表示法：  
 凡未注（原子%）者皆为（重量%）。



(d) 1000℃时的Fe-B-C三元相图



(e) 1100℃时的Fe-B-C三元相图

Fe-B-C三元系平衡相图

#### 第四节 硼对Fe-Fe<sub>3</sub>C二元相图的影响

图1-1-6是由于添加硼Fe-Fe<sub>3</sub>C二元系状态图奥氏体单相区的变化情形。图中(a)是实验测定的；(b)是通过热力学计算而绘制的。图中X<sub>c</sub>表示碳硼化物与奥氏体平衡时奥氏体中碳的浓度(原子%)。

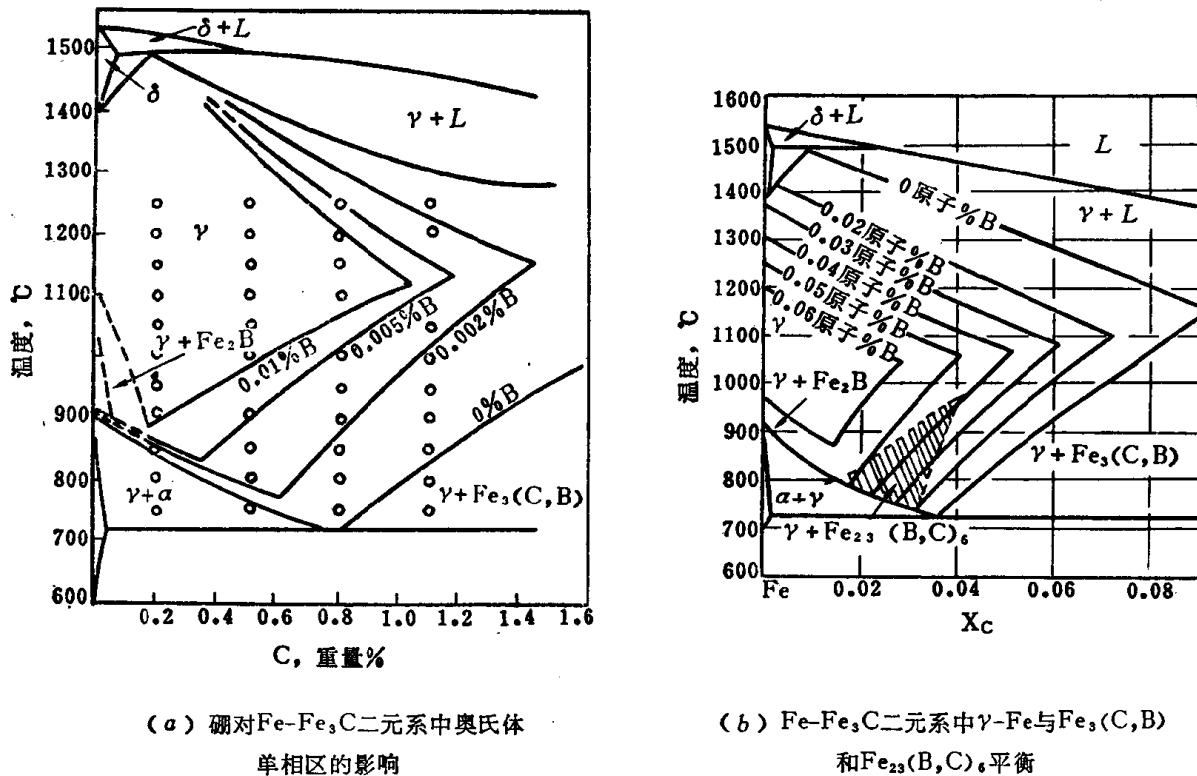


图 1-1-6 硼对Fe-Fe<sub>3</sub>C二元系相图的影响

不难看出，由于微量硼的添加，使Fe-Fe<sub>3</sub>C系的A<sub>cm</sub>线显著向低碳侧移动。由此可以认为，这是因为相当数量的硼在Fe<sub>3</sub>C中置换碳而固溶，以及硼的原子直径比较大(1.94 Å)，在奥氏体中的固溶度最大只不过0.02% (参看图1-1-1)，所以固溶了硼的硼渗碳体Fe<sub>3</sub>(C,B)，对奥氏体的固溶极限与Fe-Fe<sub>3</sub>C系中的Fe<sub>3</sub>C相比，显著降低。

一般认为，在Fe-B二元系中硼含量在0.005%以上时就要出现Fe<sub>2</sub>B，图(a)中标示虚线的位置表示没有发现此硼化物。

根据热力学计算，在Fe-Fe<sub>3</sub>C二元系中存在着γ-Fe与Fe<sub>23</sub>(B,C)<sub>6</sub>间的平衡。但是Fe<sub>23</sub>(B,C)<sub>6</sub>这种碳硼化物仅在图(b)的阴影区中被发现。

#### 第五节 硼在铁和钢中存在的形式

硼在铁中存在的形式，至今还没有一个肯定的结论。

目前，意见比较一致的是，硼溶入γ-Fe中并在晶粒表面上具有吸附效应。这种吸附意味着在晶粒边界附近溶质的加浓或缺少，由于表面张力的作用而没有沉淀。正吸附表示晶粒边界溶质的加浓，而负吸附则表示晶粒边界处溶质的缺少。吸附效应的基本原理是由于

表面能减到最小而使系统的总自由能降到最低。表面张力小于溶剂的溶质趋于浓集在晶粒边界上,反之则在晶粒内。已经证明,硼在  $\gamma$ -Fe 晶粒边界上加浓,表现为正吸附。

根据硼加入铁中所观察到的晶格常数缩小的现象,似乎可以认为,硼原子在  $\alpha$ -Fe 和  $\gamma$ -Fe 中都占据置换位置。已经有些工作支持硼在  $\alpha$ -Fe 中是置换式的概念。

通常根据尺寸因数进行判断,如果溶质对溶剂原子半径的比率小于0.59,则满足形成间隙固溶体的条件;如果半径的比率在0.85和1.15之间,通常形成置换式固溶体。硼的原子半径为0.97 Å,  $\alpha$ -Fe在910°C时原子半径约1.24 Å,比率为0.78;  $\gamma$ -Fe在910°C时原子半径约1.28 Å,则半径比率为0.76。这些比率处在上述间隙和置换两个有利值极限之间而近于形成置换式固溶体的比率,表示出硼比较适合于置换位置。

硼在铁中形成固溶体的可能类型,还可以通过考虑硼原子与晶格中间隙式空隙和置换式空隙的相对尺寸做进一步的分析。 $\alpha$ -Fe和  $\gamma$ -Fe在910°C时,单位晶胞的边长如下:

910°C时,体心立方的  $a_0 = 2.895 \text{ Å}$

910°C时,面心立方的  $a_0 = 3.635 \text{ Å}$

置换式空隙的尺寸:

体心立方  $d = \sqrt{3}/2 \times a_0 = 2.51 \text{ Å}$

面心立方  $d = \sqrt{2}/2 \times a_0 = 2.57 \text{ Å}$

间隙式空隙的尺寸:

体心立方  $d = 0.252a_0 = 0.73 \text{ Å}$

面心立方  $d = 0.293a_0 = 1.07 \text{ Å}$

据此,硼原子的直径对可取用位置的比率如下:

$$\alpha\text{-Fe} \quad \frac{\text{硼原子直径}}{\text{间隙式空隙尺寸}} = \frac{1.94}{0.73} = 2.66$$

$$\frac{\text{硼原子直径}}{\text{置换式空隙尺寸}} = \frac{1.94}{2.51} = 0.77$$

$$\gamma\text{-Fe} \quad \frac{\text{硼原子直径}}{\text{间隙式空隙尺寸}} = \frac{1.94}{1.07} = 1.81$$

$$\frac{\text{硼原子直径}}{\text{置换式空隙尺寸}} = \frac{1.94}{2.57} = 0.76$$

就  $\alpha$ -Fe 来说,硼原子直径超过间隙的 2.5 倍,因此,占据这个位置的可能性可以忽略;然而硼可以适应于置换式,这就引起了晶格常数的缩小。这已被  $x$ -射线分析数据所证实。

可是,最近有人用内耗法研究 Fe-B 合金时指出,在  $\alpha$ -Fe 中显示出一种由硼所引起的内耗峰(Snoek峰)。认为,除碳、氮的峰以外,只有间隙硼原子才可以引起这样的内耗峰。

至于  $\gamma$ -Fe,从上述计算结果和  $x$ -射线结构分析给出的晶格常数缩小的数据来看,可以认为硼在  $\gamma$ -Fe 中形成置换式固溶体。但是,根据硼和碳显示的扩散数据,二者在奥氏体中具有差不太多的扩散速度,表明了硼在  $\gamma$ -Fe 中形成间隙式固溶体的可能性。从溶解度依赖于引入一个硼原子到间隙位置或置换位置所需的能量计算的结果来看,也倾向于硼在  $\gamma$ -Fe 中形成间隙式固溶体的观点。根据硼在  $\gamma$ -Fe 中溶解度的比率进行分析的结果