

薄板坯连铸连轧生产含硼低碳热轧带钢的软化机理*

仇圣桃 肖丽俊 刘家琪 干勇

(钢铁研究总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室, 北京 100081)

摘要 通过薄板坯连铸连轧 (TSCR) 生产典型低碳铝镇静钢 SPHC(一般用热轧钢带) 流程的实验室模拟, 分析了含 $(10-50)\times 10^{-6}$ B, 0.005%N 热轧钢带的组织、析出物的特点以及性能变化. 结果表明: 由于粗大 BN 的优先析出抑制了细小 AlN 的析出, 提高了晶粒的生长能力, 以及 B 在奥氏体晶界的偏聚抑制了铁素体形核, 使得含 B 热轧钢带晶粒明显粗化, 通过测定, 含 B 钢晶粒度达到 7—8 级, 平均晶粒尺寸达到 25 μm . 含 B 钢晶粒粗化以及钢中 AlN 析出量和自由 N 含量的降低, 使得热轧钢带屈服强度与无 B 钢相比降低约 94 MPa.

关键词 硼微合金化, 薄板坯连铸连轧, 力学性能, 析出

中图分类号 TG335.3

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2006)11-1202-05

SOFTENING MECHANISM OF BORON-BEARING LOW-CARBON HOT STRIPS PRODUCED BY TSCR ROUTE

QIU Shengtao, XIAO Lijun, LIU Jiaqi, GAN Yong

State Key Laboratory of Advanced Steel Processes and Products, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081

Correspondent: QIU Shengtao, professor, Tel: (010)62183487, E-mail: qiust@vip.sina.com.cn

Supported by National Key Basic Research and Development Program of China(No.2004CB619107)

Manuscript received 2006-02-24, in revised form 2006-06-05

ABSTRACT The steel plate heat commercial (SPHC) hot strips containing $(10-50)\times 10^{-6}$ B and 0.005% N were produced simulatively by thin slab casting & rolling (TSCR) production route in the laboratory, and the effects of boron micro-alloying on the microstructure, precipitates and mechanical properties were investigated. The results showed that owing to the substitution of large size BN for fine AlN, which improved the grain growing ability, and the segregation of boron on austenite grain boundary, which retarded the transformation from austenite to ferrite, the ASTM grain degree of the hot strips can reach 7—8 grade, corresponding to the mean ferrite grain size of 25 μm . The ferrite grain coarsening, and the reductions of AlN precipitation strengthening and N solution strengthening make the yield strength decrease by 94 MPa, compared with the B free steel.

KEY WORDS boron micro-alloying, thin slab casting and rolling, mechanical property, precipitation

薄板坯连铸连轧 (thin slab casting & rolling, 简称 TSCR) 工艺中品种开发与物理冶金深入研究是该流程的新课题, 微合金化细化晶粒、提高强度已有大量报道. 国内外 TSCR 生产线配备的冷轧机组生产的是冷轧基料, 而汽车行业需要“以热代冷”的软钢产品, 要求热轧卷屈服强度降低, 此时, 粗化晶粒、降低强度是该领域一个新方向. 传统工艺生产低碳铝镇静钢加微合金元素硼 (B) 降低热轧钢带强度已做了很多的研究^[1, 2], 并取得了很好

的使用效果, 本文探讨了微合金元素 B 应用于 TSCR 流程生产低碳热轧钢带并降低屈服强度的可能性.

1 实验方法

实验材料采用在典型低碳铝镇静钢种 SPHC 钢中添加 B, 其成分 (质量分数, %) 为: C 0.05, Si 0.05, Mn 0.20, S 0.004, P 0.016, Al 0.04, B $(10-50)\times 10^{-4}$.

实验用钢在 30 kg 感应熔炼炉中冶炼, 然后浇注到 50 mm×90 mm×300 mm 铜水冷结晶器中 (冷却速率与漏斗型结晶器相当), 铸坯重 10 kg, 同一炉钢水浇两次, 第一次的钢水未加 B. 第二次的钢水加 B 微合金化. 铸坯在 960 $^{\circ}\text{C}$ 左右进行热脱模, 然后直接送入均热炉, 温度设定为 1150 $^{\circ}\text{C}$, 轧前保温 60 min. 经均热处理后, 铸坯在

* 国家重点基础研究发展规划资助项目 2004CB619107

收到初稿日期: 2006-02-24, 收到修改稿日期: 2006-06-05

作者简介: 仇圣桃, 男, 1965 年生, 教授级高级工程师, 博士

实验室可逆轧机上经 7 道次轧制成 2.15 mm 薄板, 开轧温度在 1079 °C 左右, 终轧温度在 850—870 °C 之间, 轧后喷水冷却至 500—700 °C, 再放入 650 °C 的炉中模拟卷板时效和慢冷.

取铸坯经均热后的淬火样以及经炉冷时效后的热轧钢带样, 分别进行化学相分析、力学性能以及显微组织特征研究.

2 实验结果

热轧带钢经炉冷时效后, 两种钢均由多边形铁素体和少量珠光体组成, 如图 1 所示, 与无 B 钢相比, 含 B 钢

中的珠光体含量要明显减少且晶界更为洁净. 铁素体晶粒尺寸采用平均截线长法测定, 无 B 钢的晶粒度为 9—10 级, 平均晶粒尺寸只有 13 μm ; 含 B 钢的晶粒度为 7—8 级, 平均晶粒尺寸可达 25 μm , 与无 B 钢相比, 晶粒明显粗化.

扫描电镜 (SEM) 观察表明, 添加的 B 主要以 BN 颗粒析出 (如图 2a 所示), 其平均颗粒尺寸大于 200 nm, BN 颗粒常易与钢中 MnS, Fe_3C 复合析出形成更大尺寸的夹杂 (如图 2b 所示), 尺寸达到 1.5 μm .

50 mm 厚铸坯经 7 道次轧制成 2.15 mm 厚热轧钢带, 经炉冷时效后, 含 B 钢的屈服强度和抗拉强度分别

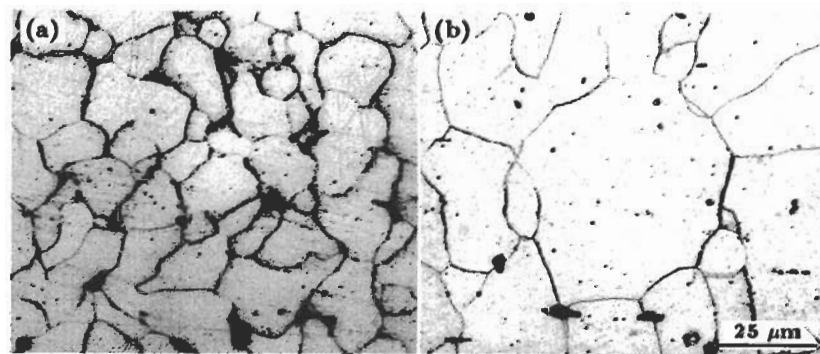


图 1 热轧板试样的金相组织

Fig.1 Optical microstructures of B-free (a) and B-bearing (b) strips hot-rolled from 1079 °C to 850—870 °C

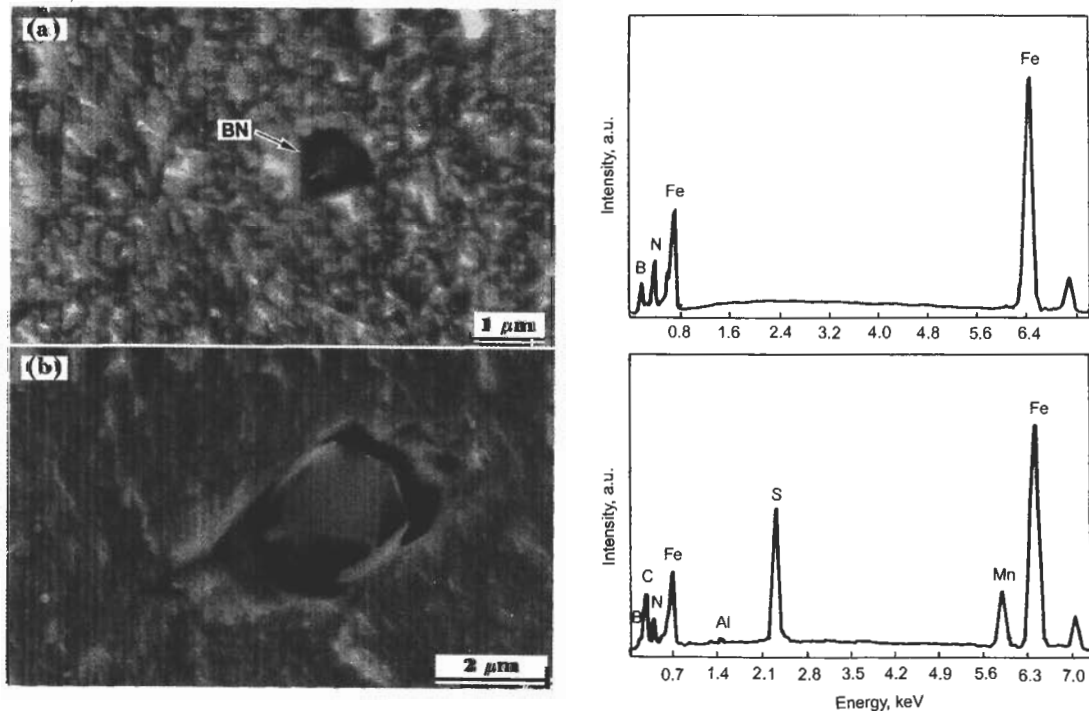


图 2 含 B 钢带中硼化物 SEM 像及 EDS 分析

Fig.2 SEM micrographs and EDS of BN particle (a) and composite particle of BN, MnS and Fe_3C (b) in the tested strip

为 231 和 321 MPa. 与无 B 钢相比, 分别降低了 94 和 104 MPa, 而延伸率 (37.5%) 增加了 1.7%.

通过 Thermo-Calc 软件进行的热力学计算 (如图 3 所示) 表明, 实验钢中 BN 的开始析出温度在 1280 °C 左右, 980 °C 时 BN 析出就已达到平衡, 而 AlN 则刚开始析出. 从热力学上来讲, BN 的析出要优先于 AlN.

铸坯经均热后的化学相分析结果表明, 无 B 钢中 AlN 析出量为 3.7×10^{-5} ; 含 B 钢 BN 优先析出, 析出量为 3.7×10^{-5} , 而 AlN 析出量极少 (仅为 2.2×10^{-6}).

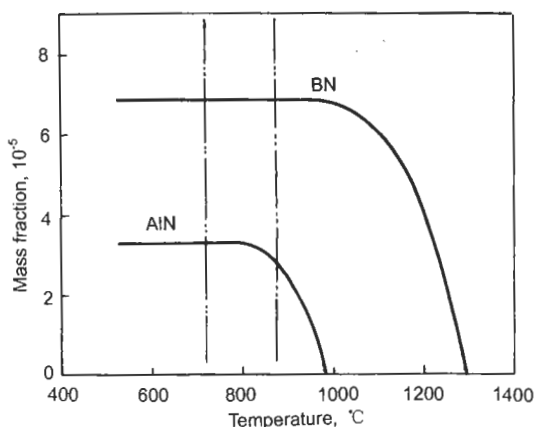


图 3 BN, AlN 析出的热力学计算曲线

Fig.3 Curves of thermodynamic calculation of BN and AlN precipitates in steel with 0.003%B and 0.005%N

3 分析与讨论

3.1 B 微合金化促进晶粒粗化

3.1.1 粗化 BN 抑制细小 AlN 析出 通过热力学计算 (图 3) 以及化学相分析表明, BN 颗粒在高温奥氏体中优先析出, 抑制了 AlN 的析出与长大, 在薄板坯连铸连轧过程中的析出的 AlN 颗粒平均直径小于 8 nm^[3], 对晶界具有显著的钉扎作用, 第二相粒子钉扎晶界时解钉的判据可表达如下^[4,5]:

$$D = \frac{\pi r}{6f} \left(\frac{3}{2} - \frac{2}{Z} \right) \quad (1)$$

式中, D 为基体晶粒尺寸, μm ; r 为第二相粒子直径, μm ; f 为第二相粒子体积分数, Z 为晶粒不均匀因子 (最大直径与平均尺寸之比, 比值在 $\sqrt{2}$ —2 之间), 取 1.7, 上式可变为

$$D = 0.169 \times \frac{r}{f} \quad (2)$$

AlN 在钢中的体积分数可以由下式计算:

$$f_{\text{AlN}} = \frac{C_{\text{AlN}} \times \rho_{\alpha\text{-Fe}}}{100 \times \rho_{\text{AlN}}} \quad (3)$$

式中, C_{AlN} 为 AlN 在钢中的质量分数; $\rho_{\alpha\text{-Fe}}$ 为 $\alpha\text{-Fe}$ 密度, 7.8 g/cm^3 ; ρ_{AlN} 为 AlN 的密度, 3.2 g/cm^3 . 对

无 B 钢而言, 已知在热连轧开始前铸坯中已有 3.7×10^{-5} 的 AlN 沉淀析出, 由此可计算出 AlN 所占体积分数为 8.94×10^{-5} . 根据式 (2) 计算出奥氏体晶粒尺寸与 AlN 粒子直径的关系, 如图 4 所示.

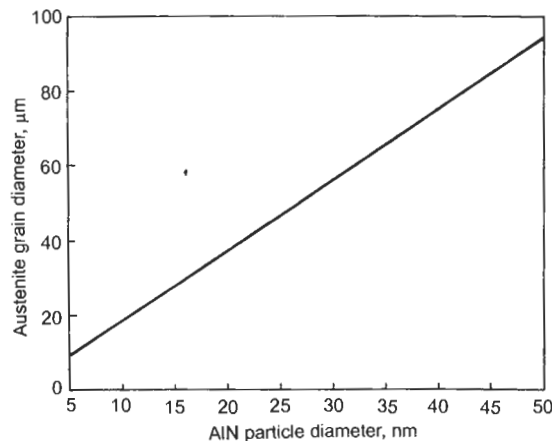


图 4 无 B 钢中奥氏体晶粒尺寸与 AlN 粒子平均粒度的关系

Fig.4 Relationship between austenite grain size and AlN particle diameter for B free steel ($f_{\text{AlN}} = 8.94 \times 10^{-5}$)

由图 4 可以看出, 在无 B 钢中, 在不考虑其它析出物、夹杂物以及工艺条件对奥氏体晶粒影响的条件下, AlN 粒子平均直径在 20 nm 以下时, 则奥氏体晶粒尺寸可细化至 40 μm 以下. 由此可见, 细小 AlN 颗粒对奥氏体晶粒尺寸的影响是显著的. 而在含 B 钢中, 由于细小 AlN 大量减少, 钢中仅有 2.2×10^{-6} 的 AlN, 其所占体积分数仅为 5.3×10^{-6} , 根据式 (2) 计算, 即使 AlN 粒子平均直径在 5 nm 以下, 奥氏体晶粒尺寸也能达到 159 μm , 可以认为钢中如此少的 AlN 析出量对奥氏体晶粒尺寸的影响微乎其微, 而对于大尺寸 BN 颗粒 (平均直径大于 200 nm), 对奥氏体晶粒长大几乎没有钉扎作用, 因此由于含 B 钢中细小 AlN 的减少, 降低了其对晶粒的钉扎作用, 提高了晶粒的生长能力, 从而促进了含 B 热轧板晶粒的长大.

3.1.2 B 在奥氏体晶界的偏聚 Sudo 等人^[2]认为, 向传统工艺生产低碳铝镇静钢中加入一定量的 B, 除一部分与 N 结合形成粗大 BN 颗粒外, 另有 $(5\text{--}15) \times 10^{-6}$ 的 B 偏聚在奥氏体晶界, 抑制了铁素体在奥氏体晶界形核, 降低了铁素体形核率, 从而增大了铁素体晶粒尺寸.

宫原征行等人^[6]的实验也证明了这一点. 钢中各元素对 A_{r3} 点影响的测定结果如下:

$$A_{r3} = 910 - 730[\text{C}] - 73[\text{Mn}] - 16000[\text{B}] \quad (4)$$

式中, $[M]$ 为元素 M 的质量分数. 由式 (4) 可以看出, B 对 A_{r3} 的影响要比 C 和 Mn 大得多, 极微量的 B 即可大大降低 A_{r3} 的温度, 这主要是由于 B 在奥氏体晶界的偏聚抑制了铁素体的形核所引起的.

对于在 TSCR 流程生产低碳铝镇静钢过程中, 微合金元素 B 在奥氏体晶界的偏聚问题目前还在进一步研究中, TSCR 流程与传统工艺流程相比, 由于铸坯在终轧前没有经历 $\gamma \rightarrow \alpha$ 和 $\alpha \rightarrow \gamma$ 两次相变过程, 很显然, BN 在终轧相变前的析出量要少于传统工艺流程, 因此, 可以认为在 TSCR 流程中, 微合金元素 B 更容易在奥氏体晶界偏聚, 抑制铁素体形核, 从而增大铁素体晶粒尺寸.

3.1.3 晶粒尺寸对屈服强度的影响 根据 Hall-Petch 关系及扩展屈服强度计算经验公式 [7], 晶粒尺寸变化对屈服强度影响关系式如下:

$$\Delta\sigma_y = 18.0(d_1^{-1/2} - d_2^{-1/2}) \quad (5)$$

式中, $\Delta\sigma_y$ 为屈服强度变化, MPa; d_1 为无 B 热轧带钢的晶粒尺寸, mm; d_2 为含 B 热轧带钢的晶粒尺寸, mm.

根据实验结果, B 微合金化后, 热轧钢带晶粒尺寸由 13 μm 长大为 25 μm . 根据式 (5) 计算得出, 由晶粒粗化导致屈服强度的降低可达 44 MPa, 晶粒尺寸大小对屈服强度的影响是显著的.

3.2 B 对钢中第二相粒子析出强化的影响

通过以上论述, 向钢中加入一定量的 B, 可以优先形成大尺寸 BN 颗粒从而抑制细小 AlN 的析出, 因此, 控制钢中 B/N 化学计量比, 可以有效地抑制钢中 AlN 的析出量. 根据化学相分析结果, 无 B 钢中 AlN 的析出量要比含 B 钢多析出 3.48×10^{-5} , 在钢中的所占体积分数为 8.72×10^{-5} , 根据 Gladman 等的理论, 采用 Ashby-Orowan 修正模型, 模型以位错线在滑移面上两个相邻粒子之间弓出, 析出物混乱分布为依据, 对析出强化有 [8]

$$\Delta\sigma_p = 8.995 \times 10^3 \frac{f^{1/2}}{r} \ln(2.417r) \quad (6)$$

式中, $\Delta\sigma_p$ 为析出强化对屈服强度的贡献; r 为析出物平均粒子直径, nm; f 为析出物粒子体积分数.

根据式 (6) 计算出析出强化对屈服强度的贡献与析出物粒子平均直径及体积分数的关系, 如图 5 所示.

由图 5 可以看出, 当析出物粒子平均直径在 10—20 nm 之间, 在钢中所占体积分数为 0.010% 时, 析出强化对屈服强度的贡献为 29—17 MPa. 根据文献 [3], AlN 在薄板坯连铸连轧过程中的析出颗粒平均直径小于 8 nm, 根据式 (6) 计算, 当 AlN 析出量为 8.72×10^{-5} 时其对屈服强度的贡献大于 31 MPa, 由此可见, 细小 AlN 对热轧钢带的析出强化是显著的. 而在含 B 钢中, 由于粗大 BN 粒子 (平均直径大于 200 nm) 的析出, 其对屈服强度的贡献微乎其微 (图 5). 因此, 向钢中加入 B, 可以减少 AlN 析出量从而降低其对热轧钢带的析出强化.

3.3 B 微合金化对自由 N 含量的影响

根据 Hall-Petch 关系及扩展屈服强度计算经验公

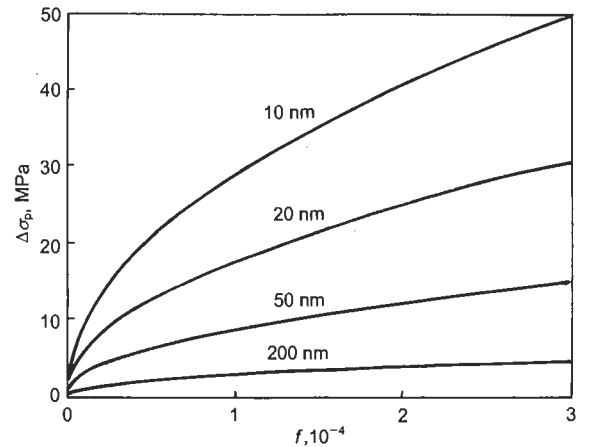


图 5 析出强化对屈服强度的贡献

Fig.5 Curves of contribution of precipitation strengthening to yield strength vs volume fraction of precipitate with different sizes

式, 自由 N 对热轧板屈服强度有显著的贡献, 20×10^{-6} 的自由 N 可以使屈服强度提高约 10 MPa, 因此通过固定钢中的自由 N 也可以降低热轧板的屈服强度. 在钢中, B 与 N、Al 和 N 在 γ -Fe 中存在如下关系 [9]:

$$\text{BN} = [\text{B}] + [\text{N}]; \lg[\text{B}][\text{N}] = -\frac{13970}{T} + 5.24 \quad (7)$$

$$\text{AlN} = [\text{Al}] + [\text{N}]; \lg[\text{Al}][\text{N}] = -\frac{7184}{T} + 1.79 \quad (8)$$

通过比较 $[\text{B}][\text{N}]$ 和 $[\text{Al}][\text{N}]$ (钢中的固溶度积), 在相同温度、相同 N 含量下, B 在钢中的固溶度要远小于 Al, 并且 B 在钢中的扩散速率与 N 相当, 是 Al 在钢中扩散速率的 10 倍左右 [1], 由此可见, 微合金元素 B 比 Al 在钢中与自由 N 具有更强的结合力, 更容易与 N 结合形成 BN 从基体中脱溶. 因此, 向钢中加入一定量的 B, 可以有效地降低钢中自由 N 的含量, 从而降低热轧板的屈服强度.

4 结论

通过实验室模拟 TSCR 流程生产低碳铝镇静钢实验, 向钢中加入 $(10-50) \times 10^{-6}$ B 时, 可得到以下结论:

(1) 含 B 钢晶粒度达到 7—8 级, 平均晶粒尺寸达到 25 μm ; 而无 B 钢平均晶粒尺寸仅为 13 μm . 与无 B 钢相比, 含 B 钢的晶粒明显粗化.

(2) 含 B 钢的屈服强度为 231 MPa, 与无 B 钢相比, 含 B 钢的屈服强度降低了 94 MPa.

(3) 粗大 BN 颗粒在高温奥氏体中的优先析出显著抑制了钢中细小 AlN 的析出, 减弱了 AlN 在晶界的钉扎作用, 以及 B 元素在奥氏体晶界的偏聚, 抑制了铁素体形核, 是热轧板晶粒粗大化的主要原因, 也是热轧板屈服强度降低的主要原因.

(4) 粗大 BN 的析出抑制了细小 AlN 的析出, 降低了 AlN 析出强化对屈服强度的贡献, 并且能有效地降低钢中自由 N 含量, 这一因素也是热轧板屈服强度降低的主要原因。

参考文献

- [1] Takahashi N, Shibata M. *Conf Proc on Technology of Continuous Annealed Cold-Rolled Sheet Steel*, Warrendale, PA: TMS-AIME, 1984: 133
- [2] Sudo M, Tsukatani I. *Conf Proc on Technology of Continuous Annealed Cold-Rolled Sheet Steel*. Warrendale, PA: TMS-AIME, 1984: 203
- [3] Kang Y L, Yu H. *Sci Technol Eng*, 2005; 5(5): 305
(康永林, 于 浩. 科学技术与工程, 2005; 5(5): 305)
- [4] Gao N, Baker T N. *ISIJ Int*, 1998; 38; 7: 744
- [5] Manohar P A. *ISIJ Int*, 1998; 38: 799
- [6] Miyahara M, Nakajima N, Kuramoto K. *R&D Kobe Steel Engineering Rep*, 1990; 36(3): 61
(宫原征行, 中岛悟博, 藏本腾次郎, R.D 神户制钢技报, 1990; 36(3): 61)
- [7] Choquet P, Febregue P, Giusti J, Chamont B, Pezant J N. *Int Symp on Mathematical Modeling of Hot Rolling of Steel*, Canada, 1990; 33
- [8] Yong Q L, Sun X J, Liu Q Y, Zhang C, Li J K. *Spec Steel*, 2005; 26(1): 1
(雍岐龙, 孙新军, 刘清友, 张 晨, 李继康. 特殊钢, 2005; 26(1): 1)
- [9] Cahn R W, Haasen P, Kramer E J. *Translated by Liu J H et al. Materials Science and Technology*. Vol.7, Beijing: Science Press, 1999: 97
(Cahn R W, Haasen P, Kramer E J. 刘嘉禾等译. 材料科学与技术丛书. 第 7 卷, 北京: 科学出版社, 1999: 97)