

带钢 薄板坯连铸
带钢 薄板坯连铸

(2)6-15

T914213

含钒高强度薄板坯连铸带钢的研究

M.J.W. Green, D.N. Crowther

(英钢技术中心 SWINDEN 实验室)

Green, M.J

薄板坯连铸

摘要 以前的研究^[1]让人们看到了用薄板坯连铸和热送热装工艺生产微合金高强度钢的潜力,同时也证实了 V-N 系带钢的屈服强度能够达到 550MPa。本课题的目标是研究屈服强度在 350~550MPa 内、较低强度级带钢的化学成分和确定 V、N 含量对机械性能的影响。

模拟薄板坯连铸工艺生产了八种 C、Si、Mn 相同, V、N 不同的钢,其成分为 (%): 0.06C, 1.5Mn, 0.5Si, 0~0.11V, 0~0.018N。采用与工厂薄板坯连铸生产上相似的冷却速度在模中进行连铸,随后将铸坯热装进温度为 1100℃ 的炉子,最后在实验室轧机上轧成 7mm 厚的板带。接着将板带水冷到 600℃,再装进温度为 600℃ 的炉子,然后以与工厂带卷相似的冷速将板带冷至室温。

带钢强度随着 V、N 含量的增加而增加。V、N 的强化因子分别为 1442MPa/wt.%V 和 8384MPa/wt.%N。以前的研究表明,带钢的强度变化从 C-Mn 钢的上屈服强度 (UYS) 344MPa、抗拉强度 (UTS) 467MPa 到含 V 0.12%, 含 N 0.018% 钢的 UYS 596MPa、UTS 670MPa。V、N 含量为 0~0.12%V、0~0.018%N 的钢能够满足 ASTM A936 中 50、60、70、80 级和 EN 10149-2 中 S420、S460、S500、S550 级对抗拉强度的要求。

冲击韧性好, 13 J 冲击转变温度 (13 J ITT) 在 -60℃~-95℃、-20℃夏比冲击吸收功为 38~97J (用 10×5mm 冲击试样)。C-Mn 钢和含 0.04%V 的钢的 13 J ITT 几乎没有变化,而较高 V、N 含量的钢的 13 J ITT 增加。13 J ITT 与析出强化产生的强度 ($\delta_{1.75}$) 成线性变化,其关系为 $ITT = -118 + 0.35\delta_{1.75}$ 。

1 前言

近年来,随着连铸技术的发展,可以浇注板厚 ≤ 80mm 的板坯,与一般板厚在 200mm 以上的传统板坯相比,这是非常薄的。薄板坯连铸通常同热送热装、直接轧成带钢联系在一起,与厚板坯冷装工艺相比,成本大大降低。因此,薄板坯连铸工艺得到了推广,目前全世界投产了许多薄板坯连铸机,大部分在北美。

从传统的厚板坯冷装工艺到薄板坯热装工艺,工艺条件有许多变化,包括:薄板坯较快的冷却速度、热送热装、较低的再加热温度和由薄板坯轧成带钢较小的总变形量。上述变化影响金相组织和改善性能,有关情况参见以前的研究^[1]。因此,研究钢的化学性质,特别是适应薄板坯连铸工艺的化学

性质就显得非常必要。

直到最近,薄板坯连铸工艺主要用于生产低强度级带钢。然而,目前已有用薄板坯连铸工艺生产较高强度级微合金带钢和含 V 高强度带钢的报道^[2]。报道表明,含 V 钢的热延性比易出现横向裂纹和表面质量不好的含 Nb 钢更好^[1]。因此,含 V 钢特别适合于薄板坯连铸,因而确定不含 Nb 的 V 微合金钢的强度范围很有必要。

以前的研究^[1]主要集中在不同合金系统的适应性,再加热温度和板厚对高强度带钢的影响,发现 V-N 系的屈服强度可能超过 500MPa,同时具有良好的冲击韧性。以前的课题只研究了屈服强度通常在 500MPa 以上含 0.1%V 同时含 N 和其它微合金元素的带钢。

本项目的目的是研究较低强度级别

(500MPa 以下)的带钢和 V、N 含量对机械性能的影响。已提交过最初结果^[4]的进展

报告,本最终报告包含了本项目研究所用的全部钢的结果。

表 1 目标成分

| 钢种 | C | Si | Mn | P | S | Al | N | V |
|---------|------|------|-----|------|-------|------|-------|------|
| C-Mn | 0.06 | 0.35 | 1.5 | 0.01 | 0.005 | 0.04 | 0.008 | |
| 低 V 低 N | 0.06 | 0.35 | 1.5 | 0.01 | 0.005 | 0.04 | 0.008 | 0.04 |
| 中 V 低 N | 0.06 | 0.35 | 1.5 | 0.01 | 0.005 | 0.04 | 0.008 | 0.08 |
| 高 V 低 N | 0.06 | 0.35 | 1.5 | 0.01 | 0.005 | 0.04 | 0.008 | 0.12 |
| 低 V 中 N | 0.06 | 0.35 | 1.5 | 0.01 | 0.005 | 0.04 | 0.013 | 0.04 |
| 中 V 中 N | 0.06 | 0.35 | 1.5 | 0.01 | 0.005 | 0.04 | 0.013 | 0.08 |
| 低 V 高 N | 0.06 | 0.35 | 1.5 | 0.01 | 0.005 | 0.04 | 0.018 | 0.04 |
| 中 V 高 N | 0.06 | 0.35 | 1.5 | 0.01 | 0.005 | 0.04 | 0.018 | 0.08 |

表 2 实际成分

| 钢种 | 板号 | 化学成分 (Wt. %) | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|----------|--------------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|---------|-------|--------|--------|--------|
| | | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mn | Ni | Al | Cu | B | N | V | Nb | Ti |
| C-Mn | A7M71 | 0.062 | 0.51 | 1.45 | 0.013 | 0.006 | 0.09 | 0.03 | 0.09 | 0.036 | 0.07 | <0.0005 | 0.064 | <0.005 | <0.005 | <0.005 |
| 低 V 低 N | A7M74 | 0.064 | 0.46 | 1.44 | 0.009 | 0.004 | 0.08 | 0.03 | 0.09 | 0.037 | 0.07 | <0.0005 | 0.010 | 0.04 | <0.005 | <0.005 |
| 低 V 低 N | A8M19 | 0.057 | 0.47 | 1.52 | 0.017 | 0.004 | 0.08 | 0.03 | 0.08 | 0.051 | 0.07 | <0.0005 | 0.008 | 0.04 | <0.005 | <0.005 |
| 中 V 低 N | A7M72 | 0.064 | 0.47 | 1.44 | 0.010 | 0.004 | 0.08 | 0.03 | 0.09 | 0.030 | 0.07 | 0.0005 | 0.010 | 0.08 | <0.005 | <0.005 |
| 中 V 低 N | A7M73 | 0.065 | 0.47 | 1.45 | 0.009 | 0.004 | 0.08 | 0.03 | 0.08 | 0.032 | 0.07 | <0.0005 | 0.010 | 0.08 | <0.005 | <0.005 |
| 高 V 低 N | A7M70 | 0.063 | 0.50 | 1.43 | 0.012 | 0.006 | 0.09 | 0.03 | 0.09 | 0.024 | 0.07 | 0.0005 | 0.005 | 0.11 | <0.005 | <0.005 |
| 高 V 低 N | A8M17 | 0.056 | 0.46 | 1.49 | 0.016 | 0.004 | 0.08 | 0.03 | 0.08 | 0.040 | 0.07 | <0.0005 | 0.008 | 0.11 | <0.005 | <0.005 |
| 高 V 低 N | A8M18 | 0.057 | 0.46 | 1.49 | 0.016 | 0.004 | 0.08 | 0.03 | 0.08 | 0.040 | 0.07 | <0.0005 | 0.008 | 0.11 | <0.005 | <0.005 |
| 低 V 中 N | A8M10 | 0.062 | 0.51 | 1.46 | 0.012 | 0.006 | 0.11 | 0.03 | 0.09 | 0.033 | 0.07 | <0.0005 | 0.012 | 0.04 | <0.005 | <0.005 |
| 低 V 中 N | A8M13 | 0.060 | 0.47 | 1.49 | 0.011 | 0.005 | 0.08 | 0.03 | 0.09 | 0.048 | 0.07 | <0.0005 | 0.013 | 0.04 | <0.005 | <0.005 |
| 中 V 中 N | A8M11 | 0.060 | 0.51 | 1.43 | 0.012 | 0.005 | 0.11 | 0.03 | 0.09 | 0.030 | 0.07 | <0.0005 | 0.012 | 0.07 | <0.005 | <0.005 |
| 中 V 中 N | A8M12 | 0.060 | 0.47 | 1.49 | 0.012 | 0.005 | 0.08 | 0.03 | 0.09 | 0.042 | 0.07 | <0.0005 | 0.014 | 0.08 | <0.005 | <0.005 |
| 低 V 高 N | A8M16 | 0.069 | 0.44 | 1.49 | 0.012 | 0.006 | 0.08 | 0.03 | 0.08 | 0.047 | 0.08 | <0.0005 | 0.018 | 0.04 | <0.005 | <0.005 |
| 中 V 高 N | A8M15 | 0.071 | 0.43 | 1.47 | 0.012 | 0.006 | 0.08 | 0.03 | 0.08 | 0.033 | 0.08 | <0.0005 | 0.018 | 0.08 | <0.005 | <0.005 |
| 高 V 高 N | P6H8 * | 0.062 | 0.34 | 1.50 | 0.012 | 0.006 | 0.07 | 0.02 | 0.07 | 0.029 | 0.07 | | 0.016 | 0.012 | <0.005 | <0.005 |
| 高 V 高 N | P6H124 * | 0.061 | 0.35 | 1.53 | 0.011 | 0.006 | 0.07 | 0.02 | 0.08 | 0.015 | 0.07 | | 0.018 | 0.012 | <0.005 | <0.005 |
| 高 V 高 N | P6H169 * | 0.0673 | 0.38 | 1.48 | 0.013 | 0.007 | 0.07 | 0.02 | 0.08 | 0.019 | 0.07 | | 0.018 | 0.012 | <0.005 | <0.005 |

*来自参考文献 [1]

2 试验材料和方法

试验所用的八种不同成分的钢的目标成分见表 1。基本成分是非碳 (0.06%),

Mn(1.5%), Si(0.35%)的铝镇静钢。V、N 按低、中、高三档加入基本成分中, 对应的 V 含量分别为 0.04%、0.08%、0.12%, 对应的 N

含量分别为 0.008%、0.013%、0.018%；高 V 钢只有低 N 含量与之对应。Cr、Mo、Ni、Cu 等元素按电炉钢中的正常残留量添加。试验钢的实际成分见表 2。对上述大部分钢种铸有双锭。除 V、N 外，不同钢号之间其它元素含量几乎相同。C 含量相近，从 0.056% 到 0.071%；Mn 也相近，从 1.43% 到 1.49%。钢的 V 含量分为三档：0.04%、0.08%、0.11%。对每一档 V 含量，有不同的 N 含量与之对应：低 N (0.004~0.010%)、中 N (0.012~0.014%)、高 N (0.017~0.018%)。以前试验钢的成分也列在表 2 中，其基本成分相近，含 0.12%V 和 0.018%N。

将在 60kg 普通炉中冶炼的钢水浇进有水冷板的模子中，铸成大小为 50×150×330mm 的钢锭。设计的模子要使钢锭的冷却速度与工厂生产 50mm 薄板坯每流的冷却速度相近。钢锭凝固后，一般在其表面温度在 1100℃ 以上时就可以脱模。一根 Hiti 针射

在钢锭边缘，将热电偶插入进行测温。在将钢锭运送到加热炉过程中，采用绝热的 Kaowool 保护以减小热量损失。钢锭入加热炉时其表面温度一般超过 900℃，在加热过程中监控钢锭温度。当温度达到 1100℃ 时，保温 30 分钟后进行轧制。

轧制规程和冷却条件见表 3。钢锭在实验室轧机上经 5 道次轧成 7mm 厚的带钢，在第 4 道次轧制后待温度达到 870℃ 再进行最后一道轧制，以保证终轧温度在 847~872℃ 之间。带钢出轧机后，立即用气雾进行冷却，即以大约 18℃/s 的冷却速度冷到 600℃ 的目标终冷温度 (ECT)。试验中有些终冷温度不同，A7M70 和 A7M74 终冷温度较低，分别为 538℃ 和 535℃。A8M10 的终冷温度高，为 672℃。实际冷却速度为 13~22℃/s。随后将带钢放入炉温为 600℃ 的电炉中，以相当于工厂实际生产时板卷的冷却速度冷却到室温。

表 3 工艺条件

| 板号 | 锭径 (mm) | 轧制过程温度 (°C) | | | | | | | |
|-------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | A7M71 | A7M74 | A8M19 | A7M72 | A7M73 | A7M70 | A8M17 | A8M18 |
| 钢种 | | C-Mn | 0.04% V 0.010% N | 0.04% V 0.008% N | 0.08% V 0.010% N | 0.08% V 0.010% N | 0.11% V 0.003% N | 0.12% V 0.008% N | 0.12% V 0.008% N |
| 第一道次 | 40 | 991 | 1017 | 991 | 983 | 975 | 971 | 953 | 964 |
| 第二道次 | 30 | | 1001 | 991 | 994 | 982 | 1010 | 957 | 931 |
| 第三道次 | 20 | 985 | 994 | 988 | 995 | 980 | 992 | 955 | 928 |
| 第四道次 | 12 | | 1060 | 988 | 990 | 982 | 994 | 973 | 939 |
| 冷到 870℃ | | | | | | | | | |
| 第五道次 | 7 | 957 | 963 | 847 | 870 | 862 | 870 | 864 | 847 |
| 终轧温度 | | 859 | 972 | 836 | 862 | 847 | 864 | 865 | 823 |
| 终冷温度 | | 613 | 535 | 592 | 630 | 626 | 538 | 523 | 591 |
| 冷却时间 (s) | | 14 | 15 | 15 | 14 | 14 | 16 | 15 | 15 |
| 冷却速度 (°C/s) | | 18 | 22 | 16 | 17 | 16 | 20 | 16 | 16 |
| 板号 | | A8M10 | A8M13 | A8M11 | A8M12 | A8M16 | A8M15 | | |
| 钢种 | | 0.04% V 0.012% N | 0.04% V 0.013% N | 0.07% V 0.012% N | 0.08% V 0.014% N | 0.04% V 0.018% N | 0.08% V 0.018% N | | |
| 第一道次 | 40 | 984 | 943 | 984 | 943 | 976 | 981 | | |
| 第二道次 | 30 | 1006 | 931 | 996 | 973 | 1011 | 1013 | | |
| 第三道次 | 20 | 1002 | 971 | 984 | 971 | 1001 | 993 | | |
| 第四道次 | 12 | 997 | 971 | 992 | 975 | 1020 | 1010 | | |
| 冷到 870℃ | | | | | | | | | |
| 第五道次 | 7 | 873 | 840 | 990 | 862 | 872 | 867 | | |
| 终轧温度 | | 861 | 838 | 865 | 835 | 863 | 884 | | |
| 终冷温度 | | 672 | 554 | 625 | 585 | 565 | 608 | | |
| 冷却时间 (s) | | 15 | 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | | |
| 冷却速度 (°C/s) | | 13 | 18 | 16 | 17 | 20 | 18 | | |

分别从每一钢号的两个板上取宽 12.5mm、标距 50mm 的横向拉伸试样,按照 BS EN10002 标准进行检验。为了获得完整的脆性转变曲线,从每一带钢上取尺寸为 10×5mm 的纵向冲击试样若干, V 形开口,开口深 2mm,按照 BS EN10045 标准进行检验。对试样纵断面抛光,用 2% 的硝酸乙醇腐蚀液腐蚀后,在光学显微镜下观察。采用 BS 4490 标准中的线性截取技术对铁素体晶粒尺寸和体积百分数进行分析。

3 结果

1) 显微组织

晶粒尺寸和相体积百分数见表 4。显微组织普遍为 1~10% 珠光体+细晶粒铁素体,而终冷温度低的钢(A7M70、A7M74)有贝氏体区域。图 1 表示铁素体晶粒尺寸随 V、N 的变化。V 钢的晶粒尺寸在 6.2~

8.3 μm ,并随 V 含量的增加而减小。对于一定的 V 含量,低 N 钢的晶粒尺寸比中、高 N 钢的略大一些。C-Mn 钢的晶粒尺寸有点粗,为 8.6 μm 。以前研究工作中的高 V 高 N 钢的结果也参与比较,其组织为铁素体+珠光体,铁素体晶粒尺寸为 6.1~6.9 μm 。

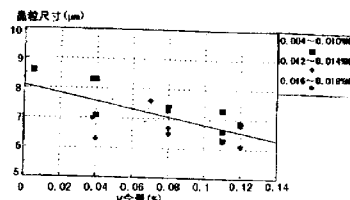


图 1 V、N 对铁素体晶粒尺寸的影响 V(%)

表 4 显微组织

| 板号 | 钢种 | 相体积分(%) | | | 铁素体晶粒尺寸 | |
|----------|-------------------|---------|-----|-----|-------------------|-----------------------|
| | | 铁素体 | 贝氏体 | 马氏体 | (μm) | ($\text{mm}^{1/2}$) |
| A7M71 | C-Mn | 98 | 0 | 2 | 8.6 | 10.8 |
| A7M74 | 0.04% V, 0.010% N | 85 | 15 | 0 | 7.1 | 11.9 |
| A8M19 | 0.04% V, 0.008% N | 87 | 9 | 4 | 8.3 | 11.0 |
| A7M72 | 0.08% V, 0.010% N | 95 | 0 | 5 | 7.3 | 11.7 |
| A7M73 | 0.08% V, 0.010% N | 93 | 0 | 7 | 7.4 | 11.6 |
| A7M70 | 0.11% V, 0.004% N | 70 | 30 | 0 | 6.6 | 12.3 |
| A8M17 | 0.11% V, 0.008% N | 96 | 0 | 4 | 7.3 | 11.7 |
| A8M18 | 0.11% V, 0.008% N | 94 | 0 | 6 | 6.3 | 12.6 |
| A8M10 | 0.04% V, 0.013% N | 90 | 0 | 10 | 8.3 | 11.0 |
| A8M13 | 0.04% V, 0.013% N | 96 | 2 | 2 | 6.3 | 12.6 |
| A8M11 | 0.07% V, 0.013% N | 95 | 0 | 5 | 7.6 | 11.5 |
| A8M12 | 0.08% V, 0.013% N | 96 | 0 | 4 | 6.7 | 12.2 |
| A8M16 | 0.04% V, 0.018% N | 93 | 0 | 7 | 7.0 | 12.0 |
| A8M15 | 0.08% V, 0.018% N | 91 | 0 | 9 | 6.5 | 12.4 |
| P6H8 * | 0.12% V, 0.016% N | 96 | 0 | 4 | 6.9 | 12.0 |
| P6H124 * | 0.12% V, 0.018% N | 99 | 0 | 1 | 6.1 | 12.8 |
| P6H169 * | 0.12% V, 0.018% N | 99 | 0 | 1 | 6.8 | 12.1 |

* 来自参考文献 [1]

2) 机械性能

拉伸和冲击结果和以前研究工作中的高 V 高 N 钢的结果^[1]均列在表 5 中。表 5 中也列出了通过从实测的下屈服强度中扣除计算屈服强度(从标准组织与性能的关系可以得到晶粒度与固溶强化的影响^[5])后所得的由析出强化产生的强度 δ_{LYS} 。

除高 V 低 N 和低终冷温度的 A7M70 外,所有的钢都表现为不连续屈服。表现出连续屈服的钢可能是由于钢中含有相对多的贝氏体组织。V、N 含量增加,强度增加。下屈服强度(LYS)随 V 含量增加而增加,LYS 从 C-Mn 钢的 338MPa 到含 0.12%V、0.018%N 钢的 588MPa (图 2)。对于一定的 V 含量,

较高 N 含量的钢的 LYS 也较高, 一般高 N 钢的 LYS 比低 N 钢的高 60~90MPa。V 的 LYS 强化因子为 1349~1492MPa/wt. %V, 较高 N 含量的钢有较高的强化因子。N 对 LYS 的影响见图 3。N 的 LYS 强化因子为 7951~9489MPa/wt. %N, 较高 V 含量的钢有较高的

强化因子。对上屈服强度 (UYYS) 和抗拉强度 (UTS) 来说, 有与 LYS 相同的趋势, 即随着 V、N 含量的增加强度增加 (图 4 和图 5)。UYYS 从 C-Mn 钢的 344MPa 到含 0.12%V、0.018%N 钢的 596MPa, 而 UTS 则从 467MPa 增加到 670MPa。

表 5 机械性能

| 板号 | 钢种 | LYS (MPa) | UYYS (MPa) | UTS (MPa) | 延伸率 (%) | 13 JTT (°C) | 50% FATT (°C) | 冲击功 (J, -20°C) | δ_{180} (MPa) |
|------------|-------------------|-----------|------------|-----------|---------|-------------|---------------|----------------|----------------------|
| A7M71 | C-Mn | 338 | 334 | 467 | 31 | -95 | -45 | 97 | -27 |
| A7M74 | 0.04% V, 0.010% N | 404 | 431 | 534 | 28 | -95 | -33 | 74 | 25 |
| A8M19 | 0.04% V, 0.008% N | 388 | 414 | 517 | 28 | -125 | -42 | 88 | 16 |
| A7M72 | 0.08% V, 0.010% N | 460 | 472 | 565 | 18 ** | -85 | -35 | 86 | 82 |
| A7M73 | 0.08% V, 0.010% N | 458 | 488 | 580 | 25 | -95 | -38 | 80 | 82 |
| A7M70 | 0.11% V, 0.004% N | 498 * | 507 * | 593 | 20 | -75 | -22 | 55 | 106 |
| A8M17 | 0.11% V, 0.008% N | 474 | 502 | 592 | 22 | -95 | -30 | 85 | 92 |
| A8M18 | 0.11% V, 0.008% N | 480 | 513 | 584 | 24 | -115 | -35 | 75 | 82 |
| A8M10 | 0.04% V, 0.013% N | 409 | 424 | 524 | 17 ** | -75 | -45 | 60 | 40 |
| A8M13 | 0.04% V, 0.013% N | 429 | 446 | 539 | 30 | -130 | -55 | 85 | 33 |
| A8M11 | 0.07% V, 0.013% N | 474 | 487 | 587 | 23 | -60 | -20 | 48 | 97 |
| A8M12 | 0.08% V, 0.013% N | 471 | 512 | 590 | 26 | -80 | -17 | 65 | 81 |
| A8M16 | 0.04% V, 0.018% N | 467 | 483 | 582 | 26 | -80 | -20 | 51 | 84 |
| A8M15 | 0.08% V, 0.018% N | 534 | 561 | 651 | 23 | -70 | 2 | 38 | 144 |
| P6H18 *** | 0.12% V, 0.016% N | 572 | 574 | 670 | 22 | -80 | 3 | 24 | 196 |
| P6H124 *** | 0.12% V, 0.018% N | 580 | 587 | 663 | - | -60 | - | 38 | 189 |
| P6H169 *** | 0.12% V, 0.018% N | 612 | 627 | 678 | 6 ** | -18 | 25 | 13 | 231 |

10 × 5 mm 纵向冲击试样; * 连续屈服, 其值为变形到 0.2% 和 0.5% 时的试验应力; ** 表示标距不在试样中心 50mm; *** 来自参考文献 [1]

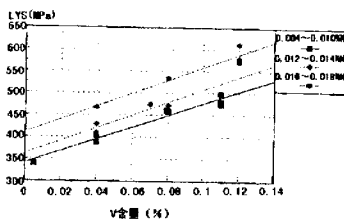


图 2 V、N 对下屈服强度的影响

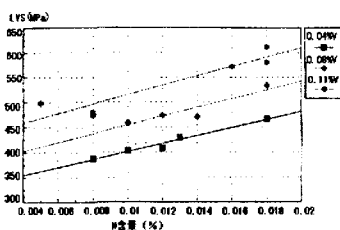


图 3 N、V 对下屈服强度的影响

析出强化产生的强度也随着 V、N 含量的增加而增加, 从含 0.04%V、0.008%N 钢的 16MPa 到含 0.12%V、0.018%N 钢的 205MPa (图 6)。析出强化产生的强度随 V 含量增

加而增加的梯度随 N 含量的不同而不同: 低 N 钢为 1130MPa/wt. %V, 中 N 钢为 1382MPa/wt. %V, 高 N 钢为 1517MPa/wt. %V。假设 C-Mn 钢的析出强化产生的强度为 0, 而不是试验值 -27MPa,

那么低 N 钢的析出强化因子将减少到 970MPa/wt. %V。

延伸率随 V、N 含量的变化见图 7。一些试样断在标距外，其延伸率低，忽略这些异常结果，将看到随 V 含量增加延伸率减小，从 C-Mn 钢的约 30% 到含 0.12%V、0.016%N 钢的 22%。N 对延伸率的影响关系不明显。

本次试验中的所有带钢都具有好的冲击性能，13 J ITT 不高于 -60°C，50%FATT 为 +5~-55°C，-20°C 冲击吸收功为 38~97 J (表 5)。以前试验中的 P6H169 钢有非常高的转变温度，其 13 J ITT 为 -18°C，50%FATT 为 +25°C。与 C-Mn 钢的 13 J ITT 为 -95°C 相比，低 V 低 N 钢的 13 J ITT 为 -95°C 和 -125°C。低 V 中 N 钢中的一种也有非常低的 13 J ITT，为 -130°C。中 V 高 N 钢和中 V 中 N 钢中的一种在本次试验中 13 J ITT 最差，分别为 -70°C 和 -60°C。-20°C 冲击吸收功、13 J ITT 和 50%FATT 随 V、N 含量的变化分别见图 8、图 9、图 10。-20°C 冲击吸收功随 V、N 含量的增加而连续减小。随 V、N 含量的增加，13 J ITT 和 50%FATT 有同样减小的趋势，只是结果特别是 13 J ITT 的结果较分散 (图 9、10)。

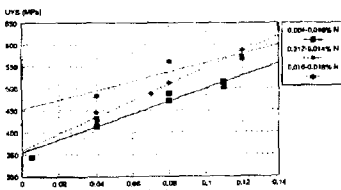


图 4 V、N 对上屈服强度的影响

4 讨论

1) 组织-性能关系

V、N 含量对显微组织的影响表现在细化晶粒、改变细颗粒 V 析出物的大小和/或体积百分数，结果导致析出强化作用增强。V、N 含量增加可以细化铁素体晶粒有几种

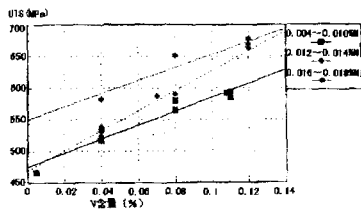


图 5 V、N 对抗拉强度的影响

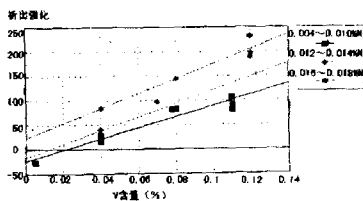


图 6 V、N 对析出强化的影响

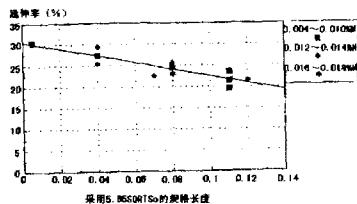


图 7 V、N 对延伸率的影响

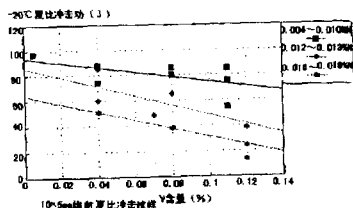


图 8 V、N 对 -20°C 冲击吸收功的影响

解释。增加 V、N 含量可能增加奥氏体中的

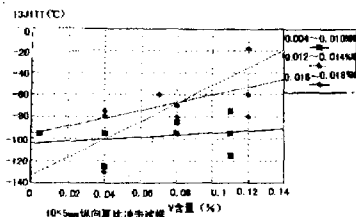


图9 V、N对13J ITT的影响

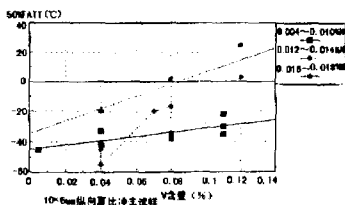


图10 V、N对50%FATT的影响

析出物，从而使再结晶温度上升。在非再结晶温度区域内可能导致在奥氏体中形核，因此细化铁素体晶粒。另一种铁素体晶粒细化的解释可能是铁素体晶粒在V的析出物上形核^[6]。当有大量的析出物出现时，铁素体潜在的形核位置大量增加，从而使最终的铁素体晶粒尺寸减小。

钢的强度随V、N含量的增加而增加是因为析出强化和晶粒细化。对于不同的含N量，V的LYS强化因子接近工厂实际生产的薄板坯连铸带钢的强化因子，为1433MPa/wt.%V^[7]。N的强化因子也接近工厂实际生产的薄板坯连铸带钢的强化因子，为873MPa/wt.%N。V的析出强化因子与文献^[5](VC:500MPa/wt.%V;VN:1500MPa/wt.%V)中论述的由于VC和VN析出产生的析出强化因子相近，为1344MPa/wt.%V。随含V量变化，析出强化因子与LYS强化因子相比有点低，这可能是由于V、N的加入细化了晶粒。

所有钢中每一个强化因素(磨擦力、固溶、晶粒尺寸、析出)对总的屈服强度的贡献见图11。从图11可知，由于V、N的加入，对钢的强度贡献最大的是析出强化，晶粒细化有少量的贡献。

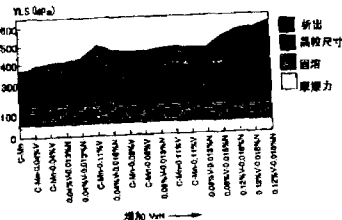


图11 不同的强化因素对下屈服强度的贡献

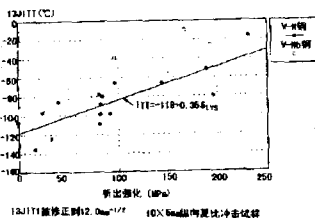
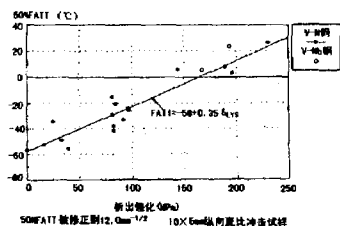


图12 13J ITT随析出强化的变化



13 50%FATT随析出强化的变化

冲击韧性也受晶粒细化和析出强化的影响。然而,随 V、N 含量的增加,铁素体晶粒细化的影响相对较小,析出强化是主要影响因素;结果是随 V、N 含量的增加,冲击韧性普遍减小。析出对冲击韧性的影响见图 12 和图 13,表明了扣除晶粒尺寸影响(用一修正因子 $10^{\circ}\text{C}/\text{mm}^{-1/2[5]}$ 将实际的 ITT 值修正到一恒定晶粒尺寸 $12\text{mm}^{-1/2}$ 下的 ITT) 后的 ITT (13 J 和 50%FATT) 随析出强化的变化。图中直线的梯度为 $0.35\text{C}/\text{MPa}$,与文献^[5]中的值一致。无论 V、N 含量多少,所有的数据点都很理想,晶粒细化和析出强化对 ITT 的影响能得到很好的解释。以前研究工作中的 V-Nb 钢^[1]的结果在上述两图中也得到体现。图 12 中 V-Nb 钢的 13 J ITT 值均在 V 钢的趋势线之上,而在图 13 中, V-Nb 钢的 50%FATT 值不分散,几乎恰好落在 V 钢的趋势线上。然而不能确定 Nb 加入 V 钢中是否降低了冲击韧性。

2) 数学分析

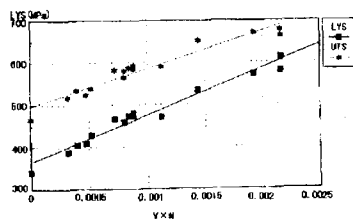


图 14 V×N 对下屈服强度和抗拉强度的影响

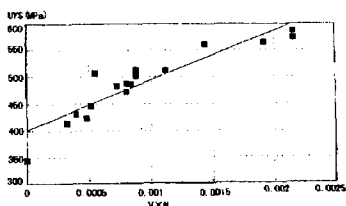


图 15 V×N 对上屈服强度的影响

以前的研究工作^[8]用 $(27401\text{N}-2)V^{1/2}$ 来描述 V、N 对空冷板卷强度的强化效果;而在本次试验工作中,发现强度和 $V \times N$ 的乘积间有更好的关连。另一个潜在的重要的变化是终冷温度(ECT)或卷取温度。在本次试验工作中发现低的 ECT 促进贝氏体形成,可能影响晶粒尺寸和析出强化。在本次试验中,除三个板卷外,所有板卷的 ECT 都控制在 $550\sim 650^{\circ}\text{C}$ 。用 LYS 作因变量, VN 和 ECT 作自变量的多元回归分析结果如下:

$$\text{LYS} = 483 + 106817(\text{VN}) - 0.018(\text{ECT})$$

ECT 的影响很小,其变化 100°C , LYS 仅仅变化 18MPa。考虑 ECT 的影响很小,可以很方便地只用 VN 的乘积来预报性能。LYS、UYS 和 UTS 随 VN 的变化见图 14、15,其变化关系如下:

$$\text{LYS} = 368 + 11025\text{VN}$$

$$\text{UYS} = 402 + 92583\text{VN}$$

$$\text{UTS} = 497 + 89164\text{VN}$$

同样可得出 VN 与冲击性能的关系(图 16、17):

$$-20^{\circ}\text{C}\text{冲击功} = 95 - 32992\text{VN}$$

$$13\text{ J ITT} = -112 + 28679\text{VN}$$

$$50\% \text{FATT} = -56 + 33936\text{VN}$$

以上关系仅仅在本次研究中的化学成分和工艺条件下适用。

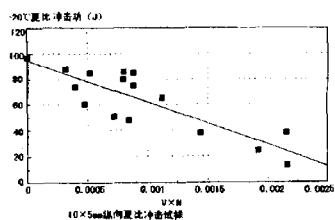


图 16 V×N 对-20℃冲击吸收功的影响

3) 实际应用

本次试验中带钢涉及到的相关标准是 EN 10149 (冷成形高屈服强度热轧板带)、ASTM

A 936、ASTM A 715 和 ASTM A 635。表 6 中列出了上述标准中的一些拉伸性能要求。冲击检验可选，通常由买卖双方商定。

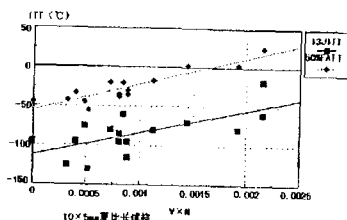


图 17 V×N对冲击转变温度的影响

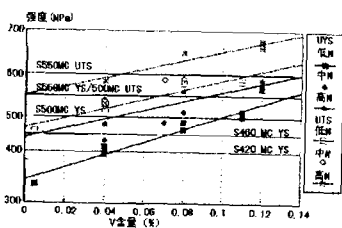


图 18 满足 EN 10149-2 强度要求的比较

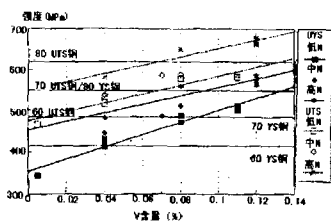


图 19 满足 ASTM A 936 强度要求的比较

用实际生产中不同钢种的强度值比较 YS 和 UTS 满足上述标准中的两种的要求的情况见图 18、19。对两个标准和所有的钢种，

只要 YS 能达到相应级别的要求，钢的成分和 UTS 总是能达到要求。从图 18 可以看出，对 EN 10419，低 N 钢中含 V 0.05% 时能满足 S420 钢的强度要求、含 V 0.08% 时能满足 S460 钢的强度要求、含 V 0.11% 时能满足 S500 钢的强度要求。对于高 N 钢，含 V 0.06% 的能满足 S500 钢的强度要求、含 V 0.10% 以上时能满足 S550 钢的强度要求。从图 19 可以看出，对 ASTM A 936，低 N (0.008%N) 钢中含 V 0.04% 以上时能满足 60 级钢的性能要求、含 V 0.11% 时能满足 70 级钢的性能要求。对于高 N (0.018%N) 钢，含 V 0.10% 以上的能满足 80 级钢的性能要求。

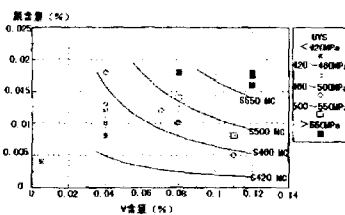


图 20 满足 EN 10149-2 需要的 V、N 含量

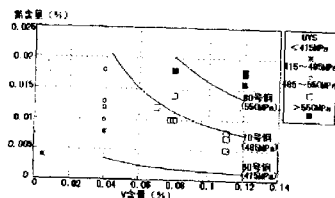


图 21 满足 ASTM A 936 需要的 V、N 含量

利用 UYS 和 VN 间的关系，可以计算出满足两个标准要求的屈服强度的 V 和 N 含量。在图 20、21 中表示出了上述关系以及试验结果。由于试验结果较分散，所以 UYS 的计算值和实测值之间有些差异。两个图表明通过加入适当的 V、N 可以达到所需要的

表6 相关标准对强度、塑性的要求

| 标准 | 钢种 | 最小屈服强度 (MPa) | 最小抗拉强度 (MPa) | 最小延伸率 (%) |
|------------|---------|--------------|--------------|---------------|
| ASTM A936 | 60 | 415 | 485 | 16 Lo=50mm |
| ASTM A936 | 70 | 485 | 550 | 12 Lo=50mm |
| ASTM A936 | 80 | 550 | 620 | 12 Lo=50mm |
| EN 10149-2 | S420 MC | 420 | 480 | 19 Lo=5.65√Ao |
| EN 10149-2 | S460 MC | 460 | 520 | 17 Lo=5.65√Ao |
| EN 10149-2 | S500 MC | 500 | 550 | 14 Lo=5.65√Ao |
| EN 10149-2 | S550 MC | 550 | 600 | 14 Lo=5.65√Ao |

强度, 较高 V、N 含量的钢有较高的强度。对于特定强度级别的钢, V、N 含量一旦确定, 就可以根据 VN 与性能的关系估算出 UTS 和冲击性能。

使用标距 50mm 试样测得的所有有效延伸钢的延伸率均超过 20%, 满足所有强度级别钢种对延伸率的要求。

5 结论

1) 用与薄板坯连铸/直接轧制工艺相似的方法, 生产出一系列 V 含量最高达 0.12%、N 含量最高达 0.018% 的标称厚度为 7mm 的带钢, 其屈服强度约高达 590MPa、抗拉强度高达 670MPa。用 10×5mm 试样检验, -20℃ 冲击功为 13~97J; 13 J ITT 为 -18~-130℃。

2) 由于晶粒细化和析出强化, 钢的强度

随 V、N 含量的增加而增加。析出强化是强度增加的主要原因。

3) 随着强度的增加, 冲击韧性减少。晶粒细化对冲击韧性的有益影响不足以克服析出强化对它的不利影响。

4) 一定的 V、N 含量能够满足 EN 10419-2 和 ASTM A 936 (415~550MPa) 对屈服强度的要求。

5) 强度和韧性随 V、N 含量的变化遵循如下关系:

$$LYS = 368 + 11025VN$$

$$UYS = 402 + 92583VN$$

$$UTS = 497 + 89164VN$$

$$-20^\circ\text{C} \text{ 冲击功} = 95 - 32992VN$$

$$13 \text{ J ITT} = -112 + 28679VN$$

$$50\%FATT = -56 + 33936VN$$

蒲学坤 译

李桂军 校