

控制冷却对 SWRH82B-1V 高碳钢盘条组织和性能的影响

华蔚 徐震 宋金玲 张驰 江来珠

(宝山钢铁股份有限公司研究院, 上海 201900)

摘要 用 Gleeble-2000 热模拟机测定了 V 微合金化 SWRH82B-1V 钢 (% : 0.79C、0.23Si、0.63Mn、0.18Cr、0.05V、0.0040N) 热变形奥氏体连续冷却转变 (CCT) 曲线, 并研究了冷却速度 (1 ~ 15 °C/s) 对钢中索氏体和马氏体面积分数和 HV 硬度值的影响。通过改变斯泰摩尔生产线的冷却风量模式研究了冷却风量对 SWRH82B-1V 钢 $\Phi 12.5$ mm 盘条组织和力学性能的影响。结果表明, 盘条吐丝温度 880 °C 50% 风量冷却可使该钢中索氏体组织 $\geq 90%$, 马氏体组织 $\leq 0.05%$, 盘条抗拉强度 ≥ 1130 MPa, 断面收缩率 $\geq 30%$ 。

关键词 SWRH82B-1V 高碳钢 钒微合金化 盘条 控制冷却 索氏体 抗拉强度

Effect of Controlling Cooling on Structure and Properties of Wire Coil of High Carbon Steel SWRH82B-1V

Hua Wei, Xu Zhen, Song Jinlin, Zhang Chi and Jiang Laizhu

(Research Institute, Baoshan Iron and Steel Co Ltd, Shanghai 201900)

Abstract The continuous cooling transformation (CCT) curves of deformed austenite of V microalloying steel SWRH82B-1V (% : 0.79C, 0.23Si, 0.63Mn, 0.18Cr, 0.05V, 0.0040N) were measured by thermal simulator Gleeble-2000 and the effect of cooling rate (1 ~ 15 °C/s) on area fraction of sorbite and martensite in steel and HV hardness value of the steel was studied. And the effect of percentage of cooling wind at Stelmor production line on structure and mechanical properties of $\Phi 12.5$ mm wire coil of steel SWRH82B-1V was studied by changing cooling mode. Results show that as the outlet temperature of finishing coil is 880 °C, cooling with 50% wind rate, the area fraction of sorbite and martensite in the steel is respectively $\geq 90%$ and $\leq 0.05%$, and the tensile strength of the coil is ≥ 1130 MPa while its area of reduction is $\geq 30%$.

Material Index High Carbon Steel SWRH82B-1V, Vanadium Microalloying, Wire Coil, Controlling Cooling, Sorbite, Tensile Strength

目前,广泛使用的优质高碳钢 SWRH82B-1 是制造高强度钢丝绳、低松弛预应力钢丝和钢绞线的重要原料^[1]。SWRH82B-1 盘条的控制以提高拉拔性能为首要目的,这就要求盘条不仅要具有 ≥ 1130 MPa 的抗拉强度和 $\geq 30%$ 以上的断面收缩率,而且还要求盘条以拉拔性能极好的索氏体组织为主,组织中索氏体化率 $\geq 90%$ 。此外,组织中不得有马氏体或贝氏体组织出现。由于该钢碳含量为 0.80% 左右,铬含量为 0.20% 左右,属于高碳钢。高碳钢的偏析,尤其是中心宏观偏析是连铸小方坯的一个重要缺陷。

在难于解决 SWRH82B-1 高碳钢电弧炉连铸小方坯锰和铬等合金元素偏析造成盘条心部马氏体产生的情况下,提出了钒微合金化措施。本试验利用膨胀法与金相法^[2]相结合的方式,在热模拟试验机上对其热变形奥氏体连续冷却转变进行了测定。以此试验结果为基础,在高线生产线上,采用 5 种冷却风量模式研究了钒微合金化对 SWRH82B-1 (以下称 SWRH82B-1V) 盘条组织和性能的影响。

1 试验材料和方法

试验材料由电弧炉冶炼、连铸成 160 mm \times 160 mm 小方坯后,经高线轧机轧成 $\Phi 12.5$ mm 的盘条,再加工成 $\Phi 8$ mm \times 12 mm 的热模拟试样。试验钢的化学成分见表 1 所示。

表 1 试验用钢的化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of test steel / %

| C | Si | Mn | P | S | Cr | V | N |
|------|------|------|-------|-------|------|------|--------|
| 0.79 | 0.23 | 0.63 | 0.005 | 0.003 | 0.18 | 0.05 | 0.0040 |

在 Gleeble-2000 热模拟试验机上进行动态 CCT 曲线的测定。试样加热到 1100 °C, 5 min, 以 10 °C/s 冷却到 1050 °C, 20 s 后施予 30% 的压缩变形、应变速率为 10/s, 变形后试样再以 10 °C/s 冷却到 880 °C, 20 s 后再施予 30% 的压缩变形、应变速率为 10/s, 再以 15 ~ 0.1 °C/s 冷却至室温。测定磨面长轴 1/4 处的维氏硬度和观察组织。利用 LEICA Q600S 图像分析仪和 DMRME 显微镜在 500 放大倍

数下沿横截面测定盘条中金相组织的索氏体面积分数,每个试样随机测定20个视场,取其平均值。

在轧制Φ12.5 mm盘条的工业性试验中,连铸坯加热温度为(1 130 ± 20)℃,盘条进入减定径机组(RSM)温度(920 ± 20)℃,吐丝温度880℃,在斯泰尔摩线上采用5种风量的冷却模式。1~4种模式分别开启85%、75%、50%、25%风量,第5种模式采用前阶段快冷,后阶段慢冷模式,其中前阶段快冷风量介于50%~85%,后阶段慢冷风量介于25%~50%(表2)。保温罩处于开启状,冷却段辊道(S1~S12)速度见表3。

表2 斯泰尔摩线的风量控制模式

Table 2 Wind rate control mode at Stelmor line

| 冷却风量/% | 开启风机号 | 风量/% | 关闭风机号 |
|--------|-------|------|-------|
| 85 | 1~9 | 85 | 10~14 |
| 75 | 1~14 | 75 | |
| 50 | 1~14 | 50 | |
| 25 | 1~14 | 25 | |
| | 1~3 | 85 | 11~14 |
| 快/慢结合 | 4 | 70 | |
| | 5~10 | 25 | |

注:保温罩开启。

表3 斯泰尔摩线的辊道速度/(m·s⁻¹)

Table 3 Roller bed rate of Stelmor line/(m·s⁻¹)

| 辊道 | 辊道速度 | 辊道 | 辊道速度 |
|----|------|-----|------|
| S1 | 0.70 | S7 | 0.80 |
| S2 | 0.78 | S8 | 0.70 |
| S3 | 0.87 | S9 | 0.60 |
| S4 | 0.97 | S10 | 0.45 |
| S5 | 1.08 | S11 | 0.30 |
| S6 | 0.95 | S12 | 0.15 |

拉伸试验是在盘条生产后的第7天进行,以考虑高碳钢盘条时效性能的影响^[3]。

2 实验结果和讨论

2.1 试验钢热变形奥氏体连续冷却转变曲线

图1为测定SWRH82B-1V钢的奥氏体连续冷却转变曲线。可以看出,钢的Ac₁ = 718℃, Ac₃ = 757℃, Ms = 161℃。

冷却速度为2℃/s时,钢的组织为索氏体,无马氏体组织出现,冷却速度为3℃/s时,在1/2截面处出现了少量马氏体,冷却速度上升到7℃/s后,在1/4和1/2截面处均出现了马氏体组织,随着冷却速度的提高,马氏体分数增加,当冷却速度为15℃/s时,不仅1/4和1/2截面处,表面无偏析成分也出现了大量马氏体组织,并且与屈氏体组织共存。这说明,正常成分条件下,珠光体类组织完全消失的临界冷

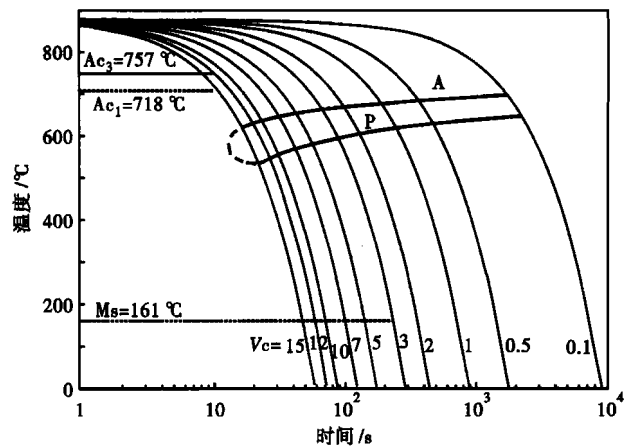


图1 SWRH82B-1V钢的热变形奥氏体连续冷却转变曲线
Fig. 1 Continuous cooling transformation curves of hot deformed austenite of steel SWRH82B-1V

却速为20℃/s左右。而偏析成分出现马氏体组织的临界冷却速度为3℃/s。

2.2 冷却速度对组织分数和硬度的影响

从奥氏体连续冷却转变曲线看,冷却速度1、2、3℃/s对应的珠光体类组织转变的开始温度比较接近,在650~670℃。冷却速度对索氏体硬度和索氏体及马氏体面积分数的影响如图2所示。钒微合金化后,冷却速度≤3℃/s的转变组织中索氏体化率都在90%以上,索氏体组织硬度值变化不大,这一点与组织转变开始温度比较接近有关。按照抗拉强度(MPa)/硬度(VHN) = 3.3经验公式^[4],可以初步了解冷却速度为1℃/s和3℃/s所对应的抗拉强度为1 130 MPa左右。而且都比同等冷却速度下未施加钒微合金SWRH82B-1盘条高40VHN左右,原因是钒的析出强化效应。当冷却速度在5~7℃/s时,随着冷却速度的提高,组织中索氏体面积分数减少,

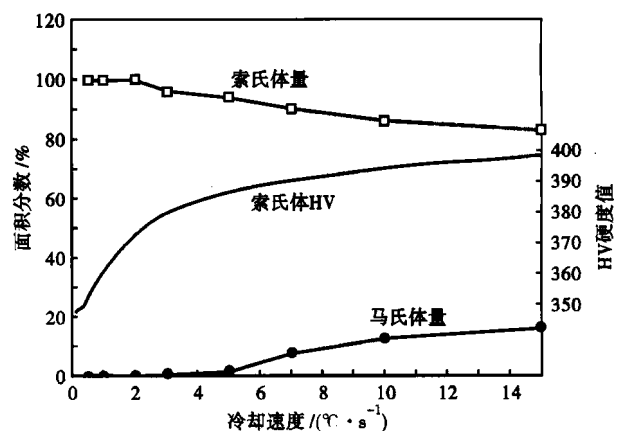


图2 冷却速度对SWRH82B-1V钢索氏体、马氏体的面积分数和索氏体HV硬度值的影响

Fig. 2 Effect of cooling rate on area fraction of sorbite and martensite and HV hardness value of sorbite, steel SWRH82B-1V

马氏体面积分数增加,索氏体硬度也相应提高。当冷却速度进一步提高到 10 °C/s 以上时,珠光体类组织转变以屈氏体组织为主,索氏体 + 屈氏体面积分数下降到 85% 左右,马氏体面积分数增加到 15% 左右,转变后的组织硬度提高到 VHN380 ~ 400。

钒微合金化使钢 SWRH82B-1V 的奥氏体连续冷却转变有如下鲜明特点:冷却速度 1 °C/s 和 3 °C/s 条件下珠光体类组织开始相变温度、索氏体硬度相差不大,组织中的索氏体化率在 90% 以上,硬度可达到 VHN375 左右,相当于抗拉强度 1 130 MPa。

2.3 风冷模式对组织和拉伸性能的影响

SWRH82B-1V 盘条生产工艺

流程为 150 t 电弧炉冶炼 → LF 精炼 → VD 真空脱气处理 → 连铸 160 mm 小方坯 → 钢坯探伤、修磨 → 加热炉 → 高线机组轧制 → 斯泰尔摩冷却 → Φ12.5 mm 盘条成品 → 检验合格 → 出厂。电弧炉连铸坯生产 SWRH82B-1V 高碳钢盘条的化学成分见表 4。斯泰尔摩线 5 种风冷模式对盘条索氏体、马氏体面积分数及拉伸性能的影响见表 5。

从表 5 可知,随着冷却速度的降低,马氏体组织面积分数降低,索氏体面积分数则变化不大,表现出盘条抗拉强度较稳定。如 85% 风量冷却模式下的马氏体组织分数平均值为 0.226%、索氏体平均分数为 96.95%、抗拉强度为 1 175 MPa;75% 风量冷却模式下的马氏体组织为 0.090%、索氏体为 96.63%、抗拉强度为 1 193 MPa;50% 风量模式下的马氏体组织为 0.054%、索氏体为 97.30%、抗拉强度为 1 183 MPa;25% 和快/慢冷却模式下的马氏体组织则为 0 和 0.075%、索氏体则分别为 96.89% 和 97.27%、抗拉强度为 1 129 MPa 和 1 140 MPa。

综合考虑,SWRH82B-1V 盘条可选择吐丝温度 880 °C、风机风量 50% 的斯泰尔摩线冷却模式,以达到盘条抗拉强度 ≥ 1 130 MPa,伸长率 ≥ 30%,索氏体比率 ≥ 90%,降低心部马氏体分数。工业性批量生产后证明,此工艺条件下的盘条心部马氏体分数明显降低,进一步与未加入钒的 SWRH82B-1 盘条相比,在同等冷却模式下,SWRH82B-1V 盘条心部马氏体分数降低了 80%,马氏体尺寸减小了 40%。另外,盘条时效周期从 15 天缩短到 7 天,提高了生产

表 4 SWRH82B-1V 钢的化学成分/%

Table 4 Chemical composition of steel SWRH82B-1V / %

| 炉号 | C | Si | Mn | P | S | Cr | V |
|--------|------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|
| 360418 | 0.82 | 0.280 | 0.650 | 0.009 | 0.000 8 | 0.160 | 0.057 |
| 360481 | 0.84 | 0.262 | 0.655 | 0.007 | 0.005 2 | 0.164 | 0.053 |

表 5 冷却风量模式对 SWRH82B-1V 钢 Φ12.5 mm 盘条组织和力学性能的影响
Table 5 Effect of mode of cooling wind rate on structure and mechanical properties of Φ12.5 mm wire coil of steel SWRH82B-1V

| 炉号 | 冷却方式 | | 平均索氏体化率/% | | | 芯部马氏体组织分数/% | | | 第 7 天 | |
|--------|---------|--------|-----------|--------|-------|-------------|-------|-------|---------------------|-----|
| | 吐丝温度/°C | 风机风量/% | 边部 | 1/2 芯部 | 芯部 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | R _m /MPa | A/% |
| 360418 | 880 | 85 | 98.62 | 96.46 | 95.78 | 0.380 | 0.076 | 0.226 | 1 175 | 35 |
| | 880 | 75 | 98.34 | 95.86 | 95.70 | 0.160 | 0.020 | 0.090 | 1 193 | 33 |
| | 880 | 50 | 99.12 | 96.62 | 96.15 | 0.100 | 0.008 | 0.054 | 1 180 | 32 |
| | 880 | 25 | 98.99 | 95.46 | 96.24 | - | - | - | 1 129 | 29 |
| | 880 | 快/慢 | 99.13 | 95.93 | 96.76 | 0.120 | 0.030 | 0.075 | 1 140 | 28 |
| 360481 | 880 | 50 | 99.26 | 97.54 | 96.74 | 0.103 | 0.008 | 0.050 | 1 170 | 40 |

效率。轧制好的盘条经过多家用户使用发现,拉拔性能和合股性能比未施行钒微合金化的 SWRH82B-1 盘条好。

3 结论

(1) 钒微合金化导致钢的奥氏体连续冷却转变特点为:冷却速度 1 °C/s 和 3 °C/s 条件下珠光体类组织开始相变温度、索氏体硬度相当,无任何马氏体组织出现。

(2) 高线斯泰尔摩生产冷却速率的降低,导致抗拉强度降低,芯部马氏体组织分数也降低。为保证盘条抗拉强度在 1 130 MPa 以上、断面收缩率在 30% 以上、组织中索氏体化率达 90% 以上、马氏体组织平均面积分数在 0.05% 以下的技术要求,SWRH82B-1V 钢的盘条最佳冷却工艺模式为:盘条吐丝温度为 880 °C,50% 风量冷却。

参考文献

- 林秀山,丁信康,孙金茂. P. C 钢丝和 P. C 钢绞线用盘条质量初步分析. 上海金属, 1996, 2(18): 47
- 林慧国,傅代直. 钢的奥氏体转变曲线-原理、测试与应用. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 江米珠,张弛,华蔚,等. 控冷模式对 SWRH82B 盘条组织和拉伸性能的影响. 钢铁, 2004, 39(12): 56

华蔚(1963-),女,工程师,东北大学毕业,金属材料研究和开发。

收稿日期:2009-08-07