

## 精轧工艺对 30 mm 厚 X65 管线钢板组织和性能的影响

熊玉彰<sup>1</sup> 李银华<sup>2</sup> 王世森<sup>1</sup> 徐进桥<sup>1</sup> 余宏伟<sup>2</sup>

(1 武钢集团公司研究院, 武汉 430080; 2 武钢集团鄂钢公司技术中心, 鄂州 436000)

**摘要** Nb-Ti 微合金化 X65 管线钢(∕% : 0.07C, 1.60Mn, 0.35Mo)的生产工艺流程为 130 t 顶底复吹转炉-钢包吹氩-LF-RH-250 mm × 1 500 mm 板坯连铸-连轧至 30 mm 板-控冷工艺。研究了第 II 阶段开轧(890 ~ 940 ℃)轧后冷却温度(780 ~ 850 ℃)和冷却速度(8 ~ 20 ℃/s)对 X65 钢厚板拉伸、落锤性能和组织的影响。结果表明, II 阶段开轧温度为 940 ℃, 轧后冷却速度为 20 ℃/s 可以使 X65 钢厚板得到以针状铁素体和粒状贝氏体为主的组织, 钢板抗拉强度 665 ~ 695 MPa, 屈服强度 495 ~ 520 MPa, 落锤纤维组织率约为 92%, 满足标准要求。

**关键词** X65 管线钢 30 mm 板 控轧控冷 组织 力学性能

## Effect of Finishing Rolling Process on Structure and Performance of 30 mm X65 Pipeline Steel Heavy Plate

Xiong Yuzhang<sup>1</sup>, Li Yinhua<sup>2</sup>, Wang Shisen<sup>1</sup>, Xu Jinqiao<sup>1</sup> and Yu Hongwei<sup>2</sup>

(1 Research and Development Institute, Wuhan Iron and Steel (Group) Corp., Wuhan 430080;  
2 Technical Center, Echeng Iron and Steel Co., Wuhan Steel Group, Ezhou 436000)

**Abstract** The production flow sheet for Nb-Ti microalloying pipeline steel X65 (∕% : 0.07C, 1.60Mn, 0.35Mo) is 130 t top and bottom combined blown converter-ladle argon blowing-LF-RH-250 mm × 1 500 mm slab casting-continuous rolling to 30mm plate-control cooling process. The effect of beginning rolling temperature (890 ~ 940 ℃) in II rolling passes, cooling temperature (780 ~ 850 ℃) and cooling speed (8 ~ 20 ℃/s) after rolling on tensile properties, drop-weight tear test (DWTT) performance and structure of X65 steel heavy plate has been studied. Results show that with beginning rolling temperature 940 ℃ in II rolling passes and cooling speed 20 ℃/s after rolling the main structure in X65 steel heavy plate is acicular ferrite and granular bainite, the tensile strength and yield strength of plate are respectively 665 ~ 695 MPa and 495 ~ 520 MPa and the DWTT fibre structure ratio of plate is about 92% to meet the requirement of standard.

**Material Index** X65 Pipeline Steel, 30 mm Plate, Control Rolling and Cooling, Structure, Mechanical Properties

管线钢主要用于生产输送石油、天然气管道, 这些介质对管道的安全系数要求很严, 特别是用于海底的管线, 对各方面的性能要求更严, 不仅需要一定的强度, 还要有一定的韧性。其他钢种随强度级别的增高, 韧性要求降低, 而管线钢则随强度级别的增高, 对韧性要求越严。

管线钢不仅要求夏比冲击试验, 还有更加严格的落锤试验要求。特别对于厚规格(≥18 mm)的管线钢, 其他性能合格率都很高, 但落锤合格率低, 成为生产管线钢的瓶颈。本文就厚规格的 X65 管线钢的生产工艺进行研究。

### 1 试验材料和方法

采用 130 t 转炉冶炼, 原料采用铁水、活性石灰、低磷硫铁合金和低硫废钢, 钢包采用碱性渣处理剂, 脱硫采用优质脱硫剂(优质石灰 + Al 块等造白渣操作), 脱硫结束后终点硫[S] ≤ 0.005%, 在转炉出钢时进行合金化, 保证出钢终点[C] ≤ 0.03%; 在氩站保证吹氩时间 ≥ 5 min, 在 130 t LF 处理时间 ≥ 35

min, LF 处理结束时保证[C]在 0.045% ~ 0.050%, 在 130 t RH 真空处理时间 ≥ 15 min, RH 真空喂入 0.5 ~ 1.2 kg/t<sub>钢</sub> 的 Si-Ca 丝, 喂丝后吹氩时间 ≥ 5 min 以使夹杂物上浮, RH 真空处理后[C]在 0.060% ~ 0.070%。连铸时拉速为 1.0 ~ 1.5 m/min, 连铸坯规格为 250 mm × 1 500 mm, X65 管线钢中间包主要成分见表 1。板坯在步进梁式加热炉内加热, 加热温度 ≤ 1 250 ℃, 在 4300 mm 轧机上轧制成 30 mm 厚的钢板, 其中 I 阶段轧制 4 个道次, II 阶段轧制 7 个道次。并控制 II 阶段开轧温度和中间坯厚度。轧制后采用 ACC 的方式冷却, 控制开冷温度和返红温度, 具体的 TMCP(Thermo-Mechanical Control Process)工艺见表 2。

将不同轧制工艺的钢板取样进行性能和组织分

表 1 试验 X65 管线钢的化学成分 / %  
Table 1 Chemical composition of test X65 pipeline steel / %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Nb	Ti
0.07	0.15	1.60	≤0.001 5	≤0.003 0	0.20	0.35	0.03	0.02

表 2 试验 X65 管线钢厚板的控轧控冷工艺和力学性能

Table 2 Thermo-mechanical control process and mechanical properties of test X65 pipeline steel heavy plate

工艺 编号	II 阶段开轧 温度/℃	开冷 温度/℃	返红 温度/℃	冷却 方式	冷却速度/ (℃·s <sup>-1</sup> )	屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		屈强比		KV <sub>2</sub> / J(-20℃)
						横	纵	横	纵	横	纵	
1 <sup>#</sup>	890	780~830	450~530	ACC	8	515	490	640	615	0.81	0.80	237~266
2 <sup>#</sup>	890	780~830	450~530	ACC	15	485	455	635	605	0.76	0.75	309~316
3 <sup>#</sup>	940	810~850	450~530	ACC	20	520	495	695	665	0.75	0.74	261~291

析。拉伸试样加工成  $\Phi 10$  mm 的圆棒试样, 试验在 Zwick/Roell 拉伸实验机上进行, 拉伸试样分横向和纵向样。冲击试样加工成 (mm)  $10 \times 10 \times 55$  的标准试样, 试验在 ZBC2452-Z 型冲击实验机上进行, 冲击试样为横向样, 一组 3 个试样取其平均值, 冲击试验温度为  $-20$  °C。落锤试样加工成  $75$  mm  $\times$   $300$  mm  $\times$  板厚的标准试样, 试验在 SANS 落锤实验机上进行, 落锤试样为横向样, 试验温度为  $-15$  °C, 一组 2 个试样。金相试样磨平、抛光后经 4% 硝酸酒精溶液浸蚀, 然后在 AXIO 显微镜上观察。

具体的工艺流程为: 高炉铁水  $\rightarrow$  KR (铁水脱硫)  $\rightarrow$  转炉顶底复吹吹炼  $\rightarrow$  吹氩  $\rightarrow$  LF  $\rightarrow$  RH 真空处理 (加 SiCa 丝)  $\rightarrow$  连铸  $\rightarrow$  铸坯检查  $\rightarrow$  铸坯下送  $\rightarrow$  铸坯验收  $\rightarrow$  铸坯清理  $\rightarrow$  铸坯加热  $\rightarrow$  4300 mm 轧机轧制  $\rightarrow$  控制冷却  $\rightarrow$  探伤  $\rightarrow$  精整  $\rightarrow$  检验。

## 2 实验结果

### 2.1 拉伸和冲击性能

对各种不同的工艺取样做横向和纵向拉伸试验, 结果见表 2。从表 2 可以看出, 无论是横向拉伸性能还是纵向拉伸性能, 第 3 种工艺的强度最高, 第 1 种和第 2 种工艺的强度相差不大, 但 3 种工艺下的钢板的屈服强度和抗拉强度都满足要求。3 种工艺下钢板的屈强比比较接近, 都在 0.81 左右, 无论

是钢板的强度还是钢板的屈强比, 横向性能均高于纵向性能。横向屈服强度比纵向屈服强度高 20 ~ 30 MPa, 横向抗拉强度比纵向抗拉强度高 30 ~ 40 MPa, 横向屈强比比纵向屈强比高 0.01 ~ 0.02。

研究表明<sup>[1]</sup>, 钢板在轧制过程中, 晶粒发生的纵向变形量比横向变形量大, 所以横向的晶粒比纵向细小。晶粒细化可以提高钢的强度, 因此, 钢板呈现上述特征。

3 种工艺的冲击功见表 2。从表 2 可以看出, 3 种工艺的冲击功值都较好的满足 X65 管线钢的性能要求 (单个冲击值  $\geq 125$  J, 3 个试样平均值  $\geq 165$  J)。第 2 种工艺的冲击功最大, 对应的其强度最低。综合比较 3 种工艺的拉伸性能和冲击性能, 第 3 种工艺最佳。

### 2.2 落锤性能

落锤断口的纤维率 (SA%) 是管线钢的另一项重要的性能指标。图 1 是 3 种工艺下的落锤断口形貌。从图 1 可以明显看出, 1<sup>#</sup> 试样的纤维状部分最少, 2<sup>#</sup> 试样的纤维状部分相对 1<sup>#</sup> 多一些, 约 77%, 但不能满足落锤性能的要求, 3<sup>#</sup> 试样的纤维率最高, 约 92%, 完全满足 X65 钢的落锤性能要求 (单个落锤 SA%  $\geq 70\%$ , 2 个试样的落锤平均 SA%  $\geq 85\%$ )。

### 2.3 金相组织观察

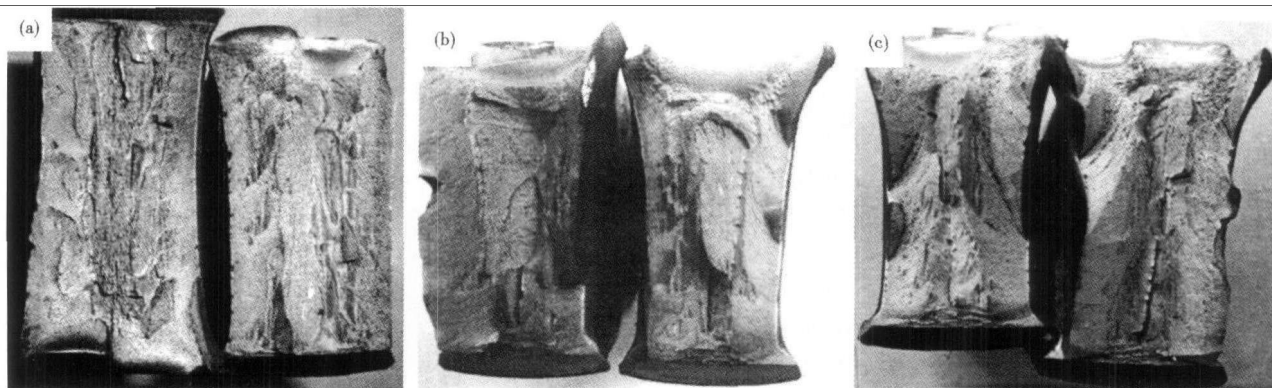


图 1 X65 管线钢厚板落锤撕裂试验结果: TMCP 工艺, 开轧温度和轧后冷却速度- (a) 1<sup>#</sup>, 890 °C, 8 °C/s; (b) 2<sup>#</sup>, 890 °C, 15 °C/s; (c) 3<sup>#</sup>, 940 °C, 20 °C/s

Fig. 1 Results of DWTT for X65 pipeline steel heavy plate: TMCP process, beginning rolling temperature and cooling speed after rolling- (a) No1, 890 °C and 8 °C/s; (b) No2, 890 °C and 15 °C/s; (c) No3, 940 °C and 20 °C/s

对各种控轧控冷工艺下的钢板取样做金相分析,组织形貌见图2。从图2可以看出:工艺1#试样的组织为铁素体+贝氏体,铁素体的形貌含有块状

和板条状2种,贝氏体为粒状贝氏体。工艺2#试样的组织为铁素体+贝氏体。铁素体形貌主要为块状,贝氏体为粒状贝氏体。

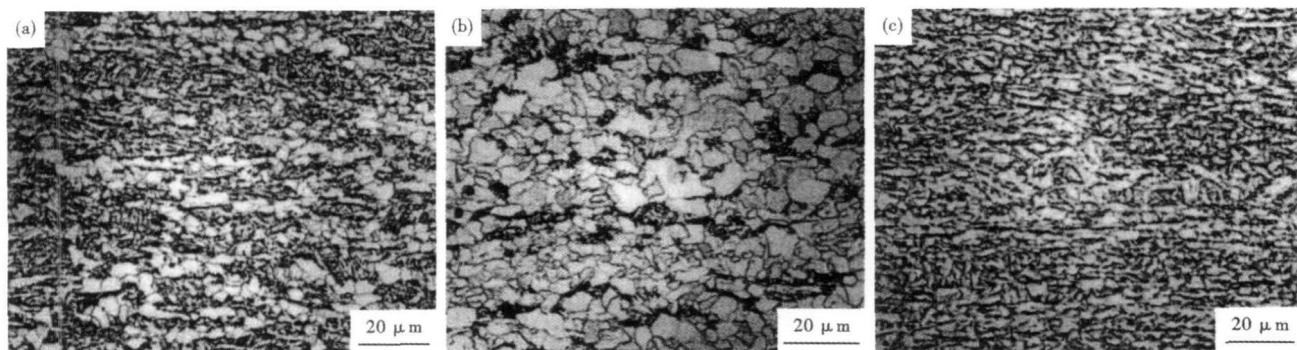


图2 轧制工艺对X65管线钢厚板组织形貌的影响:TMCP工艺,开轧温度和轧后冷却速度-(a)No1,890 °C,8 °C/s;(b)No2,890 °C,15 °C/s;(c)No3,940 °C,20 °C/s

Fig.2 Effect of rolling process on structure morphology of X65 pipeline steel heavy plate: TMCP process, beginning rolling temperature and cooling speed after rolling- (a) No1, 890 °C and 8 °C/s; (b) 890 °C and 15 °C/s; (c) 940 °C and 20 °C/s

对比工艺1#试样和工艺2#试样可以明显看出:1#试样比2#试样的晶粒细,1#试样中粒状贝氏体含量高于2#试样的粒状贝氏体含量。2个试样中有轻微的带状。

对比3种工艺所生产钢板的金相组织可以发现,工艺3#试样的组织和工艺1#、2#试样的组织存在明显的差异,工艺3#试样的组织为针状铁素体和粒状贝氏体为主的混合组织,试样的晶粒比较细。

### 3 分析和讨论

#### 3.1 轧制工艺对组织和性能的影响

对于较厚规格的X65管线钢而言,为了得到高强度和高韧性的结合,需要通过合理的TMCP工艺,来得到晶粒较细的以针状铁素体和粒状贝氏体为主的组织。

为了保证钢板最终组织均匀细小,就要避免钢板在轧制过程中和精轧结束到进入冷却区前的时间内出现大量的先共析铁素体,终轧温度越低,针状铁素体量越少,多边形铁素体量增加。所以终轧温度不能低于700 °C。当终轧温度低于700 °C时,各种冷速下组织都会有不同程度的带状,带状组织的出现会影响钢板的落锤性能<sup>[2]</sup>。在相同的终轧温度下,随冷却速度增加,针状铁素体量和粒状贝氏体量

增加,钢板的落锤性能会随着针状铁素体量的增加而改善<sup>[3-5]</sup>。

### 4 结论

(1) II阶段开轧温度为940 °C可以得到较高的终轧温度,从而使X65钢得到较少的块状铁素体,增加针状铁素体和粒状贝氏体的含量。

(2)冷却速度为20 °C/s可以使X65钢得到以针状铁素体和粒状贝氏体为主的组织,钢板的强度和落锤性能较好。

#### 参考文献

- 1 顾洪涛. 高强度管线钢的工艺与组织性能. 鞍钢科技, 2001, 5(1): 14
- 2 李国宝, 徐洪庆, 彭海红. 管线钢落锤性能的影响因素. 宽厚板, 2006, 12(6): 5
- 3 赵明纯, 单以银, 肖福仁, 等. 管线钢中针状铁素体的形成及其强韧性的分析. 材料科学与工艺, 2001, 9(4): 356
- 4 彭海红, 栾玉武, 黄伟, 等. X65管线钢连续冷却相变行为的研究. 宽厚板, 2007, 13(1): 36
- 5 刘勤博, 张红梅, 汪红绢, 等. 控制轧制对管线钢X65组织细化的影响. 热加工工艺, 2007, 36(16): 1

熊玉彰(1963-),男,高级工程师,1985年武汉科技大学毕业,冶金工艺研究。

收稿日期:2011-06-08

欢迎订阅 2012年《特殊钢》杂志

邮发代号:38-183

定价:16.00元/期 96.00元/年

全国各地邮局订阅