

## 控轧控冷工艺对 X100 管线钢组织和性能的影响

刘守显<sup>1,2</sup> 罗海文<sup>2</sup> 雍岐龙<sup>1,2</sup> 王瑞珍<sup>2</sup> 龙晋明<sup>1</sup>

(1 昆明理工大学材料与冶金工程学院,昆明 650093; 2 钢铁研究总院结构材料研究所,北京 100081)

**摘要** 通过实验室  $\Phi 350$  mm 4 辊轧机对 V-Nb-Ti 微合金化 X100 管线钢( % :0.057C、1.84Mn、0.25Mo)进行控轧控冷试验。结果表明,在 1 100 °C 始轧,800 ~ 900 °C 终轧,100 ~ 400 °C 终冷温度下,X100 钢的组织为针状铁素体 + 粒状贝氏体-下贝氏体。降低终轧温度可细化组织,提高钢的强度;降低终冷温度可提高钢的强度,但使钢的韧性降低。X100 管线钢的最佳轧制工艺为终轧温度 850 °C,终冷温度 200 °C。

**关键词** X100 管线钢 控轧控冷 组织 机械性能

## Effect of Controlled Rolling and Cooling Process on Structure and Properties of X100 Pipeline Steel

Liu Shouxian<sup>1,2</sup>, Luo Haiwen<sup>2</sup>, Yong Qilong<sup>1,2</sup>, Wang Ruizhen<sup>2</sup> and Long Jinming<sup>1</sup>

(1 Institute of Materials and Metallurgy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The controlled rolling and cooling test for a V-Nb-Ti microalloying X100 pipeline steel (0.057C, 1.84Mn, 0.25Mo) has been carried out by  $\Phi 350$  mm 4 roll mill in laboratory. Results showed that with initial rolling temperature 1 100 °C, finishing temperature 800 ~ 900 °C and end cooling temperature 100 ~ 400 °C the structure of X100 steel was acicular ferrite + granular bainite-lower bainite; and with decreasing finishing temperature, the structure fined and strength of steel increased, with decreasing end cooling temperature the strength increased but the toughness of steel decreased. The optimum hot rolling process for X100 pipeline steel is finishing temperature 850 °C with end cooling temperature 200 °C.

**Material Index** X100 Pipeline Steel, Controlled Rolling and Cooling Process, Structure, Mechanical Properties

研究了控轧控冷工艺中两个最重要的参数:终轧和终冷温度对管线钢热轧板性能的影响。本试验中对 X100 管线钢预期达到目标为:屈服强度 690 MPa,抗拉强度 760 MPa,室温冲击韧性 250 J,延伸率  $\geq 15\%$ ,屈强比  $\leq 0.90$ <sup>[1,2]</sup>。

### 1 试验材料及方法

试验钢采用 100 kg 的真空感应炉冶炼,化学成分见表 1。

试验钢分 A、B 系列,轧制制度如表 2。1 200 °C

表 1 X100 管线钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of X100 pipeline steel / %

C	Si	Mn	Nb	Mo	Ti	Cu	Ni	V	N	S	P	Al
0.057	0.26	1.84	0.04	0.25	0.014	0.21	0.22	0.047	0.004 3	0.007	0.006 8	<0.005

30 min 奥氏体化后,开始轧制温度为 1 100 °C。对 A 系列试验钢主要是改变终轧温度(800 ~ 900 °C)。而 B 系列试验钢主要是改变终冷温度(100 ~ 400 °C)。轧制试验在北京科技大学轧制技术国家重点实验室的  $\Phi 350$  mm 4 辊轧机上进行,初始和终轧厚度分别为 45 mm 和 7 mm,总的轧制压下率为 84%。轧后立即进行水幕冷却,采用上下双面喷水冷却,通过调节冷却水的流量来控制冷速;采用红外测温计进行测温。

冲击试样尺寸(mm)为 5 × 5 × 55 的 V 型缺口

表 2 X100 管线钢的轧制参数

Table 2 Rolling parameters of X100 pipeline steel

试验钢	终轧温度 / °C	终轧变形量 / %	冷却速度 / (°C · s <sup>-1</sup> )	终冷温度 / °C
A1	800	26	$\geq 30$	200
A2(B2)	850	26	$\geq 30$	200
A3	900	26	$\geq 30$	200
B1	850	26	$\geq 30$	100
B3	850	26	$\geq 30$	300
B4	850	26	$\geq 30$	400

试样。室温冲击试验在 JBN-300B 冲击试验机上进行,每个状态 6 个试样取平均值。拉伸试样按照

API RP 5L3 板拉伸标准加工, 试样标距为 50.8 mm, 在 WE-300 型试验机上进行, 应变速率为  $0.01 \text{ s}^{-1}$ , 每个状态 2 个试样取平均值。

## 2 试验结果

### 2.1 金相组织

试样中出现的金相组织可分为: 多边铁素体 (PF), 针状铁素体 (AF), 粒状贝氏体 (GB) 和下贝氏体 (LB)。图 1 为 A 系列的组织照片。虽然试样的基体组织都是由针状铁素体组成, 但是 GB 和 LB 的含量随终轧温度的升高而减少。试样 A1 (图 1a) 终轧温度  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 观察到大量的 LB, 其组织为 LB + GB + AF。试样 A2 (图 1b) 终轧温度  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , LB 基

本消失, 组织主要为 GB + AF。当终轧温度增大到  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , GB 也基本消失, PF 开始出现 (图 1c), 组织基本为 AF 和 PF。

图 2 为 B 系列的组织照片。各试样随着终冷温度的提高其组织也各不相同。试样 B1 终冷温度为  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (图 2a), 其组织为 GB + LB + AF。试样 B2 终冷温度为  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 其轧制制度与 A2 (图 1b) 相同, 主要为 GB + AF; 当终冷温度为  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 观察不到 LB 存在 (图 2b), 但明显地观察到有较多 PF 组织存在, 组织主要是 AF + PF + GB。当终冷温度分别为  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 与试样 B3 相比 B4 (图 2c) 的组织中只观察到很少的 PF 组织, 主要为 AF + GB。

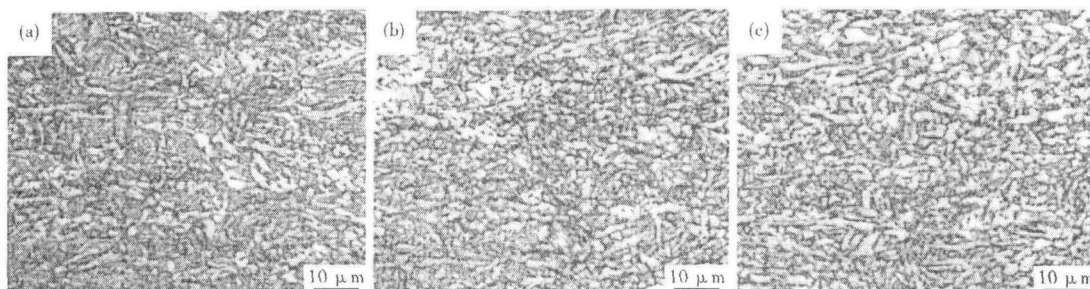


图 1 终轧温度对 X100 管线钢组织形貌的影响: 终冷温度  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 终轧温度- (a)  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、(b)  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、(c)  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 1 Effect of finishing temperature on morphology of structure of X100 pipeline steel: finishing cooling temperature  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; finishing rolling temperature- (a)  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , (b)  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , (c)  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$

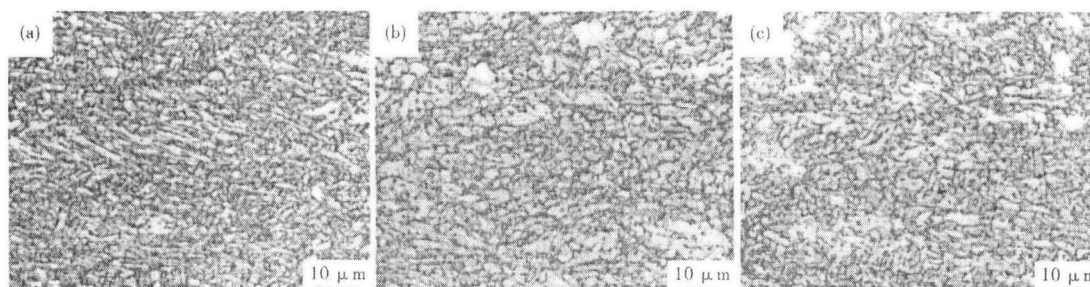


图 2 终冷温度对 X100 管线钢组织形貌的影响: 终轧温度  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 终冷温度- (a)  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、(b)  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、(c)  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 Effect of end cooling temperature on morphology of structure of X100 pipeline steel: finishing rolling temperature  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; finishing cooling temperature- (a)  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , (b)  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , (c)  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$

### 2.2 拉伸试验和冲击韧性

室温下的拉伸试验和冲击性能结果如表 3 所示。对于 A 系列试样随着终轧温度的提高, 相对应试样的屈服强度和抗拉强度逐渐降低。对于 B 系列试样随终冷温度的提高, 其强度都是逐渐降低。当终冷温度  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 相对应的抗拉强度和屈服强度最小, 分别为  $728 \text{ MPa}$  和  $558 \text{ MPa}$ 。当终冷温度提高到  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时强度再次变大。

表 3 可以看出: 试验钢板的冲击功未达到预期的 X100 钢要求水平 ( $250 \text{ J}$ ); 对于 A 系列试样, 冲

表 3 试验 X100 管线钢的室温机械性能

Table 3 Mechanical properties of test X100 pipeline steel

试验钢	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	断后伸长率/ %	屈强比/ %	冲击功 $A_{KV2}/\text{J}$
A1	890	705	22.5	79.2	119.0
A2	880	683	20.5	77.6	138.7
A3	845	663	19.5	78.5	145.0
B1	915	685	18.0	74.9	116.7
B2	880	683	20.5	77.6	138.7
B3	728	558	24.3	76.6	156.0
B4	793	715	19.5	90.2	120.0

击功随着终轧温度的提高逐渐变大; 对于 B 系列试

样,随着终冷温度的提高其冲击功变大,在终冷温度为 300 ℃时,冲击功最大为 156 J。但当终冷温度为 400 ℃时,冲击功显著降低。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 终轧温度对试验钢性能的影响

对于 A 系列试样,随着终轧温度的提高,相对应试样的强度逐渐降低,这是因为随着终轧温度的提高,高强度相 LB 含量减少;而相应强度较低的 AF 含量增大,并且在 900 ℃ PF 相出现,因此强度下降。同时由于低的终轧温度,组织得到有效细化,从而提高强度,这一点可以从图 1 中清晰地观察到。两者综合作用的结果是终轧温度升高使强度下降。

相应的冲击功随着终轧温度的提高而增大,这是因为随着终轧温度提高,钢中组织发生变化造成的。试验钢中组织的变化规律为:随终轧温度的升高,GB 和 LB 的含量减少,AF 含量增多。终轧温度 850 ℃,下贝氏体基本消失,组织主要为 AF + GB;当终轧温度增大到 900 ℃,粒状贝氏体也基本消失,多边形铁素体开始出现(图 1c),组织基本为 AF 和 PF。低碳钕微合金钢中贝氏体含量的增加在提高强度的同时,使冲击功有一定程度的下降<sup>[3]</sup>。合理的 AF、GB 和 LB 组织的配比,是取得高韧性的关键。因此,随韧性较好的 AF 和 PF 的增多,冲击功增大。

#### 3.2 终冷温度对试验钢性能的影响

对于 B 系列试样的强度,随着终冷温度的提高,在终冷温度 300 ℃(试样 B3)时达到最小值。然后随终冷温度的提高为 400 ℃(试样 B4)强度不降反升,其组织中只观察到很少的 PF 组织,与 B3 相比组织得到了细化,与 B2 中的组织比较接近,组织主要为 AF + GB。这可能是由于终轧后其实际冷却速度较快,大于 B3 的冷速,抑制了 PF 组织的生成;另一方面冷却时由于有水雾影响了终冷温度测温的准确性,其实际终冷温度可能低于 400 ℃。李龙等人在控轧控冷对低碳钕微合金钢组织与性能的研究证明<sup>[3]</sup>,随终冷温度的升高,钢的强度呈下降趋势。所以试样 B4 不能真实地反映终冷温度为 400 ℃时试样的真实组织和性能。总的来说,随着终冷温度的提高,相对应试样的强度呈逐渐降低的趋势。且试样 B1、B2、B4 都能满足 X100 管线钢的强度要求(屈服强度 690 MPa、抗拉强度 760 MPa)。

对于 B 系列试样的韧性,除了终冷温度为 400 ℃时,冲击功随着终冷温度的提高呈上升趋势,这是

因为钢中 GB 和 LB 的含量随着终冷温度的提高而减少,AF 含量增大,原因与终轧温度对韧性的影响相似。对于终冷温度为 400 ℃时的试样,其原因与强度反常现象是一致的,即此时的试样并不能反映真实终冷温度为 400 ℃时试样的组织和性能。

#### 3.3 硫含量对试验钢性能的影响

虽然冲击试样均为韧性断裂,但是韧性仍无法达到 X100 管线钢要求,这可能是硫含量超标造成的。文献[4]和[5]指出,只有当硫含量 < 0.001 2%时,HIC 明显降低,高钢级管线钢要求硫含量 < 0.002% 甚至 < 0.001%。文献[1]中指出,对于 X100 管线钢要求硫含量 < 0.000 5%。试验钢由于真空感应炉冶炼条件限制,硫含量在  $70 \times 10^{-6}$ ,因此若将所开发的 X100 钢中的硫含量降低至  $10 \times 10^{-6}$  以下,韧性将得到显著改善。所以试验钢中硫含量超标是造成韧性恶化的主要原因,对 X100 管线钢,要求硫含量控制在 0.001% 以下。

### 4 结论

(1)终轧温度在 850 ~ 900 ℃变化,随着终轧温度的提高,试样的强度逐渐降低,而其冲击功随着终轧温度的提高而增大。最佳终轧温度为 850 ℃。

(2)终冷温度在 100 ~ 400 ℃变化,随着终冷温度的提高,相对应试样的强度呈逐渐降低的趋势。同时试样的冲击功随着终冷温度的提高呈上升趋势。最佳终冷温度为 200 ℃。

(3)硫含量偏高显著恶化高强管线钢的韧性,因此要求在钢铁企业生产 X100 管线钢时,要加强铁水预脱硫、精炼脱硫的能力和防止转炉回硫,最终将钢中硫含量降低到 0.001% 以下,以达到目标韧性的目的。

#### 参考文献

- 1 罗海文,董瀚.高级别管线钢 X80 ~ X120 的研发与应用.中国冶金,2006,16(4):9
- 2 Shuji Okaguchi, Masahiko Hamada, Hiroyuki Makino. Production and Development of X100 and X120 Grade Line Pipe. Seminar Forum of X100 and X120 Grade High Performance Pipe Steel. Beijing, 2005
- 3 李龙,丁桦,杨春征,等.控轧控冷工艺对低碳钕微合金钢组织和性能的影响.钢铁研究学报,2006,18(7):46
- 4 王立涛,李正邦,张乔英.高钢级管线钢的性能要求与元素控制.钢铁研究,2004,32(4):13
- 5 郝瑞辉,丛晖,马薇,等.合金元素在高级管线钢中的作用与控制.河南冶金,2006,14(3):21

刘守显(1981-),男,硕士研究生,高钢级管线钢研究。

收稿日期:2007-04-09