

## 变形奥氏体的冷却速度对 X80 管线钢组织和性能的影响

曾宪平 卢俊毅 王文录  
(邯鄯钢铁集团邯宝公司,邯鄯 056002)

**摘要** 通过 Gleeble-1500 热模拟试验机测定了 X80 管线钢(% : 0.05C, 0.17Si, 1.78Mn, 0.40Mo, 0.08Nb, 0.03V, 0.03Ti) 18 mm 板经 1 100 ℃, 1 s<sup>-1</sup>, 40% 变形, 再以 5 ℃/s 冷至 850 ℃, 1 s<sup>-1</sup>, 40% 变形, 并以 1~40 ℃/s 冷却至室温后的连续冷却转变 (CCT) 曲线, 同时研究了冷却速度对组织和 HV 硬度的影响。结果表明, 随冷却速度提高晶粒细化, 针状铁素体比例增加, 同时 HV 硬度提高。为得到较佳的组织, 热变形后钢的冷却速度应 ≥ 15 ℃/s。

**关键词** X80 管线钢 CCT 曲线 热变形 冷却速度 组织 硬度

## Effect of Cooling Rate of Hot-Deformed Austenite on Structure and Property of X80 Pipeline Steel

Zeng Xianping, Lu Junyi and Wang Wenlu  
(Hanbao Co, Handan Iron and Steel Group, Handan 056002)

**Abstract** The continuous cooling transformation (CCT) curves of 18 mm plate of X80 pipeline steel (% : 0.05C, 0.17Si, 1.78Mn, 0.40Mo, 0.08Nb, 0.03V, 0.03Ti) with 1 s<sup>-1</sup> and 40% deforming at 1 100 ℃, then 5 ℃/s cooling to 850 ℃, 1 s<sup>-1</sup> and 40% deforming and 1~40 ℃/s cooling to ambient temperature were determined by Gleeble-1500 thermo-simulation machine and the effect of cooling rate on structure and HV hardness of steel was studied. Results show that with increasing cooling rate, the grains fine, the proportion of acicular ferrite in structure increases and the HV hardness of structure also increases. In order to get better structure, the cooling rate of hot-deformed steel should be ≥ 15 ℃/s.

**Material Index** X80 Pipeline Steel, CCT Curves, Hot-Deforming, Cooling Rate, Structure, Hardness

目前,世界石油、天然气长输管线的建设正朝着大直径、大壁厚、高压输送的方向发展,输送介质从以输油为主向以输气为主转变,对管线钢的高强度和高韧性的要求越来越高<sup>[1]</sup>。在国际标准中曾长期处于最高钢级的 X70 被 X80 取代<sup>[2]</sup>,随着我国西气东输二线工程的快速进展,对 X80 管线钢开发与应用研究提出了新的要求<sup>[3]</sup>。

### 1 试验材料和方案

#### 1.1 试验材料及制备

试验用钢 X80 卷板生产流程为 250 t 顶底复吹转炉冶炼、LF 精炼和 RH 真空脱气处理,230 mm 厚的板坯在 2250 生产线热轧机组轧制成 18.4 mm 的卷板。X80 钢的化学成分设计见表 1。

本试验采用 Gleeble-1500 热模拟实验机和光学显微镜等设备,研究 X80 管线钢的连续冷却转变和

组织演变规律,并分析轧制工艺及冷却速度等不同因素对微观组织的影响。

将热模拟后的试样从变形区中部沿横向用线切割机剖开,经过砂纸打磨及抛光,制成金相试样,用 3% 的硝酸酒精溶液浸蚀抛光好的试样表面大概 20 s,然后在 Neophot21 金相显微镜下观察其室温组织,在轧制中心硬度仪上测得试验组织的硬度。

#### 1.2 试验方案

在两阶段控轧控冷工艺中,通过奥氏体再结晶区的控制轧制获得细小的铁素体晶粒,从而获得高强韧性能的管线钢板。由于在奥氏体未再结晶区轧制和在奥氏体+铁素体区中轧制对管线钢板的力学性能产生不同的影响,因此准确的确定奥氏体向铁素体转变的温度非常重要。在没有发生相变的情况下,试样在加热和冷却过程中的膨胀量与温度的关系是一种线性关系,相变发生时不同组织的比热容不同导致热膨胀曲线出现拐点,这是热膨胀法测定相变的理论依据。

在动态连续冷却转变试验中,试样(Φ6 mm × 12 mm)以 20 ℃/s 加热至 1 200 ℃,保温 20 min 后,以 5 ℃/s 冷至 1 100 ℃,变形 40% (工程应变),变形

表 1 试验用 X80 管线钢的主要化学成分/%

Table 1 Main chemical composition of test X80 pipeline steel /%

C	Si	Mn	Ni	Cr	Nb	V	Ti	Cu	Mo
0.05	0.17	1.78	0.05	0.05	0.08	0.03	0.03	0.03	0.40

速率 1/s; 然后以 5 °C/s 冷至 850 °C, 变形 40% (工程应变), 变形速率 1/s; 然后分别以 1、3、5、8、10、12、15、20、30、40 °C/s 的冷却速度冷至室温。

## 2 结果分析

### 2.1 管线钢热连轧过程的基本特征

由图 1 的 CCT 曲线可以看出, 在 1~40 °C/s 的冷却范围内, 试验钢经过热变形和相变, 存在奥氏体、块状铁素体、针状铁素体、粒状贝氏体和多相共存区域, 钢的连续转变得到的最终组织是多相共存的, 只不过在不同条件下, 各相组织的比例有所不同。这是管线钢热连轧过程的基本特征。

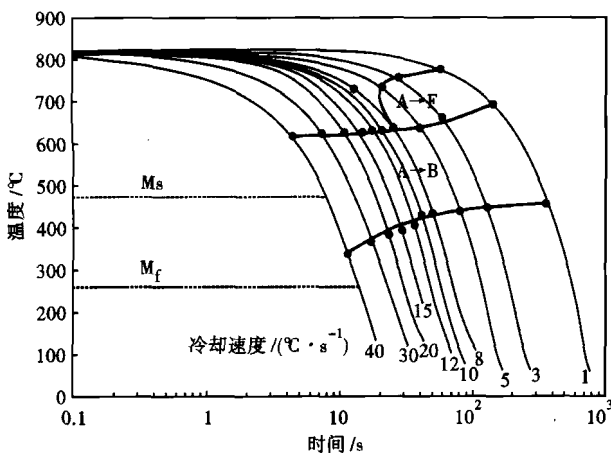


图 1 X80 管线钢 CCT 曲线

Fig. 1 CCT curves of X80 pipeline steel

### 2.2 变形对相变点的影响

由表 2 可知, 随着冷却速度的提高, 动态 CCT 曲线中 A→F 的转变温度都降低了。综合看来, 塑性变形使奥氏体的自由能和热力学不稳定性因晶格畸变而提高。增大了奥氏体向该条件下更稳定相分解的趋势。旧相储存能的提高, 必然会造成相变点

表 2 X80 管线钢连续冷却过程中相变点

Table 2 Phase transformation point of X80 pipeline steel during continuous cooling

冷却速度/ (°C·s <sup>-1</sup> )	温度/°C		
	F <sub>s</sub>	B <sub>s</sub>	B <sub>f</sub>
1	771	679	455
3	752	657	441
5	735	635	439
8	726	634	434
10		634	427
12		633	405
15		631	393
20		630	378
30		625	369
40		620	337

的提高, 以利于系统由高能量状态过渡到低能量的稳定状态; 从新相形核长大来说, 变形后产生的缺陷为新相形核提供了更多的可能, 且新相形核速度因储存能的提高而加快。

相变温度低、奥氏体区域大, 对获得细晶粒铁素体较为有利。这是因为铁在铁素体区中的自扩散系数比在奥氏体区中高一个数量级, 即在同一温度下处于铁素体状态晶粒的长大要容易得多; 若在晶粒扁平化温度和相变温度之间保证由足够的变形量, 将使 A/F 转换比值提高。因此变形后冷却速度的合理控制是得到细小晶粒的常温组织的关键所在。

### 2.3 冷却速度对显微组织的影响

在不同冷却速度下得到试验钢的部分金相显微组织如图 2 所示。由显微组织分析可见:

(1) 1~10 °C 范围内 (图 2a~d), 得到的组织都是块状铁素体和少量粒状贝氏体组织, 随着冷却速度的提高, 晶粒尺寸逐渐减小, 当冷却速度达 12 °C/s 时, 组织中开始大量出现粒状贝氏体 (图 2e);

(2) 冷却速度继续升高到 15 °C/s 时 (图 2f), 组织中出现针状铁素体, 这时的组织为针状铁素体、块状铁素体和粒状贝氏体组织。随着冷却速度升高, 在 15~40 °C/s 内, 晶粒组织进一步细化, 组织中针状铁素体的比例逐渐增加, 块状铁素体的比例开始下降, 达 40 °C/s 时, 针状铁素体的比例超过 80%。

针状铁素体组织有很高的强度和良好韧性, 因而应该增加该组织的比例和细化晶粒, 从实验结果来看, 冷却速度不能低于 15 °C/s, 在设备允许条件下尽可能提高冷却速度, 但有研究表明, 管线钢的针状铁素体比例过高将会导致其冲击韧性的降低, 针状铁素体比例在 85% 时的组织强韧性是最好的。因此, 应该适当控制冷却速度在合理范围内。

### 2.4 冷却速度对显微硬度的影响

动态连续冷却转变后试验钢的硬度值随着冷却温度的不同硬度变化趋势如图 3 所示, 随着 X80 管线钢热变形后随着冷却速度的加快, 硬度值呈逐渐增加的趋势。

当冷却速度为 1 °C/s 时, HV 硬度值为 233, 当冷却速度为 12 °C/s 时, HV 硬度值为 259, 而当冷却速度为 40 °C/s 时, HV 硬度值可达 277.4。其硬度增长的趋势呈抛物线式增长。这主要是由于随着冷却速度的提高, 组织中相的构成发生变化, 逐渐由低强度的块状铁素体组织向高强度的针状铁素体、贝氏体组织转变, 各相的比例也由块状铁素体占多数

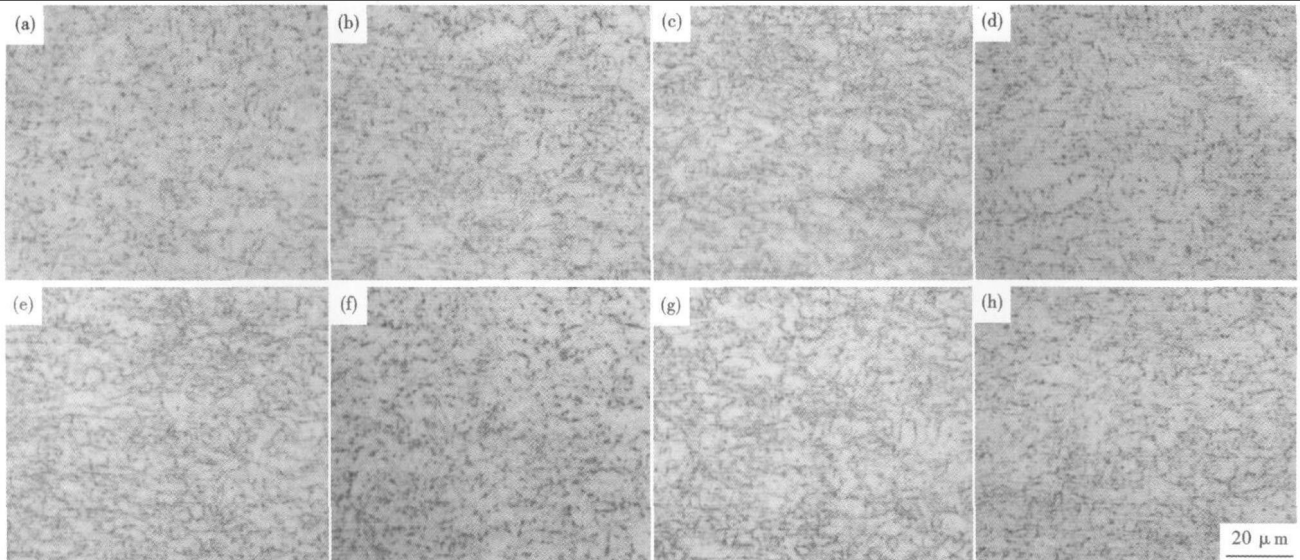


图 2 动态连续冷却转变中不同冷却速度 X80 管线钢的组织形貌, ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ): (a)1; (b)5; (c)8; (d)10; (e)12; (f)15; (g)20; (h)30

Fig. 2 Structure morphology of X80 pipeline steel during dynamic continuous cooling transformation with different cooling rate, ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ): (a) 1; (b) 5; (c) 8; (d) 10; (e) 12; (f) 15; (g) 20; (h) 30

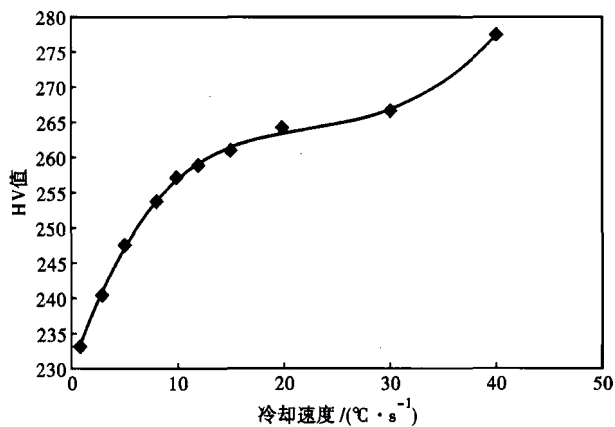


图 3 冷却速度对 X80 管线钢 HV 值的影响

Fig. 3 Effect of cooling rate on HV value of X80 pipeline steel

转换为针状铁素体占多数。而且,随着冷却速度的提高,铁素体的晶粒尺寸进一步细化,有利于强度和韧性的提高。因此试验钢的显微硬度随着冷却速度的提高呈抛物线式增长。这对管线钢选择合理的控冷工艺提供必要的依据。对于管线钢来说,硬度也不是越高越好,太高会导致韧性、焊接性能、抗  $\text{H}_2\text{S}$  腐蚀性能下降,因此应该在保证强度的情况下,尽可能降低硬度。

### 3 结论

(1) 由 X80 管线钢相变规律的热模拟实验可知,随着冷却速度的提高,管线钢的晶粒组织逐渐细化,组织构成也发生变化,由  $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时的块状铁素体

组织,逐渐变为  $40^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时的针状铁素体、块状铁素体和粒状贝氏体组织,且针状铁素体组织比例逐渐提高,硬度也随着上升。

(2) 通过 X80 管线钢的动态 CCT 实验研究发现,对于所研究的钢种,在  $5 \sim 20^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的冷却速度范围内均能得到最佳的针状铁素体比例的混合型显微组织。

(3) 冷却速度增加,使相转变温度下降,且下降幅度较大。所以在实际工业生产中,采用较大冷却速度,这样使奥氏体组织能够有充分的空间析出针状铁素体组织。

(4) X80 管线钢热变形后随冷却速度的加快,硬度值呈逐渐增加的趋势。

### 参考文献

- 1 陶 鹏,张 弛,杨志刚. 高钢级管线钢的组织 and 力学性能. 焊管, 2008, 31(2): 19
- 2 王晓香. 从 2006 年微合金钢应用国际研讨会看国际高钢级管线钢的发展动向. 焊管, 2006, 29(4): 8
- 3 李建军. 长输管线发展趋势与“西气东输”二线焊接. 焊接技术, 2008, 37(5): 5

曾宪平(1971-),男,工程师,1996 年华东冶金学院毕业,钢铁材料质量控制和金属压力加工。

收稿日期:2009-08-11