

V-Nb 微合金化 X70 深海管线钢管的连续冷却相变行为

华文林 杨秀芝 杨春杰 董春法
(湖北理工学院机电学院,黄石 435003)

摘要 利用 Gleeble-3500 热模拟试验机,测定了 $\Phi 406.4 \text{ mm} \times 16.5 \text{ mm}$ X70 深海无缝管线钢管(0.07C, 0.70Si, 0.80Mn, 0.008P, 0.002S, 0.25Ni, 0.25Cr, 0.20Mo, 0.10Cu, 0.06V, 0.03Nb, 0.04Al, 0.006ON) 的 CCT 曲线,并通过光学显微镜,扫描电子显微镜, HV 硬度计分析了 0.1 ~ 100 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的冷却速度下钢管的组织特征。结果表明,冷却速度为 0.1 ~ 5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时钢中组织主要为铁素体 + 珠光体,当冷却速度大于 5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,钢中组织为贝氏体 + 铁素体;随冷却速度的提高,钢组织细化,硬度增加;当冷却速度为 30 ~ 50 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,可以获得适量的板条贝氏体组织,从而可保证管线钢有良好的力学性能。

关键词 X70 深海无缝管线钢管 CCT 曲线 组织 硬度

Behavior of Phase Transformation of X70 V-Nb Microalloying Steel Tube for Deep-Sea Pipe-Line during Continuous Cooling

Hua Wenlin, Yang Xiuzhi, Yang Chunjie and Dong Chunfa
(Mechanical and Electrical School, Hubei Science and Technology Institute, Huangshi 435003)

Abstract The continuous cooling transformation (CCT) curves of $\Phi 406.4 \text{ mm} \times 16.5 \text{ mm}$ X70 seamless steel tube for deep-sea pipe-line (0.07C, 0.70Si, 0.80Mn, 0.008P, 0.002S, 0.25Ni, 0.25Cr, 0.20Mo, 0.10Cu, 0.06V, 0.03Nb, 0.04Al, 0.006ON) have been measured by using Gleeble-3500 thermo-mechanical simulator, and the structure feature of the steel tube with cooling rate 0.1 ~ 100 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ is analyzed by optical microscope, scanning electron microscope and HV hardness meter. Results show that with cooling rate 0.1 ~ 5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ the main structure in steel is ferrite + pearlite, as cooling rate more than 5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ the structure in steel is bainite + ferrite; with increasing cooling rate the structure of steel is fined and the hardness of steel increases; with cooling rate 30 ~ 50 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ the suitable amount of lath bainite structure is obtained therefore to insure getting excellent mechanical properties of pipe-line steel.

Material Index X70 Seamless Steel Tube for Deep-Sea Pipe-Line, CCT curves, Structure, Hardness

海底管线作为海上油气田开发中油气传输的主要方式,具有连续、快捷、输送量大等优点,现代石油工业的发展使得对管线钢的需求大幅度增加。通常使用的海底管线管钢级在 X42 以上,现在多采用 X65 和 X70 级。深海管线施工条件复杂、服役环境严酷,对深海管线钢管的技术条件和质量要求极为严格,对相关材料的成分、碳当量、组织及交货状态,对管体的强度、硬度、塑性、韧性等的技术条件都提出严格要求^[1,2],该指标远高于陆地其他用途钢种标准。为确保管线管在恶劣环境下的安全运行,对于管线钢一般要求具有细小的晶粒和特定的相变产物,因此研究管线钢的连续冷却转变曲线(CCT 曲线)是非常必要的,它是分析连续冷却过程中奥氏体转变产物的重要依据。

本文利用 Gleeble-3500 热模拟试验机和光学显微镜等手段,研究了 X70 管线钢用无缝管连续冷却相变和组织演变的规律,为生产实

践工艺的制定提供了参考依据。

1 试验材料及方法

试验材料选择 X70 深海无缝钢管,规格为: $\Phi 406.4 \text{ mm}$,壁厚 16.5mm,长 3 000 mm,热轧态,其化学成分见表 1。

试验钢经轧制后加工成热模拟试验用试样,试样尺寸为 $\Phi 6 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。试验在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行。测定试验钢的临界转变温度 (A_{c1} 、 A_{c3}) 以确定试验钢的奥氏体化温度,将试样以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的加热速率,从室温加热到 500 $^{\circ}\text{C}$,再以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的加热速率进一步加热到 950 $^{\circ}\text{C}$,采集样品加热过程中的线膨胀信号,利用切线法确定转变开始点和结束点,分别作为试验钢相变点,即 A_{c1} 、 A_{c3} ;将 CCT 试样以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的加热速率将试样加热

表 1 试验 X70 无缝钢管的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested X70 seamless steel tube / %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Alt	V	Nb	N
0.07	0.70	0.80	0.008	0.002	0.25	0.25	0.20	0.10	0.04	0.06	0.03	0.006 0

到开冷温度(900 + 30)℃,保温 5 min,使钢组织基本均匀化后,在以 0.1、0.5、1、5、8、10、15、20、25、30、40、50、75、100 ℃/s 等 14 个不同的速度冷却,直到相变结束。

在样品控冷过程中,测试并记录不同冷却速度下的热膨胀曲线以确定不同冷却速度下各组织的转变点。试验结束后将各试样沿焊接电偶处切开,并经磨制、机械抛光、4% 硝酸酒精腐蚀后用 Axiovert-200MAT 金相显微镜和 KYKY-2800 型扫描电子显微镜观察金相组织,在 FM-ARS9000 测试其硬度,最终绘制出试验钢 CCT 曲线^[34]。

2 试验结果分析

2.1 试验钢的原始金相组织

对试验钢的原始金相组织进行观察,金相组织试样选自试验钢厚度方向 1/4 处,观察结果如图 1 所示。

试验钢在金相显微镜下的组织基本显示为多边形铁素体加珠光体并含有少量的退化珠光体和贝氏体组织,低倍组织呈较为明显的带状组织。

2.2 转变点的测定

根据试验所记录冷却过程中的膨胀量-温度曲线,确定试验钢组织转变的开始、终止点,方案示意图如图 2。

2.3 试验钢的连续冷却转变曲线

试验所测得试验钢的 $Ac_1 = 712\text{ }^\circ\text{C}$; $Ac_3 = 902\text{ }^\circ\text{C}$; 将试样所测得相变点绘制到温度-时间半对数坐标上,用连线法将物理意义相同的各点连接起来,同时标出 Ac_1 、 Ac_3 两条水平线,即可得出相应的 CCT 曲线,如图 3 所示。图 3 中冷却曲线旁为对应的冷却速度,冷却曲线下的数据为该冷却速度下试验钢的 HV 硬度值。从 CCT 曲线分析中可以看出,试验钢在不同冷却速度下过冷奥氏体主要发生了铁素

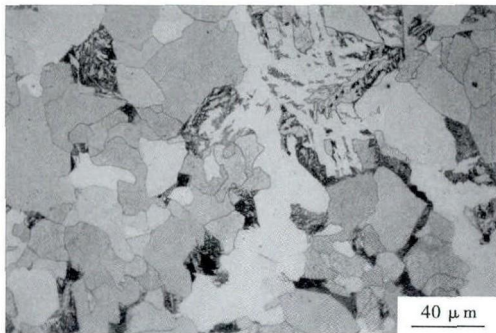


图 1 试验 V-Nb 微合金化 X70 钢管原始组织形貌
Fig.1 Morphology of structure of tested original X70 V-Nb microalloying steel tube

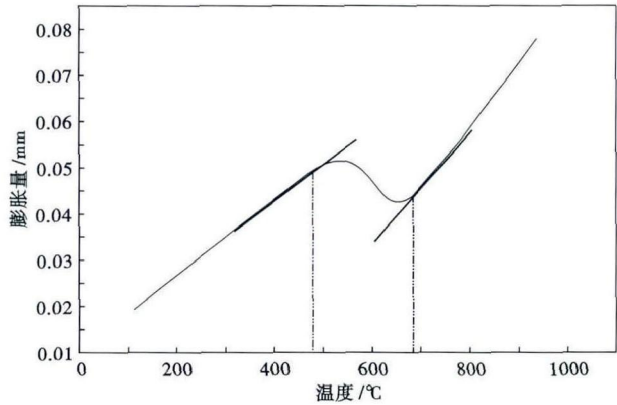


图 2 试验 V-Nb 微合金化 X70 钢的温度-膨胀量曲线
Fig.2 Temperature-volume expansion curves of tested X70 V-Nb microalloying steel

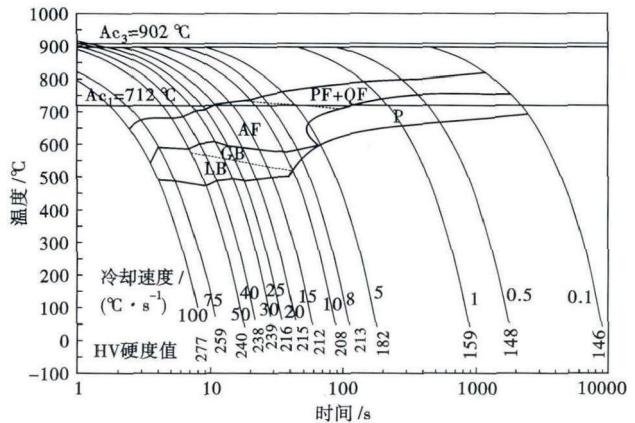


图 3 试验 V-Nb 微合金化 X70 钢的连续冷却转变曲线
Fig.3 Continuous cooling transformation curves of tested X70 V-Nb microalloying steel

体转变、珠光体转变和贝氏体转变^[5-6]。

2.4 试验钢在不同冷却速度下的金相组织及硬度值

试验钢在不同冷却速度下金相组织如图 4 所示;图 5 为在不同冷却速度下试验钢的 SEM 观察照片,表 2 为过冷奥氏体在不同冷却速度下连续冷却后得到的不同组织及相应的 HV 硬度值。

试验钢在不同冷却速度下连续冷却转变组织的微观形貌如图 4 和图 5 所示,由图 4 可以看出,随着冷却速度的升高试验钢转变过程中铁素体数量减少,晶粒尺寸减小。具体而言:在冷却速度 $\leq 1\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时(图 4a~c),试验钢在室温下的金相组织主要由铁素体加珠光体组织构成且存在明显的带状组织。

随冷却速度的增加,铁素体尺寸及数量均有所降低,珠光体有所退化。而且随冷却速度增加块状铁素体尺寸有所减小,这是因为冷却速度较慢时,贝氏体转变开始温度(B_s)点高,相变速度低,使得碳原子扩散充分,进而促使碳原子在奥氏体内富集,导

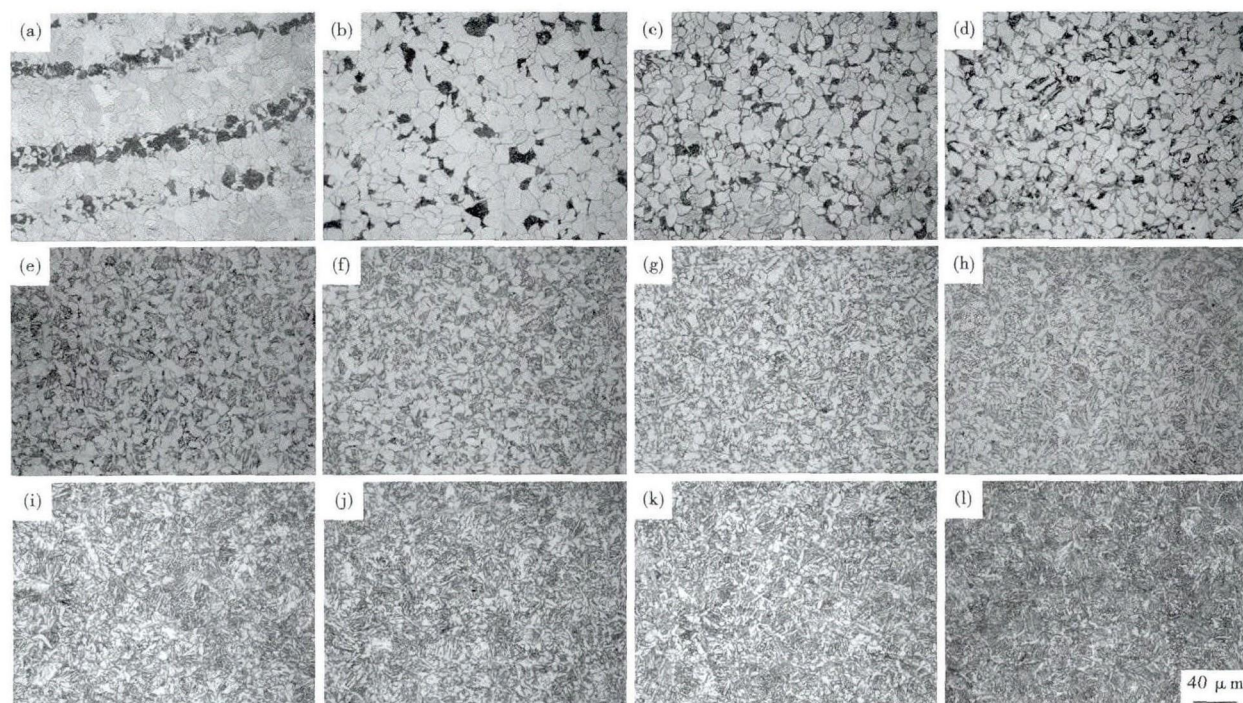


图 4 试验 V-Nb 微合金化 X70 钢的组织形貌,冷却速度/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$:(a)0.1;(b)0.5;(c)1;(d)5;(e)8;(f)10;(g)15;(h)25;(i)30;(j)40;(k)50;(l)100

Fig. 4 Morphology of structure of tested X70 V-Nb microalloying steel, cooling rate / $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$: (a) 0.1; (b) 0.5; (c) 1; (d) 5; (e) 8; (f) 10; (g) 15; (h) 25; (i) 30; (j) 40; (k) 50; (l) 100

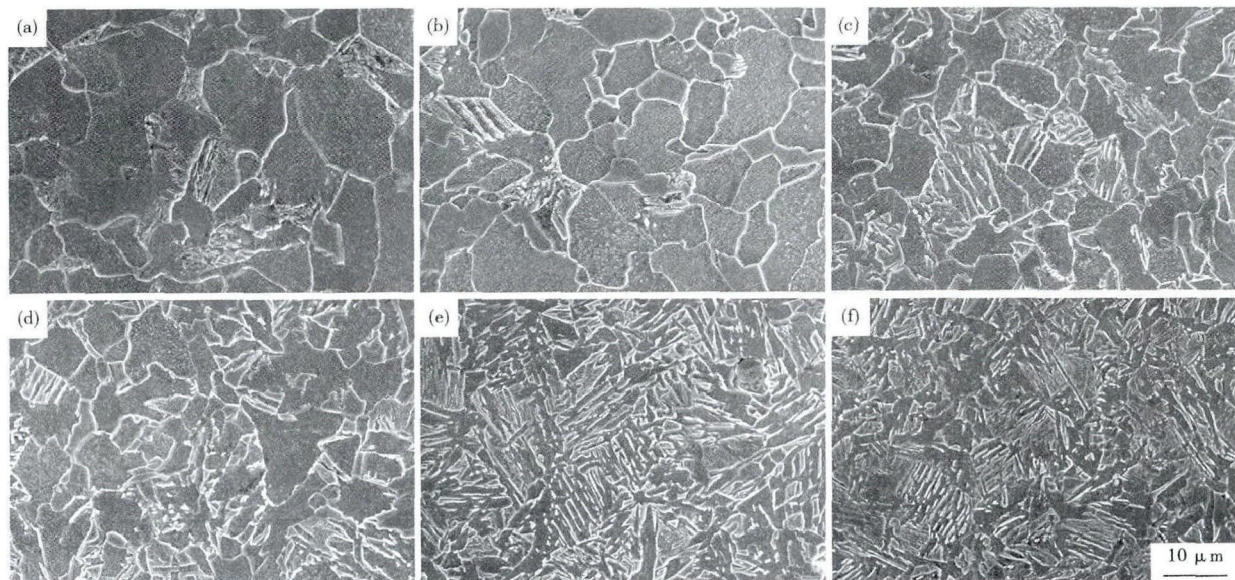


图 5 试验 V-Nb 微合金化 X70 钢的组织形貌,SEM,冷却速度/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$:(a)1;(b)5;(c)10;(d)20;(e)50;(f)100

Fig. 5 Morphology of structure of tested X70 V-Nb microalloying steel, SEM, cooling rate / $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$: (a) 1; (b) 5; (c) 10; (d) 20; (e) 50; (f) 100

致小岛尺寸增大,数目减少,间距增大。

当冷却速度为 $8 \sim 15 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时(图 4e ~ g)珠光体消失,多边形铁素体也有所变化,转变为准多边形铁素体并有少量贝氏体产生,结合扫描照片(图 5c)可以看出,该温度区间组织较之前有明显变化,首先是

块状铁素体基体上分布有少量形状不规则的岛状组织,不易于显示晶界,同时有部分小岛形态转变为半连续的板条形状,近乎平行的排列与铁素体边界。

冷却速度为 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时(图 4h)小岛组织以粒状贝氏体(本文所绘制的 CCT 曲线中将粒状贝氏体与

表 2 试验 V-Nb 微合金化 X70 钢在不同冷却速度下的组织和硬度

Table 2 Structure and hardness of tested X70 V-Nb microalloying steel with different cooling rate

冷却速度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)	组织	HV 硬度值
0.1	PF + P	146
0.5	PF + P	148
1	PF + P	159
5	PF + QF + 退化的珠光体	182
8	QF + GB	212
10	QF + GB	208
15	QF + GB	212
20	QF + GB + 少量 LB	215
25	QF + GB + 少量 LB	215
30	LB + 少量 QF + 少量 GB	239
40	LB + 少量 QF + 少量 GB	238
50	LB + 少量 QF	240
75	LB + 少量 QF	259
100	LB + 少量 QF	277

注: 多边形铁素体 (PF)、珠光体 (P)、板条贝氏体 (LB)、准多边形铁素体 (QF)、粒状贝氏体 (GB)

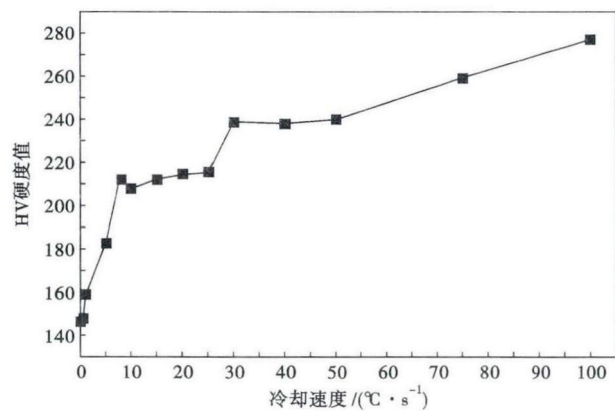


图 6 冷却速度对试验 V-Nb 微合金化 X70 钢的 HV 硬度值的影响

Fig. 6 Effect of cooling rate on HV hardness of tested X70 V-Nb microalloying steel

粒状组织统一称为粒状贝氏体)且有少量多边形铁素体,同时组织中出现板条状贝氏体,相互平行的贝氏体板条在奥氏体内生长,取向各异的贝氏体板条束分割奥氏体晶粒,在部分区域出现交叉生长。随冷却速度继续增大,转变组织中粒状贝氏体开始消除,板条特征逐渐明显,且板条逐步细化。

当冷却速度 ≥ 30 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时(图 4i~l),转变组织主要为板条状贝氏体,结合图 5(e,f)可以看出,冷却速度增大,板条明显细化。

根据如上分析可得,试验钢在较大冷却速度范围内可获得多边形铁素体、粒状贝氏体和板条状贝

氏体。随着冷却速度的增大,多边形铁素体尺寸减少数量亦有减少,粒状贝氏体则逐渐转变为板条状,且组织得到了很大程度的细化^[6-7]。

对于不同冷却速度下的试验钢进行 HV 硬度值测试,其结果如图 6 所示。由图 6 可见,随着冷却速度的提高,冷却后试样的硬度也相应的升高。一方面是由于冷却速度提高引起组织转变的原因,贝氏体硬度高的组织含量逐渐增加造成 HV 硬度值升高;另一方面是由于组织细化引起硬度的提高;同时从扫描照片来看,在冷却速度大于 20 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时(图 5d~f)晶界上存在大量呈亮白色的 M/A,其体积分数的增加提高了钢材的强度,这对试验钢硬度值提高同样起到了一定作用。

3 结论

(1) 随冷却速度的提高,试验 V-Nb 微合金化 X70 钢在连续冷却转变组织中依次出现多边形铁素体、珠光体、贝氏体组织。

(2) 随冷却速度的提高,试验钢组织细化,各阶段冷却后试验钢硬度值增加。

(3) 当冷却速度在 $30 \sim 50$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,V-Nb 微合金化 X70 钢可以获得适量的板条贝氏体组织,从而保证管线钢有良好的力学性能。

湖北省教育厅青年基金(Q21123001)、湖北省自然科学基金(2014cfb177)资助

参考文献

- [1] 王晓香. 当前管线钢管研发的几个热点问题[J]. 焊管, 2014, 37(4): 5-9.
- [2] 贾书君, 刘清友, 李拔. 厚壁 X70 管线钢的组织性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(4): 129-134.
- [3] 花桂泰, 杨胜蓉. YB/T5127-93 钢的临界点测定方法(膨胀法)[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 27-38.
- [4] 杨胜蓉. YB/T5129-93 钢的连续冷却转变曲线图的测定方法(膨胀法)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. 1-11.
- [5] 李红英, 王法云, 曾翠婷, 等. 3Cr2Mo 钢 CCT 曲线的测定与分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(7): 1928-1933.
- [6] 彭海红, 栾玉武, 黄伟, 等. X65 管线钢连续冷却相变行为的研究[J]. 宽厚板, 2007, 13(1): 36-38.
- [7] 黄明浩, 黄国建, 徐烽, 等. HTP 型 X65 级管线钢连续冷却相变的研究[J]. 焊管, 2009, 32(8): 16-20.

华文林(1967-),男,副教授,1989年武汉工学院毕业,机械设计、车辆工程、新材料研究。E-mail:896367469@qq.com

收稿日期:2016-08-08