

## P110 级 25MnV 钢石油套管热处理工艺的优化

李亚欣<sup>1</sup> 刘雅政<sup>1</sup> 赵金锋<sup>2</sup> 邹喜洋<sup>3</sup> 唐应波<sup>3</sup>

(1 北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083; 2 北京科大中冶技术发展有限公司,北京 100083;

3 衡阳华菱钢管(集团)有限公司技术中心,衡阳 421001)

**摘要** 通过 CCT 曲线测定和热处理正交试验,研究了 890 ~ 930 °C 25 ~ 45 min 淬火和 570 ~ 610 °C 50 ~ 80 min 回火参数对 25MnV 钢(% : 0.25 ~ 0.30C、1.50 ~ 1.80Mn、0.06 ~ 0.15V) 245 mm × 12 mm 管组织和力学性能的影响。结果表明,采用 910 °C 35 min 水淬 + 590 °C 65 min 回火,套管的综合力学性能最佳:屈服强度 878 ~ 906 MPa,抗拉强度 923 ~ 963 MPa,伸长率 16.6% ~ 17.4%,满足标准要求。

**关键词** 石油套管 25MnV 钢 CCT 曲线 热处理工艺 优化

## Optimization of Heat Treatment Process of P110 Oil Casing Tube of Steel 25MnV

Li Yaxin<sup>1</sup>, Liu Yazheng<sup>1</sup>, Zhao Jinpeng<sup>2</sup>, Zou Xiyang<sup>3</sup> and Tang Yingbo<sup>3</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 Sinomet Technologies Co Ltd, University of Science & Technology, Beijing 100083;

3 Technical Center, Hengyang Hualing Steel Tube (Group) Co Ltd, Hengyang 421001)

**Abstract** Effect of parameters of quenching at 890 ~ 930 °C for 25 ~ 45 min and tempering at 570 ~ 610 °C for 50 ~ 80 min on structure and mechanical properties of 245 mm × 12 mm tube of steel 25MnV (% : 0.25 ~ 0.30C, 1.50 ~ 1.80Mn, 0.06 ~ 0.15V) has been studied by measured CCT curves and orthogonal test of heat treatment. Results show that with austenizing at 910 °C for 35 min, water quenching, and tempering at 590 °C for 65 min, the comprehensive mechanical properties of casing tube are optimum i. e. yield strength 878 ~ 906 MPa, tensile strength 923 ~ 963 MPa and elongation 16.6% ~ 17.4% to meet the standard requirement.

**Material Index** Oil Casing Tube, Steel 25MnV, CCT Curves, Heat Treatment Process, Optimization

随石油工业的发展对油井管的需求量与日俱增,而石油管服役条件越来越恶劣,对油井管特别是石油套管的性能提出更高要求<sup>[1-3]</sup>。

API SPEC 5CT 标准对 P110 级石油套管力学性能有明确规定:屈服强度 758 ~ 965 MPa,抗拉强度 ≥ 862 MPa,冲击功[0 °C,尺寸(mm)为 10 × 10 × 55]:横向 ≥ 20 J,纵向 ≥ 41 J,伸长率 ≥ 13%。国内外各企业 P110 级的化学成分差别很大,大致分为碳锰系、铬钼系、锰钼系和铬锰钼系<sup>[4]</sup>。衡阳华菱钢管厂采用碳锰系 25MnV 钢,与其他钢种相比,25MnV 成分设计简单,淬透性差,但又要求其有良好的综合力学性能,故热处理工艺制度要求严格。

### 1 实验材料和方法

实验材料取自衡钢合格热轧管样,其主要化学成分见表 1。热轧管尺寸规格为 245 mm × 12 mm。

石油套管轧制生产的主要工艺流程:电弧炉炼钢 → 二次精炼 → 连铸圆坯 → 环形炉加热 → 穿孔 → 连轧、脱管 → 再加热 → 定减径 → 管排锯锯切 → 矫直 → 探伤。合格热轧管调质处理主要工艺流程:淬火加

表 1 25MnV 钢主要化学成分/%  
Table 1 Main chemical composition of steel 25MnV /%

C	Si	Mn	V	P	S
0.25 ~ 0.30	0.20 ~ 0.40	1.50 ~ 1.80	0.06 ~ 0.15	≤ 0.020	≤ 0.010

注:(As + Sn + Pb + Sb + Bi) ≤ 0.050%。

热 → 水淬冷却(采用浸入或喷淋式冷却) → 回火加热 → 定径 → 矫直 → 冷却 → 探伤 → 水压测试 → 定尺 → 包装入库。淬火和回火加热炉均为步进式加热炉。

在 Gleeble-1500 热模拟实验机上进行热模拟实验。热处理试样沿钢管轴向切取 230 mm × 25 mm 的长条试样,采用箱式电加热炉加热及保温。热处理后,加工成标距尺寸为 80 mm × 15 mm 的拉伸试样,按照 GB/T228-2002 加工成标准拉伸试样并进行拉伸试验,主要检测不同热处理工艺下屈服强度( $R_{el}$ )、抗拉强度( $R_m$ )、伸长率( $A$ )。执行 GB/T6394-2002 标准,利用 ImageTool 软件测量不同热处理工艺下原始奥氏体的晶粒尺寸。

调质处理主要控制工艺参数有淬火温度  $T_1$ 、淬火保温时间  $t_1$ 、回火温度  $T_2$  和回火保温时间  $t_2$ 。为

减少实验次数,提高实验效率,本实验采用4因素3水平的正交实验。对于25MnV钢种, $A_{c3} = 830\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,根据CCT曲线,设计正交实验(表2)。

表2 4因素3水平正交实验  
Table 2 Orthogonal test with 4 factors and 3 levels

水平	$T_1/^{\circ}\text{C}$	$t_1/\text{min}$	$T_2/^{\circ}\text{C}$	$t_2/\text{min}$
1	890	25	570	50
2	910	35	590	65
3	930	45	610	80

## 2 实验结果

### 2.1 连续冷却转变曲线的测定

在合格热轧管上取样,经线切割加工成尺寸 $\Phi 6\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的圆柱试样,采用Gleeble-1500热模拟实验机测定25MnV钢热轧后的连续冷却转变(CCT)曲线(图1)。

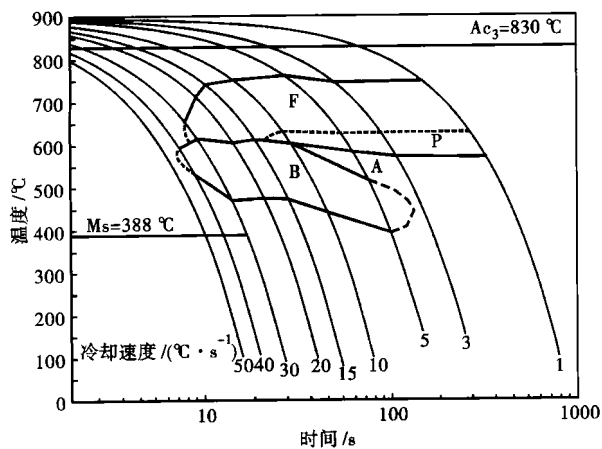


图1 25MnV钢的CCT曲线  
Fig. 1 CCT curves of steel 25MnV

由图1看出,分别在不同的相对应温度范围内,冷却速度为 $1 \sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,相变组织为铁素体和珠光体;冷却速度为 $5 \sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,相变组织为铁素体、珠光体和贝氏体的三相混合组织;冷却速度为 $15 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,不存在亚稳奥氏体区,相变组织为铁素体和贝氏体;冷却速度 $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,马氏体开始出现;当冷却速度 $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,奥氏体几乎全部转变为马氏体,马氏体转变温度为 $388\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于25MnV钢生产P110级石油套管,在水淬过程中要得到全马氏体组织,则淬火冷却速度必须 $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

### 2.2 热处理工艺对25MnV钢套管的力学性能和奥氏体晶粒的影响

从9组实验结果看出(表3),25MnV钢种的热

表3 不同热处理工艺下25MnV钢套管的力学性能和奥氏体晶粒尺寸

Table 3 Mechanical properties and austenite grain size of casing tube of steel 25MnV with different heat treatment process

组号	热处理工艺/ ( $^{\circ}\text{C} \times \text{min}$ )		力学性能			晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$
	淬火	回火	$R_{eL}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$	
1	890 × 25	570 × 50	960	1 010	15.50	15.14
2	890 × 35	590 × 65	905	965	17.26	16.28
3	890 × 45	610 × 80	860	920	17.38	16.74
4	910 × 25	590 × 80	900	955	17.09	16.10
5	910 × 35	610 × 50	865	940	17.45	16.69
6	910 × 45	570 × 65	950	1 000	17.40	17.04
7	930 × 25	610 × 65	880	945	17.50	16.31
8	930 × 35	570 × 80	960	1 005	16.63	17.23
9	930 × 45	590 × 50	935	985	17.50	18.84

处理工艺稳定性非常好,特别是在强度指标上表现明显,4个工艺参数在所选范围内的任意组合得到的屈服、抗拉强度和伸长率都能满足API标准要求,并且大部分指标在规定屈服强度的上限部分。

对不同的性能指标分别计算各因素3个水平下的平均实验指标及极差,分析不同热处理工艺参数对25MnV钢强度和塑性的影响规律。由极差法可知,各因素对屈服强度、抗拉强度和伸长率影响主次为屈服强度:回火温度 > 淬火温度 > 回火保温时间 > 淬火保温时间;抗拉强度:回火温度 > 回火保温时间 > 淬火温度 > 淬火保温时间;伸长率:回火温度 > 淬火保温时间 > 淬火温度 > 回火保温时间。

回火温度是屈服强度、抗拉强度和伸长率最主要的影响因素,其影响水平分别达到 $88.4\text{ MPa}$ 、 $70\text{ MPa}$ 、 $0.93\%$ 。根据表3试验结果,结合极差分析可得,热处理工艺参数对抗拉强度和屈服强度的影响趋势基本相同。随淬火温度的升高和保温时间的延长,强度变化不明显,伸长率整体呈上升趋势,当淬火温度为 $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,伸长率最大。考虑淬火工艺参数对碳和合金元素均匀化,保证充分奥氏体化以及保持较细的奥氏体晶粒,淬火保温时间选择 $35\text{ min}$ 。随回火温度的升高和回火保温时间的延长,强度不断下降,伸长率呈上升趋势。考虑回火消除淬火引起的内应力,并考虑其综合性能最优,回火温度选择 $590\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,回火保温时间定为 $65\text{ min}$ 。

综上所述,采用由正交实验确定的最优热处理工艺: $910\text{ }^{\circ}\text{C}\ 35\text{ min}$  淬火 +  $590\text{ }^{\circ}\text{C}\ 65\text{ min}$  回火,进行调质处理,浸入式淬水至室温,其淬火组织和回火组织如图2所示。淬火后组织几乎全部为板条马氏体,回火组织为细粒状渗碳体和等轴状铁素体组成的均匀回火索氏体,其既具有较高的抗拉强度和屈

服强度组合,又具有足够的塑性。

采用上述工艺优化和调质热处理后的力学性能:屈服强度 878 ~ 906 MPa,抗拉强度 923 ~ 963 MPa,伸长率 16.6% ~ 17.4%,各项力学指标均满足 API SPEC 5CT 标准中对 P110 钢级的性能要求。

### 3 讨论

原始奥氏体晶粒尺寸的大小依赖于淬火加热温度和保温时间。由表 3 可见,淬火加热温度越高,保温时间越长,原始奥氏体晶粒尺寸越粗大。奥氏体晶粒长大的速度:

$$V_D \propto D_0 \exp(-Q/kT)$$

式中: $D_0$ -常数; $Q$ -激活能; $k$ - Boltzmann 常数; $T$ - 淬火加热温度。

随着淬火加热温度的增加,原子扩散的激活能  $Q$  减小,晶粒长大速度增加,奥氏体晶粒开始粗化。淬火后形成的马氏体板条也越粗大。

随淬火加热温度升高,合金碳化物逐渐分解,合金元素 C、Mn、V 在奥氏体中的溶解量增加,固溶强化效果加强,使得强度增加<sup>[5]</sup>;另一方面,随淬火温度升高,奥氏体晶粒逐步长大,得到粗大的马氏体组织,强度降低。因此综合上述作用,强度增加浮动不大。

随回火温度的升高和回火保温时间的延长,25MnV 钢的强度降低,伸长率增加。随回火温度升高,过饱和 C 原子从  $\alpha$  固溶体中不断析出,C 原子的固溶强化效应不断下降,使得钢的强度降低;随回火温度升高,钢中合金碳化物数量增加并逐渐聚集、长大,对位错运动阻碍作用明显减弱,也使其强度急剧降低<sup>[6]</sup>。在回火过程中马氏体板条内部、板条边缘和奥氏体晶界上析出碳化物。其中在马氏体板条内部有大量弥散析出的  $\epsilon$ - 碳化物质点,并开始逐渐聚集为片状渗碳体。在回火温度逐渐升高的过程中,马氏体中析出的细小粒状渗碳体易于向马氏体晶界聚集,粒状渗碳体开始球化和聚集长大,加上  $\alpha$  固溶体因回复、再结晶所引起的软化是钢的伸长率增加的主要原因<sup>[7]</sup>。

### 4 结论

(1)测定了 25MnV 钢的 CCT 曲线,当淬火冷却速度  $\geq 50$   $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  冷却到 388  $^{\circ}\text{C}$  以下,得到全部马氏体组织。

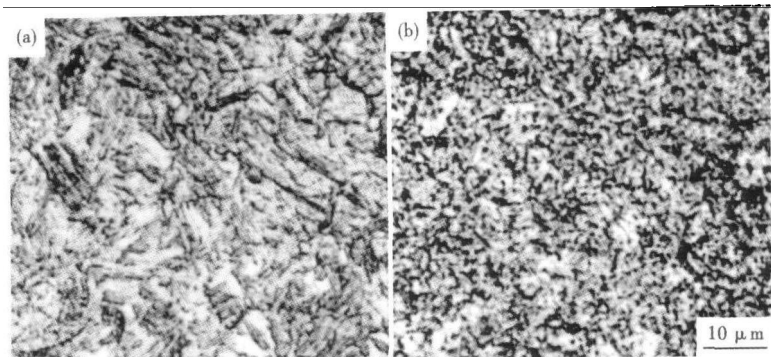


图 2 25MnV 钢套管的组织形貌:(a)910  $^{\circ}\text{C}$  35 min 淬火;(b)910  $^{\circ}\text{C}$  35 min 淬火 + 590  $^{\circ}\text{C}$  65 min 回火

Fig.2 Structure morphology of casing tube of steel 25MnV: (a) quenched at 910  $^{\circ}\text{C}$  for 35 min; (b) quenched at 910  $^{\circ}\text{C}$  for 35 min and tempered at 590  $^{\circ}\text{C}$  for 65 min

(2)25MnV 钢热处理后屈服强度、抗拉强度和伸长率的最主要影响因素是回火温度。随回火温度升高和保温时间延长,强度降低,伸长率增加;淬火温度升高和保温时间延长对强度影响不大,伸长率整体呈上升趋势。

(3)25MnV 钢 P110 级石油套管最优调质处理工艺:淬火温度为 910  $^{\circ}\text{C}$  保温 35 min,出炉水淬至室温,回火温度 590  $^{\circ}\text{C}$  保温 65 min。此工艺下钢的力学性能:屈服强度 878 ~ 906 MPa,抗拉强度 923 ~ 963 MPa,伸长率 16.6% ~ 17.4%,综合力学性能良好,满足了 API SPEC 5CT 标准中对 P110 钢级的性能要求。

### 参考文献

- 1 彭在美.“十一五”期间中国钢管市场需求预测. 焊管,2007,30(5):12
- 2 成海涛.我国无缝钢管行业的现状分析. 钢管,2006,35(3):1
- 3 榑田,隆弘·大谷,泰夫.石油エネルギーの生産及び輸送用鋼管. 鉄と鋼,1994,80(4):263
- 4 刘斌,周亮.P110 抗挤毁套管材料成分的设计. 金属材料与冶金工程,2007,35(3):14
- 5 李安铭,黄丽娟,王向杰.“零保温”淬火温度对 25MnV 钢组织性能的影响. 煤炭学报,2007,32(4):445
- 6 惠卫军,董瀚,翁宇庆,等.回火温度对 Cr-Mo-V 系高强度钢力学性能的影响. 金属学报,2002,38(10):1009
- 7 马素媛,徐建辉,王东林,等.磨削对不同温度回火钢铁材料微观结构的影响. 材料热处理学报,2005,26(2):47

李亚欣(1980-),女,博士研究生,从事高性能石油套管的产品开发及质量控制。

收稿日期:2009-05-27