

淬火温度对石油套管用钢 27MnCrV 冲击韧性的影响

白兴国 梅 丽 陈建伟 宗卫兵 张传友

(天津钢管集团股份有限公司, 天津 300301)

摘 要 研究了 890 ~ 780 °C 淬火对 630 °C 回火的石油套管用钢 27MnCrV (% : 0. 24 ~ 0. 30C, 0. 50 ~ 0. 70Cr, 0. 06 ~ 0. 10V) 横向冲击功的影响。结果表明, 随淬火温度降低, 该钢横向 V-冲击功显著增加; 在保证拉伸强度不降低的情况下, 横向最小冲击功由 890 °C 淬火 + 630 °C 回火的 35 J 提高到 820 °C + 630 °C 回火的 66 J。27MnCrV 钢最佳热处理工艺为 830 °C ± 10 °C 水淬 + 630 °C 回火空冷, 其屈服强度 847 ~ 860 MPa, 抗拉强度 922 ~ 930 MPa, 横向冲击功 57 ~ 66 J, 满足标准要求。

关键词 27MnCrV 钢 石油套管 淬火温度 冲击韧性

Effect of Quenching Temperature on Impact Toughness of Steel 27MnCrV for Petroleum Casing Pipe

Bai Xingguo, Mei Li, Chen Jianwei, Zong Weibing and Zhang Chuanyou

(Tianjin Pipe Group Corp, Tianjin 300301)

Abstract The effect of quenching at 890 ~ 780 °C on transverse impact energy of steel 27MnCrV (% : 0. 24C ~ 0. 30C, 0. 50 ~ 0. 70Cr, 0. 06 ~ 0. 10V) for petroleum casing pipe tempered at 630 °C has been tested and studied. Results show that with decreasing the quenching temperature, the transverse V- notch impact energy increases obviously; with insuring non-decreasing tensile strength of steel, the minimum transverse impact energy increases to 66 J by quenching at 820 °C + tempering at 630 °C from 35 J by quenching at 890 °C + tempering at 630 °C. The optimum heat treatment process of steel 27MnCrV is water quenching at 830 °C ± 10 °C + tempering at 630 °C air cooling, its tensile strength is 847 ~ 860 MPa, Yield strength is 922 ~ 930 MPa and impact energy is 57 ~ 66 J to meet the requirement of standard.

Material Index Steel 27MnCrV, Petroleum Casing Pipe, Quenching Temperature, Impact Toughness

随着钻井深度的增加以及国家对地质条件复杂、开采难度大的西南部油田、西部油田和海上油田的开发, 建井用套管承受的外挤载荷和轴向载荷越来越高。高强度高抗挤套管主要用于深井、超深井或地层条件复杂对套管性能要求苛刻的场合。因此, 要求这种套管具有良好的强韧性综合性能: 高抗拉及连接强度, 优异的抗挤毁能力和良好的密封性能。而其中的核心是套管的抗挤毁能力。针对 Mo 铁等合金原料市场价位较高的情况, 科技降成本优化钢种成为科研人员需要解决的新课题。为此课题组开发了采用不含 Mo 元素的钢种 27MnCrV 生产高强度石油套管, 但 27MnCrV 钢种经过大量的小试样热处理试验研究发现, 该钢种有二类回火脆^[1]现象产生。生产中冲击韧性普遍偏低, 冲击韧性值有时达不到产品性能指标要求。为解决强度和韧性的良好配合, 改变以往在 880 ~ 900 °C (高出 Ac₃ 温度 50 °C 左右) 传统淬火的热处理工艺方法, 尝试采用低温至亚温温度区间的淬火工艺来摸索其产品性能。

1 产品常规工艺及技术要求

该高强度级套管的力学性能指标为: 屈服强度 $R_{0.2} 758 \sim 965$ MPa, 抗拉强度 $R_m \geq 862$ MPa, 横向冲击功 $A_{KV} \geq 22$ J。采用电弧炉冶炼, 二次精炼真空处理, 钢管采用热轧方法制造, 并经过全长调质处理 (淬火 + 回火)。

27MnCrV 钢的 $Ac_1 = 736$ °C, $Ac_3 = 810$ °C, 一般情况下大生产钢的淬火加热温度采用 $Ac_3 + (30 \sim 50$ °C), 考虑到钢管的实际温度与炉温有一定差距, 另外为了充分利用 Cr、V 等合金元素的强化作用, 将淬火加热温度定为 900 °C, 该钢种采用的常规热处理工艺为 900 °C 保温 20 min 后水淬, 640 °C 保温 50 min 回火。热处理后产品性能见表 1。

从表 1 数据看, 在常规调质工艺下处理后钢管的力学性能基本满足 API 标准的要求, 但冲击断口呈脆性准解理断口形貌, 其冲击性能无法满足 API 5 CT PSL2 级以上产品的要求。后经试验发现该钢种经回火后采用快速冷却的方法能够得到较高的冲击性能, 此现象完全符合第二类回火脆性的特性^[1]。

表 1 石油套管常规热处理后的性能和组织
Table 1 Mechanical properties and structure of petroleum casing steel after normal heat treatment

项目	$R_{m0.6}$ / MPa	R_m / MPa	A/ %	A_{KV} /J 横向 全尺寸试样	剪切断面 率/%	组织
常规工艺	840 ~ 880	940 ~ 970	22	25 ~ 35	30	$S_{回}$
API 5CT 标准的规定	758 ~ 965	\geq 862	\geq 13	\geq 22	PSL-2 级产品 要求 $\geq 75\%$	-

注： $S_{回}$ -回火组织；剪切断面率-韧性断口面积占试样断口总面积的百分率。

2 产生脆性原因分析及试验方案

27MnCrV 钢主要化学成分为 (%)：0.24 ~ 0.30C、0.20 ~ 0.45Si、0.25 ~ 0.45Mn、 $\leq 0.025P$ 、 $\leq 0.020S$ 、0.50 ~ 0.70Cr、0.06 ~ 0.10V。此钢种是中碳 Mn-Cr 钢，为二类回火脆性^[1]敏感钢种；通过透射电镜和扫描电镜观察分析，调质处理后冲击韧性偏低是由于杂质元素在晶界的偏析造成的。而实际冶炼过程中，钢中的杂质元素不能完全去除。这就要求去寻求其它解决方法。

解决回火脆性的办法通常有：

(1) 通过加入 Mo 等合金元素来抑制回火脆性的倾向发生，但为了降低吨钢原料成本，所设计的钢种不含 Mo；

(2) 通常采用回火后快速冷却的方法可避免钢的回火脆性，但公司的热处理生产线设计中没有这种工艺，在生产线上实现回火后快速冷却很不现实。

亚温淬火通过不完全的奥氏体化可以有效的改善有害元素及杂质的分布，可提高钢的强韧性^[2]。对此，打破常规的淬火温度制度，尝试采用低温或亚温等淬火工艺温度制度来摸索其性能，以此来抑制回火脆性的产生。

结合 27MnCrV 钢的连续冷却转变 (CCT) 曲线

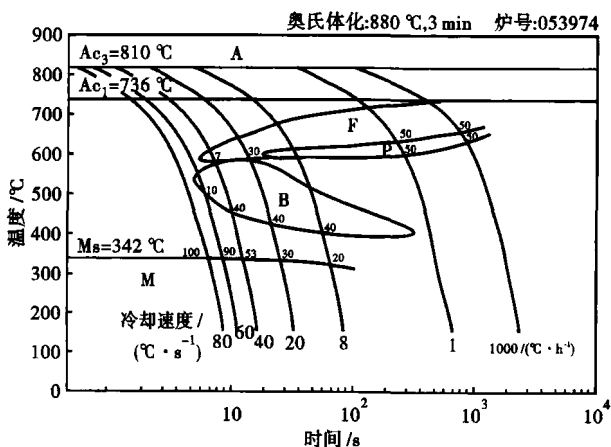


图 1 27MnCrV 钢种 CCT 曲线
Fig. 1 CCT curves of steel 27MnCrV

(图 1)，对两相区至 A_{c3} 以上 80 °C 区间 (780 ~ 890 °C) 进行淬火的小试样热处理试验研究，比较了不同温度淬火对材料性能的影响。

3 试验结果和分析

选用规格 244.48 mm × 11.99 mm 的试样做了比较有代表性的一系列不同淬火温度、同一回火温度的小试样热处理试验研究。具体热处理方案及力学性能试验结果如表 2。

表 2 淬火温度对石油套管用钢 27MnCrV 力学性能的影响
Table 2 Effect of quenching temperature on mechanical properties of steel 27MnCrV for petroleum casing pipe

试样号	淬火温度/°C	保温时间/min	回火温度/°C	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	横向冲击最小试验值/J	剪切断面率/%
1	890	25	630	841	916	25	35	30
2	840	25	630	847	922	26	57	80
3	820	25	630	860	923	25	66	100
4	800	25	630	816	884	26	75	100
5	780	25	630	689	787	27	86	100

注：冲击为横向 10 mm × 7.5 mm。

由力学性能结果趋势可以看出，在回火温度 (630 °C) 不变的热处理工艺下，随着淬火温度不断降低 (890 ~ 820 °C)，拉伸强度值没有大的变化，而冲击值却显著提高，820 °C 淬火温度的冲击值比 890 °C 淬火高 89%；但在 820 ~ 780 °C 淬火温度区间内拉伸强度值却不断降低，而冲击值也不断提高。

试验数据结果表明，在 820 ~ 780 °C 温度区间，随着淬火温度的降低，屈服强度和抗拉强度都明显降低，这是因为亚温淬火加热是在 $\alpha + \gamma$ 两相区内进行的，淬火后基体组织中出现少量的游离铁素体，从而造成强度的下降，因此不宜采用该温度段的淬火工艺。为保证管材强韧性的良好配合，并得到均匀的 $S_{回}$ 回火组织和产品性能的稳定性，充分考虑到大生产工艺的实现，以采用 830 °C ± 10 °C 淬火 + 630 °C 回火的热处理工艺为佳。

890 °C 淬火保温 25 min + 630 °C 回火保温 40 min 空冷，0 °C 横向冲击断口形貌见图 2(a, b)。820 °C 淬火保温 25 min + 630 °C 回火保温 40 min 空冷，0 °C 横向冲击断口形貌见图 2(c, d)。

由图 2 的冲击断口形貌分析可知，890 °C 淬火的断口形貌为脆性准解理断口，820 °C 淬火为韧窝断口。低温淬火在保证强度的同时，冲击韧性却有了很大的提高。冲击值平均提高了 70% 左右，从而保证了该高钢级套管强韧性的良好配合。

从图 3 可以看出，820 °C 淬火保温 25 min + 630

℃回火保温 40 min 空冷的热处理工艺淬火的套管材料的组织为板条状马氏体,回火组织为均匀细小的回火索氏体,证明该材料的淬透性非常好,且组织均匀细小,确保了该套管具有很好的强度和良好的冲击韧性。

4 产生效果

通过小试样热处理试验数据分析,最终确定了大生产热处理工艺制度,热处理生产线由最初的批量试制到大批量的生产,大生产检验结果在保证要求强度的同时冲击值提高到原来的 1.5 倍以上。生产检验结果的各项性能指标全部达到性能指标要求值。从能源方面考虑,由于淬火温度的降低(降低了大约 60 ℃),也节省了天然气能源。

5 结论

(1) 合理的低温淬火工艺,可以使 27MnCrV 钢在获得较高强度的前提下,明显地提高了冲击韧性,回火脆性得到抑制。

(2) 27MnCrV 钢生产高钢级套管最优热处理工艺为 830 ℃ 20 min 水淬,630 ℃ 45 min 回火后空冷。

(3) 27MnCrV 钢通过低温淬火 + 高温回火的热处理生产工艺,热处理后性能指标不仅能够满足 API Spec 5CT 标准

P110 钢级套管的要求,而且可满足更高钢级套管的要求。

(4) 一般情况下认为亚共析钢的淬火温度通常设定在 A_{c3} 点以上高 30 ~ 50 ℃,实际上淬火加热温度的选择会对钢热处理后的综合机械性能有一定的影响,各种材料淬火温度的制定不应受到传统的约束,也不可一概而论。

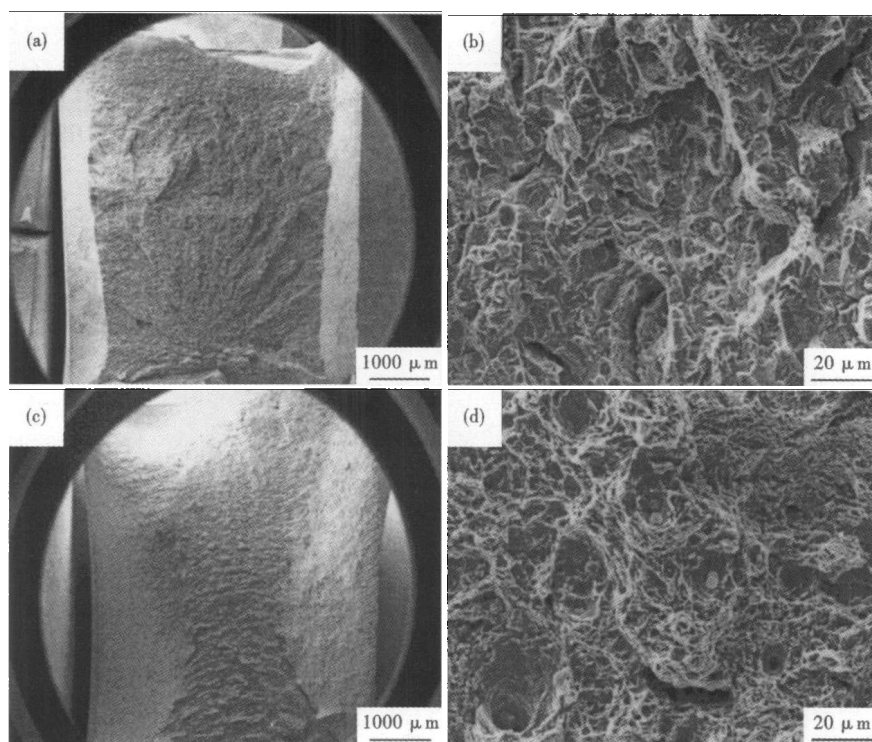


图2 淬火温度对 27MnCrV 钢 0 ℃冲击断口形貌的影响,SEM:(a)(b)890 ℃淬火 + 630 ℃回火;(c)(d)820 ℃淬火 + 630 ℃回火

Fig. 2 Effect of quenching temperature on morphology of impact fracture of steel 27MnCrV at 0 ℃, SEM: (a) (b) quenching at 890 ℃ + tempering at 630 ℃; (c) (d) quenching at 820 ℃ + tempering at 630 ℃

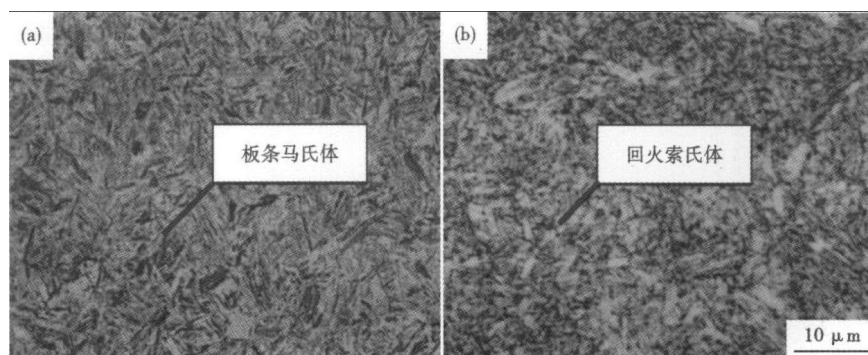


图3 27MnCrV 钢 244.5 mm × 12.0 mm 套管的组织形貌:(a)板条马氏体,820 ℃淬火;(b)回火索氏体,820 ℃淬火 + 630 ℃回火

Fig. 3 Morphology of structure of 244.5 mm × 12.0 mm casing pipe of steel 27MnCrV: (a) lath martensite, quenching at 820 ℃; (b) fine tempered sorbite, quenching at 820 ℃ + tempering at 630 ℃

参考文献

- 1 刘云旭. 金属热处理原理. 北京:冶金工业出版社,1985
- 2 夏立方. 金属热处理工艺学. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1996

白兴国(1978-),男,工程师,2003年内蒙古科技大学毕业,油井管、锅炉管新品种开发。

收稿日期:2009-10-23