铬钼钢调质C90钢级小炉热处理制度研究*

宋 歌,吕婉姝,刘玉荣,米永峰,马新宇

(内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章研究了不同淬火温度和回火温度对铬钼钢组织和力学性能的影响。试验结果表明,随着回火温度的升高,试验钢的抗拉强度、伸长率和冲击功变化不大。屈服强度对于回火温度较为敏感,随温度的升高屈服强度明显下降。用该钢种调试C90钢级钢管采用合适的淬火温度为900~920 ℃,回火温度为690~710 ℃。

关键词: 铬钼钢; 热处理; 组织; 性能

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)03-0045-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.03.013

Research on Heat Treatment Schedule of Hardening and Tempering C90 Steel Grade Chrome-molybdenum Steel with Rangette

Song Ge, Lv Wan-shu, Liu Yu-rong, Mi Yong-feng, Ma Xin-yu

(*Steel Tube Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the paper, the effects of different quenching and tempering temperatures on the microstructure and mechanical properties of chrome-molybdenum steel are studied. The results showed that the tensile strength, elongation and impact energy of test steel were not changed much with the tempering temperature increased. The yield strength was more sensitive to tempering temperature and it decreased with the temperature increased. The optimum quenching and tempering temperatures were 900~920 ℃ and 690~710 ℃ respectively for hardening and tempering C90 steel grade steel tube with this grade of steel.

Key words: chrome-molybdenum steel; heat treatment; microstructure; property

C90钢级是API系列高钢级抗硫化氢腐蚀用石油套管。根据API 5CT标准要求,C90钢级对于硬度要求较高,不仅要求洛氏硬度单个值不能大于25.4,同时要求检验全壁厚硬度,且要求一个象限内任意两个平均硬度值之差不能超过4.0(平均硬度值为同一位置上3个洛氏硬度值的平均值)[1]。这对于钢管的热处理工艺提出了更高的要求,尤其在热处理温度控制上的要求更为严格。为生产满足API 5CT标准要求的C90钢级油套管,利用已设计开发的铬钼钢生产的规格为Φ244.48 mm×13.84 mm的C90钢级轧态钢管,在管材检验室进行系统的小炉热处理试验,期望通过实验室试验摸索为现场提供可行的工业热处理制度,以满足工业化生产的需求。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

取自主研发的铬钼钢生产的钢管,钢管的成品成分检验结果满足设计要求。非金属夹杂物分析结

* 收稿日期:2021-05-06

作者简介:宋 歌(1984-),女,吉林省长春市人,现从事金相组织检测工作。

果(见表1)也满足材料设计要求。API 5CT标准对C90钢级的力学性能要求如表2所示。其中,冲击韧性所用试样尺寸为7.5 mm×10 mm×55 mm的横向试样。

表1 铬钼钢的非金属夹杂物分析结果

A类		B类		C类		D类		D_S
粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	
0	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0.5
0	0.5	0	0	0	0	0	0.5	0

表2 API 5CT中对于钢管力学性能的要求

规格	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	冲击功(0 ℃)/J
Φ244.48 mm×13.84 mm	≥689	621~724	19	≥15

要进行热处理制度的摸索,应确定试验钢的相变点温度,查阅资料,得出临界点计算公式如下所示[2]:

$$A_{c1}(℃) = 723 - 26\,w[Si] + 20\,w[Cr] + 8\,w[W] + 16\,w[Mo] + 55\,w[V] - 14\,w[Cu] - 18\,w[Ni] - 12\,w[Mn]$$

$$A_{c3}(℃) = 910 - 320\,w[C] - 14\,w[Ni] - 12\,w[Cu] - 10\,w[Mn] + 5\,w[Cr] + 7\,w[W] + 14\,w[Mo] + 5\,w[V] + 18\,w[Si]$$

上式适用范围:$w[C]$ 0.09%~0.81%,$w[Si]$ 0.02%~1.49%,$w[Mn]$ 0.35%~1.79%,$w[Mo]$ 0~0.92%,$w[Cr]$ 0~1.55%,$w[Ni]$ 0~4.56%。

结合本钢种的化学成分计算结果如下:

A_{c1} = 742 ℃;A_{c3} = 835 ℃。

1.2 试验方法

试验材料从成品管上截取,在热处理后加工成标准拉伸试样(b = 25.4 mm,L_o = 50.8 mm)、横向夏比V型缺口冲击试样(7.5 mm×10 mm×55 mm)和洛氏硬度环试样[1],在KN600-J4A液压万能试验机上进行室温拉伸试验,测得不同热处理后试样的抗拉强度、屈服强度和延伸率。在RKP450GE冲击试验机上进行0 ℃的冲击试验,测定冲击功,在RB2000洛氏硬度试验机上检测不同热处理后的洛氏硬度值,在Observer.z1m显微镜上观察不同热处理工艺后的金相组织形貌(试样经4%硝酸酒精溶液腐蚀),进而研究不同热处理工艺对材料金相组织和性能的影响。

2 试验结果及分析

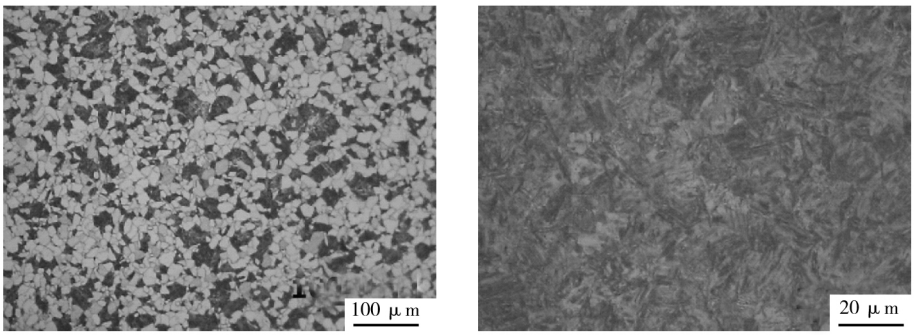
2.1 淬火温度对试验钢淬火硬度的影响

根据API 5CT要求,C90钢级淬火后的平均硬度值应等于或大于由式$HRC_{min} = 58 \times w[C] + 27$所确定的值。钢轧态和淬火后的金相组织如图1所示。根据该批钢的成品成分,计算得HRC_{min}为41.5。淬火温度的选择原则应为使铁素体能完全溶解于奥氏体中,奥氏体成分比较均匀,而奥氏体晶粒又不致于粗大,确定该钢种的淬火加热温度为A_{c3}+(30~50)℃[3]。通过公式计算该钢种的A_{c3}为835 ℃,本试验设计的淬火加热温度为870 ℃,880 ℃,900 ℃,920 ℃。保温时间为30 min。测定不同温度淬火后的洛氏硬度值如表3所示。

表3 试验钢不同温度回火的洛氏硬度结果

淬火温度/℃	外表面				中间				内表面				最大值	最小值
	单值			平均	单值			平均	单值			平均		
870	40.6	42.0	40.3	40.97	39.8	39.3	40.1	39.73	43.5	42.7	42.6	42.93	42.93	39.73
	39.3	40.0	40.1	39.80	40.6	40.0	40.4	40.33	44.5	44.1	44.3	44.30	44.30	39.80
880	39.5	40.6	40.8	40.30	44.4	44.8	44.7	44.63	42.4	42.2	42.3	42.30	44.63	40.30
	40.4	40.5	40.3	40.40	43.4	43.5	44.6	43.83	46.1	47.0	46.7	46.60	46.60	40.40
900	42.5	41.1	42.0	41.87	42.9	42.9	42.5	42.77	45.8	46.0	46.2	46.00	46.00	41.87
	42.0	42.0	42.0	42.00	44.4	44.3	44.0	44.23	44.2	44.2	44.2	44.20	44.23	42.00
920	42.6	42.8	44.2	43.20	42.1	42.3	44.2	42.87	46.3	47.2	46.4	46.63	46.63	42.87
	44.2	41.8	42.5	42.83	45.2	43.2	43.1	43.83	46.1	44.6	44.4	45.03	45.03	42.83

通过不同温度淬火后的洛氏硬度值可以看出，试验钢在淬火加热温度为 870 ℃和 880 ℃时，洛氏硬度平均值满足标准要求的淬火硬度值。但是洛氏硬度值不均匀，从 39.73 到 46.60 不等。主要还是加热温度不够，加热状态为奥氏体与铁素体二相组成，淬火冷却后铁素体保存下来，使得零件淬火后硬度不均匀，强度和硬度降低。而当加热温度达到 900 ℃以上时，能使工件心部在规定加热时间内保证达到 A_{c3} 点以上的温度，铁素体能完全溶解于奥氏体中，奥氏体成分比较均匀，冷却后得到均匀的硬度值。根据不同温度下测定的硬度值，能使钢淬火后硬度值满足标准要求的淬火温度应为 900 ℃以上。



（a）试验钢的轧态金相组织　　（b）试验钢淬火后的金相组织

图 1　试验钢轧态和淬火后的组织形貌

2.2　回火温度对组织和性能的影响

把钢在 900 ℃淬火后分别在 670 ℃、690 ℃、710 ℃、730 ℃温度下回火，保温 50 min 后测得不同回火温度后的力学性能和硬度值如表 4 所示。

表 4　试验钢不同温度回火的力学性能结果

回火温度/℃	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	冲击吸收功/J		
670	721	795	25	135	142	120
	755	797	24	137	124	132
690	715	812	32	152	149	149
	699	799	34	150	164	147
710	676	758	33	126	124	134
	685	765	35	122	121	125
730	637	746	30	129	119	123
	633	748	32	128	128	114

不同温度回火后，抗拉强度、伸长率和冲击吸收功变化不大，均能满足 C90 钢级性能要求。但是回火温度对于屈服强度的影响较为敏感，不同的回火温度，屈服强度的变化较为明显，当回火温度为 670 ℃时，屈服强度超出标准要求上限，在 690 ℃和 710 ℃回火后屈服强度结果较好，而回火温度升高到 730 ℃时，屈服强度贴近下限要求，在该温度下回火存在一定的风险。

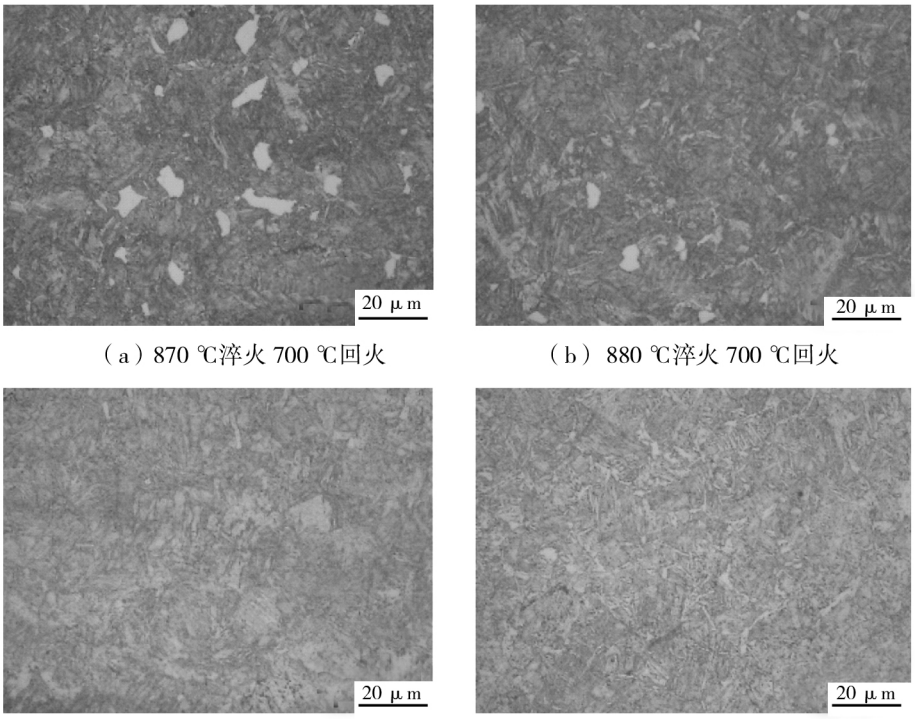
调质后的 C90 钢级要求检验一个象限全壁厚硬度。洛氏硬度值 HRC≤25.4，且 Φ244.48 mm × 13.84 mm 规格钢管要求一个象限内任意两个平均硬度值之差不能超过 4.0。经检验不同温度回火后的洛氏硬度如表 5 所示，洛氏硬度的检验单值和均匀度检验结果均能满足标准要求。由综合强度、硬度和冲击功的检验结果可知，900 ℃淬火后，合适的回火温度为 690 ~ 710 ℃。

表5 试验钢不同温度回火后的洛氏硬度结果

回火温度/℃	外表面				中间				内表面				最大值	最小值
	单值			平均	单值			平均	单值			平均		
670	17.9	16.9	15.7	16.83	19.4	20.1	21.5	20.33	20.2	21.5	18.7	20.13	20.33	16.83
	21.6	23.0	23.5	22.70	22.4	22.4	22.5	22.43	21.3	21.0	21.4	21.23	22.70	21.23
690	22.5	23.5	23.5	23.17	21.9	20.7	20.9	21.17	22.0	21.8	21.6	21.80	23.17	21.17
	18.2	18.7	18.8	18.57	21.9	20.6	20.6	21.03	19.3	21.1	21.7	20.70	21.03	18.57
710	23.7	24.1	23.0	23.60	25.0	24.3	24.5	24.60	24.3	23.5	22.5	23.43	24.60	23.43
	23.5	22.5	24.7	23.57	25.5	26.0	26.3	25.93	24.0	25.1	25.6	24.90	25.93	23.57
730	22.8	23.7	23.0	23.17	25.1	25.8	26.5	25.80	23.5	24.6	24.4	24.17	25.80	23.17
	23.0	23.6	23.3	23.30	24.7	24.1	24.5	24.43	22.3	22.0	23.7	22.67	24.43	22.67

2.3 淬火温度对组织和性能的影响

为验证淬火温度的选择是否合适，在对钢管在870 ℃、880 ℃、900 ℃、920 ℃淬火后再进行700 ℃的高温回火，观察金相组织，如图2所示。



（a）870 ℃淬火 700 ℃回火　（b）880 ℃淬火 700 ℃回火

（c）900 ℃淬火 700 ℃回火　（d）920 ℃淬火 700 ℃回火

图2 试验钢在不同温度淬火并700 ℃回火后的组织形貌

可以看出，当淬火温度较低时，钢淬火并回火后得到的组织为铁素体和回火索氏体组织，这是因为淬火温度较低时，铁素体未能完全溶解于奥氏体中，淬火后仍以铁素体的状态保存下来，铁素体的存在将影响钢调质后的洛氏硬度值，使洛氏硬度结果不均匀，达不到标准要求的差值（小于4.0），而实际检验的结果如表6所示，也验证了该结果。当淬火温度达到900 ℃并回火后可以得到全部回火索氏体组织，均匀的回火索氏体组织能很好的满足C90钢级所有性能要求。所以钢的淬火温度不能低于900 ℃。

（下转第57页）

(2) 经过 980 ℃正火 +900 ℃正火处理可消除魏氏组织,且组织晶粒细小,晶粒度为 6 级,无混晶现象。钢管的纵向冲击功大于 120 J,达到 GB 6479—2013标准中冲击值下限的 3 倍,且其他力学性能指标均满足标准要求。

参 考 文 献

[1] GB/T 6479—2013,高压化肥设备用无缝钢管[S].

[2] 程巨强. 正火消除准贝氏体铸钢组织遗传性的研究[J]. 铸造技术,2002,23(3):187 – 188,192.

[3] 史小荣. 无缝钢管组织缺陷及对力学性能的影响[J]. 轧钢,2000,17(5):24 – 25.

[4] 汤海芳. Q345R 钢板断后伸长率不合格原因分析[J]. 理化检验物理分册,2016,52(4):287 – 290.

[5] 田君. 27SiMn 钢管中魏氏组织的防止措施[J]. 金属热处理,2006,31(12):87 – 88.

[6] 宁玫. 魏氏组织形成机理及对钢管性能影响的分析研究[J]. 天津冶金,2008,(5):118 – 124.

[7] 王荣. 失效分析应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社,2020.

[8] 张志慧. Q355C 热轧 H 型钢低温冲击性能不合格的原因分析与对策[J]. 热加工工艺,2020,49(13):156 – 158,162.

[9] 李智超. 亚共析钢魏氏组织的组织遗传现象研究[J]. 兵器材料科学与工程,2004,27(2):12 – 14.

[10] 朱天寿. 魏氏组织对 20# 碳钢 H_2S 应力腐蚀开裂性能的影响[J]. 天然气工业,2006,26(9):122 – 124.

[11] 崔忠圻. 金属学及热处理[M]. 北京: 机械工业出版社,2008.

(上接第 48 页)

表 6　试验钢不同温度淬火并 700 ℃回火后的洛氏硬度检验结果

热处理制度	外表面				中间				内表面				最大值	最小值	判定
	单值			平均	单值			平均	单值			平均			
870 ℃淬火	16.7	15.3	14.9	15.63	24.7	25.3	25.1	25.03	23.7	22.9	20.9	22.50	25.03	15.63	不合格
700 ℃回火	19.1	19.8	19.5	19.47	23.4	23.9	22.4	23.23	25.1	24.1	25.4	24.87	24.87	19.47	不合格
880 ℃淬火	20.1	20.5	21.4	20.67	23.5	23.8	24.5	23.93	23.4	23.5	23.1	23.33	23.93	20.67	合格
700 ℃回火	19.1	19.6	20.4	19.70	23.2	23.7	24.6	23.83	22.1	22.5	22.2	22.27	23.83	19.70	不合格
900 ℃淬火	22.1	22.0	21.0	21.70	24.0	24.5	24.6	24.37	25.1	26.3	25.0	25.47	25.47	21.70	合格
700 ℃回火	22.0	21.8	22.1	21.97	22.8	23.4	22.6	22.93	24.8	24.7	25.3	24.93	24.93	21.97	合格
920 ℃淬火	23.1	24.0	23.4	23.50	24.4	24.4	25.4	24.73	26.1	26.7	26.0	26.27	26.27	23.50	合格
700 ℃回火	20.9	21.9	21.2	21.33	23.3	22.1	22.1	22.50	23.0	22.8	22.9	22.90	22.90	21.33	合格

3　结论

(1) 随着回火温度的升高,试验钢的抗拉强度、伸长率和冲击功变化不大。屈服强度对于回火温度较为敏感,随温度的升高屈服强度明显下降。

(2) 根据小炉热处理后性能分析,建议用该设计钢种铬钼钢调试 C90 钢级钢管采用合适的淬火温度为 900 ~ 920 ℃,回火温度为 690 ~ 710 ℃,加热时间应根据现场实际管批的规格进行计算。

参 考 文 献

[1] API Spec 5CT. Specification for Casing and Tubing[S].

[2] 赵品,谢辅洲,孙振国. 材料科学基础教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社,2003.

[3] 刘瑞堂,刘文博. 工程材料力学性能[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社,2001.