

热处理工艺对 10Cr5MoVRE 热轧无缝 钢管组织性能的影响

闫升宇, 石晓霞, 詹 飞, 雷 鸣, 张海燕

(内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管分公司, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章以热轧态 10Cr5MoVRE 无缝钢管为研究对象, 开展淬火温度、淬火保温时间、回火温度、回火保温时间对试验钢组织性能的影响研究。研究结果表明, 随着淬火温度的提高, 试验钢屈服强度、抗拉强度及硬度 (HRC) 呈先升高后降低的趋势, 延伸率、冲击功随淬火温度的提高而降低; 随着淬火保温时间的延长, 试验钢屈服强度、抗拉强度及硬度 (HRC) 呈降低的趋势, 延伸率升高, 冲击功呈先增加后降低的趋势; 随着回火温度的提高, 试验钢屈服强度提高约 17.5%, 抗拉强度提高约 18.2%, 冲击功降幅为 8.1%, 随着回火保温时间的延长, 试验钢强度、硬度呈降低趋势, 冲击功逐渐增加。

关键词: 热处理; 10Cr5MoVRE; 钢管; 力学性能; 微观组织

中图分类号: TG141.2

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)04-0059-07

Influences of Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of 10Cr5MoVRE Hot Rolled Seamless Steel Pipe

Yan Shengyu, Shi Xiaoxia, Zhan Fei, Lei Ming, Zhang Haiyan

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

Abstract: In the paper, the study on influences of quenching temperature, holding time of quenching, tempering temperature and holding time of tempering on microstructure and properties of test steel is carried out by taking as-hot-rolled 10Cr5MoVRE seamless steel pipe as the object of study. The study results showed that the yield strength, tensile strength and hardness (HRC) of test steel were first increased and then decreased while elongation and impact energy were decreased with the increase of quenching temperature; yield strength, tensile strength and hardness (HRC) of test steel were decreased while elongation was increased as well as impact energy was first increased and then decreased with the extension of holding time of quenching; yield strength of test steel was increased by about 17.5%, tensile strength was increased by about 18.2% and impact energy was decreased by 8.1% with the increase of tempering temperature; strength and hardness of test steel were decreased while impact energy was gradually increased with the extension of holding time of tempering.

Key words: heat treatment; 10Cr5MoVRE; steel pipe; mechanical properties; microstructure

随着我国石油资源需求量的不断攀升, 油气开采力度逐年增加, 油气勘探开发环境也趋于恶

劣^[1-3]。油套管作为油气开采的关键设备, 在石油天然气开采领域占据非常重要的位置, 油管管的性

能与质量不仅是油气田顺产的保证,同时也是环境与人员安全的保障。油气开采过程中,油套管消耗巨大,就我国的实际情况而言^[4-5],每钻探 1 m 深度所需的套管重量约为 48 kg,油管重量则为 10 kg。另外,国内约 1/3 的油气田用油井管均存在 H₂S 和 CO₂ 腐蚀问题,随着压裂技术、趋油趋气等油气开发技术的不断提高,耐蚀油套管需求逐年增加^[6-9]。10Cr5MoVRE 作为抗 H₂S 和 CO₂ 腐蚀油套管专用中合金钢,不仅要求有良好的耐蚀性,同时还应保证良好的综合力学性能。回火索氏体是耐蚀油套管显微组织的首选,中低合金钢获得稳定回火索氏体的有效手段是调质热处理,然而,调质热处理工艺是否合

理不仅影响着钢铁材料各项性能指标,同时还直接影响能源消耗及生产效率。以 10Cr5MoVRE 热轧无缝钢管(以下简称试验钢)为研究对象,基于相变转变点,设计了不同的调质热处理工艺,开展淬火温度、淬火保温时间、回火温度、回火保温时间对试验钢组织性能的影响研究,为现场热处理工艺制定及控制提供技术支持。

1 试验方法

选用规格为 $\Phi 88.9 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm}$ 的 10Cr5MoVRE 热轧无缝管,具体化学成分见表 1。

表 1 试验钢化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo + V + Al	RE
0.10	0.28	0.41	0.014	0.002	4.99	0.562	0.005

切取 $\Phi 88.9 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 热轧态无缝管 1 支,沿轧制方向切取 $300 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm}$ 的长条样,使用高频电阻炉进行调质热处理,采用热膨胀仪对试验钢的 CCT 曲线进行了测定,该试验钢的 A_{c3} 为 820 °C,设计的热处理工艺见表 2。热处理后按照 API Spec 5CT《套管和油管技术规范》^[10] 要求加工拉伸试样、冲击试样及硬度试样,显微组织试样选取冲击试样残样。拉伸性能检测采用 WAW-600C 型液压伺服拉伸机,试验温度为室温,冲击功检测采用 NI 750 摆锤试验机,试验温度为 $0 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$,洛氏硬度检测采用 LC-200RB 全自动洛氏硬度计,冲击残样利用线切割机切除断口,垂直轧制方向用不同目数砂纸打磨,抛光机抛光后用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀,采用蔡司显微镜观察显微组织。

表 2 热处理工艺

编号	淬火温度 /°C	淬火保温 时间/min	回火温度 /°C	回火保温 时间/min
1#	830	50	700	90
2#	870	50	700	90
3#	910	50	700	90
4#	950	50	700	90
5#	910	25	700	90
6#	910	75	700	90
7#	910	50	670	90
8#	910	50	640	90
9#	910	50	610	90
10#	910	50	700	60
11#	910	50	700	120

2 试验结果及分析

2.1 淬火温度对试验钢组织性能的影响

淬火温度为 830 ~ 950 °C,淬火保温时间为 50 min,回火温度为 700 °C,回火保温时间为 90 min,不同淬火温度条件下,试验钢的力学性能测试结果见表 3,淬火温度对试验钢屈服强度、抗拉强度、延伸率的影响见图 1,淬火温度对试验钢的冲击功及硬度(HRC)的影响见图 2,不同淬火温度条件下,试验钢显微组织见图 3。

从表 3 可以看出,830 ~ 950 °C 淬火 + 高温回火后的试验钢表现出了良好的拉伸性能和冲击性能,较低的 HRC 更有利于油套管管端螺纹加工。830 °C 淬火的 1# 试验钢,屈服强度差值为 53 MPa,抗拉强度差值为 71 MPa,870 °C 淬火的 2# 试验钢,屈服强度差值为 12 MPa,抗拉强度差值为 16 MPa;910 °C 淬火的 3# 试验钢,屈服强度差值为 1 MPa,抗拉强度差值为 6 MPa;950 °C 淬火的 4# 试验钢,屈服强度差值为 6 MPa,抗拉强度差值为 9 MPa。随着淬火温度的增加,强度差值呈先降低后增加的趋势,910 °C 淬火,试验钢表现出良好的热处理稳定性。从图 1 和图 2 可以看出,在 830 ~ 950 °C 范围内,随着淬火温度的提高,试验钢屈服强度、抗拉强度及硬度(HRC)呈先升高后降低的趋势,延伸率及冲击功则随着淬火温度的提高而降低。从图 3 可以看出,

830 °C 淬火的 1[#] 试验钢显微组织为回火索氏体 + 先共析铁素体, A_{c3} 为 820 °C, 试验钢出炉到水淬炉之间存在温损, 试验钢显微组织中沿晶界析出先共析铁素体, 铁素体塑性变形的能力强, 1[#] 试验钢表现出较高的延伸率, 同时也是 1[#] 试验钢强度差值相对较大的主要原因。2[#]、3[#] 试验钢显微组织均为回火索氏体, 3[#] 试验钢强度、硬度均高于 2[#] 试验钢, 但延伸

率和冲击功低于 2[#] 试验钢。随着淬火温度的提高, 奥氏体化过程加速了碳化物的溶解, 固溶强化效果得到加强。950 °C 淬火的试验钢相较于 910 °C 淬火的试验钢, 晶粒尺寸明显增大, 950 °C 淬火的试验钢强度及韧性均高于 910 °C 淬火的试验钢, 晶粒粗化削弱了试验钢强化韧化的效果。

表 3 不同淬火温度条件下试验钢力学性能检测结果

编号	$R_{t0.5}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$KV_8(0\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$	HRC
1 [#]	505,558	612,683	35,34	353,341,335	14.7,14.8,13.6,15.1,16.4
2 [#]	629,641	728,746	34,32	326,329,327	17.4,16.8,16.9,17.4,18.1
3 [#]	652,653	768,762	32,33	317,314,329	18.2,18.8,19.9,19.0,19.3
4 [#]	643,649	749,740	31,31	303,312,302	16.4,16.5,17.3,17.6,17.7

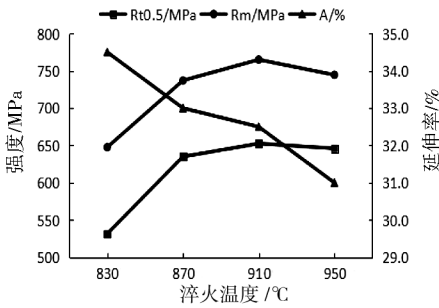


图 1 淬火温度对试验钢拉伸性能的影响

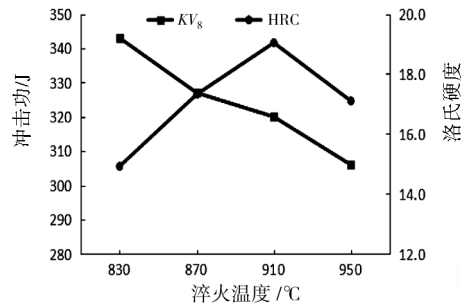
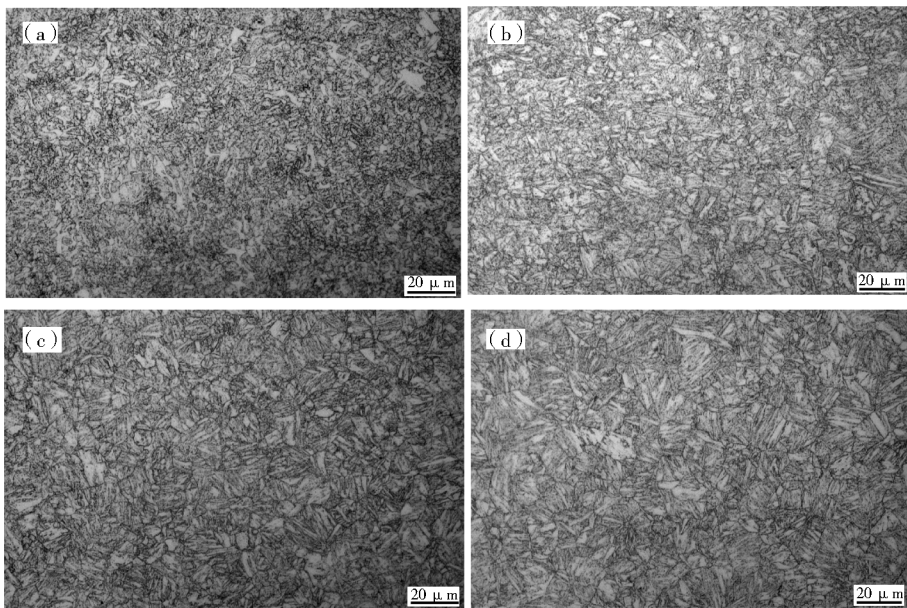


图 2 淬火温度对试验冲击功、硬度的影响



(a)1[#]; (b)2[#]; (c)3[#]; (d)4[#]

图 3 不同淬火温度条件下试验钢显微组织

2.2 淬火保温时间对试验钢组织性能的影响

淬火温度为 910 ℃,保温时间为 25 ~ 70 min,回火温度为 700 ℃,回火保温时间为 90 min。不同淬火保温时间条件下,试验钢的力学性能测试结果见

表 4,淬火保温时间对试验钢屈服强度、抗拉强度、延伸率的影响见图 4,淬火保温时间对冲击功及硬度(HRC)的影响见图 5,不同淬火保温时间条件下,试验钢显微组织见图 6。

表 4 不同淬火保温时间试验钢力学性能检测结果

编号	$R_{t0.5}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$KV_8(0\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$	HRC
5#	674,671	799,791	33,31	300,311,306	18.9,19.2,18.8,20.3,19.6
3#	652,653	768,762	32,33	317,314,329	18.2,18.8,19.9,19.0,19.3
6#	632,592	725,699	33,34	312,313,317	18.3,17.2,16.0,16.8,18.3

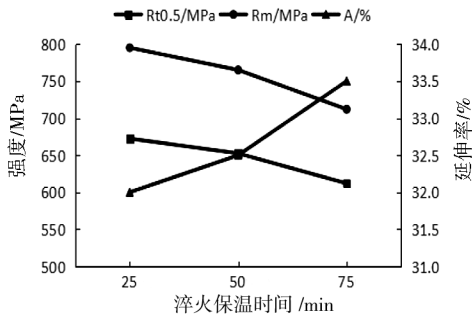


图 4 淬火保温时间对试验钢拉伸性能的影响

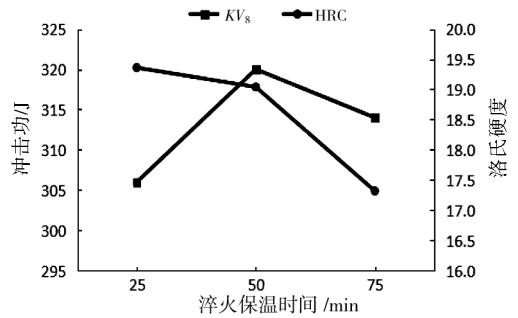
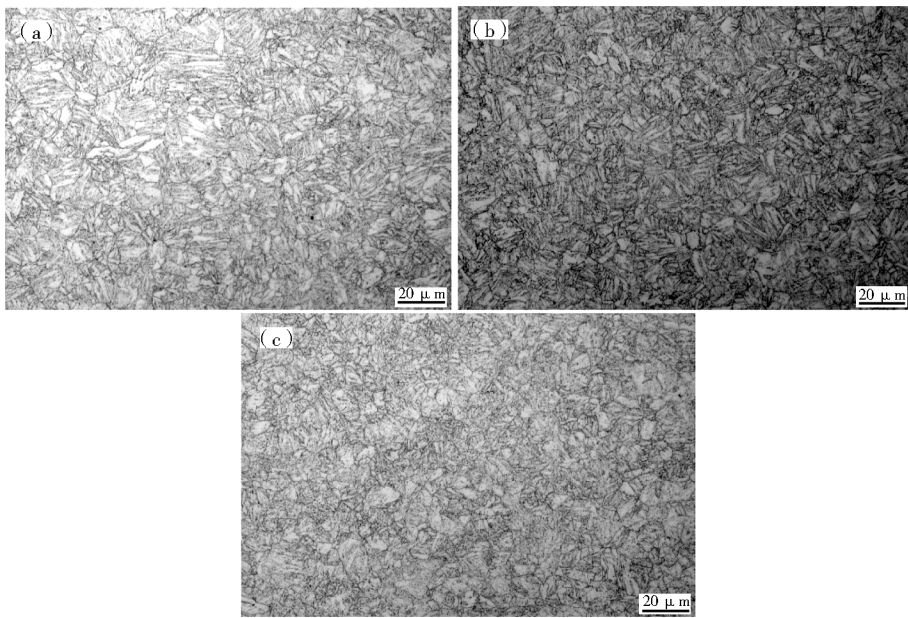


图 5 淬火保温时间对试验冲击功、硬度的影响



(a)5#;(b)3#;(c)6#

图 6 不同淬火保温时间条件下试验钢微观组织

从表 4 看出,保温时间为 25 min 的 5# 试验钢,屈服强度差值为 3 MPa,抗拉强度差值为 8 MPa,保温时间为 50 min 的 3# 试验钢,屈服强度差值为 1 MPa,抗拉强度差值为 6 MPa;保温时间为 75 min

的 6# 试验钢,屈服强度差值为 60 MPa,抗拉强度差值为 69 MPa。随着保温时间的延长,强度差值呈先降低后提高的趋势。从图 4 和图 5 可以看出,保温时间在 25 ~ 75 min 范围内,随着保温时间的延长,

试验钢屈服强度、抗拉强度及硬度(HRC)呈降低的趋势,延伸率呈升高的趋势,冲击功则先提高后降低。从图6可以看出,5[#]试验钢显微组织为回火索氏体+少量铁素体+少量贝氏体,贝氏体有高的强度与硬度,其冲击功及延伸率相对较差,5[#]试验钢中存在少量贝氏体及铁素体的主要原因为试验钢保温25 min不能充分奥氏体化,轧态组织贝氏体与铁素体有极少部分保留下来,导致5[#]试验钢强度、硬度较高,而韧性较差。3[#]、6[#]试验钢显微组织均为回火索氏体,相较于3[#]试验钢,6[#]试验钢部分晶粒明显粗

化,影响晶粒长大的主要因素为高温长时间保温,晶粒粗化也是6[#]试验钢强度及韧性均降低的关键所在。

2.3 回火温度对试验钢组织性能的影响

淬火温度为910℃,加热保温时间为50 min,回火温度为610~700℃,回火保温时间为90 min。不同回火温度条件下,试验钢的力学性能测试结果见表5,回火温度对屈服强度、抗拉强度、延伸率的影响见图7,对冲击功及硬度(HRC)的影响见图8,不同回火温度条件下,试验钢显微组织见图9。

表5 不同回火温度条件下试验钢力学性能检测结果

编号	$R_{t0.5}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$KV_8(0^\circ\text{C})/\text{J}$	HRC
3 [#]	652,653	768,762	32,33	317,314,329	18.2,18.8,19.9,19.0,19.3
7 [#]	665,672	781,778	28,28	314,311,313	19.3,20.4,21.4,21.1,21.4
8 [#]	719,749	838,870	28,28	302,300,314	22.8,22.2,23.6,23.8,24.7
9 [#]	780,753	909,900	27,27	290,296,296	27.9,28.6,28.1,28.2,27.8

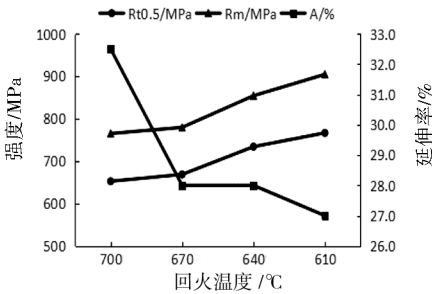


图7 回火温度对试验钢拉伸性能的影响

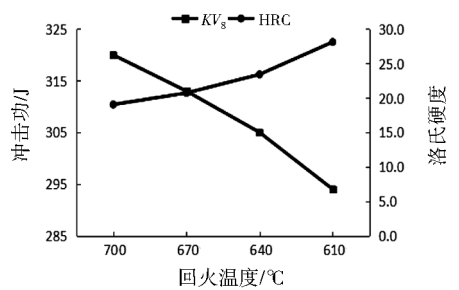
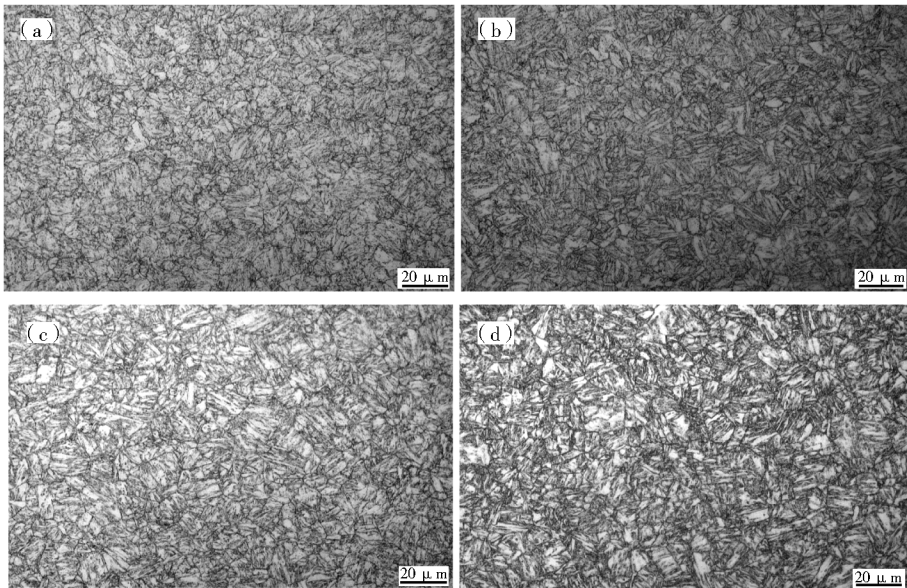


图8 回火温度对试验冲击功、硬度的影响



(a)3[#];(b)7[#];(c)8[#];(d)9[#]

图9 不同回火温度条件下试验钢微观组织

从表 5 及图 7、图 8 可以看出,随着回火温度的降低,试验钢屈服强度、抗拉强度及硬度逐渐提高,延伸率及冲击功逐渐降低。回火温度从 610 °C 提高到 700 °C,屈服强度增加约 17.5%,抗拉强度增加约 18.2%,冲击功降幅为 8.1%。结合 API Spec 5CT 各钢级各项力学性能要求,根据不同回火温度对试验钢力学性能的影响,可以设计 80ksi、90ksi、95ksi 及 110ksi 钢级油套管热处理回火工艺。高于 700 °C 回火,各项力学性能满足 80ksi 油套管技术要求,670 °C 回火,各项力学性能满足 90ksi 油套管技术要求,640 °C 回火,各项力学性能满足 95ksi 油套管技术要求,低于 610 °C 回火,各项力学性能满足 110ksi 油套管技术要求。从图 9 可以看出,3[#]、7[#]、8[#] 及 9[#] 试验钢显微组织均为回火索氏体,淬火马氏体高温回火是从 α -Fe 的饱和固溶体中析出碳化物,进而聚集长大形成颗粒状渗碳体的过程。回火温度低时,碳化物颗粒细小,随着回火温度的升高,碳化物逐渐长大。另外,高温回火时间足够前提下,基体 α -Fe 相会发生再结晶,趋向等轴化,位错密度很低的新等轴晶粒逐渐取代板条状晶粒,形成渗碳体、铁素体机械混合的复相回火索氏体。如 3[#] 试验钢在 700 °C 条件下回火,碳化物在铁素体基体上分布均匀,晶粒趋于等轴,晶界相对模糊,随着回火温度的降低,原板条状马氏体形貌得以保留,在晶界和板条

界上分布的碳化物数量明显增多,晶界碳化物的增多明显弱化了晶界之间的作用力,冲击功逐渐降低。

2.4 回火保温时间对试验钢组织性能的影响

淬火温度为 910 °C,加热保温时间为 50 min,回火温度为 700 °C,回火保温时间为 60 ~ 120 min。不同回火保温时间条件下试验钢的力学性能测试结果见表 6,回火保温时间对试验钢屈服强度、抗拉强度、延伸率的影响见图 10,对冲击功及硬度(HRC)的影响见图 11,不同回火保温时间条件下,试验钢显微组织见图 12。

从表 6 可以看出,回火保温时间为 60 min 的 10[#] 试验钢,屈服强度差值为 24 MPa,抗拉强度差值为 11 MPa,回火保温时间为 90 min 的 3[#] 试验钢,屈服强度差值为 1 MPa,抗拉强度差值为 6 MPa;回火保温时间为 120 min 的 11[#] 试验钢,屈服强度差值为 3 MPa,抗拉强度差值为 19 MPa。从图 10、图 11 可以看出,随着回火保温时间的延长,试验钢屈服强度、抗拉强度及硬度呈降低趋势,回火保温时间从 60 min 延长至 120 min,延伸率变化不明显,但冲击功随着回火保温时间的延长逐渐提高。回火保温时间从 60 min 延长到 120 min,屈服强度降低 5.9%,抗拉强度降低 6.1%,硬度降低 15.4%,冲击功提高 11.0%。

表 6 不同回火保温时间条件下试验钢力学性能检测结果

编号	$R_{t0.5}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$KV_8/(0^\circ\text{C},\text{J})$	HRC
10 [#]	652,676	768,779	29,31	298,294,292	20.9,20.6,21.1,19.3,19.5
3 [#]	652,653	768,762	32,33	317,314,329	18.2,18.8,19.9,19.0,19.3
11 [#]	626,623	736,717	33,32	332,326,323	17.5,17.4,16.2,16.9,17.8

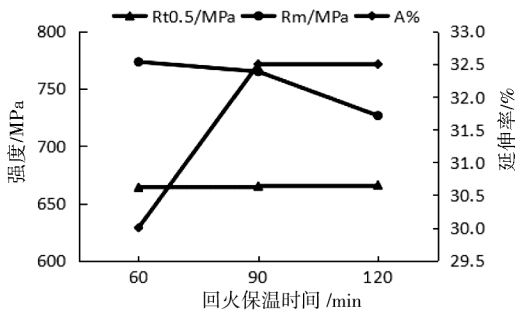


图 10 回火保温时间对试验钢拉伸性能的影响

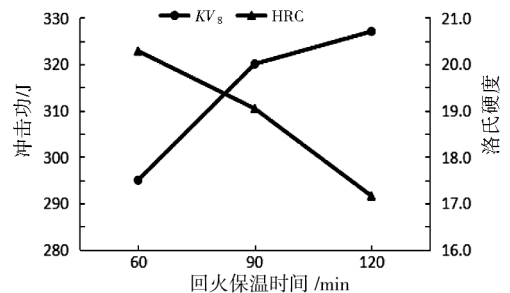


图 11 回火保温时间对试验钢冲击功、硬度的影响

从图 12 可以看出,3[#]、10[#]、11[#] 试验钢显微组织均为回火索氏体。回火温度与回火保温时间对试验钢力学性能的影响呈此消彼长的关系,较高的回火温度配较短的回火保温时间,与较低的回火温度配较长的回火保温时间均可保证材料的力学性能,回火温度高,回火保温时间短,回火稳定性相对较差,

回火温度低,回火保温时间长,回火稳定性较好。相比较而言,低的回火温度配置长的保温时间,延长产品生产制备周期,不利于高效生产。考虑淬火保温时间为 50 min,结合现场淬火炉料位与回火炉料位比接近 2:3,回火保温时间为 90 min 最佳。



(a)10[#];(b)3[#];(c)11[#]

图 12 不同回火保温时间条件下试验钢微观组织

3 结论

(1)在 830 ~ 950 °C 温度范围内,随着淬火温度的提高,试验钢屈服强度、抗拉强度及硬度(HRC)呈先升高后降低的趋势,延伸率及冲击功则随着淬火温度的提高而降低,910 °C 淬火材料综合力学性能最优。

(2)淬火保温时间在 25 ~ 70 min 范围内,随着淬火保温时间的延长,试验钢屈服强度、抗拉强度及硬度(HRC)呈降低的趋势,延伸率升高,冲击功呈先升高后降低的趋势,50 min 的淬火保温时间,可保证试验钢均热的同时避免晶粒粗化。

(3)在 610 ~ 700 °C 温度范围内,随着回火温度的提高,试验钢屈服强度、抗拉强度及硬度(HRC)呈降低趋势,延伸率和冲击功呈升高趋势。

(4)高回火温度结合短回火保温时间与低回火温度结合长回火保温时间,试验钢均可获得回火索氏体,保证试验钢具有良好的综合性能,为生产高效,优选回火保温时间为 90 min。

参 考 文 献

[1] 李鹤林,韩礼红. 刍议我国油井管产业的发展方向(续)[J]. 焊管,2009,32(5):11-14.
 [2] 高建中. 我国石油管材国产化回顾与思考[J]. 石油管材与仪器,2021,7(2):1-8,14.
 [3] 范仲涛,高秀华,袁国,等. 轧后冷却和热处理

工艺对 Nb 微合金化 V140 油井管用钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2020,45(12):1-6.

- [4] 李鹤林. 油井管发展动向及若干热点问题(上)[J]. 钢管,2005,34(6):1-6.
 [5] 李鹤林,张亚平,韩礼红. 油井管发展动向及高性能油井管国产化[M]. 北京:石油工业出版社,2007.
 [5] 孙建波,苏鑫,张勇. 高温高压 H₂S/CO₂ 腐蚀产物膜对低铬钢氢渗透行为的影响[J]. 表面技术,2018,47(6):17-23.
 [6] 裘智超,刘翔,赵志宏,等. CO₂/H₂S 分压比对 BG90SS 材质腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护,2013,34(11):981-984.
 [7] 冯耀荣,韩礼红,张福祥,等. 油气井管柱完整性技术研究进展与展望[J]. 天然气工业,2014,34(11):73-81.
 [8] Jiang X, Zheng Y G, Qu D R, et al. Effect of calcium ions on pitting corrosion and inhibition performances in CO₂ corrosion of N80 steel[J]. Corrosion Science,2006,48(10):3091-3108.
 [9] 刘婉颖,李金宇,高科超. 温度对 N80 钢在饱和 CO₂ 模拟地层水下腐蚀行为的影响及机理[J]. 表面技术,2022,51(8):353-362.
 [10] API Spec 5CT,套管和油管 10th[S].