

热处理工艺对 100 mm 特厚 07MnCrMoVR 水电钢板组织性能的影响

冯路路^{1,2} 乔文玮³ 鲁修宇⁴

(1 荆楚理工学院机械工程学院, 荆门 448000; 2 武汉科技大学高性能钢铁材料及其应用省部共建协同创新中心, 武汉 430081; 3 江苏华能电缆股份有限公司, 高邮 225613; 4 武汉钢铁(集团)研究院, 武汉 430080)

摘要 对 07MnCrMoR 水电钢板的淬透性曲线进行了测定, 利用淬火机和热处理炉对 100 mm 厚试验钢板进行了淬火和回火试验, 并对试验钢进行了组织观察和力学性能测定。结果表明, 随着试验钢距水冷端的距离增大, 淬火组织由马氏体转变为粒状贝氏体, 距离端部 50 mm 处转变为铁素体和粒状贝氏体的混合组织。试验钢板利用淬火机淬火后得到板条贝氏体 + 粒状贝氏体 + 先共析铁素体, 回火后转变为铁素体 + 粒状贝氏体, 同时大量的碳化物在铁素体基体和晶界处析出。试验钢最合理的热处理工艺为 930 °C 30 min 水冷淬火, 660 °C 60 min 空冷回火。

关键词 特厚规格 07MnCrMoR 水电钢 调质 端淬试验

Effect of Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of 100 mm Ultra-thick 07MnCrMoVR Hydropower Steel Plate

Feng Lulu^{1,2}, Qiao Wenwei³ and Lu Xiuyu⁴

(1 School of Mechanical Engineering, Jing Chu University of Technology, Jingmen 448000; 2 Collaborative Innovation Center for Advanced Steels, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 3 Jiangsu Huaneng Cable Co Ltd, Gaoyou 225613; 4 Research Institute of Wuhan Iron & Steel Group, Wuhan 430080)

Abstract The curves of hardenability of 07MnCrMoR hydropower steel plate are tested, and the 100 mm thick tested steel plate is quenched and tempered by heat treatment furnace and quenching equipment, and the structure of and mechanical properties of test steel are observed and measured. The results show that with increasing the distance from cooling end the microstructure of tested steel transforms from martensite to granular bainite, and transforms to ferrite and granular bainite microstructure at 50 mm from the water-cooled end. The lath bainite + granular bainite + pre-eutectoid ferrite are obtained in test steel plate after quenching by quenching equipment, then transforming into ferrite + granular bainite after tempered, and a large number of carbides precipitating at ferrite matrix and grain boundary. The most reasonable heat treatment process of the test steel is water-cooled quenching at 930 °C for 30 min and air-cooled at 660 °C for 60 min.

Material Index Ultra-thick, 07MnCrMoR, Hydropower Steel, Quenched and Tempered; End Quenching Test

水电站的压力岔管以及蜗壳的月牙肋板需要大量用到特厚 07MnCrMoVR 钢板, 三峡三期建设中已经使用到 70 mm 厚的蜗壳钢板。长期以来特厚规格的水电钢依赖于日本进口, 实现特厚 07MnCrMoVR 钢板的国产化备受关注。肖桂芝等人^[1]研究了调制型 610 MPa 级储油罐用钢的生产工艺, 钢板厚度仅为 21 mm。孙卫华等人^[2]则研究了非调质型水电钢的在线生产工艺, 钢板厚度达到 32 mm。而李新玲等人^[3-4]采用 TMCP + 回火工艺对水电钢的减量化生产工艺进行了研究, 厚度局限在 50 mm 以下。石昆等人^[5]则研究了 07MnNiMoDR 钢材的脆性断裂机制, 认为不均匀的贝氏体组织是影响脆性断裂的因素。当前特厚规格 (≥100 mm) 水电站用钢的生产还处于试制阶段, 如何提高特厚规格钢板的淬透性成为研究的重点。本试验采用低碳成分设计, 添加高淬透性元素进行合金

化, 结合端淬实验对 100 mm 特厚钢 07MnCrMoVR 的淬透性进行了研究, 并利用淬火机和工业热处理炉对 100 mm 特厚水电站用钢进行了生产试制, 并讨论了热处理工艺对其组织性能的影响。

1 试验材料及方法

试验钢板为钢厂轧制车间生产的 100 mm 特厚 07MnCrMoVR 水电钢板 (表 1)。从表 1 中可以看出, 试验钢采用低 C 成分设计, 添加一定量的 Mn 元素与 S 元素形成 MnS 防止钢的热脆性, 采用 Nb、V、Ti 微合金化处理, 细化晶粒的同时可以构成碳或碳

表 1 试验钢的化学成分 / %
Table 1 Composition analysis of tested steel / %

C	Si	Mn	P	S	Alt	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo
0.072	0.25	1.46	0.006	0.002	0.05	0.046	0.054	0.017	0.28	0.36	0.22

注: Pcm/% = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B = 0.19

表 2 淬火机冷却水参数控制模型
Table 2 Cooling water parameter control model of quenching equipment

项目	集水管上部									集水管下部										
	1#	2#	3#	7#	8#	9#	13#	15#	17#	19#	4#	5#	6#	10#	11#	12#	14#	16#	18#	20#
高压端,水流量/(mm ³ ·h ⁻¹)	170	619	170	95	490	95	490				221	880	221	90	500	90	650			
低压端,开口度/%								30	30	30								50	50	50

氮化物在回火时析出产生沉淀强化的作用, Ti 还可以改善焊接热影响区的韧性。添加 Cr、Mo 元素来提高钢板的淬透性, Mo 还能抑制杂质元素向奥氏体晶界的偏聚, 降低高温回火脆性的倾向。同时添加 Ni 元素来改善钢板的低温冲击韧性, 降低韧脆转变温度^[6]。试验钢的焊接裂纹敏感性指数(Pcm)为 0.19%, 符合标准小于 0.22% 的要求。

在试验钢板上取样, 加工成 Φ25 mm × 100 mm 试样进行端淬试验^[7]。同时在距离端部 1.5、3、5、25、50 mm 处取样观察微观组织形貌。

结合淬透性曲线制定试验钢的淬火工艺, 淬火加热温度为 930 °C, 保温 30 min 后采用淬火机进行水冷淬火, 淬火机辊道速度为 1.5 m/min, 淬火机冷却水水量参数控制模型如表 2 所示。淬火完成后取样检测力学性能和观察微观组织形貌。

试样经 640、660、680、700 °C 60 min 回火, 回火后取样检测力学性能和观察组织。用光学显微镜(Olympus, PEM3-3)观察组织。拉伸性能按照 GB/T228《金属材料室温拉伸试验方法》进行检测, 低温冲击韧性按照标准 GB/T229《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行检测。

2 试验结果

2.1 试验钢淬透性曲线和金相显微组织

图 1 为试验钢淬透性曲线图, 图 2 为距水冷端部不同位置的显微组织, 从图 1 和图 2 中可以看出, 试验钢的淬硬倾向不大, 距水冷端 1.5 mm 处 HV10 硬度最大值可以达到 460 以上, 转变组织为马氏体组织, 距水冷端 3~5 mm 处 HV10 硬度最大

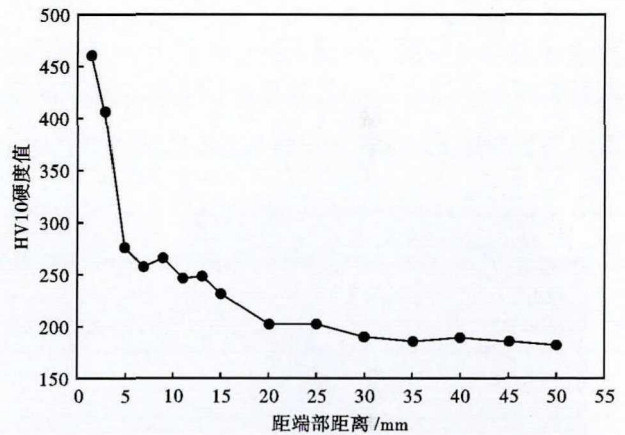


图 1 试验钢 07MnCrMoVR 淬透性曲线图
Fig. 1 Hardenability curve of tested steel 07MnCrMoVR

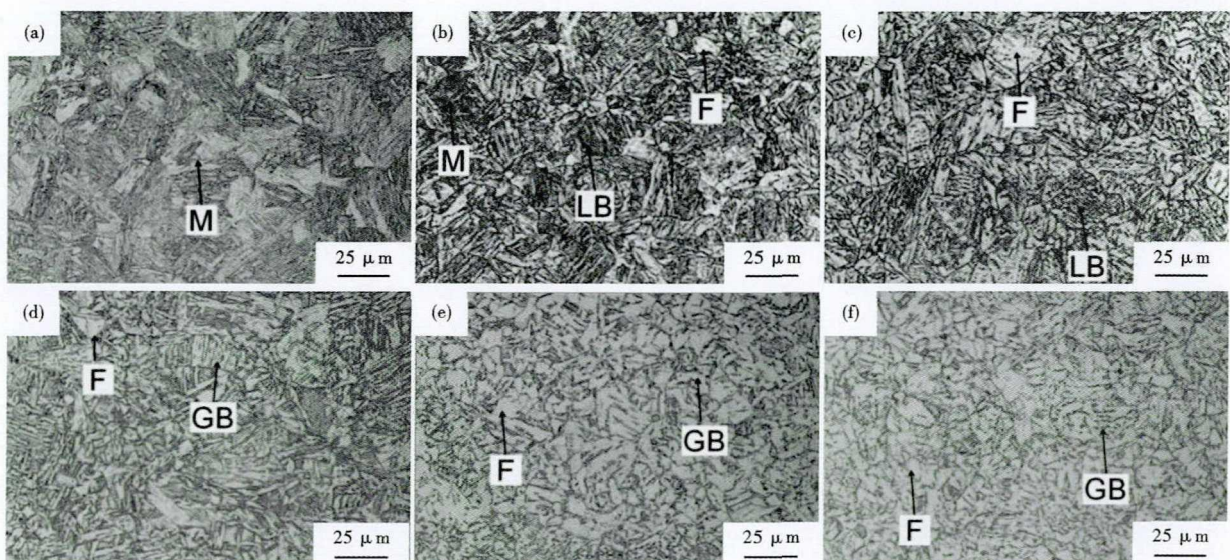


图 2 试验钢 07MnCrMoVR 距水冷端距离 (a) 1.5 mm; (b) 3 mm; (c) 5 mm; (d) 20 mm; (e) 35 mm; (f) 50 mm 光学显微组织
Fig. 2 Optical microstructure at distance (a) 1.5 mm; (b) 3 mm; (c) 5 mm; (d) 20 mm; (e) 35 mm; (f) 50 mm from water cooling end of tested steel 07MnCrMoVR

值下降至 400 以下, HV10 硬度最小值不到 250, 转变组织中出现板条贝氏体。在距水冷端 5 mm 处组织为板条贝氏体 + 铁素体, 随着距水冷端距离逐渐增加, 在 5 ~ 20 mm, HV10 硬度值逐渐下降至 200 左右。距水冷端 20 ~ 50 mm, HV10 硬度值逐渐降低至 180 左右后维持稳定波动很小; 从图 2(f) 中可以看出, 此处微观组织转变为铁素体 + 粒状贝氏体组织。说明该试验钢的成分设计, 可以满足最大厚度为 100 mm 厚钢板对贝氏体淬透性的要求。

2.2 试验钢淬火后力学性能和金相显微组织

试验钢采用 930 °C 淬火后力学性能如表 3 所示, 组织如图 3 所示, 淬火时淬火机水量控制参数如表 2 所示, 采用此水冷参数模型淬火后能得到较好的板型, 为后续回火处理做好板型准备。淬火时淬火机辊道速度为 1.5 m/min, 100 mm 厚钢板淬火后钢板近表面组织为马氏体组织, 如图 3(a) 所示, 钢板近表面由于淬火时冷却速度快, 过冷奥氏体在较快的冷却速度下, 碳没有足够的时间扩散至奥氏体

外, 发生切变转变, 最终形成了马氏体组织^[8]。钢板厚度 1/4 处距离钢板表面 25 mm 处, 在淬火时冷却速度降低, 过冷奥氏体不具备转变为马氏体的能力, 转变为板条贝氏体组织, 如图 3(b) 所示。钢板厚度 1/2 处冷却速度进一步降低, 少量的过冷奥氏体在高温下发生了先共析转变, 生成了部分多边形铁素体组织, 其最终的组织为多边形铁素体 + 粒状贝氏体^[8], 如图 3(c) 所示。对试验钢淬火后钢板厚度 1/4 处的力学性能进行了检验, 屈服强度在 655 MPa, 抗拉强度 826 MPa, 处于比较高的水平, -40 °C 低温冲击韧性平均值在 134 J, 试验钢淬火后力学性能处于比较合理的水平。

2.3 试验钢回火后力学性能和金相显微组织

试验钢回火后钢板厚度 1/4 处组织如图 4 所示。试验钢回火后组织均为铁素体和粒状贝氏体组织, 随着回火温度的升高, 铁素体的形貌由针状转变为多边形, 尺寸逐渐增大^[9]。试验钢在 640 °C 回火时发生马氏体的分解以及碳化物的析出, 屈服强度

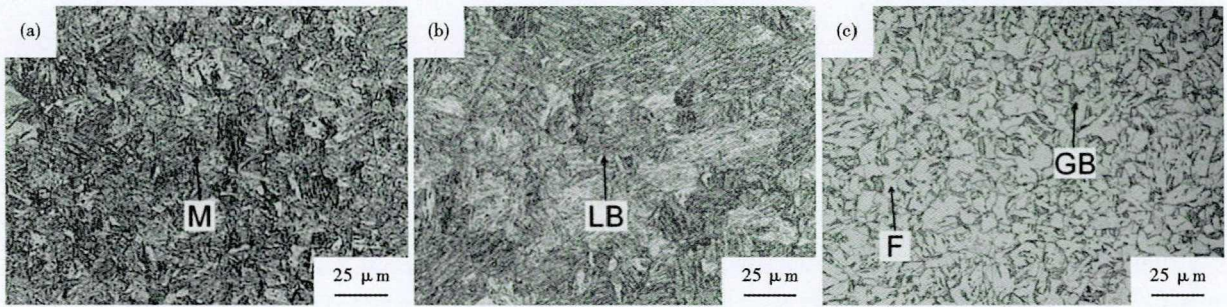


图 3 07MnCrMoVR 试验钢板淬火后 (a) 近表面; (b) 厚度 1/4 处; (c) 厚度 1/2 处的光学显微组织

Fig. 3 Optical micrographs of tested steel plate 07MnCrMoVR after quenching at (a) Near-surface; (b) 1/4 thickness; (c) 1/2 thickness

表 3 试验钢 07MnCrMoVR 淬火后力学性能
Table 3 Mechanical properties of test steel 07MnCrMoVR after quenching

屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	-40 °C 低温冲击 韧性/J
655	826	17.5	133, 139, 131

降至 620 MPa, 抗拉强度降至 721 MPa, 低温冲击韧性提高至 253 J; 当回火温度达到 660 °C 时, 对应回火过程中的回复过程, 此时淬火钢内部的位错缠结解开、相互抵消、具有小角度边界的条片合并成宽板条, 板条内部及边界碳化物析出^[10], 屈服强度降至

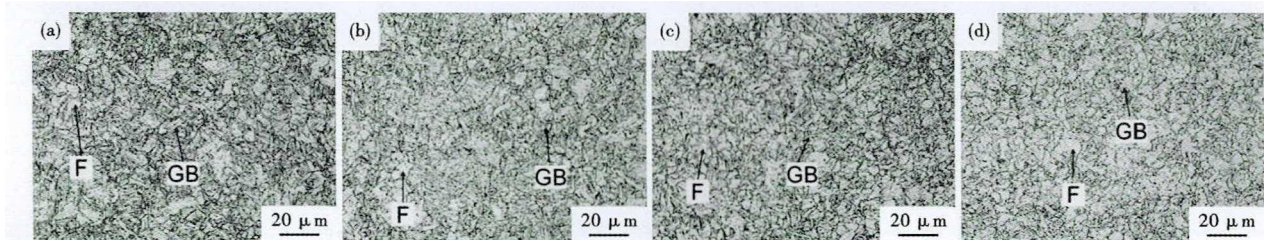


图 4 试验钢 07MnCrMoVR 厚度 1/4 处在 (a) 640 °C; (b) 660 °C; (c) 680 °C; (d) 700 °C 回火后光学显微组织

Fig. 4 Optical microstructure of tested steel plate 07MnCrMoVR at 1/4 thickness tempered at (a) 640 °C; (b) 660 °C; (c) 680 °C; (d) 700 °C

598 MPa,抗拉强度降至 703 MPa,低温冲击韧性提高至 262 J;而当 680 °C 回火时,开始发生再结晶,逐步形成多边形铁素体,其内部的位错进一步减少,原始偏聚于晶界、束界的粒子趋向均匀分布,碳化物颗粒明显聚集,板条痕迹已经不易分辨^[11],随着大角度晶界的迁移,钢板的强度大幅下降,屈服强度降至 559 MPa,抗拉强度降至 632 MPa,低温冲击韧性提高至 265 J;回火温度升高至 700 °C,组织中马氏体板条完全消失,渗碳体颗粒更加弥散且聚集长大,再结晶块状铁素体长大明显,回火晶粒尺寸明显增大^[12],钢板屈服强度降低至 491 MPa,抗拉强度降低至 586 MPa,低温冲击韧性提高至 285 J。因此试验钢的最佳回火组织对应马氏体的回复阶段后期和再结晶初期,640 ~ 680 °C 是 100 mm 特厚钢板力学

性能获得最佳强韧性匹配的温度区间。试验钢回火温度对力学性能的影响见图 5。

3 结论

(1)端淬试验表明,试验钢沿着水冷端向内依次发生马氏体相变、贝氏体相变,随着距水冷端距离的增加,转变组织由马氏体组织逐渐转变为板条贝氏体、粒状贝氏体和多边形铁素体组织。合理的淬火线水冷模型能够满足 100 mm 厚 07MnCrMoVR 水电钢板对贝氏体淬透性的要求。

(2)试验钢淬火后,钢板近表面冷却速度较快发生马氏体相变转变为马氏体组织,厚度 1/4 处冷却速度降低发生贝氏体相变,转变为板条贝氏体组织,厚度 1/2 处冷却速度进一步降低,转变为多边形铁素体和粒状贝氏体组织。

(3)试验钢在 640 ~ 660 °C 回火时位错相互抵消而消失,在铁素体内部和边界出现碳化物的析出。在 660 ~ 680 °C 发生再结晶,板条状组织出现合并长大,逐步形成多边形铁素体,位错进一步减少,碳化物颗粒明显聚集长大。回火温度达到 700 °C,渗碳体颗粒更加弥散且聚集长大,再结晶多边形铁素体明显长大。综合对比试验钢的最佳回火温度范围为 640 ~ 680 °C。

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究项目(B2019216);高压科学与先进超硬复合材料科研团队(TD201906);绿色化工与制药工程优势特色学科群(621901)

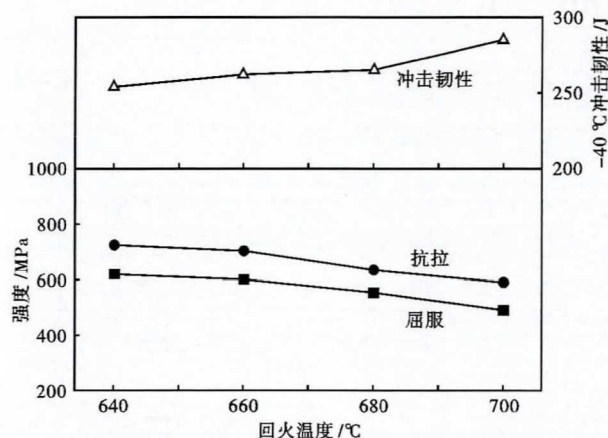


图5 试验钢回火温度对力学性能的影响

Fig. 5 Effect of tempering temperature on mechanical properties of test steel

参考文献

- [1] 肖桂枝,朱伏先,邸洪双,等. 610 MPa 级大型石油储罐用高强度钢板的开发[J]. 钢铁研究学报,2008,20(11):55-58.
- [2] 孙卫华,王国栋,陈启祥,等. 非调质型 15 万 m³ 石油储备罐体用 610MPa 高强度钢板轧制和热处理工艺研究与实践[J]. 钢铁研究学报,2010,22(18):50-54.
- [3] 李新玲,应传涛,丛津功,等. 610MPa 级水电钢轻量化生产工艺研究[J]. 鞍钢技术,2016,32(4):32-34.
- [4] 李新玲,乔馨,高强. 石油储罐用钢 12MnNiVR 在线冷却工艺研究[J]. 钢铁研究学报,2011,23(增刊1):152-158.
- [5] 石昆,侯洪,李金富,等. 调质态 07MnNiMoDR 钢脆性断裂机制及冲击功离散性[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(3):350-355.
- [6] 吴斌,金茄,隋鹤龙,等. 水电站用高强度压力钢管用钢的研制开发[C]. 2009 年全国高品质热轧板带材控制轧控冷与在线、离线热处理生产技术交流研讨会文集,北京:2009,16th:223-228.
- [7] 刘智良,史兴隆,董瑞峰. 非标准小试样端部淬透性试验方法[J]. 热加工工艺,2019,48(13):156-158.
- [8] Chen J, Li C S and Chen L Q, et al. Controlling of Reheated Quenching Temperature of 1 000 MPa Grade Steel Plate for Hydropower Sta-

tion [J]. Materialwiss,2019,50(1):33-43.

- [9] Xu Zhibao, Hui Weijun and Wang Zhanhua, et al. Mechanical Properties of a Rnicroalloyed Bainitic Steel After Hot Forging and Tempering[J]. Journal of Iron and Steel Research, International,2017,24(11):1085-1094.
- [10] 卜凡征,王玉斌,郑连辉,等. Ti-Mo 微合金钢回火过程中纳米碳化物析出行为[J]. 钢铁研究学报,2018,30(11):928-934.
- [11] 石骁,吴建中,郭汉杰,等. DH36 高强度船板钢中碳化物及碳氮化物析出行为[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(3):518-527.
- [12] 马耿魏,其其格. 610 MPa 级压力容器用钢回火工艺参数的研究[J]. 上海金属,2011,33(2):14-17.

冯路路(1982-),男,硕士(2008年东北大学),高级工程师,2005年沈阳理工大学(本科)毕业,高性能金属材料及强韧化研究。E-mail:85013296@qq.com

收稿日期:2019-11-08