

40mm厚原油储罐用12MnNiVR钢板 在线淬火工艺研究

刘晓玮, 周光杰, 金韬, 汪后明

湖南华菱湘潭钢铁集团有限公司 湖南湘潭 411101

摘要: 对40mm厚原油储罐用12MnNiVR钢板轧后离线淬火+回火和在线直接淬火+回火两种热处理工艺进行试验, 分析了两种不同热处理方式下钢板组织和性能的差异。结果表明: 两种热处理工艺路线均能满足12MnNiVR钢板性能要求, 在线直接淬火+回火处理工艺路线的强度较好, 回火工艺的温度范围适中, 试验钢经模拟焊后热处理后拉伸、冲击均无明显变化。

关键词: 原油储罐用钢; 在线淬火; 力学性能; 组织

Study on direct-quenching of 40mm thick 12MnNiVR steel for crude oil storage tank

LIU Xiaowei, ZHOU Guangjie, JIN Tao, WANG Houming

Xiangtan Iron and Steel Group Co., Ltd., Xiangtan 411101, Hunan, China

Abstract: Two heat treatment experiments of offline-quenching plus offline-tempering (Q+T) and direct-quenching plus offline-tempering (DQ+T) were conducted on steel of 12MnNiVR whose thickness is 40mm to study the otherness of the different heat treatment processes on the microstructural evolution and mechanical properties. The results show that the DQ+T process has a better strength margin indicating the moderate tempering process window even though the Q+T process can also meet the performance requirements. Furthermore, the different heat treatment processes have no impact on the mechanical property after post-weld heat treatment with the performance of strength and impact results.

Keywords: steel for crude oil storage tank; direct-quenching; mechanical properties; microstructure

1 序言

随着全球能源消耗与能源短缺的加剧, 石油已经成为国家的战略资源, 各国都在加快建立和完善石油储备体系的脚步。到2020年, 随着一批新的石油储备基地的投入使用和国际油价暴跌, 我国大量进口石油, 石油储备能力达到8500万t (近

6亿桶)。我国2021年每天消耗石油1300万桶, 而6亿桶石油储备也仅能维持全国46天消耗, 距离国际能源署规定的“达标线”90天还有一定的差距。目前, 我国石油储备量的发展主要受到储存设备的限制, 对于大规模建造容积10~15m³的储罐, 壁板主要采用610MPa焊接性能较好的高强度钢板, 使

第一作者: 刘晓玮, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为金属压力加工, E-mail: 116553@mail.hnxcg.com.cn。

用钢板厚度在12~40mm。此强度规格的中厚板主要采用离线淬火+回火的工艺路线进行生产,采用MULPIC超快冷装置,试验40mm规格原油储罐用12MnNiVR钢,通过控制轧制+直接淬火+回火工艺的技术路线取代原有离线调质生产工艺,可以达到缩短生产工序流程和节能减排的生产目的。

通过对40mm厚度规格原油储罐用12MnNiVR钢,对比控制轧制+离线淬火+回火与控制轧制+直接淬火+回火两种不同热处理工艺路线情况下的性能和组织,获得最佳强韧性匹配条件下的最优热处理工艺路线,为大规模生产提供技术指导。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

试验选用260mm厚度连铸坯,炼钢过程为:高炉铁液→铁液预处理→转炉冶炼→LF炉冶炼→RH炉真空脱气→连铸。试验钢的成分采用中低碳成分体系,通过合金元素Mn、Ni、V等,以及微合金元素Mo、Ti等来提高钢板的强度,还适当提高了Al含量,通过Al来稳定N,并通过AlN析出物来抑制晶

粒的粗化,以提高钢板的淬透性。采取氧化物冶金技术,利用钢中细小的夹杂物粒子来抑制奥氏体粗化,促进晶内针状铁素体的形核,从而改善焊接热影响区的组织。试验钢化学成分见表1。

试验板坯加热温度为1130~1220℃,时间220~280min,保证组织结构的均匀性,经5m双机架轧机轧制为厚度40mm钢板。轧制过程采取奥氏体再结晶区和未再结晶区两阶段轧制工艺,粗轧阶段压缩比为2.3~3.3,粗轧两道次压下率达20%以上,通过大压下率充分发挥奥氏体再结晶细化晶粒的效果。中间坯厚度≥2.5倍成品板厚,精轧阶段开轧温度为890~940℃,精轧阶段终轧温度为800~850℃,保证奥氏体未再结晶区应变累积量,充分细化晶粒。1[#]试验钢轧后ACC冷却到670~740℃之间,后离线淬火+回火;2[#]试验钢轧后快速入水冷却,入水温度为770~820℃,采用MULPIC的DQ冷却模式,最大水流量可达15513m³/h,终冷温度为200~300℃,轧后取样实验室回火匹配最优性能再离线回火^[1, 2]。

表1 试验钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	V	Cr、Mo、Al、Cu、Ti
0.07~0.12	0.15~0.4	1.2~1.6	≤0.015	≤0.008	0.15~0.4	0.02~0.06	适量

注:试验钢的 $P_{cm} \leq 0.24\%$ 。 $P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + CuCr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$ (%)。

2.2 试验方法

(1) 1[#]试验钢热处理工艺 1[#]试验钢轧后直接在工业生产炉进行离线淬火+回火,淬火温度为910~930℃,在炉时长1.8~2.5倍成品厚度;回火温度620~630℃,在炉时长2.5~3倍成品厚度。

(2) 2[#]试验钢实验室模拟热处理 对2[#]试验钢轧后钢板取样,试样大小为450mm×300mm×T(T为钢板厚度,单位为mm)。样板在箱式电阻炉中进行回火处理,工艺如图1所示。从图1可看出,样板以≥5℃/min的速率升温至试验温度(630±10)℃/(650±10)℃,经30~50min保温后出炉空冷。

12MnNiVR钢的力学性能要求见表2。

(3) 实验室模拟热处理结果及分析 2[#]试验

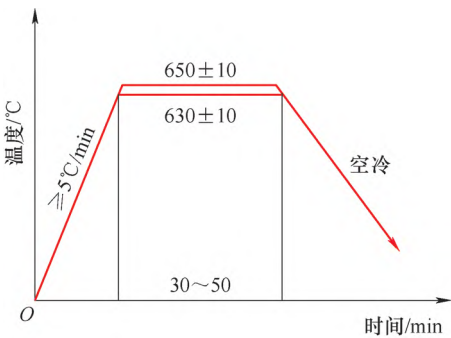


图1 回火处理工艺

表2 12MnNiVR钢力学性能要求

厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	常规冲击性能 (横向1/4)	
				温度/℃	KI/J
30~40	≥490	610~730	17	-20	80

钢轧后经实验室回火处理后性能数据见表3。由表3可知, 630℃和650℃回火温度下强度均能满足对

12MnNiVR钢要求, 630℃回火温度下伸长率与1/2处冲击性能明显优于650℃回火温度下的冲击性能。

表3 2[#]试验钢实验室回火后力学性能

回火温度/℃	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	伸长率 (%)	常规冲击性能 (横向1/4)		常规冲击性能 (横向1/2)	
					温度/℃	KV/J	温度/℃	KV/J
630	604	687	0.86	25.06	-20	204、216、208	-20	271、230、207
650	607	687	0.88	21.81	-20	225、135、227	-20	101、190、160

2[#]试验钢不同回火温度处理的金相组织如图2所示。从金相组织来看, 630℃回火处理的组织主要是板条贝氏体+少量铁素体软相组织, 板条间界面不清析, 钢板具有较好的强韧匹配。650℃回火处理的组织主要是板条贝氏体, 板条束的取向各异, 板条束上存在少量碳化物。



a) 630℃回火



b) 650℃回火

图2 试验钢不同回火温度处理的金相组织

结合力学性能数据和金相结果, 2[#]试验钢工业生产炉离线回火工艺按照620~640℃保温, 在炉时长2.5~3倍成品厚度生产。

(4) 试验钢模拟焊后热处理工艺 将1[#]试验钢、2[#]试验钢进行工业炉热处理后钢板取样, 试样大小为450mm×300mm×T。样板在箱式电阻炉

中进行模拟焊后热处理。模拟焊后热处理工艺: (585±10)℃, 保温195min, 300℃以上升温速度≤137℃/h, 300℃以上降温速度≤175℃/h。

3 试验结果及分析

3.1 不同热处理工艺路线对试验钢性能的影响

试验钢离线淬火+回火(Q+T)与在线直接淬火+回火(DQ+T)两种热处理工艺路线下, 力学性能均能满足12MnNiVR钢标准要求(见表4)。GB/T 19189—2011《压力容器用调质高强度钢板》要求回火温度不低于600℃, 中石油、中石化行业标准要求回火温度不低于620℃。在满足国家标准以及客户标准回火温度需求的情况下, 1[#]试验钢的抗拉强度裕量<10MPa, 2[#]试验钢的抗拉强度裕量有80MPa以上。2[#]试验钢在线DQ+T工艺路线的强度裕量明显优于1[#]试验钢离线Q+T工艺路线, Q+T工艺的抗拉强度裕量不足。两种热处理工艺路线下, 板厚1/4和1/2冲击吸收能量均达到150J以上。钢板经模拟焊后热处理其力学性能无明显变化。

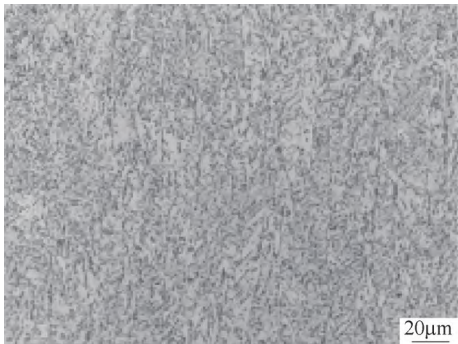
试验钢按照Q+T工艺路线, 回火温度工艺620~630℃, 试验钢按照DQ+T工艺路线, 回火温度工艺范围可扩展到620~660℃。在生产中, 回火温度范围只有10℃, 对于设备的精度和稳定性要求更高, 且容易出现性能波动, 而较宽的工艺范围更便于生产。DQ+T工艺路线缩减了一道离线淬火工艺, 可以减少能源消耗, 且缩短生产周期, 提高效率。

3.2 不同热处理工艺路线对试验钢组织的影响

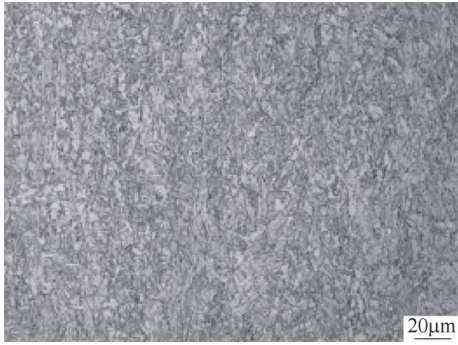
试验钢离线Q+T与在线DQ+T两种热处理工艺得到的金相组织如图3所示。Q+T工艺路径下的组织主要是板条状回火贝氏体组织, 部分板条束发生合并组织呈现明显的多边形化特征, 板条束内部

表4 试验钢力学性能

编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	伸长率 (%)	常规冲击性能 (横向1/4)		常规冲击性能 (横向1/2)	
					温度/℃	KV/J	温度/℃	KV/J
1	521	614	0.85	24.03	-20	322、326、326	-20	288、319、312
1-SR	528	621	0.85	24.74	-20	300、283、291	-20	263、279、299
2	605	693	0.87	23.16	-20	234、216、245	-20	291、216、201
2-SR	609	695	0.88	20.01	-20	203、194、201	-20	197、188、171



a) Q+T



b) DQ+T

图3 试验钢不同热处理工艺路径的组织

存在大量细小碳化物腐蚀痕迹。DQ+T工艺路径下的组织主要是板条状的回火贝氏体组织，板条束的取向各异，板条束内部存在少量细小碳化物腐蚀痕迹，板条间组织开始出现多边形化特征。

4 讨论

试验钢采用低碳成分，微合金元素的添加，降低了板坯加热过程中原始奥氏体晶粒度长大倾向，同时在粗轧阶段大压力下的变形过程中实现细化奥

氏体再结晶晶粒尺寸的效果；通过Cr、Mo元素的添加提高了试验钢的强度和淬透性。采用直接淬火生产的试验钢入水温度在800~830℃，低于离线淬火910~930℃的温度，这主要是因为钢板经过加热和轧制后直接入水淬火，只需要保证钢板温度大于 A_{r3} 即可保证在直接淬火前仍为奥氏体组织，而离线淬火需要保证钢板达到 A_{r3} 以上温度才可实现奥氏体化。另外，在线淬火的奥氏体组织是经过变形的奥氏体组织，有更强的相变驱动力，而离线淬火前钢板的组织为平衡态的奥氏体^[2-5]。

通过不同热处理工艺路线条件下生产的12MnNiVR钢原油储罐，其力学性能均能满足标准要求，冲击吸收能量可达到150J以上的稳定水平，DQ+T工艺路线下的强度优于Q+T工艺路线，具有充足的强度裕量，经模拟焊后热处理仍具有较好的强度和冲击性能要求。GB/T 19189—2011要求回火温度不低于600℃，而中石油、中石化标准要求回火温度不低于620℃，Q+T强度裕量较小，Q+T工艺路线下的回火温度范围窄于DQ+T工艺路线下的回火工艺。

DQ+T工艺轧后仅需进行回火处理，减少一道离线淬火工艺，缩短了工业化生产的流程，达到了绿色节能生产的目的。

5 结束语

1) 在 (630 ± 10) ℃、 (650 ± 10) ℃两个回火温度，DQ+T试验钢的强度均能满足12MnNiVR钢强度要求，630℃回火温度下伸长率与1/2处冲击性能更优，DQ+T的回火工艺温度范围在620~

(下转第107页)

4 结束语

1) 对WB36钢进行中频感应加热弯管试验,弯制成形过程中采用水淬对弯管区急冷,弯后经无损检测,弯管区无缺陷产生,质量可靠。弯后弯管区金相组织为铁素体+不规则贝氏体,上中性面、背弧面、内弧面的硬度均高出标准要求,需要通过弯后热处理来改善弯管区的组织和性能。

2) 在对弯管区分别采用回火、正火+回火两种工艺后,弯管区的无损检测依然合格。通过对WB36钢弯管区金相检验得出:回火组织为铁素体+贝氏体+少量珠光体,晶粒度为5~6级;而经正火+回火的金相组织为贝氏体+铁素体,晶粒度能达到9级。

3) 对两种热处理后的WB36钢弯管区,分别取样进行硬度检测和力学性能试验。结果显示,回火区硬度整体依旧高出标准,正火+回火区的硬度均在标准范围内;通过拉伸、冲击试验可知,回火试样强度高于正火+回火试样,延性、塑性方面则是正火+回火高于回火;冲击试验表明,正火+回火的韧性高于回火。

4) 综上分析,WB36钢中频感应加热弯管水淬急冷后,再通过正火+回火,弯管区的质量、金相组织及力学性能,能够满足标准要求。

参考文献:

- [1] 肖雄峰,潘振涛,林明新,等. 热处理工艺对高压配管用15NiCuMoNb5-6-4钢板组织和性能的影响[J]. 宽厚板, 2019, 25 (5): 12-15.
- [2] 刘志超,朱锦波,李学军,等. 淬火、回火后厚壁WB36钢管径向力学性能的分析[J]. 热加工工艺, 2016, 45 (18): 232-234.
- [3] 许志强,李学通,杜凤山. 中频加热大口径钢管弯管过程的有限元模拟[J]. 秦皇岛:燕山大学学报, 2003 (2): 122-125.
- [4] 闫平,马骏彪,卞小军,等. P92钢中频弯管技术研究及应用[J]. 综合智慧能源, 2008 (4): 41-45.
- [5] 李俊峰,张丰收,郑海臣,等. 核电用WB36CN1钢中频弯管技术研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (17): 166-169.

MW 20241115

(上接第102页)

660℃之间,

2) Q+T试验钢经910~930℃淬火,620~630℃回火处理后,强度裕度较少,回火工艺温度范围在620~630℃,窄于DQ+T的回火工艺温度范围。且回火温度精度范围只有10℃,对于设备的精度和稳定性要求更高,且容易出现性能波动

3) Q+T工艺路径下的组织主要是板条状回火贝氏体组织,部分板条束发生合并,组织呈现明显的多边形化特征,板条束内部存在大量细小碳化物腐蚀痕迹。DQ+T工艺路径下的组织主要是板条状回火贝氏体组织,板条束的取向各异,板条束内部存在少量细小碳化物腐蚀痕迹,板条间组织开始出现多边形化特征。

4) 试验钢采取轧后DQ+T,可以达到原油储罐用12MnNiVR钢性能要求,冲击吸收能量稳定且强度较标准有较多富裕值。原油储罐用12MnNiVR

钢可以通过轧后在线DQ+T达到节能减排生产钢铁的目的。

参考文献:

- [1] 其其格,余伟,武会宾,等. 回火工艺对在线淬火12MnNiVR钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2008 (24): 101-103.
- [2] 王立军,武会宾,余伟,等. 直接淬火低碳贝氏体钢的回火组织与力学性能[J]. 材料工程, 2011 (3): 36-44.
- [3] 李志恩. 大型原油储罐用12MnNiVR中厚钢板研制与开发[J]. 中国冶金, 2012 (4): 49-54.
- [4] 石明光. 12MnNiVR钢板热处理工艺及性能研究[J]. 冶金与材料, 2021 (2): 9-10.
- [5] 陈小林. 超快冷条件下中厚板温度均匀性的研究及应用[D]. 沈阳:东北大学, 2014.

MW 20241108