

中厚壁 X65Q 管线管热处理工艺研究

余泽金, 张行刚, 裴福莉, 贾冬梅, 魏 淼, 刘立宏

(内蒙古包钢钢管有限公司, 内蒙古 包头 014010)

摘要:对中厚壁 X65Q 无缝钢管进行了不同热处理工艺制度的工业试验,并对材料的组织、性能进行了检测分析。试验结果表明:生产的 $\Phi 406.4 \text{ mm} \times 26.19 \text{ mm}$ 规格 X65Q 无缝钢管,经过内喷、外淋水量均为 $3\ 300 \text{ m}^3/\text{h}$ 淬火后,钢管由内壁至心部,马氏体含量逐渐减少,钢管内表面组织为回火索氏体 + 贝氏体组织,外表面组织为贝氏体组织;淬火后经过 $630 \text{ }^\circ\text{C}$ 回火,材料晶粒度达 8.5 级, $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 横向冲击值达 200 J 以上,屈服强度达 500 MPa 以上,实现了材料强度、韧性良好匹配,满足 API 5L 标准要求。

关键词:中厚壁;无缝钢管;X65Q;调质;组织性能

中图分类号: TG156

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2022)05-0055-04

Study on Heat Treatment Process of X65Q Line Pipe with Medium Thick Wall

Yu Ze-jin, Zhang Xing-gang, Pei Fu-li, Jia Dong-mei, Wei Miao, Liu Li-hong

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

Abstract: In this paper, the industrial experiments of different heat treatment processes for X65Q seamless steel tube with medium thick wall are carried out as well as its microstructure and properties are tested and analyzed. The test results showed that the martensite content of X65Q seamless steel tube with specification of $\Phi 406.4 \text{ mm} \times 26.19 \text{ mm}$ was gradually reduced from inner wall to center after quench with $3\ 300 \text{ m}^3/\text{h}$ inner and outer spraying as well as the microstructure of its internal surface was tempered sorbite + bainite, microstructure of its outer surface was bainite; after quenching, its grain size reached grade 8.5, transverse impact value at $0 \text{ }^\circ\text{C}$ reached over 200 J and yield strength reached over 500 MPa with tempering of $630 \text{ }^\circ\text{C}$ so that the strength and toughness of material matched well, which could meet the requirements of API 5L standard.

Key words: medium thick wall; seamless steel tube; X65Q; quenching and tempering; microstructure and properties

管道输送是一种经济高效的流体输送方式,是陆地和海上长距离输送石油、天然气最经济合理的运输方式。近十年来,我国油气供给与管道建设呈现跨越式发展。国内油气管道总长达到 14 万 km。除了应用在化工产业、石油工业中,管线管也被广泛地应用于大型工厂的暖气输送与供水系统^[1]。在

城市建设中,管线管也被用作煤气和天然气的运输管道,为城市提供清洁环保、高效节能的新能源。同时随着石油天然气工业的不断发展,非常规油气资源占比越来越大,为保障油气输送管道的安全运行,要求材料具有高强、易焊接、良好的淬透性^[2]。国内的无缝钢管企业在生产管线钢管时多采用调质工

艺生产。通常,由板材制成管线的钢或非调制的管线钢的成分设计思路,都是在低碳锰钢的基础上加微合金化元素如 V、Ti、Nb、N 等^[3]。包钢钢管公司 460 机组引进世界最先进的 PQF 三辊轧机,同时配套有一条热处理生产线,完全具备生产 X65Q 钢级管线管的条件。本文以包钢钢管公司 460 机组生产的 X65Q 为研究对象,先在实验室研究了相同淬火温度、不同回火温度下对 X65Q 拉伸性能的影响,得到了不同热处理制度下试验钢性能的变化规律,以试验研究结果作为 X65Q 实际生产的热处理工艺依据,得到合格的产品。在包钢钢管公司现有工装条件下,适应市场需求,开发出壁厚不小于 25 mm 的 X65Q 管线管。

X65Q 管线管生产工艺流程为管坯加热→穿孔→连轧→张减径→冷床冷却→精整矫直→热处理→探伤→检查→水压→倒棱→带保护帽→测长、计重、喷标、涂漆→包装。

1 试验材料和方法

本试验所用的母材为 $\Phi 406.4 \text{ mm} \times 26.19 \text{ mm} \times 12\,000 \text{ mm}$ 无缝钢管,其化学成分见表 1 和表 2。将试验钢管整体加热到 $910 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 30 min,进行淬火热处理,冷却介质为水,内喷、外淋水量均为 $3\,300 \text{ m}^3/\text{h}$,冷却时间为 40 s,将试验钢管冷却至 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,将淬火后的钢管进行回火热处理,具体热处理工艺方案见表 3。

表 1 试验钢成品化学成分及碳当量(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	CE _{IIW}
0.10~0.18	0.15~0.45	0.90~1.65	≤0.025	≤0.015	0.01~0.05	0.01~0.08	0.01~0.03	≤0.43

表 2 残留元素的限量要求(质量分数) %

Cr	Mo	Ni	Cu	B
≤0.30	≤0.15	≤0.30	≤0.50	≤0.001

注:气体含量: $w[\text{O}]_{\text{total}} \leq 0.0025\%$ 、 $w[\text{N}] \leq 0.0080\%$ 、 $w[\text{H}] \leq 0.0002\%$

表 3 试验钢热处理工艺方案

工艺	热处理工艺方案
工艺 1	910 °C 保温 30 min, 水淬
工艺 2	910 °C 保温 30 min, 水淬 + 600 °C 保温 90 min, 空冷
工艺 3	910 °C 保温 30 min, 水淬 + 630 °C 保温 90 min, 空冷
工艺 4	910 °C 保温 30 min, 水淬 + 660 °C 保温 90 min, 空冷

表 5 试验钢不同热处理工艺后力学性能检测结果

项目	屈服强度 ($R_{0.5}$)/MPa	抗拉强度 (R_m)/MPa	延伸率(A) /%	0 °C 横向冲击 功(KV_8)/J
API 5L	450~570	535~760	≥20	≥27
工艺 1	568/579	813/811	18/18	40/36/36
工艺 2	530/539	660/644	33/32	230/236/230
工艺 3	505/510	615/618	33/34	238/242/236
工艺 4	492/497	597/594	35/37	256/244/252

由表 5 可知,试验钢管经内喷、外淋淬火后的屈服强度为 560~580 MPa,抗拉强度达 810 MPa 左右,0 °C 横向冲击功为 36~40 J;淬火后经过不同温度回火,随回火温度的升高,屈服、抗拉强度逐渐降低,0 °C 横向冲击值逐渐升高,不同温度回火后冲击值均达 200 J 以上,远高于标准 27 J 的要求。

综合考虑材料性能及热处理生产工艺成本,采用热处理工艺 3(910 °C 保温 30 min,水淬 + 630 °C 保温 90 min,空冷)更加经济、环保,材料的各项力学性能指标均满足 API 5L 标准要求^[4]。

2.2 显微组织分析

对试验钢管的轧态、淬火态、淬火 + 回火(工艺 3)组织进行检测分析,检测结果分别如图 1 至图 4 所示。钢管轧态组织为铁素体 + 珠光体、淬火后钢管显微组织为马氏体和贝氏体整合组织,淬火

2 试验结果与分析

2.1 力学性能结果分析

试验钢管轧态下的力学性能见表 4。

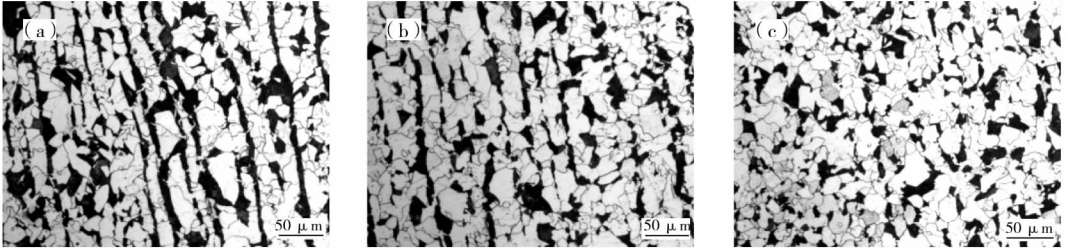
按照表 3 中的工艺进行热处理,分别对不同热处理工艺后钢管进行取样、力学性能检测,检测结果见表 5。

表 4 试验钢轧态力学性能

屈服强度 ($R_{0.5}$)/MPa	抗拉强度 (R_m)/MPa	延伸率(A) /%	0 °C 横向冲击功 (KV_8)/J
383/376	556/559	30/31	10/8/24

后钢管分别经过 600 ℃、630 ℃、660 ℃ 回火,保温时间均为 90 min,最终钢管的内壁显微组织为回火索

氏体和贝氏体整合组织^[5]。

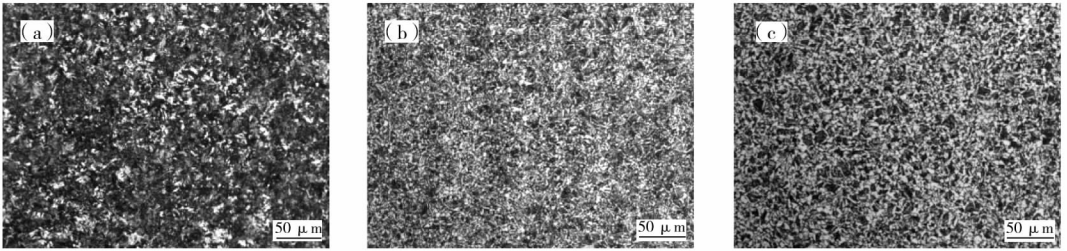


(a) 内壁 (b) 心部 (c) 外壁

图1 轧态钢管全壁厚显微组织照片

对轧态钢管的带状组织进行检测评级,内表面的带状组织为 1.5 级,心部带状组织为 1.0 级,外表面无明显带状组织。从图 1 轧态组织照片来看,轧态钢管的带状组织由内向外逐渐减轻,这主要是由

于铸坯心部 Mn、S 等元素的成分偏析以及钢管在轧制过程中内、外表面变形和冷却速度不均等因素造成^[6]。

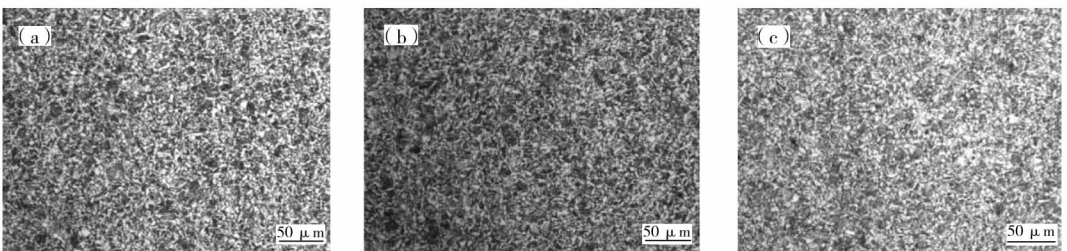


(a) 内壁 (b) 心部 (c) 外壁

图2 钢管淬火态全壁厚显微组织照片

通过取样,对淬火态钢管壁厚方向内表面、心部、外表面显微组织观察见图 2,由显微组织照片可

以看出钢管内表面组织主要为马氏体,另外有少量贝氏体组织,钢管心部、外表面组织主要为贝氏体。



(a) 内壁 (b) 心部 (c) 外壁

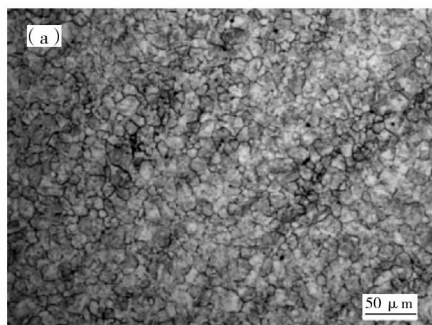
图3 钢管淬火后 630 ℃ 回火全壁厚显微组织照片

钢管淬火后 630 ℃ 回火屈服强度较淬火态降低 60 MPa 左右,抗拉强度降低近 200 MPa。由图 3 组

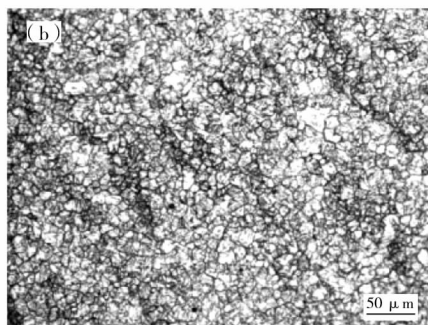
织照片可以看出,钢管淬火后经 630 ℃ 回火,钢管内壁组织由原来的马氏体 + 贝氏体组织转变为回火索

氏体 + 贝氏体组织, 钢管的心部、外表面淬火后组织主要为贝氏体 + 少量马氏体, 回火后的组织为少量

回火索氏体 + 回火贝氏体组织。



(a) 淬火态



(b) 淬火+630 °C回火

图4 淬火态和淬火+630 °C回火后显微组织晶粒

对淬火态及淬火后630 °C回火后的试样进行晶粒度检测, 晶粒度均达8.5级(见图4)。回火索氏体中珠光体片层间距越小, 以及细小组织晶粒度保证了试验钢具有良好的综合机械性能^[4]。试验钢管经过系列热处理试验, 在所有工艺制度下, 试验钢的拉伸性能均满足标准要求 ($R_{0.5} \geq 450$ MPa, $R_m \geq 535$ MPa, $A \geq 30\%$)。在淬火温度一定时, 随着回火温度的提高, 试验钢的屈服强度、抗拉强度减小, 延伸率升高, 其中热处理工艺3(910 °C保温30 min, 水淬+630 °C保温90 min, 空冷)实现了材料强度、韧性的良好匹配, 实现了壁厚不小于25 mm非API 5L标准的工业化生产。

3 结论

(1)生产的 $\Phi 406.4$ mm \times 26.19 mm规格X65Q无缝钢管经过调质热处理后, 材料力学性能满足API 5L标准要求, 产品实现了壁厚大于25 mm非API 5L标准无缝钢管的工业化生产。

(2)试验钢管轧态全壁厚组织为铁素体 + 珠光体组织, 内表面带状组织达1.5级, 经过调质热处理后, 带状组织消失; 淬火态的全壁厚组织为马氏体 + 贝氏体的整合组织, 回火后的全壁厚显微组织为回火索氏体 + 贝氏体整合组织, 该组织具有优异的综

合机械性能。

(3)试验钢经过热处理工艺3(910 °C保温30 min, 水淬+630 °C保温90 min, 空冷)调质热处理后, 材料原始奥氏体晶粒度达8.5级, 0 °C横向冲击值达200 J以上, 屈服、抗拉强度有50~70 MPa富余量, 材料的各项力学性能指标达到最佳, 热处理工艺合理。

参 考 文 献

- [1] 张伟卫, 熊庆人, 吉玲康, 等. 国内管线钢生产应用现状及发展前景[J]. 焊管, 2011, 34(1): 5-8.
- [2] 孔祥磊, 黄国建, 黄明浩, 等. X80 管线管成分工艺与组织性能研究[J]. 材料热处理技术, 2011, 40(24): 20-23.
- [3] 徐天兵, 方剑. X70 钢级热轧无缝管线钢热处理工艺研究[J]. 热处理技术与装备, 2006, 27(1): 31-33.
- [4] API Spec 5L—46th, 管线钢管[S].
- [5] 雍岐龙. 微合金钢: 物理和力学冶金[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [6] 刘宗昌. 材料组织结构转变原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.