经济型 B 级酸性服役管线管开发

刘玉荣[1], 米永峰[1], 余泽金[1], 王增海[1], 赵广林[1], 胡 波[2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管分公司, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司长材厂, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章针对 BNS 酸性服役管线管, 设计了经济型新钢种, 开展了实验室研究及工业试制。结果表明, 不论是热轧态还是经 890 ℃正火热处理后, 试制钢管的屈服强度、抗拉强度、延伸率、冲击性能、维氏硬度等各项性能均满足 API 5L 标准要求。钢管经 890 ℃正火热处理后, 其低温冲击韧性大幅提高, 韧脆转变温度从热轧态的 -10 ℃降至正火态的 -50 ℃, 正火热处理改善了钢管的带状组织, 且基体的晶粒度由热轧态的 7 级细化为 8.5 级。

关键词: 经济型管线管; 酸性服役; 正火处理
中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009 - 5438(2026)01 - 0065 - 04

Development of Economical Class B Line Pipe in Sour Service

Liu Yurong[1], *Mi Yongfeng*[1], *Yu Zejin*[1], *Wang Zenghai*[1], *Zhao Guanglin*[1], *Hu Bo*[2]

(1. *Steel Pipe Branch Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Long Products Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, the design of new economical steel grade, laboratory researches and industrial trial production of BNS line pipe in sour service are carried out. The results showed that such properties as the yield strength, tensile strength, elongation, impact properties and Vickers hardness of trial - produced steel pipe (as - hot - rolled and after normalizing treatment of 890 ℃) could meet the requirements of API 5L standard. After normalizing treatment of 890 ℃, the low temperature impact toughness of steel pipe is significantly improved and its ductile - brittle transition temperature is reduced from -10 ℃ (as - hot - rolled) to -50 ℃ (as - normalized condition) as well as its banded structure is improved and grain size of matrix is refined from grade 7 (as - hot - rolled) to grade 8.5 with normalizing treatment.

Key words: economical line pipe; sour service; normalizing treatment

作为五大运输行业(铁路、公路、水运、航空和管道)之一的管道运输因其具有经济、安全、高效、不间断、无污染等特点被广泛应用, 除了大量用于长距离输送石油、天然气外, 还可作为煤和其他固体物料的重要输送手段, 原油依靠管线输送占整个原油一次输出量的比例高达 85%, 天然气管线输送比例是 100%。包钢股份目前已具备生产 API 5L 标准中所有钢级产品的能力, 其中管线用无缝钢管由于钢

收稿日期: 2024 - 11 - 03
作者简介: 刘玉荣(1985 -), 女, 河北省石家庄市人, 硕士, 高级工程师, 现从事无缝管产品研究工作。

中添加了价格高的合金元素，造成产品成本较高。本文设计了经济型新钢种，试制钢管各项性能完全满足 API 5L 标准，提高了包钢产品的市场竞争力。

1 成分设计

B 级酸性服役管线管原钢种为 10CrMoTiRE，钢中添加了 0.2% Cr、0.12% Mo 和 0.015% Ti。本研究采用经济型钢种成分，取消添加价格较高的合金元素 Cr 和 Mo，提高 Mn 含量，新设计钢种为 10MnTiRE，化学成分如表 1 所示。相比原钢种 10CrMoTiRE，吨钢可实现降本 500 元左右。

表 1 试验钢化学成分和碳当量（质量分数） %

C	Si	Mn	P	S	Ti	CE_{pcm}
≤0.12	≤0.30	≤1.25	≤0.018	≤0.003	≤0.020	≤0.19

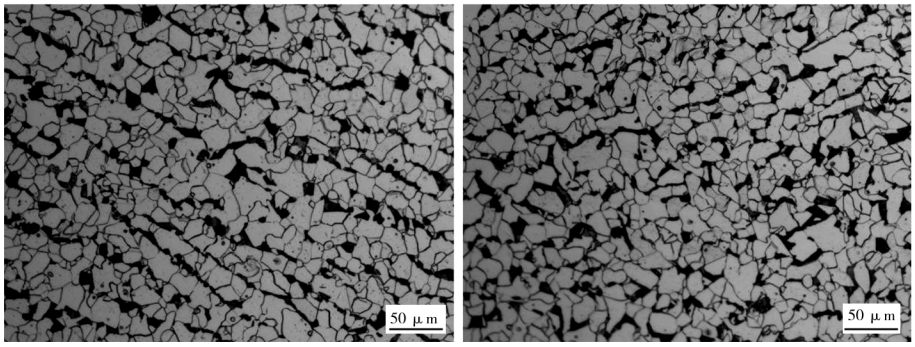
2 实验室研究

试验钢采用 25 kg 真空感应炉冶炼，浇注成 Φ90 mm 钢锭，空冷至室温。钢锭装炉加热至 1 250 ℃，通过 550 mm 二辊可逆热轧机轧制成厚度 16 mm 的钢板，终轧温度 900 ℃，压缩比 6.25。通过测试和绘制 CCT 曲线获知试验钢 Ac_3 温度为 849 ℃。取试样按 890 ℃进行正火处理。

试验钢热轧态及正火态的力学性能及金相组织分别见表 2 及图 1。由表 2 可知，试验钢轧态和正火态的屈服强度、抗拉强度、延伸率、冲击功、维氏硬度等指标均满足 API 5L 标准要求。通过对比正火态与热轧态的性能，发现试验钢正火后屈服强度、抗拉强度、延伸率和维氏硬度与热轧态相比变化不大，低温冲击性能却大幅提高，-50 ℃的横向冲击功平均值由热轧态 55 J 提高至正火态 116 J，变化显著。

表 2 试验钢检验结果

状态	$R_{t0.5}$/MPa	R_m/MPa	$R_{t0.5}/R_m$	A/%	A_{KV}（横向，-50℃）/J	HV10
热轧态	298,301	450,455	0.66,0.66	43,42	30,75,60	127,120,131
正火态	310,305	449,458	0.69,0.67	45,44	110,121,118	130,132,135
API 5L 标准	245～450	415～655	≤0.93	≥23	≥27(0 ℃)	≤250



（a）热轧态（晶粒度7级） （b）正火态（晶粒度8级）

图 1 试验钢金相组织

图 1 表明，正火后的试验钢晶粒细化，由热轧态 7 级细化为正火态 8 级，并且带状组织得到消除。带状组织是指沿钢材轧制方向形成的，以先共析铁素体为主的偏析带与以珠光体为主的偏析带彼此堆叠而成的组织形态[1]。已有研究表明[2-4]带状组织是钢管中的一种缺陷组织，它破坏了基体组织的连续性且因为强弱带之间的应力集中会使钢管的力学性能呈现明显的各向异性，尤其影响钢管横向断面

收缩率及横向冲击性能。带状组织形成的根本原因为元素偏析,钢水在浇注钢锭过程中形成枝晶偏析,在热塑性变形时延伸成铁素体和珠光体的交替条带而形成带状组织。正火是消除带状组织最有效的方法之一,正火加热温度一般为 Ac_3 以上 30 ~ 50 ℃,此时试验钢进入奥氏体相变区,室温下的铁素体和珠光体全部转变为奥氏体组织,保温一定时间,奥氏体完全均匀化,然后在室温下冷却,当冷却速度大于抑制偏析带的临界冷却速度时,先共析铁素体被抑制析出,直接由过冷奥氏体转变为铁素体和珠光体的共析产物。由于冷速较快,大量生成的晶核来不及长大,正火后晶粒度得到细化,细化后的晶粒和均匀化组织有效提高试验钢的横向低温冲击韧性,使得低温冲击韧性提高一倍多。

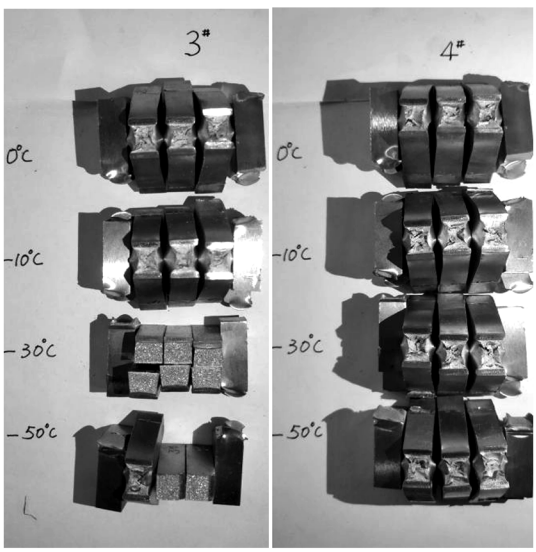
3　工业试制

试样取自 Φ159 mm 机组生产的 Φ168 mm × 15 mm规格 BNS/L245NS 钢管,钢管热轧态和890 ℃正火态的力学性能见表 3。性能结果表明,钢管热轧态及正火态的力学性能均满足 API 5L 标准要求[5],两种状态的钢管屈服强度、抗拉强度、延伸率和维氏硬度基本相当,不同的是正火态钢管的横向低温冲击韧性相比热轧态更好。

图 2 为钢管冲击断口形貌。由图 2 可以看出,两种状态的钢管在 0 ℃和 -10 ℃下的冲击断口形貌均为典型韧窝状断口,冲击功在 330 J 以上。随着温度的下降(从 -30 ℃至 -50 ℃),热轧态钢管冲击功下降剧烈,在 -30 ℃、-50 ℃下的冲击功平均值分别降至69.3 J 和27 J。图2 显示冲击断口呈白亮色,在断裂前基本没有变形,说明材料完全呈现脆性断裂状态。与之形成鲜明对比,正火态钢管的低温冲击功不但没下降,相反有微幅增加,说明钢管正火后明显改善了材料的低温冲击韧性,钢管的韧脆转变温度从热轧态的 -10 ℃降至正火态的 -50 ℃。

表 3　钢管力学性能检验结果

状态	HV10	$R_{t0.5}$ /MPa	R_m /MPa	A/%	A_{KV}(横向,全尺寸 10 mm × 10 mm × 55 mm)/J			
					0 ℃	-10 ℃	-30 ℃	-50 ℃
热轧态	128,126,127,131,127	267,264	420,419	53,54	344,328,364	337,357,356	49,63,96	12,26,43
正火态	129,128,128,135,134	286,287	418,426	54,54	340,366,355	379,369,376	384,385,361	387,372,351
API 5L 标准	≤250	245 ~ 450	415 ~ 655	≥23	≥27			



(a) 热轧态　　(b) 正火态

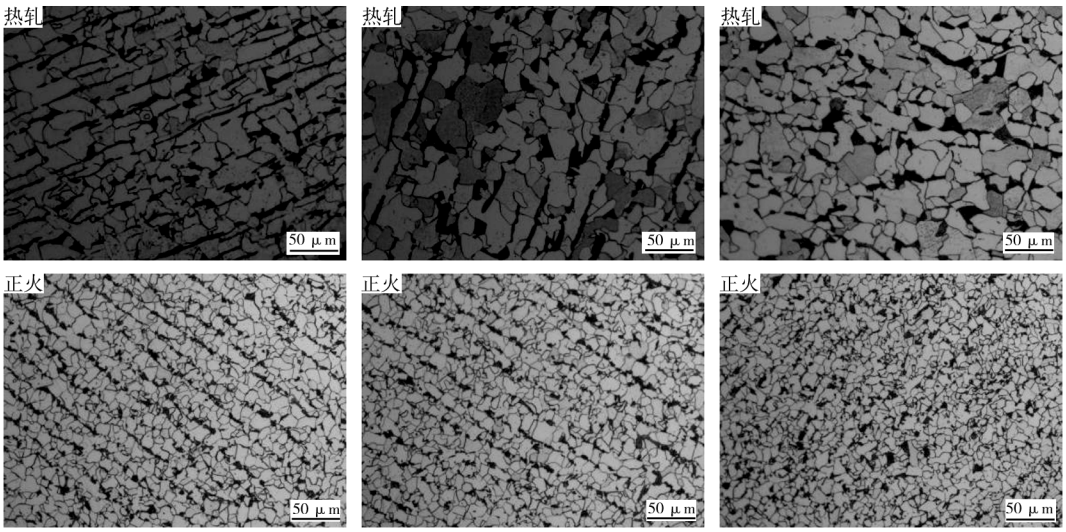
图 2　试验钢冲击断口形貌

两种状态的钢管晶粒度及显微组织检测结果分别见表4 和图 3。结果显示,钢管热轧态及正火后的显微组织均为铁素体和珠光体(少量),但正火后的晶粒明显细化,由热轧态的 7 级细化为正火态的 8.5 级。带状组织同步亦有所改善,由 1.0 级降为 0.5 级。钢管带状组织较小炉试样带状组织严重,并且呈现出带状组织从外壁到内壁逐渐严重。分析认为现场批量化生产时钢管整体冷速比小炉试样要慢,并且钢管外壁冷速快、内壁冷速慢,导致内壁的带状组织较严重,但正火后带状组织级别有所降低。

分别对 Φ168 mm × 15 mm 和 Φ168 mm × 11 mm 的热轧态钢管进行 HIC(氢致开裂)试验,HIC 试验结果如图 4 所示。两个规格的钢管 CLR 、CTR、SCR 平均值均为 0,满足 API 5L 标准要求(CLR ≤ 15% 、CTR ≤ 5% 、CSR ≤ 2%),说明试制的经济型 B 级酸性服役管线管抗氢致开裂性能满足标准要求。

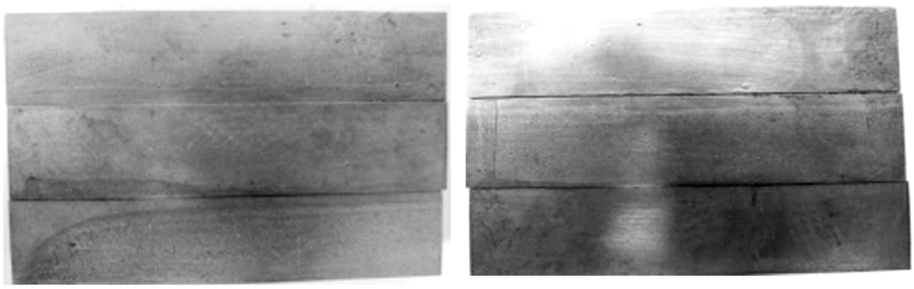
表4 两种状态钢管的金相检验结果

规格	状态	晶粒度/级	显微组织	带状组织/级
Φ168 mm×15 mm	热轧态	7.0	F+P(少量)	1.0
	正火态	8.5	F+P(少量)	0.5



(a)内壁 (b)中心 (c)外壁

图3 钢管金相组织



(a)壁厚11 mm (b)壁厚15 mm

图4 HIC试验结果

4 结论

(1)研究设计的经济型B级酸性服役管线管10MnTiRE能够取代原钢种10CrMoTiRE,各项性能满足API 5L标准,成本下降500元/t左右。

(2)钢管经890 ℃正火后,其低温冲击韧性大幅提高,韧脆转变温度从热轧态的-10 ℃降至正火态的-50 ℃。

(3)正火热处理后的钢管带状组织得到改善,由1.0级降至0.5级,基体晶粒度由热轧状态的7.0级细化为8.5级。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 刘云旭. 低碳合金钢中带状组织的成因、危害和消除[J]. 金属热处理,2000(12):1-3.

[3] 王松林,陈俊德,赵成英,等. 消除钢管中带状组织的热处理[J]. 热处理技术与装备,2010,31(4):26-30.

[4] 宋立秋. 16Mn钢锰含量的偏析及其对带状组织的影响[J]. 攀钢技术,2000,23(5):10-13.

[5] API Spec 5L, Line Pipe: Forty-Sixth Edition[S].