

热处理工艺对 5 mm 9Ni 钢板性能的影响

于 雄 徐 伟 刘 洋

(江阴兴澄特种钢铁有限公司研究院, 江阴 214429)

摘 要 研究了淬火+亚温淬火+回火(QLT)、淬火+回火(QT)、正火+正火+回火(NNT)3种工艺对5 mm 9Ni 钢板低温韧性的影响。结果表明,采用NNT工艺,钢板低温韧性良好,逆变奥氏体含量8.0%;通过工艺试制,5 mm 9Ni 钢板,采用3.3 mm厚度规格试样,-196℃冲击吸收能量 ≥ 40 J;采用2.5 mm厚度规格试样,-196℃冲击吸收能量 ≥ 27 J。

关键词 5 mm 9Ni 钢板 逆变奥氏体 -196℃冲击吸收能量

Effect of Heat Treatment Process on Properties of 9Ni Steel 5 mm Plate

Yu Xiong, Xu Wei and Liu Yang

(Research Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel Work Co Ltd, Jiangyin 214429)

Abstract The effect of three kinds of process quenching + lamellarizing (quenching from intercritical temperature) + tempering (QLT), quenching + tempering (QT), double normalizing + tempering (NNT) on low temperature toughness of 5 mm 9Ni steel plate has been studied. The results show that the steel plate with NNT has good ductility at low temperature, good plate shape and 8.0% reverse austenite content by using double normalizing and tempering process. Through industrial trial production, the -196℃ Charpy absorption energy of 5 mm 9Ni steel plate with 3.3 mm thickness specimen is ≥ 40 J; and that with the 2.5 mm thickness specimen is ≥ 27 J.

Material Index 5.5 mm 9Ni Steel Plate, Reverse Austenite, -196℃ Charpy Absorption Energy

江阴兴澄特种钢铁有限公司(兴澄特钢)生产的5 mm厚度9Ni钢板主要用于LNG储罐底板、热角保护板等,属于LNG储罐核心材料,其产品性能受到设计人员、施工人员等广泛关注。5 mm厚度规格9Ni钢板,兴澄特钢利用炉卷轧机轧制成型,拟采用合理的工艺进行热处理,期盼得到性能、板型良好的低温压力容器用钢板。

对于6~15 mm厚度的9Ni钢板,为了增加钢板的韧性,一般采用NNT或QLT工艺。有学者^[1]研发了6 mm的薄规格9Ni钢板,终轧温度850℃以上,采用NNT工艺进行热处理,正火温度820℃,亚温正火温度670℃,回火空冷,所得钢板力学性能优良;但该热处理工艺的温度范围不满足ASME SA353/SA353M-2019标准要求,限制了钢板的推广及使用。还有学者^[2]针对15 mm厚度9Ni钢板,回火后采用水冷工艺,其研究认为较低的温度进行回火,配合水冷工艺,能使逆转奥氏体在基体上的分布达到最佳,改善钢的低温韧性;本课题的研究对象为5 mm厚度钢板,回火后在流动的空气中冷却,其冷却速率较快,与该文作者提及的回火后水冷的效果具有可比性;但实际生产中,回火后水冷将给5 mm

厚度钢板的板型控制带来极大的困难。对于5 mm厚度9Ni钢板的生产研究,既要保证钢板性能及满足相关标准,又要确保生产工艺顺行,目前尚未见有相关文献报道。

根据ISO 148-2017、EN10028-2017等标准及相关设计院标准,5 mm厚度钢板试样应加工成3.3 mm×10 mm×55 mm或2.5 mm×10 mm×55 mm横向V型冲击试样,槽口深度2 mm。目前,各大设计院设计3.3 mm规格的冲击试样-196℃冲击吸收能量平均值不低于33 J,单值不低于23 J;2.5 mm规格的冲击试样-196℃冲击吸收能量平均值不低于25 J,单值不低于16 J;试样的冲击吸收能量并不是随着试样厚度降低而成比例的降低,一般而言,2.5 mm厚度的试样,其冲击吸收能量实测值约等于10 mm厚度规格试样实测值的10%。

1 研究思路

5 mm厚度9Ni钢板采用炉卷轧机轧制成型,在轧制过程中,为了保证板型,钢板整体温度控制在较高水平,远超Ar₃温度;轧后的钢板冷却速率受到钢板厚度的影响,无法进行有效的控冷操作;因此,很难通过控轧控冷来细化钢板晶粒。

为了提高并稳定薄规格9Ni钢板的低温韧性,必须从优化热处理工艺方面入手,通过合理的工艺参数制定,得到性能优良的钢板。钢板由连铸坯轧制而成,连铸坯在凝固过程中,心部不可避免的聚集较多的有害元素,如P、S等;连铸坯轧制成5 mm的薄板,加工成3.3 mm或2.5 mm的冲击试样,连铸坯心部聚集的有害元素遗传至冲击试样的心部,将导致冲击结果恶化或出现较大波动;因此,首先必须提高钢板的纯净度,降低钢中有害夹杂物含量,本研究确定P含量 $\leq 0.004\%$,S含量 $\leq 0.0015\%$ 。

对于5 mm厚度9Ni钢板,由于合金含量较高,且厚度规格较薄,即使在空冷的条件下也有类似于淬火的效果;另外,正火较淬火也更容易控制钢板的板型,因此,本项目分别采用QLT、NNT、QT热处理工艺进行研究。

2 实验室试制

本课题所研究对象为兴澄特钢生产的9Ni钢板,150 t转炉冶炼,真空(RH)脱气处理,利用150 mm厚连铸坯轧制生产的5 mm厚9Ni钢板,试块大小为200 mm \times 500 mm,化学成分如表1所示;3套试样热处理工艺如表2所示,试样1工艺满足GB/T 3531-2014标准及ASME SA553/SA553M-2019标准;试样2工艺满足GB/T 3531-2014标准、EN10028-4-2017标准及ASME SA353/SA353M-2019标准;试样3工艺满足GB/T 3531-2014标准、ASME SA553/SA553M-2019、EN10028-4-2017标准。

3 结果与分析

试样1、2、3的力学性能如表3、表4所示,其中试样尺寸及检验方法均采用国标。

从表3及表4分析,试样1、2、3的拉伸性能均能满足标准要求;但冲击吸收能量,试样1与试样2均能满足标准要求,而试样3如果加工成2.5 mm厚度冲击试样,则不能满足兴澄特钢企业标准要求。

取冲击试样做金相分析,金相组织如图1所示。

试样1和试样2的金相组织相似,说明了对于5 mm厚度的

表1 试验9Ni钢板的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested 9Ni steel plate /%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	O
≤ 0.06	0.15 ~ 0.30	0.60 ~ 0.80	≤ 0.004	≤ 0.0015	8.50 ~ 9.50	0.020 ~ 0.040	≤ 0.0020

表2 试验9Ni钢板热处理工艺

Table 2 Heat treatment process for tested 9Ni steel plate

试样编号	工艺	保温温度/ ℃	保温时间/ min	冷却方式
1	QLT			
	淬火	不低于800	≥ 30	水冷
	亚温淬火	670 \pm 30	≥ 30	水冷
2	回火	600 \pm 35	≥ 30	风冷
	NNT			
	正火	900 \pm 15	≥ 30	风冷
3	正火	790 \pm 15	≥ 30	风冷
	回火	585 \pm 15	≥ 30	风冷
	QT			
	淬火	不低于800	≥ 30	水冷
	回火	600 \pm 35	≥ 30	风冷

注:热处理工艺源于ASTM A553/A553-2019标准。

表3 试验9Ni钢板拉伸性能

Table 3 Tensile properties of tested 9Ni steel plate

试样编号	工艺	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	延伸率A/ %
1	QLT	702	731	24.5
2	NNT	651	695	26
3	QT	711	725	21.5
EN10028-4标准		≥ 585	680 ~ 820	≥ 18

表4 试验9Ni钢板冲击性能

Table 4 Impact properties of tested 9Ni steel plate

试样号	试样规格/ mm	-196℃冲击 吸收能量/J	断面纤维率/ %	侧膨胀/ mm
1	3.3 \times 10 \times 55	50,47,49	100,100,100	1.43,1.42,1.47
	2.5 \times 10 \times 55	29,28,30	100,100,100	1.24,1.22,1.23
2	3.3 \times 10 \times 55	46,47,43	100,100,100	1.24,1.25,1.27
	2.5 \times 10 \times 55	29,30,29	100,100,100	1.22,1.20,1.23
3	3.3 \times 10 \times 55	40,40,42	100,100,100	1.22,1.25,1.17
	2.5 \times 10 \times 55	22,20,23	90,90,90	1.02,1.09,1.03
兴澄特钢	3.3 \times 10 \times 55	平均值 ≥ 35 ,单值 ≥ 25	≥ 80	≥ 0.64
企业标准	2.5 \times 10 \times 55	平均值 ≥ 25 ,单值 ≥ 16	≥ 80	≥ 0.64

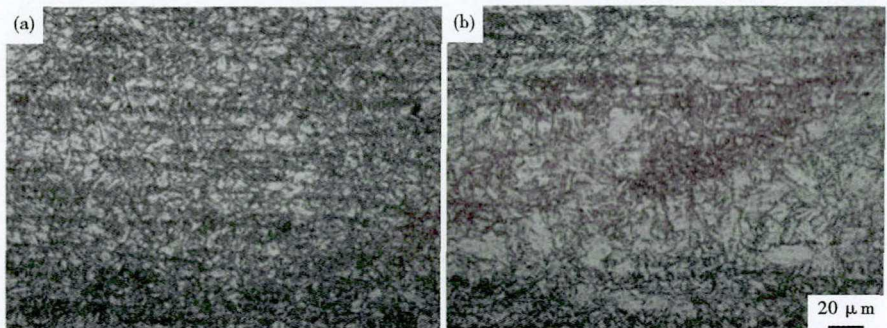


图1 试验9Ni钢板(a)QLT处理和(b)NNT处理的组织形貌

Fig.1 Morphology of microstructure of tested 9Ni steel plate treated by QLT (a) and NNT (b)

9Ni 钢板,即使在空气中冷却,也具备良好的淬透性,可以得到类似于淬火的效果;另外,图 1 中试样 2 的组织较试样 1 略为粗大,说明冷却速率对钢板的晶粒会产生影响,所以对于较厚规格的 9Ni 钢板,尽量采用调质工艺,但对于 5 mm 厚度规格钢板,这种效应还不明显。

图 1 中白色部分为典型的马氏体回火后组织,有学者^[3]认为,9Ni 钢板从奥氏体化温度降温后得到板条状马氏体,经过高温回火,位错极大的减少或消失,淬火应力释放,白色区域为逆变奥氏体与回火马氏体组成。

一般认为,逆变奥氏体含量是 9Ni 钢低温韧性的关键组织^[4-7],逆变奥氏体是在低于 A_{c1} 温度下,由过饱和马氏体转变而来,合金元素高度富集,在极低温度下能保持组织相对稳定;钢板在断裂过程中,形变诱发逆变奥氏体向马氏体发生相变,吸收能量,使塑性变形引起的局部应力集中,因相变而发生松弛,阻止了裂纹的萌生和扩展。

本项目通过 XRD 对比分析试样 1、试样 2、试样 3 的逆变奥氏体含量。实验结果显示,试样 1 的逆变奥氏体含量 9.8%,试样 2 的逆变奥氏体含量 8.0%,试样 3 的逆变奥氏体含量 4.4%,该含量结果与对应的钢板低温韧性实测值相吻合。

4 工业试制

采用 NNT 工艺进行工业试制,依据 ASTM A353/A353-2019 标准,分别采用 3.3 mm × 10 mm × 55 mm 规格试样及 2.5 mm × 10 mm × 55 mm 规格试样进行冲击试验,结果如图 2 所示;钢板拉伸等其它性能满足兴澄特钢企标要求。

通过实测数据分析,采用 NNT 工艺生产的 9Ni 钢板,低温韧性良好,3.3 mm × 10 mm × 55 mm 规格冲击吸收能量主要集中在 40 ~ 50 J,2.5 mm × 10 mm × 55 mm 规格冲击吸收能量主要集中在 27 ~ 32 J,满足相关标准要求。

5 结语

(1) NNT 工艺与 QT 工艺相比较,NNT 工艺的

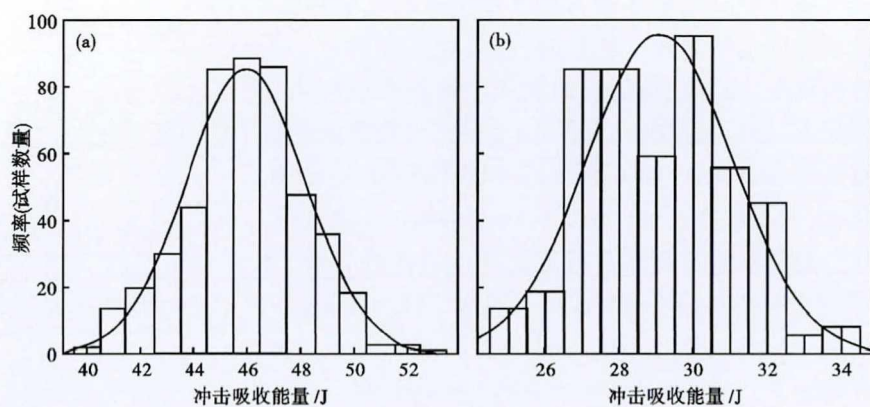


图 2 5 mm 9Ni 钢板冲击功分布,试样规格 /mm:(a)3.3 × 10 × 55; (b)2.5 × 10 × 55
Fig.2 Distribution of impact energy of 5 mm 9Ni steel plate, sample size /mm: (a) 3.3 × 10 × 55; (b) 2.5 × 10 × 55

钢板强度略低,但韧性更好。

(2) NNT 工艺与 QLT 工艺相比较,两者金相组织相似,其中 NNT 工艺钢板中逆变奥氏体含量略低于 QLT 工艺所得钢板。

(3) 采用 NNT 工艺进行工业试制,钢板低温韧性良好,满足企业标准要求。

创新型产业集群培育计划专项资金(CYJQ201802)

参考文献

- [1] 陆淑娟,陈润泽.低温容器用 9Ni 薄规格钢板生产工艺研究[J].热加工工艺,2012,41(2):69-70,74.
- [2] 武会宾,程莉,蔡庆伍.调质处理对 9Ni 钢逆转奥氏体形成的影响[J].材料热处理技术,2011,40(7):146-150.
- [3] 杨跃辉,蔡庆武,武会宾.两相区热处理工艺对 9Ni 钢性能的影响[J].材料热处理学报,2009,30(3):92-94.
- [4] 刘彦明,石凯,周勇.9Ni 钢的热处理及低温韧度[J].材料热处理,2007,36(16):77-81.
- [5] Yang Yuehui, Cai Qingwu and Tang Di. Precipitation and Stability of Reversed Austenite in 9Ni Steel[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2010, 17(5):587-595.
- [6] 何应玲,何宜柱,杨磊.热处理工艺对 9Ni 钢组织和低温韧性的影响[J].金属热处理,2017,42(2):119-123.
- [7] 谢章龙,刘振宇.9Ni 钢组织演变、合金元素配分及增韧机理的研究[J].材料科学与工艺,2013,21(2):6-13.

于雄(1979-),男,博士(重庆大学),高级工程师,新产品研发。E-mail:yuxiong@citicsteel.com

收稿日期:2020-09-09