

# 临氢化工用 200 mm 特厚 12Cr2Mo1R 钢板的研制及应用

尹卫江<sup>1</sup> 李杰<sup>2</sup> 龙杰<sup>1</sup> 张剑<sup>3</sup> 袁锦程<sup>1</sup> 吴艳阳<sup>1</sup> 王甜甜<sup>1</sup>

(1 舞阳钢铁有限责任公司科技部,舞钢 462500;2 舞阳钢铁有限责任公司,舞钢 462500;3 河钢集团承钢公司,承德 067002)

**摘要** 根据临氢化工用 200 mm 特厚 12Cr2Mo1R 钢板的要求,即  $P \leq 0.007\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ , 回火脆化系数  $J \leq 100$ ,  $X \leq 10 \times 10^{-6}$ , 采用 120 t BOF-LF-VD-连铸-电渣重熔技术及 300 mm 厚板淬火机热处理工艺控制,成功开发出了厚度 200 mm 的特厚 12Cr2Mo1R 钢板,钢板具有良好综合力学性能及内部质量,完全满足设计技术条件要求。

**关键词** 临氢化工 特厚钢板 12Cr2Mo1R 研制应用

## Development and Application of 200 mm Extra Thick 12Cr2Mo1R Steel Plate for Hydrogen Chemical Industry

Yin Weijiang<sup>1</sup>, Li Jie<sup>2</sup>, Long Jie<sup>1</sup>, Zhang Jian<sup>3</sup>, Yuan Jincheng<sup>1</sup>, Wu Yanyang<sup>1</sup> and Wang Tiantian<sup>1</sup>

(1 Department of Science and Technology, Wu Yang Iron and Steel Co Ltd, Wugang 462500;  
2 Wu Yang Iron and Steel Co Ltd, Wugang 462500; 3 HBIS Group Cheng Steel Company, Chengde 067002)

**Abstract** According to the requirements of 200 mm extra thick 12Cr2Mo1R steel plate for hydrogen chemical industry i. e.  $P \leq 0.007\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ , brittleness index  $J \leq 100$ ,  $X \leq 10 \times 10^{-6}$ , by the electroslag remelting technology of 120 t BOF-LF-VD-continuous bloom and the heat treatment process control of 300 mm thick plate quenching machine, the extra thick 12Cr2Mo1R steel plate with thickness of 200 mm is successfully developed. The steel plate has good comprehensive mechanical properties and internal quality to meet the requirements of design technical conditions.

**Material Index** Hydrogen Chemical Industry, Extra Thick Steel Plate, 12Cr2Mo1R, Development and Application

12Cr2Mo1R 钢作为加氢装置的核心设备加氢反应器和热高压分离器所用抗氢钢的首选材料,因长期处于 400 ~ 500 °C 高温、10 ~ 20 MPa 高压、强腐蚀(H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S)工作环境,设备服役周期长,对高温性能、稳定性和安全性要求苛刻<sup>[1,2]</sup>。随着现代压力容器设备日益向大型化发展及设计要求的提高,对钢板的厚度和性能要求更高更为严格;要求长时模焊,并保证板厚1/2处各项性能指标满足设计需求,因合金种类多、成分要求严,工艺过程复杂、组织性能要求高,钢板生产难度很大,因此,要求在现有工艺设备基础上,生产出具有高洁净、均质化、高强韧性稳定的超厚 12Cr2Mo1R 钢板,以满足化工行业技术升级和装备国产化用关键钢铁材料需求。

舞钢公司通过采用 Cr-Mo 钢电渣重熔技术及 300 mm 厚板淬火机热处理工艺控制,结合现有工艺

设备,成功开发出了厚度 200 mm 的临氢化工用特厚 12Cr2Mo1R 钢板,产品具有优良的综合力学性能。

### 1 主要技术标准

根据设备制造厂的设计使用要求,依据 GB/T 713-2014 标准及生产厂设备能力,制订了特厚 12Cr2Mo1R 钢板的技术要求。

#### 1.1 化学成分

特厚 12Cr2Mo1R 钢板的化学成分要求如表 1 所示。

#### 1.2 力学性能

特厚 12Cr2Mo1R 钢板模拟焊后力学性能应满足表 2 的要求。

#### 1.3 超声波探伤要求

表 1 12Cr2Mo1R 钢板的化学成分和技术要求

Table 1 Chemical composition and technical requirements of 12Cr2Mo1R steel plate

化学成分 /%											回火脆化系数 $J$	回火脆化系数 $X$
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	As	Sn	Sn	Cu		
0.05 ~ 0.17	≤0.10	0.30 ~ 0.60	≤0.007	≤0.005	2.00 ~ 2.50	0.90 ~ 1.10	≤0.012	≤0.015	≤0.003	≤0.20	≤100	≤10 × 10 <sup>-6</sup>

注:回火脆化系数  $X: X = (10P + 5Sb + 4Sn + As) \times 10^{-2} \leq 10 \times 10^{-6}$ , 式中元素以 10<sup>-6</sup> 代入,如 0.01% 以 100 × 10<sup>-6</sup> 代入;回火脆化系数  $J = [(Mn) + (Si)] \times [(P) + (Sn)] \leq 100$ , 式中元素以重量百分比代入,如 0.15% 应以 0.15 代入。

表 2 12Cr2Mo1R 钢板的力学性能要求  
Table 2 Mechanical properties of 12Cr2Mo1R steel plate

室温拉伸试验			横向冲击功 (-30℃)/J	高温(440℃)拉 伸( $R_{p0.2}$ )/MPa
$R_{el}$ /MPa	$R_m$ /MPa	A/%		
≥310	520~680	≥19	≥54(均值), ≥47(单值)	≥240

钢板应按 NB/T47013-2015 标准,进行 100% 超声波无损检测,要求满足 I 级合格。

#### 1.4 模拟焊后热处理制度

钢板试样应进行模拟焊后热处理,热处理制度如下:

Max. PWHT: (690 ± 14)℃ × (26 ~ 28)h

Min. PWHT: (690 ± 14)℃ × (6 ~ 8)h

装炉 ≤ 400℃,升温速率 ≤ 55℃/h,降温速率 ≤ 55℃/h,降温至 400℃ 出炉空冷。

## 2 生产难点及关键工序控制

### 2.1 生产难点

(1) 有害元素控制严格,  $P \leq 0.007\%$ 、 $J$  系数 ≤ 100、 $X$  系数 ≤  $10 \times 10^{-6}$ ; (2) 断面组织均匀性要求高,全厚度贝氏体组织 ≥ 90%; (3) 性能要求高,需满足长时模拟焊后性能、NB/T47013-2015 标准 I 级探伤以及高温性能、低表面硬度等指标; (4) 表面质量控制难度大,易产生应力裂纹等缺陷。随着钢板厚度增加,厚向截面效应引起的组织不均、心部性能恶化问题突出,生产难度进一步增加。

### 2.2 工艺路线

120 t 转炉 → LF 精炼 → VD 真空脱气 → 200 mm × 1 700 mm 断面连铸 → 960 mm 电渣锭 → 清理加热 → 轧制 → 探伤 → 热处理 → 钢板精整 → 取样 → 性能检验 → 成品钢板 (200 mm × 1 900 mm × 12 500 mm) → 判定入库。

### 2.3 关键工序控制

(1) 制定合适的内控成分,严格控制化学成分波动范围,确保钢板的性能稳定性。首先,应改善原料质量,采用弱脱氧 + 深脱氧 + 二次扒渣工艺,控制钢水中残氧含量在  $350 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ ,使钢水重新具备脱 P 反应的条件,通过精炼二次脱 P 技术, P 含量可控制在  $P \leq 0.006\%$ ,保证钢坯良好的内部质量,同时针对大厚度临氢钢合金含量高的特性,采用适合临氢钢特性的  $CaF_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $SiO_2$ 、 $MgO$  五元渣系和针对临氢 Cr-Mo 钢的电渣锭二次冷却工艺,同时控制重熔过程中电流、熔速等主要冶炼参数,使金属熔池深度得到有效控制,改善了大截

面氢化工用钢电渣锭偏析及疏松等缺陷。

(2) 轧钢工序控制方面,坯料全程执行温清、温装,采用全面扒皮清理方式,确保表面质量良好,电渣锭带温装入均热炉中进行加热,最高加热温度 ≤ 1 600℃,保证均匀透烧,轧制时采用 II 阶段控制轧制直接成材,开轧温度 1 050 ~ 1 100℃,高温阶段采用低速大压下轧制工艺, I 阶段轧制时,单道次压下率不低于 10%,确保心部组织有较大的变形量使电渣锭心部晶粒充分细化, II 阶段的开轧温度 ≤ 960℃,并控制晾钢厚度不低于 2 倍成品钢板厚度,对终轧前一道次,采用大压下量确保内部晶粒有足够的变形量,使原始晶粒组织得到细化,轧后不浇水,厚度按标准公差上限控制,电渣成材钢板轧后需进行扩氢退火处理。

(3) 热处理工艺控制,钢板正火热处理在 300 mm 厚板淬火机进行,钢板加热时采用动态有限元的二级系统加热工艺代替传统加热工艺,保证了正火温度和保温时间的准确控制,由于此钢合金含量高,正火温度根据相变点测定相变温度  $Ac_3$  以上 40 ~ 60℃,确保合金元素完全固溶,钢板充分奥氏体化,针对长板的加速冷却过程,对淬火机的水量、水压进行动态优化,水量 ≥ 5 000 m<sup>3</sup>/h,确保钢板厚度方向的组织均匀性,为保证钢板组织转变充分,钢板正火过程中严格控制水温不高于 28℃,保证钢板晶粒细化及组织均匀性。300 mm 级特厚钢板连续热处理线及核心加热、淬火装备见图 1。

(4) 利用膨胀法结合金相-硬度法,测定了 12Cr2Mo1R 钢的连续冷却转变静态 CCT 曲线,利用膨胀仪测定钢在不同冷却速度下的冷却曲线,确定相变点,同时绘制静态 CCT 曲线,12Cr2Mo1R 钢的静态 CCT 曲线见图 2。试验确定钢的相变点  $Ac_1$  为 791℃,  $Ac_3$  为 870℃,正火温度选择在该钢  $Ac_3$  相变点的基础上 40 ~ 60℃,确保奥氏体化充分为最佳。所以,本文采取的热处理工艺为:正火,加热温度 910 ~ 930℃,钢板出炉时采用水冷加速冷却,并进行高温回火处理。

## 3 产品实物性能分析

### 3.1 化学成分

通过对炼钢工序进行工艺优化,实现了成分的精确控制,钢板的化学成分见表 3 所示。

通过表 3 可以看出,钢板的各元素的化学成分均满足设计及标准要求,头尾成分差异性较小,有害元素 P、S 含量控制在较低水平,残余元素 As、Sn、Sb

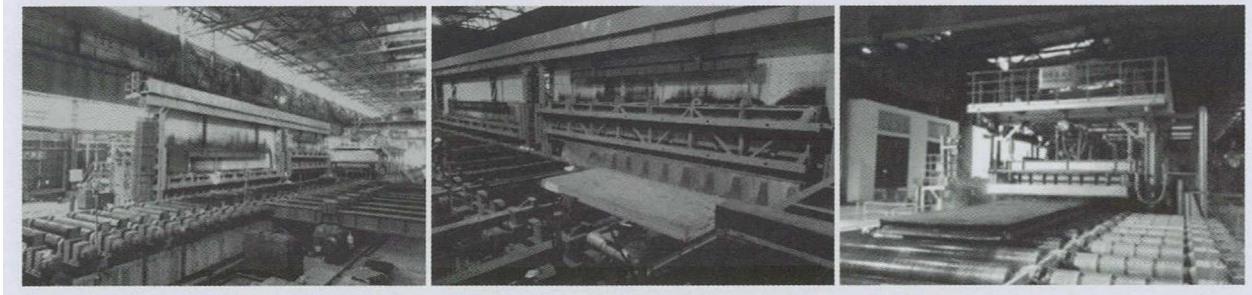


图1 300 mm 级特厚钢板连续热处理线及核心加热、淬火装备

Fig. 1 300 mm thick steel plate continuous heat treatment line and core heating and quenching equipment

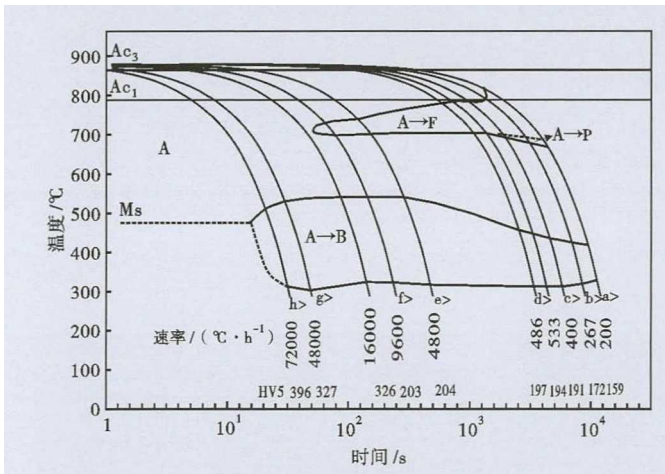


图2 12Cr2Mo1R 钢静态 CCT 曲线

Fig. 2 Static CCT curves of 12Cr2Mo1R steel

均控制较低含量,有效降低了钢板回火脆性的产生。

3.2 力学性能

为了分析特厚 12Cr2Mo1R 钢板的力学性能及其厚度方向性能的均匀性,分别在钢板表面下 1.6 mm,厚1/2处取样,制取试样并在小型热处理炉进行最大、最小模拟焊后热处理,随后进行力学性能检验,试验结果见表 4。

从表 4 可以看出,钢板板厚 1/2 处最大模焊态和表面下 1.6 mm 处最小模焊态性能均超设计标准值(室温拉伸要求值为:R<sub>cl</sub> ≥ 310 MPa, R<sub>m</sub>: 520 ~ 680 MPa, A ≥ 19%),并有较大的富余量,最小模焊态强度明显高于最大模焊态,说明随着模焊时间的延长,钢板的屈服强度及抗拉强度均呈下降趋势,延伸率明显提高。440 °C 高温拉伸屈服强度均满足设计要求, -30 °C 冲击功在 268 ~ 295 J,且比较均匀稳定,整体

力学性能可以看出,钢板的头尾性能差异性较小,力学性能较稳定,总体性能完全满足设计使用要求。

3.3 超声波检验

实物钢板经 100% 超声波检验,结果满足 NB/T47013-2015 标准 I 级的验收标准,内部质量良好。

3.4 金相组织

钢板正火后,切取科研试样,对正火状态钢板不同厚度位置的金相显微组织进行观察,结果见图 3 所示。

从图 3 可以看出,超厚 12Cr2Mo1R 钢板经厚板淬火机正火后的钢板上表面、中心、下表面均为贝氏体组织,组织较为均匀,厚板淬火机保证了钢板正火后的冷却速度,得到了预期的组织,晶粒度 6 ~ 7 级。

从图 4 可以看出,钢板经取样后在小型箱式电阻炉进行模拟焊后热处理,随后对其微观组织进行观察,经过 690 °C 28 h 长时模焊后其组织仍为回火贝氏体,晶粒度也未发生变化,碳化物在晶界和晶内以粒状和长条状弥散析出,钢板头尾组织呈均匀分布,无明显差别,这种组织决定了钢板 -30 °C 低温冲击功达到了较高水平,并且非常均匀稳定。

模拟焊后热处理过程相当于一个长时回火过

表 3 12Cr2Mo1R 钢板的化学成分和回火脆化系数

Table 3 Chemical composition and brittleness index of 12Cr2Mo1R steel plate

钢板部位	化学成分 / %											回火脆化系数 J
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	As	Sn	Sn	Cu	
头部 T	0.14	0.07	0.56	0.006	0.001	2.41	1.01	0.003	0.002	0.003	0.05	39
尾部 W	0.14	0.08	0.57	0.006	0.001	2.42	1.03	0.004	0.001	0.003	0.05	35

表 4 12Cr2Mo1R 钢板经模拟焊后热处理后的力学性能

Table 4 Mechanical properties of 12Cr2Mo1R steel plate after simulated PWHT

热处理工艺	位置	常温拉伸			440 °C 高温拉伸		-30 °C 冲击功 / J
		R <sub>cl</sub> / MPa	R <sub>m</sub> / MPa	A / %	R <sub>p0.2</sub> / MPa	R <sub>m</sub> / MPa	
最大模焊	1/2 厚-T	446	583	27	275	441	287, 284, 268
最小模焊	表面下 1.6-T	519	637	21.5	296	460	294, 289, 286
最大模焊	1/2 厚-W	447	582	27.5	277	443	283, 291, 269
最小模焊	表面下 1.6-W	510	632	21	300	472	295, 292, 286

程,该过程中的组织转变主要为回复作用增强,基体位错密度降低;第二相的形状、尺寸及分布发生变化<sup>[3]</sup>。而经过长时间模拟焊后热处理,钢内部回复作用逐渐增强,位错密度大幅度降低,板条宽度增大,且析出物聚集长大,析出强化效应下降,位错密度降低和板条宽度增加引起的软化效应明显大于析出强化效应,造成了长时模焊后钢强度的下降<sup>[4]</sup>。而钢经过长时模焊后晶内细小的析出物随着时间的延长增多,并在晶内及晶界弥散分布,随着合金元素析出增多,虽降低了固溶强化效果,但是由于新析出的第二相粒子未发生聚集长大,所以起到了一定的第二相强化作用,但长时模焊后钢板的强度出现不同比例的下降。随着模拟焊后热处理时间的延长,虽然有部分固溶的合金元素以析出相的形式析出,在一定程度上减弱了固溶强化的效果,但同时也增加了析出强化的效果,且材料的组织类型和晶粒度并未发生明显的变化,因此强度并没有大幅度下降<sup>[5]</sup>。

#### 4 结论

(1)通过采用 Cr-Mo 钢电渣重熔技术及 300 mm 厚板淬火机热处理工艺控制,结合现有工艺设备,成功开发出了厚度 200 mm 的临氢化工用特厚 12Cr2Mo1R 钢板,生产的钢板具有优良的综合力学性能。

(2)钢板实物经 100% 超声波检验,结果满足 NB/T47013-2015 标准 I 级的验收标准,内部质量良好。

(3)生产的钢板上表面、中心、下表面均为贝氏体组织,组织较为均匀。头尾及厚度方向性能差异性小,各项性能指标均符合设计及技术标准要求,并有较大的富余量。

国家重点专项计划项目(2017YFB0305300)资助

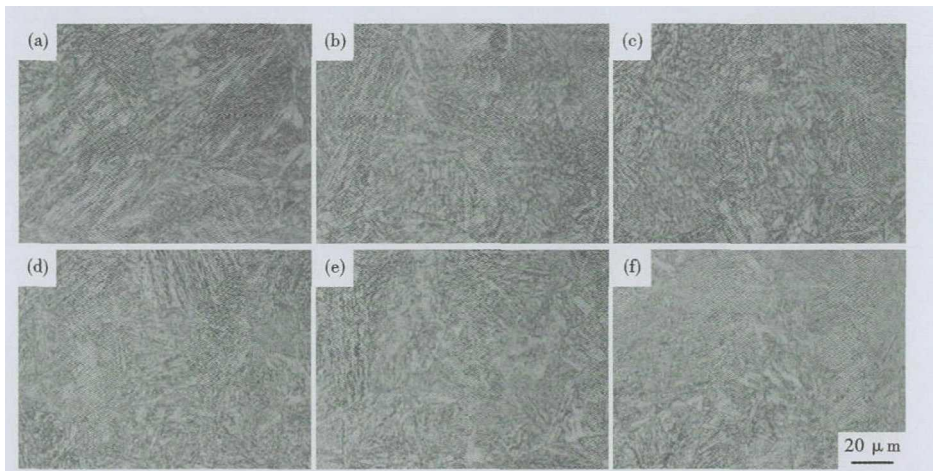


图 3 12Cr2Mo1R 钢板经正火后不同位置金相显微组织:(a)上表面-T;(b)中心-T;(c)下表面-T;(d)上表面-W;(e)中心-W;(f)下表面-W

Fig. 3 Microstructure of 12Cr2Mo1R steel plate at different positions after normalizing:(a) Upper surface-T; (b) Center-T; (c) Lower surface-T; (d) Upper surface-W; (e) Center-W; (f) Lower surface-W

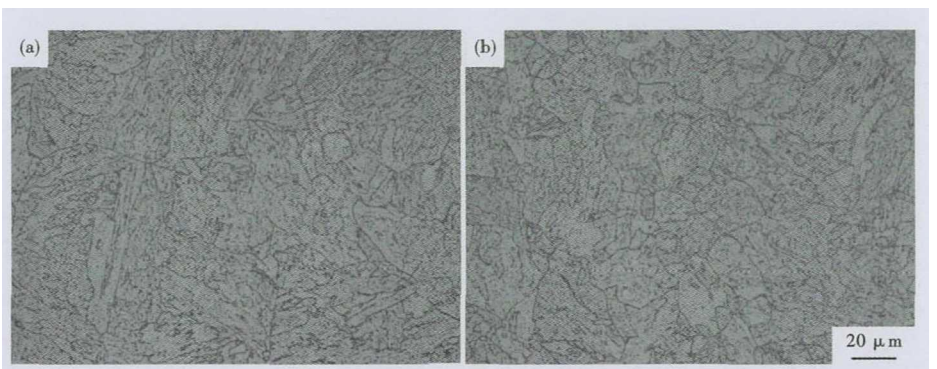


图 4 12Cr2Mo1R 钢板经最大模焊中心位置金相显微组织:(a)中心-T;(b)中心-W

Fig. 4 Metallographic microstructure of 12Cr2Mo1R steel plate at center-T (a) and center-W (b) of maximum simulated PWHT

#### 参考文献

- [1] 薛巍,王天先. 国产 2.25Cr-1Mo 厚钢板工艺性能研究. 第六届全国压力容器学术会议压力容器先进技术精选集[C]. 北京:机械工业出版社,2005:453-457.
- [2] 姜洪生,宋冬利,张汉谦,等. 临氢设备用 12Cr2Mo1R 厚钢板临界厚度研究[J]. 材料热处理学报,2009,30(2):192-194.
- [3] 董富军,张留红,刘小林. 模拟焊后热处理对 630MPa 压力容器用钢组织和性能的影响[J]. 金属材料与冶金工程,2017,45(5):76-80.
- [4] 吴艳阳,温冰,牛红星,等. 模拟焊后热处理制度对临氢 12Cr2Mo1R 钢板性能的影响[J]. 宽厚板,2012,18(1):6-8.
- [5] 何贝,徐光,袁清. 压力容器用 12Cr2Mo1R 钢 150 mm 超厚板热处理对组织和性能的影响[J]. 特殊钢,2015,36(6):45-48.

尹卫江(1983-),男,硕士(内蒙古科技大学),高级工程师,辽宁科技大学(本科)毕业,特殊钢品种开发。

E-mail:yinweijiang2010@163.com

收稿日期:2019-12-25