

高品质 980 mm × 1 960 mm 电渣扁锭轧制 164 mm × 1 700/1 806 mm 12Cr2Mo1VR 钢板研发

侯敬超¹ 赵国昌² 吴艳阳¹ 龙杰²

(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)

摘要 12Cr2Mo1VR 钢板生产的流程为 100 t EAF-LF-VOD-CC-ESR-轧制工艺。电渣重熔过程中,采用熔速降低(160~180) kg/h 及氮气保护等工艺;轧制过程采用低速大压下量轧制工艺;轧后采用 650~700 °C 长时保温扩氢退火工艺;热处理采用 930~950 °C 正火(加速冷却)+680~700 °C 回火工艺。生产的钢板表面质量良好,探伤级别满足 NB/T47013.3-2015 及第 1 号修改单 T I 级要求,钢板成分、显微组织均匀,力学性能满足技术要求。

关键词 12Cr2Mo1VR 钢板 电渣扁锭 大压下量轧制 扩氢退火 力学性能

Research and Development of High Quality 164 mm × 1 700/1 806 mm 12Cr2Mo1VR Steel Plate Rolled from 980 mm × 1 960 mm ESR Slab Ingot

HOU Jing-chao¹, ZHAO Guo-chang², WU Yan-yang¹, LONG Jie²

(1 Ministry of Science and Technology, Wuyang Iron and Steel Co Ltd, Wugang 462500;

2 Wuyang Iron and Steel Co Ltd, Wugang 462500)

Abstract The 12Cr2Mo1VR steel plate production flow is 100 t EAF-LF-VOD-CC-ESR-rolling process. In the electroslag remelting process, the processes such as melting rate reduced by (160~180) kg/h and nitrogen protection are adopted; low speed and large reduction rolling process is adopted in the rolling process; after rolling, 650~700 °C long-time holding hydrogen diffusion annealing process is adopted. Normalizing at 930~950 °C (accelerated cooling) + tempering process at 680~700 °C are adopted during heat treatment. The surface quality of the produced steel plate is good. The flaw detection level meets the requirements of NB/T 47013.3-2015 with No. 1 amendment T I rating. The composition and microstructure of the steel plate are uniform. The mechanical properties are stable to meets the technical requirements.

Material Index 12Cr2Mo1VR Steel Plate, ESR Slab Ingot, Large Reduction Rolling, Hydrogen Diffusion Annealing, Mechanical Property

近年来,我国能源、石油、化工等行业发展迅猛^[1],石化行业逐渐向大型化^[2-4]、集约化、绿色化的方向发展。对于大型石化设备,较早采用锻焊生产,由于工艺成熟稳定^[5],因此,国内设计院及制造厂更倾向于采用锻焊的方式生产。但相较于板焊工艺,锻焊工艺生产成本较高,越来越多的板焊^[6]石化设备逐渐代替锻焊设备。12Cr2Mo1VR 钢作为高端石化设备制造用钢^[7],常用于制造大型高端加氢反应器等,因此国内市场上对大厚度、大单重、性能优良的 12Cr2Mo1VR 钢板的需求量大幅增加。

由于电渣锭具有成分均匀、组织致密、有害元素含量低^[8,9]及成材率高等优势,因此对于高品质 12Cr2Mo1VR 钢板,一般采用电渣锭生产。

舞钢公司依托现有的 3 座 53 t 级别的电渣重熔炉,为国内石化项目供货了 12 块 12Cr2Mo1VR 钢板,钢板规格(mm)为 164 × 1 700/1 806 × 15 492 ,

钢板单重 34.2~36.3 t。

1 钢板技术要求

1.1 成分性能和检验

钢板成分要求见表 1。钢板的力学性能应符合表 2 要求。钢板进行性能检验时应从正火(加速冷却)+回火处理后钢板上取样,且应逐张成品取样检验,试样的切取位置、试验项目、试验方法、试样数量和热处理状态应符合表 3 的规定。

1.2 钢板探伤

钢板应逐张进行超声检测,检测方法按 NB/T 47013.3-2015 及第 1 号修改单标准执行,合格级别为 T I 级。

1.3 钢板晶粒度、显微组织及夹杂物

钢板原奥氏体晶粒度级别 ≥ 5 级;钢板贝氏体组织 $\geq 90\%$;钢板中硫化物夹杂(A类)、氧化物夹杂(B类)、硅酸盐夹杂(C类)、球状氧化物夹杂(D

表 1 12Cr2Mo1VR 钢板成分要求/%
Table 1 Requirements for chemical composition of 12Cr2Mo1VR steel plate/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Cu	Nb	Sb	Sn	As	P + Sn
熔炼分析	0.11 ~	≤	0.30 ~	≤	≤	2.00 ~	0.90 ~	0.25 ~	≤	≤0.07	≤	≤	≤	≤
	0.15	0.10	0.60	0.008	0.005	2.50	1.10	0.35	0.20		0.003	0.010	0.012	0.012
成品分析	0.10 ~	≤	0.30 ~	≤	≤	1.95 ~	0.87 ~	0.25 ~	≤	≤	≤	≤	≤	≤
	0.16	0.10	0.60	0.008	0.005	2.60	1.13	0.35	0.20	0.07	0.003	0.010	0.012	0.012

注:(1)J 系数 = (Si + Mn) × (P + Sn) × 10⁴ ≤ 100(目标值 ≤ 80);(2)式中各元素以质量百分含量(%)代入。(3)熔炼分析是指电渣锭电极所用连铸坯熔炼分析。

表 2 164 mm 12Cr2Mo1VR 钢板的力学性能要求
Table 2 Mechanical properties requirements of 164 mm 12Cr2Mo1VR steel plate

常温性能			435 °C 高温性能		-30 °C 冲击功/J	硬度值 HBW	180°冷弯
抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa			
590 ~ 760	415 ~ 620	≥18	≥470	≥344	≥60	≤235	D = 3a, 无裂纹

表 3 钢板取样及性能检验要求
Table 3 Requirements for sampling and performance testing of steel plate

试验项目	试验标准	试样数量	试样位置	试样状态
室温性能	GB/T 228.1-2010	6 组	T/2 处、T/4 处及表面下 1.6 mm, 试样轴线横向①	3 组 Max. PWHT②, 3 组供货态③
高温性能	GB/T 228.2-2015	2 组	T/2 处及表面下 1.6 mm, 试样轴线横向	1 组 Max. PWHT(T/2 处), 1 组 Min. PWHT(表面下 1.6mm 处)
夏比(V 形缺口) 冲击(-30°C)	GB/T 229-2007	2 套, 每套 3 件	T/2 处各 2 套, 试样轴线应垂直于轧 制方向, 试样缺口与钢板表面垂直	1 套 Max. PWHT, 1 套 Min. PWHT
回火脆化倾 向评定试验④	GB/T 229-2007	16 套	T/2 处, 试样轴线应垂直于轧制 方向, 试样缺口与钢板表面垂直	8 套 Min. PWHT 8 套 Min. PWHT + 阶梯冷却

注:①T 为钢板厚度。②Max. PWHT 及 Min. PWHT 指从正火(加速冷却) + 回火处理后钢板上取样后, 试样在试验室进行最大及最小模拟焊后热处理。③供货状态指钢板正火(加速冷却) + 回火态。④回火脆化评定试验推荐冲击温度为 -100 °C、-80 °C、-60 °C、-40 °C、-30 °C、-10 °C、0 °C、20 °C 各组成一组进行最小模拟焊后热处理和最小模拟焊后热处理 + 步冷脆化(SC)后的系列冲击, 其结果应满足 $V_{T54} + 3 \Delta V_{T54} \leq 0$ °C。

类)、单颗粒球状类夹杂(Ds 类)等粗、细系列均不得大于 1.5 级, 且应满足(A + C) ≤ 2.0 级、(B + D) ≤ 2.0 级、(A + B + C + D + Ds) ≤ 4.0 级。

1.4 试样模拟焊后热处理

试样进行性能检验前, 应进行相应的模拟焊后热处理, 试样模拟焊后热处理工艺如下所示:

最大模拟焊后热处理制度(Max. PWHT): (705 ± 14) °C 保温 32 h; 最小模拟焊后热处理制度(Min. PWHT): (705 ± 14) °C 保温 8 h。

2 钢板工艺控制要点

2.1 坯料成分

电渣锭电极所用连铸坯采用 100 t 电弧炉初炼 + 100 t LF 精炼 + 100 t VOD 脱气 + 连铸生产。

12Cr2Mo1VR 钢中主要含有 C、Cr、Mo、V、Al 等合金元素。C 为钢中重要的强化元素; Cr、Mo 在钢中形成稳定的碳化物, 能够提高钢板的热强性, 且起到固 C 作用, 避免钢中的不稳定 C 与 H 反应而造成的氢腐蚀; V 做为钢中的强碳化物形成元素, 能提高钢板的回火稳定性, 但 V 含量过高, 会增加钢板的

裂纹敏感性^[10]。在电渣重熔过程中, C、Cr、Al 等元素会产生一定的烧损^[11-12]。为保证成品钢板的性能及成分满足标准要求, 因此, 在冶炼电渣锭所用电极坯料时, C 按 0.13% ~ 0.15% 控制, Cr 按 2.4% ~ 2.5% 控制, Al 按 0.4% ~ 0.6% 控制, Mo 按 1.0% ~ 1.05% 控制, V 按 0.28% ~ 0.33% 控制。

2.2 电渣重熔过程

250/300 × 1 600 × 5 300(mm) 连铸坯制成自耗电电极后, 在 980 mm 级低频双极串联抽锭式板坯电渣重熔炉内通过电阻热加热熔化, 形成金属熔滴穿过渣池进入金属熔池, 在水冷结晶器的强冷作用下, 凝固成电渣锭。

对于电渣锭而言, 锭截面积越大, 越容易产生缩孔缺陷^[13]。此次 164 mm 厚 12Cr2Mo1VR 钢板采用截面为 980 mm × 1 960 mm 电渣锭生产, 易产生缩孔缺陷。为了减少电渣锭尾部出现的缩孔缺陷, 主要对以下工艺进行了优化: (1) 下调重熔前输入功率, 减少单位时间供热量, 熔速降低 160 ~ 180 kg/h; (2) 抽锭后采用先风冷后气雾冷却工艺, 提高冷却

表4 164 mm 12Cr2Mo1VR 钢板成分和气体含量/%
Table 4 Analysis composition and gas content of 164 mm 12Cr2Mo1VR steel plate/%

钢板号	位置	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	As	Sn	Sb	N	H	O
P21608113	上表面	0.13	0.07	0.55	0.005	0.0013	2.41	1.03	0.30	0.003	0.002	0.002	0.0052	0.0001	0.0012
	T/4 处	0.14	0.08	0.56	0.005	0.0014	2.42	1.04	0.31	0.004	0.002	0.002	0.0053	0.0001	0.0013
	T/2 处	0.14	0.08	0.55	0.005	0.0013	2.41	1.03	0.30	0.004	0.002	0.002	0.0051	0.0001	0.0011
	T3/4 处	0.14	0.08	0.55	0.006	0.0014	2.41	1.04	0.31	0.004	0.003	0.002	0.0053	0.0001	0.0012
	下表面	0.13	0.07	0.55	0.005	0.0013	2.42	1.04	0.30	0.004	0.002	0.002	0.0052	0.0001	0.0013

均匀性。

当电渣锭中的 H 含量超过一定值时,轧成钢板后就会出现白点或氢致裂纹等缺陷^[14],会直接造成钢板判废。研究表明,电渣锭中 H 主要来源于自耗电极中的原始 H,电渣重熔用渣料带入的水分和电渣重熔过程中空气中的水分^[15]。为减少电渣锭中 H 含量,主要工艺措施:(1)控制电渣重熔炉周围空气湿度;(2)重熔过程中,在熔渣界面充氮气,进行氮气保护。

2.3 钢板轧制过程

电渣锭在均热炉内加热至 1 240 ~ 1 280 °C,充分保温后,在 4 200 mm 四辊可逆式轧机上开坯成规格为 500 mm × 2 000 mm × 6 500 mm 坯料。坯料加热轧制前应先进行切割清理,首先切掉头部缩孔区域及尾部垫铁,之后对坯料表面缺陷处进行火焰清理。坯料处理完后装连续炉加热,为了减少坯料表面由于加热产生的缺陷,加热采用阶梯加热工艺。首先在预热段预热,加热温度 700 ~ 1 000 °C,之后转运至加热段,加热温度 1 250 ~ 1 290 °C,出炉前在均热段保温,加热温度 1 240 ~ 1 280 °C。钢板在轧制过程中,需要采用低速大压下量轧制工艺,至少 3 道次压下量 ≥ 25 mm。

2.4 钢板扩氢退火过程

常用的扩氢退火有两种,一种是电渣锭开坯后对坯料进行退火,一种是轧成钢板后对钢板进行退火。研究表明^[14],对于电渣锭扩氢,截面积越小,越有利于氢元素的扩散。因此,此次 164 mm 厚 12Cr2Mo1VR 钢板,钢板轧出后,在台车炉内对钢板进行高温长时扩氢退火处理,扩氢退火工艺为 650 ~ 700 °C,保温 65 ~ 70 h。

2.5 热处理过程控制

12Cr2Mo1VR 钢的理想组织为回火贝氏体组织,因此,钢板热处理时采用正火(加速冷却) + 回火工艺。为保证钢板充分奥氏体化,正火温度 930 ~ 950 °C,钢板在辊底式淬火炉及配套的淬火机进行正火(加速冷却)处理,正火出炉后采用高低冷却水压淬火工艺冷却,可以保证钢板在淬火机水量一定的情况下得到预期的组织。根据 12Cr2Mo1VR 钢

CCT 曲线^[16],正火后冷却过程中需达到一定的冷速才可以避过铁素体转变区,因此,在铁素体转变区内淬火时采用高压冷却水,钢板快冷避过铁素体转变区;之后可采用压力较小冷却水,钢板冷速较慢,进入贝氏体转变区,确保钢板生成贝氏体组织。根据钢板的模拟焊后热处理工艺和性能要求,确定钢板回火温度为 680 ~ 700 °C。

3 钢板实物质量

12 块电渣锭成材 164 mm 厚 12Cr2Mo1VR 钢板探伤级别均满足 NB/T47013.3-2015 及第 1 号修改单 T I 级要求。

电渣成材 164 mm 厚 12Cr2Mo1VR 钢板表面质量良好,无白点、裂纹等表面缺陷。

表 4 为钢板全厚度方向主要成分(成品)分析,从表 4 可以看出,电渣锭成材 164 mm 厚 12Cr2Mo1VR 钢板全厚度方向成分均匀,未出现明显成分偏析现象,有害元素 P、S、As、Sn、Sb 等控制良好,N、H、O 气体元素处于较低水准。

图 1 为钢板供货状态全厚度(T)方向金相组织,图 1(a、b、c、d、e)分别为钢板上表面、板厚 1/4 处、板厚 1/2 处、板厚 3/4 处及下表面金相组织。从图 1 中可以看出,钢板全厚度方向金相组织均为回火贝氏体,组织均匀细小,无混晶及明显偏析带,厚度方向组织差别不大。

图 2 为钢板最大模焊态金相组织,图 3(a、b、c)分别为钢板表面、板厚 1/4 处及板厚 1/2 处金相组织。从图 2 中可以看出,试样经最大模焊处理后,贝氏体组织中的残留奥氏体已明显分解,残留奥氏体与贝氏体铁素体界面已经模糊不清,贝氏体铁素体中有部分碳化物析出。

表 5 为钢板最大模焊态夹杂物及晶粒度检测结果,从表 5 可以看出,钢板夹杂物控制良好,晶粒度达到 9 级。

3.1 常规力学性能

3.1.1 常温拉伸性能

表 6 是钢板表面下 1.6 mm、板厚 1/4 处、1/2 处

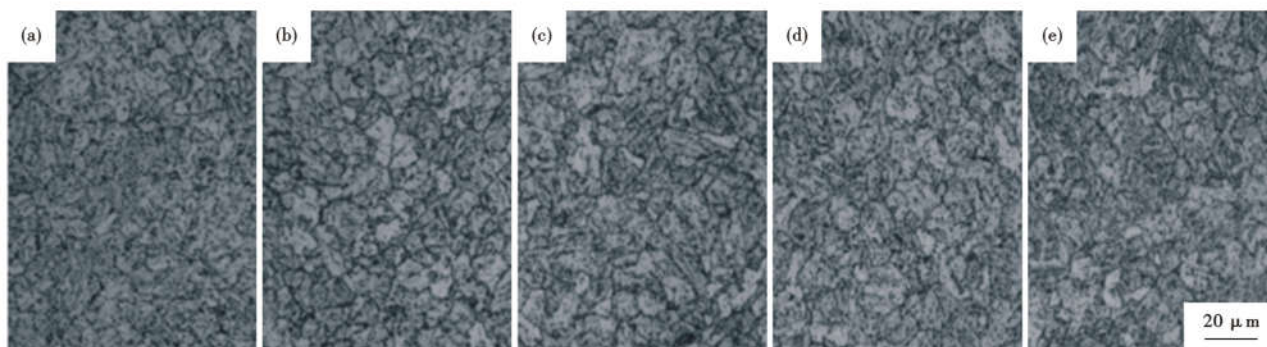


图 1 正火-高温回火 164 mm 12Cr2Mo1VR 钢板金相照片:(a)上表面,(b)板厚 1/4 处,(c)板厚 1/2 处,(d)板厚 3/4 处,(e)下表面

Fig. 1 Metallographic photographs of 164 mm 12Cr2Mo1VR steel plate as supplied-normalized + high temperature tempered:(a) Upper surface, (b) Thick 1/4, (c) Thick 1/2, (d) Thick 3/4, (e) Lower surface

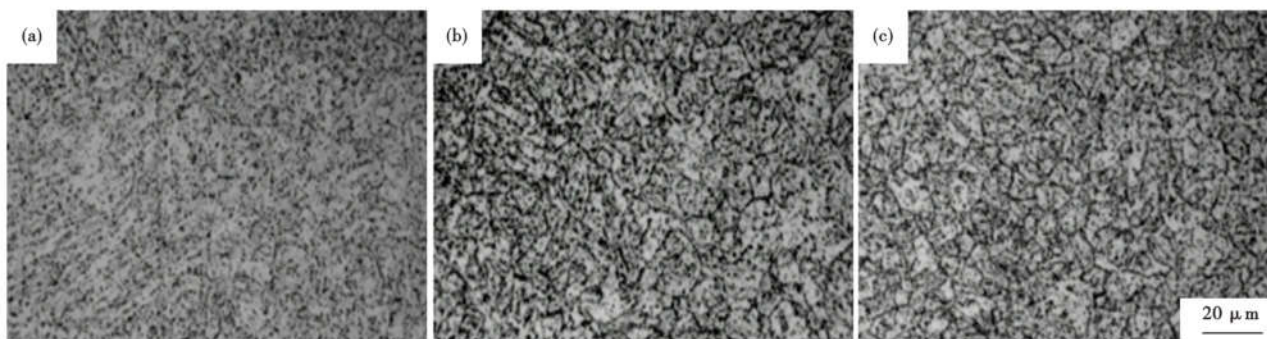


图 2 164 mm 12Cr2Mo1VR 钢板最大模焊态金相照片:(a)上表面,(b)板厚 1/4 处,(c)板厚 1/2 处

Fig. 2 Metallographic photographs of 164 mm 12Cr2Mo1VR steel plate of Max. PWHT:(a) Upper surface, (b) Thick 1/4, (c) Thick 1/2

表 5 164 mm 12Cr2Mo1VR 钢板的最大模焊态夹杂物及晶粒度/级

Table 5 Inclusions and grain size of 164 mm 12Cr2Mo1VR steel plate of Max. PWHT/rating

钢板号	A 类		B 类		C 类		D 类		Ds 类	晶粒度
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细		
P21608113	0	0	0	0.015	0	0	0.020	0.025	0	9

表 6 164 mm 12Cr2Mo1VR 钢板的常温拉伸性能

Table 6 Tensile properties of 164 mm 12Cr2Mo1VR steel plate at room temperature

钢板号	状态	位置	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
P21608113	供货态	表面下 1.6 mm	684	749	18
		T/4 处	695	751	18
		T/2 处	694	745	19
	Max. PWHT	表面下 1.6 mm	466	601	22
		T/4 处	472	612	23
		T/2 处	471	609	21

表 7 164 mm 12Cr2Mo1VR 钢板 435 °C 高温拉伸性能

Table 7 Tensile properties of 164 mm 12Cr2Mo1VR steel plate at 435 °C high temperature

钢板号	状态	位置	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
P21608113	Min. PWHT	表面下 1.6 mm	482	554
	Max. PWHT	T/2 处	452	526

供货态及最大模焊态常温拉伸性能。从表 6 中可以看出,钢板供货状态,3 个位置屈服强度 684 ~ 695 MPa,抗拉强度在 745 ~ 751 MPa,厚度方向拉伸性能无明显差异,与上述钢板厚度方向成分组织的均匀性相对应,钢板延伸率均达到 18% 以上,表现出良好的塑性。钢板最大模焊态,3 个位置屈服强度 466 ~ 472 MPa,抗拉强度 601 ~ 612 MPa,钢板具有较好的抗回火软化能力。

3.1.2 高温拉伸性能

表 7 是钢板 435 °C 最小模焊及最大模焊态高温拉伸性能,从表 7 中可以看出,钢板的高温拉伸性能良好。钢板成分设计时,在保证钢板力学性能及使用性能的前提下,提高了 Cr、Mo、V 元素含量,保证了钢板的热强性。

表8 164 mm 12Cr2Mo1VR钢板 -30 °C冲击性能
Table 8 Impact properties of 164 mm 12Cr2Mo1VR steel plate at -30 °C

钢板号	状态	位置	KV ₂ /J
P21608113	Min. PWHT	T/2处	299,286,296
	Max. PWHT		260,256,258

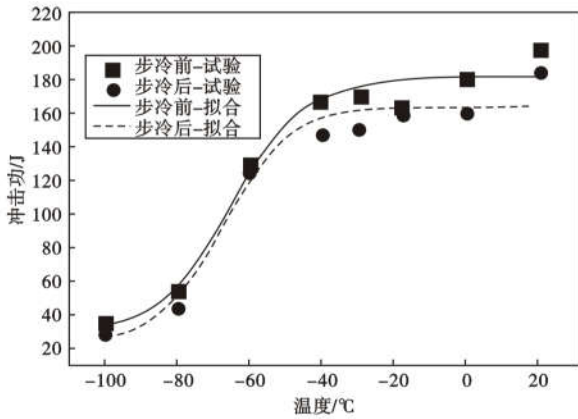


图3 164 mm 12Cr2Mo1VR钢板步冷脆化曲线

Fig. 3 Step-cooling embrittlement test curve of 164 mm 12Cr2Mo1VR steel plate

3.1.3 低温冲击性能

表8为钢板最小模焊及最大模焊态-30 °C冲击性能,从表8中可以看出,钢板模焊态冲击性能均达到250 J以上,表现出良好的低温冲击性能,这与

钢板组织均匀、晶粒细小相对应。

3.2 步冷脆化试验结果

图3为钢板步冷脆化曲线,根据步冷曲线计算的钢板步冷脆化试验结果为Min. PWHT状态板厚1/2处 $VTr_{54} + 3 \Delta VTr_{54} = -78.9$ °C完全满足钢板步冷试验 $VTr_{54} + 3 \Delta VTr_{54} \leq 0$ °C的要求,说明钢板具有良好的抗回火脆化能力。钢板生产过程中对P、Sn等有害元素进行严格控制,明显降低了钢板的回火脆化倾向,提高了设备的服役稳定性。

4 结论

(1)通过对坯料成分、电渣重熔工艺、轧制工艺、扩氢退火工艺、热处理工艺进行优化并精确控制,164 mm厚电渣锭成材12Cr2Mo1VR钢板表面质量优良,探伤满足NB/T47013.3-2015及第1号修改单T I级要求。

(2)164 mm厚电渣锭成材12Cr2Mo1VR钢板成分均匀,有害元素含量低;显微组织、晶粒度及夹杂物控制良好;钢板全厚度方向常温拉伸性能均匀,高温拉伸性能及低温冲击性能良好,且与标准值有一定富余量;钢板的步冷脆化试验结果良好,体现了钢板较好的抗回火脆化能力。

参考文献

[1] 李祥兵,柳付芳,赵国昌,等. 14Cr1MoR钢136 mm特厚板极限低温冲击韧性[J]. 特殊钢,2020,41(4):59-63.
 [2] 王天先,王文利. 2.25Cr-1Mo-0.25V钢大直径封头拼缝的性能试验[J]. 压力容器,2018,35(1):15-19.
 [3] 尹卫江,李杰,龙杰,等. 临氢化工用200 mm特厚12Cr2Mo1R钢板的研制及应用[J]. 特殊钢,2020,41(3):51-54.
 [4] 林强,张华,陈国威,等. 压力容器钢板探伤不合格原因分析及工艺优化[J]. 特殊钢,2017,38(5):17-21.
 [5] 柳曾典,陈进,卜华全,等. 2.25Cr-1Mo-0.25V钢加氢反应器开发与制造中的一些问题[J]. 压力容器,2011,28(5):33-40.
 [6] 张国松,刘斌,张勇,等. 板焊式加氢反应器[J]. 石油科技论坛,2016(增刊):212-215.
 [7] 刘永胜,庞庆海. 2.25Cr-1Mo-0.25V钢加氢筒体锻件持久性能的研究[J]. 热加工工艺,2018,47(1):158-160.
 [8] 李世健,成国光,苗志奇,等. 自耗电极冶金质量对G20CrNi2Mo轴承钢电渣锭洁净度的影响[J]. 特殊钢,2018,39(6):6-10.
 [9] 李大航,王思成,刘璇,等. 电渣重熔对4J36合金组织和力学性能的影响[J]. 特殊钢,2020,41(2):54-56.
 [10] 侯敬超,李峥,吴艳阳,等. 舞钢电渣锭成材12Cr2Mo1VR钢板研制与开发[J]. 宽厚板,2018,24(5):16-20.
 [11] 陈韩峰,张东. 气氛保护电渣重熔GH4169的冶金质量及锻造性能分析[J]. 甘肃科技,2021,37(7):53-57.
 [12] 李孟钊,郭宏磊. 水电钢电渣重熔过程中Al元素烧损研究[J]. 宽厚板,2021,27(1):25-32.
 [13] 郭宏磊,毕殿阁,李常牛. 板坯电渣锭轧板尾部探伤质量控制工艺改进[J]. 宽厚板,2019,25(5):23-25.
 [14] 吴彬,姜周华,董艳伍,等. 电渣重熔过程钢的洁净度控制[J]. 辽宁科技大学学报,2018,41(5):341-349.
 [15] 耿鑫,姜周华,刘福斌. 电渣重熔过程中氢含量的控制[J]. 钢铁,2008,43(10):38-41.
 [16] 侯敬超,李杰,吴艳阳,等. 2.25Cr-1Mo与2.25Cr-1Mo-0.25V钢冷却转变对比分析[J]. 金属热处理,2020,45(4):51-54.

侯敬超(1989-),男,硕士(2015年内蒙古科技大学),工程师,2012年河南工业大学(本科)毕业,钢铁材料新产品研发及工艺研究。E-mail:hou_jingchao@163.com

收稿日期:2021-09-16