

单重 50 t 级别 174 mm 12Cr2Mo1R(H) 钢板研发

侯敬超¹ 赵国昌² 李 杰² 龙 杰¹ 吴艳阳¹ 袁锦程¹

(1 舞阳钢铁有限责任公司科技部; 2 舞阳钢铁有限责任公司, 舞钢 462500)

摘 要 介绍了舞钢生产的单重 50 t 级别的 174 mm 12Cr2Mo1R(H) 钢板的技术要求、工序工艺控制点及实物质量。通过冶炼时采用 C/Al 结合脱氧方式, 铸锭进行 900 ~ 940 °C 保温 28 ~ 32 h 退火处理, 轧制时保证道次压下量 20 ~ 30 mm, 并采用正火 + 加速冷却 + 回火工艺, 钢板组织均匀, 各项力学性能及步冷脆化性能均能满足技术要求。钢板内部质量良好, 探伤满足 NB/T47013. 3-2015 及第 1 号修改单 T1 级。

关键词 12Cr2Mo1R(H) 钢板 锻造锭 热处理 力学性能 探伤

Research and Development of Single Weight 50 t Grade 174 mm 12Cr2Mo1R (H) Steel Plate

Hou Jingchao¹, Zhao Guochang², Li Jie², Long Jie¹, Wu Yanyang¹ and Yuan Jincheng¹

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

2 Wuyang Iron and Steel Co Ltd, Wugang 462500)

Abstract The paper induces technical requirements, process control key points and quality of actual product of single weight 50 t grade 174 mm 12Cr2Mo1R (H) steel plate is produced at Wugang. By C/Al combined deoxidation in the smelting process, ingot annealing at 900 ~ 940 °C for 28 ~ 32 h, rolling pass reduction 20 ~ 30 mm and using normalizing + accelerating cooling + tempering process, the plate structure is uniform, and the mechanical property and step-cooling embrittlement performance of steel plate reach technical requirements. Internal quality of steel plate is excellent. NDT meets NB/T47013. 3-2015 and revised list No. 1 T1.

Material Index 12Cr2Mo1R(H) Steel Plate, Forged Ingot, Heat-Treatment, Mechanical Property, NDT

中委合资广东石化 2 000 万 t/年重油加工工程项目于 2012 年 4 月获国家发改委批准, 该工程由中国石油集团与委内瑞拉国家石油公司共同出资建设, 为适应市场形势变化需要, 2018 年对项目建设内容进行了调整变更, 项目变更后的建设内容之一是 2 套 330 万 t/年的柴油加氢装置热高压分离器。

热高压分离器长期处于高温、高压及临氢的工作环境中^[1], 为保证设备的正常运转, 对设备用钢提出了相当高的要求。首先要求钢板有良好的内部质量^[2], 其次钢板在高温、高压状态下性能满足使用要求的前提下, 仍具有良好的机械加工性能^[3], 最后钢板还应具有良好的抗回火脆化性能、耐氢腐蚀性能及抗氢致剥离性能^[4], 综合考虑生产成本及性能要求, 12Cr2Mo1R(H) 钢板^[5-6]成为热高压分离

器的首选材料。

随着石化设备的产能在逐渐扩大, 设备用钢板的规格和单重也逐步增大, 该项目热高压分离器用 12Cr2Mo1R(H) 钢单重达到 50 t, 厚度 174 mm, 长度 16 796 mm, 钢板生产难度极大。舞钢公司作为国内压力容器用 Cr-Mo 钢板生产的龙头企业, 为该项目供货了 11 块单重 50 t 级的 12Cr2Mo1R(H) 钢板。

1 钢板技术要求

根据 GB/T 713-2014、并参照项目用 12Cr2Mo1R(H) 钢板采购规范, 制定了技术条件, 技术条件主要要求如下。

1.1 成分要求

钢板成分在满足 GB/T 713-2014 的前提下, 对

表 1 12Cr2Mo1R(H) 钢板化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 12Cr2Mo1R(H) steel plate/%

项目	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Ni	Cu	V	Sb	Sn	As
熔炼分析	≤0.15	≤0.10	0.30~0.60	2.00~2.50	0.90~1.10	≤0.010	≤0.010	≤0.20	≤0.20	≤0.02	≤0.003	≤0.015	≤0.016
成品分析	≤0.15	≤0.10	0.27~0.63	1.95~2.60	0.87~1.13	≤0.010	≤0.010	≤0.20	≤0.20	≤0.02	≤0.003	≤0.015	≤0.016

要求: (1) J 系数 = (Si + Mn) × (P + Sn) × 10⁴ ≤ 100, (2) P + Sn ≤ 0.012。式中各元素以质量百分数(%) 代入。

表 2 12Cr2Mo1R(H) 钢板力学性能要求

Table 2 Mechanical property requirements for 12Cr2Mo1R(H) steel plate

常温拉伸				410 ℃ 高温拉伸		30 ℃ 冲击功/J	180° 冷弯
R_m /MPa	R_{el} /MPa	A/%	Z/%	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa		
520 ~ 680	310 ~ 620	≥20	≥50	≥428	≥238	≥54	D = 3a, 无裂纹

表 3 12Cr2Mo1R(H) 钢板力学性能检验方法

Table 3 Test method for mechanical properties of 12Cr2Mo1R(H) steel plates

试验项目	试验标准	试样位置	试样状态
室温拉伸	GB/T 228. 1	板厚 1/2 处	交货态及最大模焊态①
高温拉伸	GB/T 228. 2	板厚 1/2 处	最大模焊态
夏比(V 形缺口) 冲击(- 30℃)	GB/T 229	板厚 1/2 处	最小及最大模焊态
冷弯试验	GB/T 232	钢板表面	交货态
成分分析	GB/T 223	板厚 1/2 处	交货态
回火脆化倾向评定试验②	GB/T229	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: ① 钢板以正火(加速冷却) + 回火状态交货, 试样状态中交货态即正火(加速冷却) + 回火态, 模焊态即正火(加速冷却) + 回火 + 模焊态, 模焊工艺为: 最大模焊: (690 ± 14) ℃ 保温 26 h, 最小模焊: (690 ± 14) ℃ 保温 8 h。② 回火脆化评定试验推荐冲击温度为 - 100 ℃、- 80 ℃、- 60 ℃、- 40 ℃、- 30 ℃、- 10 ℃、0 ℃、20 ℃ 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 $V_{Tr54} + 2.5 \Delta V_{Tr54} \leq 0$ ℃。

P、S 等元素进行了限定, 如表 1 所示。

1.2 性能及检验要求

钢板的力学性能应符合表 2 要求。

钢板的力学性能检验方法符合表 3 要求。

1.3 钢板探伤要求

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

2 钢板工序及工艺设计

首先考虑钢板单重及规格, 11 块钢板单重均达到 50 t, 钢板厚度均为 172 mm, 长度均为 16 796 mm, 该单重规格钢板已超舞钢采用电渣锭及普通扁锭生产极限; 其次考虑钢板性能, 钢板要求板厚 1/2 处最大模焊态常温及高温拉伸性能和低温冲击性能, 为保证钢板性能, 板厚 1/2 处必须有良好的组织储备; 最后考虑钢板内部及表面质量, 钢板要求能标 T1 级探伤, 且表面不允许出现压坑、裂纹等缺陷。综上考虑, 最终决定采用锻造锭开坯 + 轧制 + 正火 + 加速冷却 + 回火工艺生产该钢板。钢板具体生产工艺流程如下: 90 t 电弧炉 → 90 t 精炼炉 → 100 t 真空炉脱气 → 模注(80 t 16 楞锻造圆锭) → 退火 → 轧制 → 锻造开坯(460 mm × 2 200 mm × 7 500 mm) → 坯料清理 → 连续炉加热 → 轧制 → 探伤 → 热处理 → 性能检验 → 线下精整 → 成品钢板(172 mm × 2 150 mm × 16 796 mm) → 入库发运。

2.1 锻造锭冶炼

锻造锭冶炼过程中, 不仅要确保钢锭成分满足工艺要求, 更要保证钢锭内部质量。12Cr2Mo1R

(H) 钢为低 Si 临氢 Cr-Mo 钢, 根据舞钢公司该类钢板的生产经验, 低 Si 临氢 Cr-Mo 钢锭尾部容易出现分层缺陷, 缺陷带到钢板上, 即造成钢板探伤不合格。研究表明^[7-8], 钢锭在凝固过程中形成的尾部沉积锥, 是造成钢板分层缺陷的主要原因。钢板尾部沉积锥的成因主要是, 钢锭顶部的结晶雨、钢锭侧壁枝晶熔断或折断形成的自由晶以及底部传热的凝固生长, 阻碍钢液对流回到钢锭底部夹杂物的上浮。为减少由于沉积锥造成的钢板尾部分层缺陷, 舞钢主要采取的措施有: (1) C 脱氧与 Al 脱氧结合使用, 减少 Al 使用量, 并加强真空过程中吹 Ar 操作, 避免真空后喂 Al; (2) 严格控制浇注速度 3 ~ 4.5 t/min, 特别浇注后期, 避免冒口浇注时间长而导致钢液上升动力不足^[9]; (3) 采用保温钢冒口, 冒口处挂绝热板, 减少冒口处降温^[10]。

2.2 锻造锭开坯

采用大单重锻造锭锻造开坯, 首先可以满足钢板单重及规格的轧制要求, 其次, 锻造过程中产生的大变形量可以渗透到锻造锭心部, 不仅可以弥合锻造锭心部缺陷^[11], 还可以细化心部组织。本次钢板生产过程中, 采用舞钢自产的 80 t 16 楞锻造圆锭, 外委国内锻造厂锻造成规格为 460 mm × 2 200 mm × 7 500 mm 坯料, 之后切掉坯料冒口及锭尾, 保证坯料单重 60 t 左右。为避免坯料产生裂纹及炸裂缺陷, 锻造锭浇注后进行高温长时退火处理, 退火温度高于该钢的奥氏体化温度, 设定在 900 ~ 940 ℃, 保温 28 ~ 32 h, 降至 200 ~ 250 ℃ 出炉; 锻造坯装炉加热轧制前, 为避免火焰清理时二次加热造成的裂

纹缺陷, 坯料采用机械修磨处理, 清理掉坯料表面的锻痕、铁皮压入、压坑、裂纹等缺陷。

2.3 坯料轧制

轧制过程是钢板成型中最后也是最关键的一步, 要保证钢板的板型、表面及内部质量。由于锻造坯料厚度大且单重大, 坯料加热过程中需采用阶梯加热及长时保温工艺, 轧制过程中采用低速大压下量轧制工艺。阶梯加热可以避免坯料在加热过程中由于内外温差大产生较大内应力而造成的坯料裂纹及炸裂现象, 并且保证了坯料加热均匀性。由于 12Cr2Mo1R(H) 合金元素含量达到近 4%, 为保证钢板性能, 合金元素必须充分固溶, 众所周知, 合金元素的固溶与其的扩散速度有关, 而提高坯料加热温度及延长保温时间可以促进合金的扩散, 保证合金元素充分固溶, 考虑到该钢有较高的合金元素, 并结合舞钢现场生产经验, 坯料加热温度设置在 1 240 ~ 1 280 °C, 保温时间 ≥ 5 h。轧制时采用大压下量轧制工艺, 可以在锻造的基础上进一步弥合坯料内部缺陷, 并能细化晶粒, 改善组织, 轧制 11~14 道次, 轧制道次压下量 20 ~ 30 mm。

2.4 钢板热处理

由于钢板的模焊制度及性能要求极为严格, 为保证钢板性能稳定性, 钢板热处理时采用正火 + 加速冷却 + 回火工艺生产。钢板正火及加速冷却过程在辊式淬火炉及其配套的淬火机进行, 为保证钢板正火过程中充分奥氏体化^[2], 正火温度控制在 A_{c3} 温度以上 50 ~ 70 °C, 加热时间采用 PLC 二级模拟自动加热控制系统, 按 PLC + 20 min 控制, 钢板厚度达到 172 mm, 足够的正火后冷却速度才能保证钢板心部发生预期的组织转变, 加速冷却过程中采用高低压淬火工艺, 在总水量一定的前提下, 充分利用淬火机流量及压力合理配比, 保证钢板在各阶段的冷却速度。通过回火对钢板性能进行调整, 回火温度控制在 A_{c1} 温度以下 80 ~ 100 °C, 保温 6 ~ 6.5 h, 空冷。

3 钢板实物质量

3.1 化学成分

图 1 为钢板主要有害元素含量分布图。从图 1 可以看出, P 含量最高达到 0.007%, S 最高 0.004%, 大多在 0.003% 及以下, As、Sn 最高 0.004%, Sb 最高 0.003%, 大多 0.002% 及以下。可以看出, 钢板的主要有害元素控制在较低的水准, 且与标准要求有较大的富余量, 能够很好的满足钢

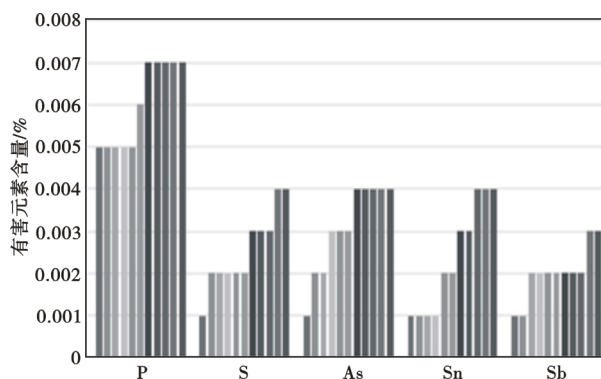


图 1 12Cr2Mo1R(H) 钢板 P、S、As、Sn、Sb 含量分布

Fig. 1 Distribution of P, S, As, Sn, Sb content in 12Cr2Mo1R(H) steel plate

板的焊接性能及设备的使用性能。

3.2 显微组织

图 2 为钢板全厚度方向的显微组织金相照片, 图 2(a、b、c、d、e) 分别为钢板上表面、板厚 1/4 处、心部、板厚 3/4 处及下表面。从图 2 可以看出, 钢板全厚度方向金相组织均为回火贝氏体组织, 心部与表面相比, 并没有明显区别, 组织中均存在贝氏体铁素体、(M/A) 岛及析出碳化物。钢板经过锻造及轧制处理后, 合金已充分固溶, 变形已渗透到钢板心部, 为后续热处理做好了组织基础; 钢板中含有较多 Cr、Mo 等元素提高淬透性, 冷却过程中高低压淬火保证了钢板冷速, 在钢板正火 + 加速冷却过程中, 确保了钢板从表面到心部的组织转变。

3.3 常规力学性能

3.3.1 常温及高温拉伸性能

表 4 为钢板常温及 410 °C 高温拉伸性能数据, 从表 4 可以看出, 钢板常温拉伸性能中, 交货态屈服强度最低 500 MPa, 最高 559 MPa, 大多分布在 500 ~ 530 MPa, 抗拉强度最低 640 MPa, 最高 674 MPa, 交货态拉伸性能较为均匀; 钢板最大模焊态屈服强度最低 413 MPa, 最高 451 MPa, 大多分布在 413 ~ 427 MPa, 抗拉强度最低 556 MPa, 最高 599 MPa, 试样经最大模焊处理后, 屈服强度及抗拉强度较标准值仍有较大富余量, 保证了钢板经多次加工及返修后, 性能仍能满足使用要求。410 °C 高温拉伸性能中, 最大模焊态屈服强度主要分布在 356 ~ 390 MPa, 抗拉强度主要分布在 481 ~ 518 MPa, 钢板的高温拉伸屈服强度及抗拉强度据标准值均有较大的富余量, 表现出了较好的高温力学性能。生产过程中 Cr、Mo 等合金元素充分固溶, 钢板经锻造 + 轧制 + 正火 + 加速冷却 + 回火处理后形成的组织均匀

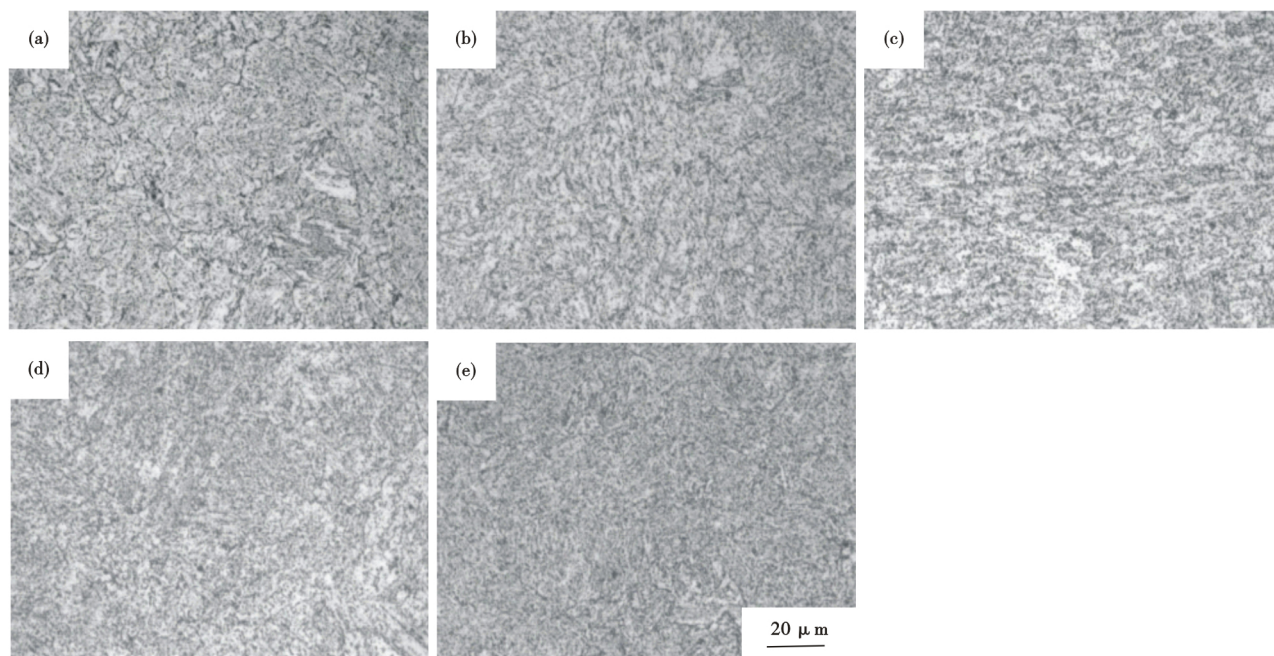


图 2 12Cr2Mo1R(H) 钢板 (a) 上表面; (b) 板厚 1/4 处; (c) 心部; (d) 板厚 3/4 处; (e) 下表面显微组织形貌

Fig. 2 Metallographic photograph of microstructure of 12Cr2Mo1R(H) steel plate at (a) upper surface, (b) thick 1/4, (c) core, (d) thick 3/4, (e) lower surface

表 4 12Cr2Mo1R(H) 钢板常温及 410 °C 高温拉伸性能

Table 4 Tensile properties of 12Cr2Mo1R(H) steel plate at normal temperature and at high temperature 410 °C

材料号	常温拉伸		410 °C 高温拉伸		试样状态
	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	
L20914176	451	586	339	450	最大模焊态
	500	640	—	—	交货态
L20722335	447	585	336	481	最大模焊态
	513	641	—	—	交货态
L20722332	418	556	356	484	最大模焊态
	522	646	—	—	交货态
L20914174	413	561	387	503	最大模焊态
	511	648	—	—	交货态
L20914175	419	567	386	506	最大模焊态
	528	652	—	—	交货态
L20914173	449	599	366	513	最大模焊态
	514	655	—	—	交货态
L20914177	451	586	390	518	最大模焊态
	530	667	—	—	交货态
L20914178	416	562	375	494	最大模焊态
	524	668	—	—	交货态
L20914172	421	562	369	508	最大模焊态
	543	668	—	—	交货态
L20914170	423	578	385	501	最大模焊态
	559	673	—	—	交货态
L20914171	427	588	375	498	最大模焊态
	546	674	—	—	交货态

的回火贝氏体组织,保证了钢板经最大模焊处理后仍有良好的常温及高温拉伸性能。

3.3.2 低温冲击性能

为保证设备在低温环境中仍具有良好的使用性能,钢板需要有良好的低温冲击韧性。钢板取样后,测定试样最大模焊及最小模焊态板厚 1/2 处

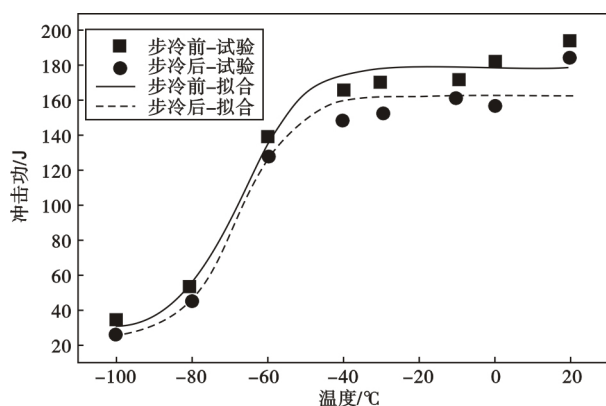


图3 12Cr2Mo1R(H) 钢板步冷脆化试验曲线

Fig.3 Curves of step cooling embrittlement test of 12Cr2Mo1R(H) steel plate

-30℃冲击性能,最大模焊态冲击功大多分布在150~200 J,平均值为170 J,最大模焊态冲击功大多分布在170~230 J,平均值为203 J,冲击性能均满足标准要求且有较多富余量,这与钢板组织为细小均匀的回火贝氏体相对应。试样经最大模焊处理后冲击值稍低于最小模焊态,主要是由于试样经大模焊处理后,出现了碳化物聚集现象,影响了钢板的冲击性能。

3.4 步冷脆化试验结果

图3为钢板典型步冷试验曲线。试样经最小模焊及最小模焊+步冷脆化处理后,计算 $V_{Tr54}+2.5$

ΔV_{Tr54} ,结果均低于-50℃,远远满足结果低于0℃的要求,钢板表现出了良好的抗回火脆化性能。成分设计时降低P、Sn、Si等促进回火脆化元素,增加Mo等抗回火脆化元素^[3],热处理工艺设计时采用正火+加速冷却+回火得到稳定的回火贝氏体组织,保证了钢板良好的抗回火脆化性能。

3.5 钢板探伤

该项目11块50 t级别的12Cr2Mo1R(H) 钢板探伤质量全部满足NB/T47013.3-2015及第1号修改单T1级要求,钢板内部质量良好

4 结论

(1) 通过合理控制锻造冶炼、浇注、开坯、轧制及热处理工艺,舞钢公司成功研发出了50 t级别12Cr2Mo1R(H) 钢板。

(2) 50 t级别12Cr2Mo1R(H) 钢板有害元素控制良好,组织均匀,各项力学性能及步冷脆化性能均能满足标准及项目采购规范要求,且据标准要求值有一定的富余量。

(3) 50 t级别12Cr2Mo1R(H) 钢板内部质量好,探伤均满足NB/T47013.3-2015及第1号修改单T1级。

新一代压水堆核岛用钢及临氢化工大单重特厚板专项(2017YFB0305300)

参考文献

- [1] 杨晓洋,晏欣伟,侯敬超,等.热高压分离器用12Cr2Mo1VR钢板的研制开发[J].宽厚板,2020,26(3):1-5.
- [2] 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.
- [3] 汤国安.热高压分离器的特殊制造简捷[J].能源研究与管理,2014(1):73-77.
- [4] 周雯,吴开明,李具中,等.中温压力容器钢12Cr2Mo1R的回火脆性[J].材料热处理学报,2015,36(增刊1):111-116.
- [5] 高照海,唐郑磊,许少普,等.特厚临氢设备用钢12Cr2Mo1R(SA387Gr.22Cl.2)的试制[J].钢铁研究学报,2014,26(2):56-62.
- [6] 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.
- [7] 丁雨田.大型钢锭底部沉积锥形成的计算机模拟[J].甘肃工业大学学报,1991,17(1):61-67.
- [8] 朱宪华,刘伟涛,丁雨田,等.大型钢锭夹杂沉积区形成过程的计算机模拟[J].西安交通大学学报,1990,24(5):71-77.

- [9] 谢良法,韦明,刘利香,等.特厚板尾部面积缺陷的成因分析[J].钢铁研究,2014,42(3):55-58.
- [10] 徐亚东,沈厚发,胡永平,等.冒口发热效果对钢锭内部质量的影响[J].热加工工艺,2015,44(1):84-87.
- [11] 代礼斌,张志国,杨章程,等.铸造合金CoCrMoW锻造工艺的研究[J].锻压技术,2017,42(6):12-15.
- [12] 姜颖,徐华,黄微涛,等.压力容器用钢板ASTM A387Gr.11 CL.2的生产实践[J].特殊钢,2020,41(4):40-42.
- [13] 张颖,尚尔晶,谷文.2.25Cr-1Mo和2.25Cr-1Mo-0.25V钢加氢反应器材料和制造经验[J].压力容器,2014,31(12):73-78.

侯敬超(1989-),男,硕士(2015年内蒙古科技大学),工程师,钢铁材料新产品研发及工艺研究。

E-mail: hou_jingchao@163.com。

收稿日期:2021-04-19