



200 mm 厚度加氢反应器用特厚板 12Cr2Mo1VR(H) 的开发

杨 阳, 李忠波, 别佳保
(南阳汉冶特钢钢研院, 南阳 474500)

摘 要:介绍了加氢反应器特厚板 12Cr2Mo1VR(H) 钢的成分设计、冶炼、浇铸和轧制工艺, 利用 JMatPro 软件计算热扩散率、热容量、钢板导热能力等重要相变参数, 并分析了热处理制度对其组织、回火脆化性能、高温持久与蠕变性能的影响。生产过程中通过调整 Cr、Mo(Mn) 和 V 含量, 控制各组织的形态和分布, 促进晶内铁素体形核, 利用洁净钢冶炼技术将有害元素控制在较低水平, 减少有害元素晶界偏聚产生的回火脆化现象, 利用水冷模浇铸技术和控制轧制技术控制原始晶粒度, 性能检测结果显示, 12Cr2Mo1VR(H) 钢的抗回火脆化温度达到 -51°C , 钢板经模拟热循环后 X 向、Y 向、Z 向的三个位置拉伸性能差异范围在 15 MPa 以内, 厚度截面表层、厚度 1/4、厚度 1/2、厚度 3/4 位置冲击功均达到 280 J 以上, 无较大的位置趋向差异, 在 540°C 温度下, 加载力为 210 MPa 时, 持续 1 010 h 未断裂, 高温蠕变弹性伸长率为 0.147 5%, 总塑性伸长率 1.454 5%。

关键词: 12Cr2Mo1VR(H) 特厚板; 水冷模铸; 回火脆化; 高温持久; 蠕变

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00163 **中图分类号:** TG142.1

Development of Extra-thick Plate 12Cr2Mo1VR(H) for Hydrogenation Reactor with 200 mm Thickness

Yang Yang, Li Zhongbo, Bie Jiabao
(Steel Research Institute of Nanyang Hanye Special Steel Co., Ltd., Nanyang 474500, China)

Abstract: This paper introduces the composition design, smelting, casting and rolling process of extra-thick plate 12Cr2Mo1VR(H) steel for hydrogenation reactor application, calculates the important phase change parameters such as heat diffusion rate, heat capacity and thermal conductivity of steel plate by JMatPro software, and analyzes the influence of heat treatment system on its organization, tempering embrittlement performance, high temperature persistence and creep performance. In the production process by adjusting Cr, Mo (Mn) and V contents, control the morphology and distribution of microstructure, promote the crystalline iron body core, using clean steel smelting technology to control harmful elements at a low level, reducing the tempering brittleness phenomenon produced by the polarization of grain boundaries of harmful elements, controlling the original grain size by using water cooling mold casting technology and control rolling technology. The performance detection results showed that the anti-tempering embrittlement temperature of 12Cr2Mo1VR(H) steel reached -51°C , after simulated thermal cycling, the difference of tensile properties of steel plate in X, Y and Z direction of steel plate was within 15 mpa, the impact energy of the surface layer, 1/4, 1/2 and 3/4 of the thickness section was over 280 J, and there was no significant difference in the position trend. At the same time, the loading force at 540°C temperature was 210 MPa without breaking for 1 010 h. The elastic elongation of high temperature creep was 0.147 5%, and the total plastic elongation was 1.454 5%, respectively

Key Words: Extra-thick Plate 12Cr2Mo1VR(H); Water Cooled Mold Casting; Tempering Embrittlement; High Temperature Endurance; Creep

12Cr2Mo1VR(H) 特厚钢材强度高、韧性好、塑性高, 成型性好, 可用于制作大型容器^[1]。虽然国内特厚板的生产技术已达到世界先进水平, 但仍存在着如生产工艺不稳定、板材组织性能波动大等问题, 制约了特厚板的推广应用。为解决上述问题, 南阳汉冶特钢成功实现了对进口特厚板的国产化替代。特厚钢板的开发应用为国产特厚板生产技术从“跟跑”到“并跑”乃至“领跑”提供了重要技术

支撑。目前, 成功开发的特厚板品种占到该领域全部特厚板品种的 60% 以上, 为进一步调整产品结构, 南阳汉冶特钢针对压力容器用 12Cr2Mo1VR(H) 钢板进行研发。鉴于 12Cr2Mo1VR(H) 的使用条件及质量要求, 为确保钢板经热循环后的力学性能满足要求, 系统性研究了 12Cr2Mo1VR(H) 钢的成分、冶炼、浇铸工艺、轧制和热处理工艺, 掌握了钢板组织和性能关系, 研究了钢板的物理性能

和应用性能分析。最终汉冶特钢经长时间研发,成功生产出 200 mm×2 200 mm×10 000 mm 厚度规格的 12Cr2Mo1VR(H),研发生产的钢板性能均匀,表面、内部质量优异,性能离散度小,经模拟试验各项性能稳定,完全满足各项特殊化质量要求。

1 12Cr2Mo1VR(H)钢板的主要技术指标

1.1 钢板化学成分要求见表 1。

1.2 GB/T 35012—2018 标准中 12Cr2Mo1VR(H) 钢 200 mm 厚钢板的力学性能要求见表 2。

2 12Cr2Mo1VR(H)钢板成分设计与冶炼及轧制

2.1 成分设计

12Cr2Mo1VR(H)特厚临氢用钢板是加氢反应器制造首选材料,钢板能够承受高温高压和临氢环境下的腐蚀和压力,不易发生变形和破裂,从而保护设备的安全运行。此外,12Cr2Mo1VR(H)特厚临氢用钢板具有良好的耐腐蚀性能^[2],能够长时间在腐蚀性环境中运行,减少维护成本。制造设备在运行过程中,影响因素有温度、压力和介质等及其变化,往往导致设备管道失效^[3]。故安全性尤其需要得到保证,考虑生产 GB/T35012—2018 或者 GB/T713—2014 中标准极限厚度为 200 mm,生产规格为 200 mm×2 200 mm×10 000 mm,净板单重达到 34.54 t;在钢板设计方面,提高钢的强度是保证压力容器安全使用的基本要求,针对高强钢板的力学性能,需要重点控制钢板中 Cr、Mo(Mn)和 V 含量。通

过对成分进行调整,使 $w[\text{Cr}]$ 达到 2.3%,以改善奥氏体组织,抑制析出强化,并同时控制铁素体和珠光体的形态和分布,使其对晶内铁素体形核具有重要作用。同时,控制 Mn/V 比在一定范围内变化,以调节奥氏体晶界的结构和性质。通过合金元素的调整可以增加晶界的强度和稳定性,增强钉扎作用,提高奥氏体晶内铁素体形核数量及体积分数,抑制晶内铁素体的析出, $w[\text{C}]$ 设计为 0.11%~0.14% 是为了保证钢板的强韧性匹配,若 C 增加到一定范围,会导致钢材的脆化和敏感时效性变低,成分设计采用低 Si 的设计方法,因为当 (Si+Mn) 一定时,低 Si 高 Mn 对强度和抗脆化的平衡改善更有利;Cr、Mo 虽然都可以提高淬透性,但是 Mo 比 Cr 更有利的抑制珠光体的产生,可以有效快速的获得贝氏体组织,因此成分设计时必须将 Mo 含量按上限控制,使钢材具有较高的淬透性。12Cr2Mo1VR(H)钢板长期在高温工作,控制杂质元素含量显得尤其重要,南阳汉冶特钢可利用先进的冶炼工艺保证有害元素控制在较低的水平,减少有害元素在晶界偏聚产生回火脆化现象^[4]。

2.2 冶炼与模铸浇铸工艺

冶炼重点工艺控制为:铁水在转炉冶炼前进行 KR 铁水脱硫预处理,经过 KR 搅拌,石灰质脱硫剂处理后,可控制铁水 $w[\text{S}] \leq 0.005\%$,为后续冶炼环节提供优质铁水;采用底复吹转炉冶炼,通过变频调速顶底复吹、PLC 控制、氮氩切换等技术,确保出钢

表 1 12Cr2Mo1VR(H)钢板的化学成分(质量分数)

Table 1 The chemical composition of 12Cr2Mo1VR(H) steel plate

%

项目	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	
标准	0.11 ~ 0.15	≤0.10	0.30 ~ 0.60	≤0.20	≤0.25	2.00 ~ 2.50	0.9 ~ 1.10	
内控	0.11 ~ 0.14	0.001	0.45 ~ 0.55	0.001	0.001	2.2 ~ 2.4	1.0 ~ 1.1	
项目	Nb	V	Ti	P	S	B	Ca	
标准	≤0.07	0.25 ~ 0.35	≤0.030	≤0.008	≤0.004	≤0.002 0	≤0.015	
内控	0.06	0.25 ~ 0.35	0.010	≤0.010	≤0.005	≤0.000 5	0.001	
项目	As	Sn	Sb	H	O	N	J ^μ	X ^μ
标准	≤0.010	≤0.010	≤0.003	≤0.000 2	≤0.002 5	≤0.008 0	≤80	≤12
内控	≤0.008	≤0.005	≤0.002	≤0.000 1	≤0.001 0	≤0.005 0	≤80	≤12

* J^{*}和 X^{*}分别为回火脆化 J 系数和 X 系数。

表 2 12Cr2Mo1VR(H)钢 200 mm 厚钢板力学性能

Table 2 Mechanical performance of 12Cr2Mo1VR(H) extra-thick steel plate

屈服强度 ^a /MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 A/%	冲击功 KV ₂ (-20℃) ^b /J	冷弯 ^c 180°	500℃高温拉伸 Rp0.2/MPa
415~620	590~760	≥18	≥80	D=3a	≥325

a 如屈服现象不明显,屈服强度取 Rp0.2;b 可根据需求进行-30℃低温检测;c 为可用 D=2a。

温度 $\geq 1\ 620\ ^\circ\text{C}$,避免钢水过氧化的同时,控制终点 P 含量和 N 含量;并在出钢过程中进行挡渣,达到控制 $w[\text{P}]\leq 0.007\%$ 的目标,LF 精炼炉,采用大渣量脱硫处理,在精炼过程中白渣保持时间 $> 15\ \text{min}$,充分去除钢中硫和夹杂物,工业化生产过程中,LF 精炼处理后,钢中 $w[\text{S}]\leq 0.001\%$ 、 $w[\text{O}]\leq 0.003\ 0\%$,按 GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物含量的测定》中的 B 法进行测定,四类夹杂物(A 类、B 类、C 类、D 类中细系和粗系)之和 ≤ 2.5 级,VD 真空脱气过程中,要求真空度达到 66.7 Pa 以下并保持 18 min 以上,同时,采取氩气搅拌钢水,充分脱除钢中的 H、O、N 等气体,进一步降低夹杂物含量,真空处理后,钢中 $w[\text{H}]\leq 0.000\ 15\%$ 、 $w[\text{O}]\leq 0.002\ 0\%$ 、 $w[\text{N}]\leq 0.005\ 0\%$;结合连铸结晶器凝固理论与设备的实际进行优化,采用水冷模铸浇铸技术,钢水冶炼完毕后进行浇铸,浇铸温度控制在 $1\ 560\sim 1\ 565\ ^\circ\text{C}$,浇铸时间控制在 $20\sim 25\ \text{min}$,浇铸水冷控制在 $230\sim 260\ \text{m}^3/\text{h}$,从而保证钢锭内部的应力最小化。水冷模铸的主要优点是工艺成熟、生产效率高、成本低,并且可以生产高质量的钢锭^[5]。与常规铸铁模相比,汉冶特钢研制的水冷钢锭模系统基于优化的定向凝固技术,采用热传导率高、热稳定性好的铜板作为钢锭模的型腔内壁,通过循环冷却水对铜板模壁进行冷却,钢锭凝固过程所释放的热量通过循环冷却水快速带走,显著提高了热传导效率,加快了钢锭凝固结晶的速度,有效地减轻了钢锭内部偏析和中心疏松,使钢锭的原始铸态组织得到细化,最终得到内部组织致密、晶粒细化的钢锭,同时凝固速度较铸铁模的凝固速度提高 $15\sim 20\ \text{h}$;并且水冷钢锭模设置有侧边挤压机构,侧边挤压机构可在凝固后期对钢锭宽边(厚度方向)形成挤压,以减小气隙而加速传热,从而形成更加致密的组织,这种技术适用于生产各种规格的钢锭,特别是大型钢锭,可以保证钢锭铸态微缺陷或者无缺陷,浇铸钢锭达到 $1\ 010\ \text{mm}\times 2\ 000\ \text{mm}\times 3\ 200\ \text{mm}$,满足 200 mm 厚板压缩比 ≥ 5 的要求,为后续钢板的内部质量奠定良好的基础^[6]。

2.3 控制轧制技术

12Cr2Mo1VR(H) 钢板加热轧制工艺直接影响奥氏体晶粒大小和晶粒的均匀性,钢锭的加热时间控制在 28 h 最为优异。通过控制加热时间和温度还可以减小表面和心部的温度差异,降低温度应力,避免表面炸裂的发生。在高温段的保温过程

中,目标温度的稳定和保温时间的控制是保证钢锭均匀烧透的重要因素。通过以上工艺控制措施,可以使得合金固溶更加充分,进一步提高钢板的质量和性能,缓解了高温下奥氏体晶粒粗大^[7]。钢锭进行两阶段控轧,第一阶段轧制过程,采用高压下轧制,压下量达到 $50\sim 60\ \text{mm}$,并采用 IC 对中间坯进行冷却,冷却后钢坯表层温度达到 $930\sim 950\ ^\circ\text{C}$,钢坯芯部温度达到 $980\sim 1\ 030\ ^\circ\text{C}$,保证钢坯表面与芯部成形温度差,控制粗轧结束厚度,钢板进入 ACC 以最大冷速冷却,使其心部温度来不及发生再结晶,避免混晶而影响韧性,同时,能够减轻钢板的心部偏析,精轧采用多道次、小压下轧制^[8],终轧温度 $\leq 820\ ^\circ\text{C}$,此处采用较大的累积变形量,使奥氏体晶粒充分变形,在晶粒内部形成更多的滑移带,为铁素体的转变提供更多的形核位置,多道次轧制下奥氏体晶粒延长细化后变为细小的铁素体,钢板轧制完毕后进入层流冷却,以充分抑制相变前的奥氏体晶粒长大,阻止或延迟碳化物在冷却过程中过早析出,使其在铁素体中弥散析出,提高强度,改善钢的塑性、韧性等综合力学性能^[9]。控制返红温度 $< 700\ ^\circ\text{C}$,控制冷速为 $4\sim 8\ ^\circ\text{C}/\text{s}$,进行二次冷却可以保证奥氏体晶粒不因温度的增高而增大,阻止碳化物在冷却中析出。

3 12Cr2Mo1VR(H) 钢板物理性能参数分析

3.1 钢板静态连续冷却曲线

根据 JMatPro 模拟可以得到 12Cr2Mo1VR(H) 钢的静态 CCT 曲线,如图 1 所示。由图 1 可以看出,当 12Cr2Mo1VR(H) 钢从奥氏体以不同速度冷却时,存在下述相变区:当冷却速度小于 $1\ ^\circ\text{C}/\text{s}$ 时,得到贝氏体及残奥的混合组织;当冷速为 $1\sim 40\ ^\circ\text{C}/\text{s}$ 时,得到贝氏体及马氏体混合组织;当冷速 $> 40\ ^\circ\text{C}/\text{s}$ 时,得到马氏体组织,理想态的组织为贝氏体组织,故冷却速度应控制为 $1\sim 40\ ^\circ\text{C}/\text{s}$ 。

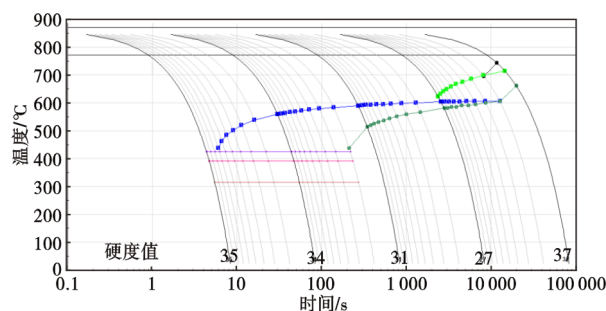


图 1 12Cr2Mo1VR(H) 钢板静态 CCT 曲线

Fig. 1 Static CCT curve of 12Cr2Mo1VR(H) steel plate

3.2 线膨胀系数

12Cr2Mo1VR(H)钢板不同温度的线膨胀系数见表 3,可以看出,200 ℃时线膨胀系数为 $25.0 \times 10^{-6}/\text{K}$,500 ℃时线膨胀系数达到 $28.0 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。

表 3 12Cr2Mo1VR(H)钢板不同温度的线膨胀系数

Table 3 Line expansion coefficient of 12Cr2Mo1VR (H) steel plate at different temperatures

温度/℃	25 ~ 100	100 ~ 200	201 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500
线膨胀系数/ $10^{-6} \times \text{K}^{-1}$	21 ~ 24	24.1 ~ 25	24.2 ~ 26	26.1 ~ 27	27.1 ~ 28

3.3 12Cr2Mo1VR(H)钢相变点

12Cr2Mo1VR(H)钢的相变点计算值见表 4。为保证 200 mm 厚度 12Cr2Mo1VR(H)钢临界冷却速度,应采用加速冷却手段,通过加速冷却可以保证得到全贝氏体组织,热处理工艺采取淬火+回火^[10],以保证奥氏体晶粒更加细小;同时采用临界奥氏体温度的工艺方法,通过表 4 相变点 Ac3 经验公式,最终确定 12Cr2Mo1VR(H)钢热处理正火保温温度为 895 ℃,正火保温时间 $T = \text{厚度} \times 2.2 \text{ min/mm}$;热处理过程能够结合生产实际情况较好的执行生产工艺,钢板升温速度、保温时间、出炉后钢板的冷却速度都能按照既定工艺严格执行,具体制定的热处理工艺见表 5。

表 4 12Cr2Mo1VR(H)钢的相变点计算值

Table 4 Calculation of phase transition point for 12Cr2Mo1VR(H) steel

Ac1	Ac3	Ar3	T _{nr}
771	885	705	1 034

表 5 12Cr2Mo1VR(H)钢 200 mm 厚度钢板的热处理工艺
Table 5 Heat treatment process of 200 mm thickness of 12Cr2Mo1VR(H) steel plate

工艺	保温温度/℃	保温系数/ (min·mm ⁻¹)	冷却方式
正火	895	2.2	淬火
回火	710	4.0	空冷

4 12Cr2Mo1VR(H)钢板应用性能分析

4.1 封头热成型工艺试验

特别是厚度 60 mm 以上封头用钢,采用热冲压成型,封头采用热冲压后,力学性能遭到破坏,必须采用恢复性能工艺保证性能指标达到技术要求,因 200 mm 厚度 12Cr2Mo1VR(H)钢板采用热处理正火

空冷后,冷却速率只有 0.05 ℃/s,无法满足贝氏体的冷却速度 1 ~ 40 ℃/s,只有采用加速冷却工艺,才能得到所需的贝氏体组织。对供货态试验钢板按照表 6 中的热处理制度处理后,再作各项力学性能试验。

表 6 12Cr2Mo1VR(H)封头热成型热处理制度

Table 6 Seal head thermo-forming heat treatment process of 12Cr2Mo1VR(H)

工艺步骤	状态	温度/℃	保温时间/ min	冷却
第一步	模拟成型	940±10	180	空冷
第二步	试板正火	920±10	220	加速冷却
第三步	试板回火	720±10	380	空冷
第四步	Min.PWHT	700 ~ 715	480	随炉冷却至 380 ℃出炉
	Max.PWHT	700 ~ 715	1 920	随炉冷却至 380 ℃出炉

4.2 常温拉伸试验

200 mm 厚度钢板按照 GB/T 228.1—2021 标准方法加工拉伸试样,并分别对热成型+正火+回火+Min.PWHT(NY-200-NT-8 h)和热成型+正火+回火+Max.PWHT(NY-200-NT-32 h)的试板作常温 X 向、Y 向、Z 向拉伸试验,结果见表 7。

表 7 N+T+模拟焊后热处理后的拉伸性能

Table 7 Tensile properties of N+T+simulated post welding heat treatment

热处理状态	取样 方向	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	伸长 率 A/%	断面收 缩率 Z/%	取样 位置
NY-200-NT- MinPWHT (8 h)	X 向	539	659	23.5	79	表层
	X 向	535	651	24.0	80	T/2
	Y 向	546	665	25.0	80	表层
	Y 向	538	659	23.5	79	T/2
	Z 向	524	648	24.5	72	表层
	Z 向	520	651	24.0	79	T/2
NY-200-NT- MaxPWHT (32 h)	X 向	482	616	24.5	80	表层
	X 向	463	617	24.5	81	T/2
	Y 向	469	612	28.0	81	表层
	Y 向	470	614	25.5	80	T/2
	Z 向	469	613	21.0	46	表层
	Z 向	484	613	22.0	54	T/2

试验用 12Cr2Mo1VR(H)钢板 X 向、Y 向、Z 向经模拟热成型+正火+回火+模拟焊后进行热处理,其 R_{eL} 、 R_m 、A%、断面收缩率 Z% 各项性能指标均满足技术要求,性能均匀,且无较大的性能差异性。

4.3 高温拉伸试验

按照 GB/T 228.1—2021 标准制备拉伸试样,高温拉伸试验结果见表 8。试验用 12Cr2Mo1VR(H) 钢板高温拉伸性能经模拟热成型+正火+回火+Min.PWHT 或 Max.PWHT 后其高温拉伸性能满足标准要求。

表 8 N+T+模拟焊后热处理后的高温拉伸性能
Table 8 High temperature tensile properties after N+T+simulated post welding heat treatment

热处理状态	温度/℃	屈服强度 R _{p0.2} /MPa	抗拉强度 R _m /MPa
NY-200-NT- MinPWHT(8 h)	454	450	527
	482	427	482
	540	412	465
NY-200-NT- MaxPWHT(32 h)	454	389	467
	482	382	451
	540	337	440

4.4 冲击试验

按照 GB/T 229-2020 标准方法制备冲击试样,-30℃ 的 KV₂ 冲击试验结果见表 9。试验用 12Cr2Mo1VR(H) 钢板经模拟热成型+正火+回火+Min.PWHT 或 Max.PWHT 后,-30℃ 的 KV₂ 冲击试验值远远高于标准要求,同时可以看出热处理保温时间对冲击韧性影响不大。

表 9 N+T+模拟焊后热处理后的冲击性能(-30℃)
Table 9 Impact performance of N+T+simulated post welding heat treatment

热处理状态	取样位置	KV ₂ /J
NY-200-NT-MinPWHT (8 h)	距上表面 1.6 mm	296、316、301
	T/4 处	308、299、298
	T/2 处	319、303、313
	T3/4 处	321、313、325
	距下表面 1.6 mm 处	330、332、307
	距上表面 1.6 mm	287、320、321
NY-200-NT-MaxPWHT (32 h)	T/4 处	302、319、302
	T/2 处	302、298、312
	3T/4 处	278、294、301
	距下表面 1.6 mm 处	316、307、282

4.5 弯曲试验与硬度试验

按照 GB/T 232—2010 弯曲试验方法,经模拟热成型+正火+回火+Min.PWHT 或 Max.PWHT 后,进行侧向弯曲和正向侧弯试验各 1 件,弯心直径 d=3a,试样厚度 a=25 mm,弯曲角度 α=180°,2 件均合格。

按照 GB/T 231.1—2002 金属材料硬度试验方法检验硬度,供货态钢板经热成型+正火+回火+Min.

PWHT(NY-200-NT-8)和热成型+正火+回火+Max.PWHT(NY-200-NT-32)后,硬度结果见表 10。经热成型+正火+回火+Min.PWHT 和热成型+正火+回火+Max.PWHT 后母材硬度均满足标准要求,且其硬度较供货态有所下降;硬度随着热处理时间的增加而降低。

表 10 N+T+模拟焊后热处理后的硬度检验结果
Table 10 Hardness test results after N+T+simulated post welding heat treatment

热处理状态	取样位置	硬度(HBW)
NY-200-NT- MinPWHT(8 h)	从表面下 2 mm 处,沿钢板厚度方向,间隔 10 mm 进行测试	195、205、206、207、209、202、201、207、210、205、209、202、201、204、205
		195、191、192、193、194、195、193、195、200、195、193、196、198、196、193、197

4.6 回火脆化倾向评定试验

回火脆化是指将材料进行高温回火处理后,其冲击韧性会降低,易发生脆性断裂。回火脆化敏感性是评价材料对回火脆化的敏感程度的指标。要测定材料的回火脆化敏感性,首先需要对材料进行脆化处理,通常是在高温下进行长时间的回火处理。回火处理会导致材料内部的晶粒再长大,晶界处的碳化物析出,从而使材料的韧性降低。经过脆化处理后,材料的冲击功值会显著下降,通过测定材料在脆化处理前后的冲击功值可以确定材料的韧性变化。如果经过脆化处理后,材料的冲击功值大幅下降,说明材料对回火脆化敏感;而如果脆化处理后,材料的 vTr54 值(冲击功为 54 J 时的温度)比脆化处理前有较大增加,也表明材料对回火脆化敏感。测定材料的回火脆化敏感性可以通过脆化处理后的冲击功值及其 vTr54 值的变化来评估。

按照 ASTM A387—2017 补充条件规定的试验方法进行阶梯冷却试验,指标应达到 vTr54 + 3.0ΔvTr54 ≤ 10℃,经计算得到-51℃ 满足技术要求。

4.7 显微组织和奥氏体晶粒度检验

按照 GB/T 13298—2015 标准中对供货态钢板经热成型+正火+回火+Min.PWHT 和热成型+正火+回火+Max.PWHT 后,在上下表面 2 mm 及 1/2T 处取样,进行显微组织、奥氏体晶粒度检验。金相组织分别如图 2、图 3 所示,显微组织为贝氏体回火组织达到所需的组织要求,并且奥氏体晶粒度可以达到 9 级,为强韧性的匹配提供了有力的组织基础。

12Cr2Mo1VR(H)钢板在上述热循环状态下,显微组织为贝氏体回火组织,晶粒度9.0级,HB硬度210HBW,满足所要求的显微组织需求和晶粒度要求。

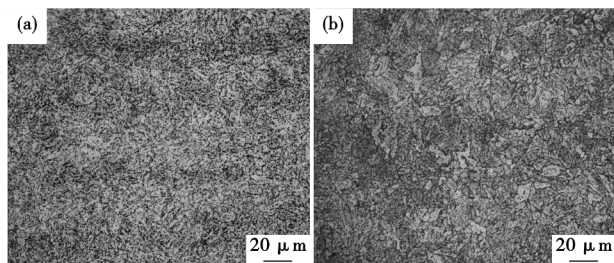


图2 N+T+Min. PWHT后金相组织:(a)厚度1/2位置,(b)表层下2 mm位置

Fig. 2 Metallographic structure after N+T+Min. PWHT: a 1/2 of the thickness location, b 2 mm below the surface location

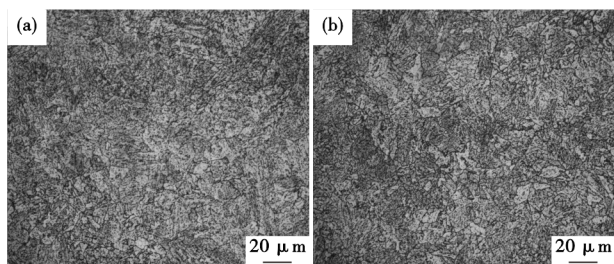


图3 N+T+Max. PWHT后母材金相组织:(a)厚度1/2位置,(b)表层下2 mm位置

Fig. 3 N+T+Max the metallographic structure of the base material after PWHT: a 1/2 thickness location, and b 2 mm below the surface location

5 单轴拉伸持久与单轴拉伸蠕变试验

按照 GB/T 2039—2012 标准规定方法,对供货

态的 12Cr2Mo1VR(H)钢 $\phi 10$ mm 试样进行试验,加载力 210 MPa,试验温度为 540 °C、试验时间 ≥ 1010 h。单轴拉伸持久试验 2 支,试验时间 > 1010 h 试验结果均未断;单轴拉伸蠕变试验 1 支,弹性伸长率为 0.147 5%,总塑性伸长率为 1.454 5%,总伸长率为 1.602%。

6 结论

通过合理的成分设计及制定合理的冶炼、浇铸、轧制、热处理工艺生产出的 12Cr2Mo1VR(H)钢力学性能、焊接性能达到良好效果。

(1)通过控制钢锭内部的残余应力和晶界能量,从而降低轧制过程中的变形抗力,较低的变形抗力有助于实现更好的轧制效果,同时合理控制钢锭的加热工艺使其中的合金元素能够充分固溶,也防止了奥氏体晶粒的粗化长大,保证原始晶粒细小,避免组织遗传影响热处理性能。

(2)力学性能稳定,-30 °C低温冲击韧性保证值高;整张 X、Y、Z 位置三个方向的钢板力学性能均匀,强度差异性控制在 15 MPa 以内;经模拟热循环的力学性能达到标准要求,具有较好的加工性能。钢板实物质量满足附加技术要求模拟热成型、回火脆化倾向评定试验性能要求。

(3)12Cr2Mo1VR(H)钢板,在 540 °C 的温度下,加载力为 210 MPa 的持久时间达到 > 1010 h 以上未出现断裂,抗蠕变指标良好,在钢板设计方面,提高钢的蠕变和持久性能是保证压力容器安全使用的基本要求。

参考文献

- [1] 章小浒,段 瑞,张国信. 压力容器用钢板在 GB150.2 中的应用[J]. 石油化工设备技术, 2013, 34(6): 48-51+73.
- [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] 唐郑磊,朱承杰,袁 恒,等. 压力容器用特厚 18MnMoNbR 钢种的研制[J]. 金属材料与冶金工程, 2012, 40(1): 3-6+10.
- [4] 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.
- [5] 唐郑磊,彭 帅,李忠波,等. 铝板带拉伸机钳口用特厚板 Q550C 的研发[J]. 轧钢, 2016, 33(6): 30-33.
- [6] 杨 东,唐郑磊,李红洋. 压力容器用 12Cr2Mo1R 特厚钢种的研发实践. 中国冶金文摘;2012-12-30.
- [7] 许少普,唐郑磊,李忠波,等. 煤化工临氢设备用特厚 12Cr2Mo1R 钢热处理工艺研究;煤炭加工与综合利用;2016-05-31.
- [8] 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.
- [9] 朱书成,郑海明,许少普,等. 一种冲击韧性高于 LPG 船储罐用 P690QL2 钢板的新颖钢板及其生产方法 CN202010609475.6
- [10] 杨光起. 加氢反应器用铬钼钢回火脆性[J]. 石油化工设备, 2001, 30(5): 53-57.