

高强度 Q355NHE 耐候 H 型钢的开发

李建中^{1,3} 叶高旗¹ 张玉峰²

(1 河北津西钢铁集团股份有限公司技术中心,唐山,064302;2 河北津西钢铁集团股份有限公司炼钢二厂,唐山,064302;3 马鞍山钢铁股份有限公司长材事业部,马鞍山,243011)

摘要 介绍了津西高强度 Q355NHE 耐候 H 型钢试制和生产工艺,对生产过程中的关键工序进行了分析和讨论,通过控制成品碳 0.06% ~ 0.10%,镍铬当量比(Ni/Cr)0.35 ~ 0.45,连铸一冷下降 10%,二冷比水量 0.70 L/kg 左右,稳定连铸浇注周期 35 ~ 40 min,加热炉在炉时间 ≤ 150 min,以及含铌钢的控制轧制等工艺措施,减轻了连铸坯表面凹陷和裂纹,减少了钢中大型 C 类夹杂物,杜绝了耐候 H 型钢表面的龟裂缺陷,从而保证 -40 °C 低温冲击功超过标准 27 J 的要求,平均值为 156 J。

关键词 高强度耐候钢 H 型钢 铸坯表面凹陷 C 类夹杂物 含微 Nb 钢轧制 低温冲击韧性

Research and Development of High Strength Weather-Resistant H-beam Steel Q355NHE

Li Jianzhong^{1,3}, Ye Gaoqi¹ and Zhang Yufeng²

(1 Technology Center, Hebei Jinxi Iron & Steel Group Co Ltd. Tangshan 064302; 2 No. 2 steel-making plant, Hebei Jinxi Iron & Steel Group Co Ltd. Tangshan 064302; 3 Long Product Division, Ma'anshan Iron & Steel Co Ltd. Ma'anshan 243011)

Abstract Research and production process of high strength weather-resistant H-beam steel Q355NHE at Jinxi are introduced in this paper, the key process in production process is analyzed and discussed. By the process measures including to control chemical composition carbon 0.06% ~ 0.10%, nickel chromium ratio(Ni/Cr) 0.35 ~ 0.45, water flow of continuous casting mould down by 10%, water ratio of second colling 0.70 L/kg, stable continuous casting cycle 35 ~ 40 min, heating time in the furnace less than or equal to 150 min, carried out hot rolling control process of niobium microalloying steel, etc. the surface depress and crack of CC beam-blank and bloom are relieved, amount of large size class C Inclusions in steel is reduced and surface checking of weather-resistant H-beam steel is eliminated to guarantee -40 °C low temperature impact energy is more than standard requirement 27 J, average value is 156 J.

Material Index High Strength Weather-Resistant H-beam Steel, Surface Depress of CC Beam-Blank and Bloom, Class C Inclusions, Rolling of Nb Microalloying Steel, Impact Toughness at Low Temperature

钢结构腐蚀造成的经济损失占国民经济总值的 2% ~ 4%,降低钢结构腐蚀的有效措施之一就是耐候钢代替普通碳素、低合金高强度结构钢。耐候钢是通过添加少量合金元素,使耐候钢在大气中具有良好的耐腐蚀性能,随着使用时间的延长,其耐腐蚀性能更显著;同时耐候钢无需酸洗、镀锌等对环境有污染的后续加工工序,可实现绿色环保生产,符合国家发展方向。为此,河北津西钢铁集团股份有限公司(津西公司)试制并开发耐候用 H 型钢,钢种为 Q355NH,级别 E 级。

1 高强度耐候钢 Q355NHE 技术要求及试制路线

1.1 化学成分、力学性能、耐大气腐蚀指数

高强度耐候钢 Q355NHE,通过添加 Cu、Cr、Ni 等元素来提高钢的耐候性能,成分及力学性能按照

耐候结构钢国家标准为 GB/T 4171-2008 要求,其中要求耐大气指数 $I \geq 6.0$ 。 $I = 26.01 [Cu] + 3.88 [Ni] + 1.20 [Cr] + 1.49 [Si] + 17.28 [P] - 7.29 [Cu][Ni] - 9.10 [Ni][P] - 33.39 [Cu]^2$

1.2 晶粒度和夹杂物的要求

(1) 晶粒度:不小于 7 级,晶粒度不均匀性应在三个相邻级别范围内。

(2) 非金属夹杂物:A 类 ≤ 2.5 级, B ≤ 2.0 级, C ≤ 2.5 级, D ≤ 2.0 级, D_s ≤ 2.0 级。

1.3 试制工艺路线、连铸坯断面及 H 型钢规格

高强度 Q355NHE 耐候 H 型钢的生产试制工艺:100 t 顶底复吹转炉 → 100 t LF 钢包精炼 → 异形坯/大方坯连铸机 → 精整 → 步进梁式加热炉 → 二辊可逆式开坯机(BD) → 串列式万能轧机(往复轧制/连续轧制) → 步进链式冷床 → 辊式矫直机 → 锯切 →

精整→打包。

根据 H 型钢规格的不同,津西公司 H 型钢生产线所需坯料由两台异形坯连铸机和一台大方坯连铸机提供,有连铸异形坯和方坯两种类型,连铸异形坯和方坯断面及 H 型钢横截面尺寸示意图见图 1。连铸异形坯断面有四种规格,连铸大方坯有五种断面规格,本次试制高强度耐候钢的连铸坯为:异形坯尺寸(mm) 555 × 440 × 105 × 128.5 × 78,方坯 230 mm × 230 mm,具体尺寸表示及对应 H 型钢规格见表 1。

2 试制过程及结果

2.1 Q355NHE 钢的化学成分

耐候 H 型钢 Q355NHE 的实际化学成分范围见表 2。

2.2 冶炼工艺

2.2.1 转炉冶炼

冶炼 Q355NHE 钢种,铜板、镍块随废钢加入炉内,低碳铬铁出钢时随合金加入钢包,转炉终点要求低碳、低磷出钢:[C]0.03% ~ 0.08%, [P]0.002% ~ 0.015%, 终点出钢温度 1 613 ~ 1 664 °C, 转炉终

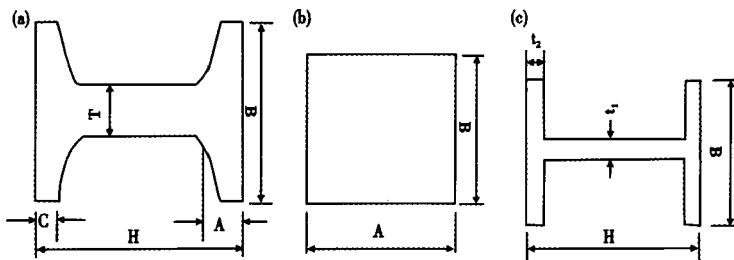


图 1 (a)连铸异形坯(H × B × T × A × C)、(b)方坯(A × B)及(c) H 型钢(H × B × t₁ × t₂)截面尺寸示意图

Fig. 1 Cross section size diagram of CC beam-blank (H × B × T × A × C) (a), bloom (A × B) (b) and H beam-steel (H × B × t₁ × t₂) (c)

表 1 连铸坯断面尺寸及对应 H 型钢规格

Table 1 Dimensions of continuous casting billet and corresponding H beam-steel specifications

连铸异形坯/mm	连铸方坯/mm	H 型钢/mm	
550 × 440 × 105 × 128.5 × 78	230 × 230H	250 × 250 × 9 × 14	194 × 150 × 6 × 9
		300 × 300 × 10 × 15	200 × 100 × 5.5 × 8

表 2 Q355NHE 钢的化学成分

Table 2 Chemical composition of steel Q355NHE

项目	成分/%									耐候指数(I)
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Nb	
标准	≤0.16	≤0.50	0.50 ~ 1.50	≤0.030	≤0.030	0.25 ~ 0.55	0.40 ~ 0.80	≤0.50	0.015 ~ 0.060	≥6.0
实测范围	0.06 ~ 0.15	0.20 ~ 0.40	1.10 ~ 1.40	0.006 ~ 0.021	0.005 ~ 0.009	0.35 ~ 0.50	0.50 ~ 0.70	0.25 ~ 0.35	0.025 ~ 0.040	6.09 ~ 6.47

表 3 转炉终点控制

Table 3 End point control mean of converter

成分/%				出钢温度/°C
C	Mn	P	S	
0.055	0.095	0.008 4	0.025 1	1 646

表 4 LF 终渣成分/%

Table 4 Refining end slag component/%

炉号	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	FeO
196-2767	53.31	6.79	20.50	2.86	0.13	0.33

点控制均值见表 3, 主要耐候元素回收率为: Cu 98.40%, Ni 98.30%, Cr 99.40%

2.2.2 LF 精炼

由于 H 型钢冶炼生产采用的是传统的连铸浇注工艺,即连铸浇注采用“定径水口 + 半浸入式水口”和“定径水口 + 浸入式水口”方式,为避免水口蓄流套眼,限制了转炉、精炼采用铝进行脱氧和铝作为细化晶粒元素的工艺,因此细化晶粒微合金元素采用铈或钒,或者铈钒复合,结合经验采用铈作为细化晶粒的微合金元素。

钢水进入 LF 后,加入铈铁,后续加入精炼渣、石灰、萤石、硅钙钡粉及电石等进行造渣、脱氧,成渣

后成分见表 4。LF 终渣(FeO + MnO)只有 0.46%, 具备较强的脱氧和脱硫能力,精炼脱硫率为 74.07%, 同时吸附夹杂能力也较好;成分、温度达到目标值后进入软吹工位,保证软吹 10 min 以上。

2.3 连铸工艺

高强度 Q355NHE 耐候钢的碳控制往往处于包晶钢范围,且又添加裂纹敏感性元素如铈、钒、铜等,为避免严重的铸坯裂纹和凹陷缺陷,Q355NHE 耐候钢与普通钢种相比,异形坯结晶器水流量下调 10% ~ 20%, 宽 1 890/窄 910 L/min;二冷比水量下调 10% ~ 15%, 控制在 0.70 L/kg。

2.4 加热炉工艺

Q355NHE 耐候钢含有较高的铜元素, Cu 熔点只有 1 083 °C, 所以钢液凝固时有一部分 Cu 会在晶界富集,如果在轧钢加热炉 1 100 °C 左右区域内

停留时间过长,就会使 Cu 富集相以液态形式存在并沿奥氏体晶界向基体内部渗透,渗透至基体内部的 Cu 富相互连形成网状 Cu 富相,破坏基体的完整性,降低晶粒间的结合力,加剧裂纹倾向,在晶界形成热裂纹,这是耐候钢出现龟裂等裂纹缺陷的主要原因,因此耐候钢要求必须快速加热^[1],缩短 1 100 ℃左右区域内的停留时间。

Q355NHE 耐候钢还含有细化晶粒的微合金化元素 Nb 等,为保证微合金化效果,尽量让 Nb 元素在高温区充分固溶,提高奥氏体的再结晶温度,从而充分发挥其细化晶粒的作用。

所以结合钢中 Cu 和 Nb 的各自特性,Q355NHE 耐候钢的加热工艺就要求快速加热,缩短 1 050 ~ 1 150 ℃区域的铸坯停留时间,同时适当延长 1 200 ~ 1 280 ℃高温区域的停留时间,铸坯在炉时间不超过 150 min。耐候钢加热制度见表 5,实际加热时间在 135 ~ 169 min。

2.5 轧制工艺

津西公司 H 型钢轧制工艺分“初轧 + 串列式万能往复轧制”和“初轧 + 串列式万能连续轧制”两种。为保证 Q355NHE 耐候钢的低温冲击性能,初轧开轧温度控制在 1100 ~ 1 150 ℃,充分利用高温以及合适的道次变形率,尽可能使奥氏体再结晶细化过程充分,获得细小的奥氏体再结晶晶粒^[2]。

万能精轧串列往复轧制或连续轧制开轧温度控制在 950 ~ 1 000 ℃,在精轧阶段含 Nb 钢尽可能保持在未再结晶区域轧制,保证道次累计变形率,奥氏体被压扁拉长^[3],产生了变形带和大量的位错,应变诱导析出的 Nb 的化合物如 NbC、NbN 和 Nb(C, N)等优先沉淀在奥氏体的晶界、亚晶界和位错线上,不仅能推迟再结晶过程的开始,还能延缓再结晶过程的进行,通过粒子钉扎抑制再结晶的效应,提高了再结晶温度,也扩大了未在结晶区的温度范围^[4]。当发生奥氏体向铁素体相变时,细小的 Nb 化合物颗粒成为铁素体形核晶粒之一,同时又阻止了铁素体晶粒长大,相变后的铁素体晶粒细小、均匀^[5]。

表 5 加热炉加热制度

Table 5 Heating process parameters of heating furnace

工艺	炉温/℃	时间/min
预热	950 ~ 1 000	30 ~ 40
加热 1	1 100 ~ 1 150	20 ~ 30
加热 2	1 250 ~ 1 300	35 ~ 45
均热	1 200 ~ 1 250	35 ~ 45
在炉时间		≤ 150

终轧温度控制在 820 ~ 870 ℃,由于轧制温度降低,奥氏体的形变储存能增大,形变亚结构增多,提高铁素体相变形核,从而增强形变晶粒细化效果达到细晶强化作用^[3]。

精轧后冷却喷淋水全部关闭,避免产生异常组织,耐候 H 型钢上冷床缓冷至 80 ℃以下矫直,检查表面质量后锯切、打包。

3 结果及分析

3.1 钢坯表面质量

高强度耐候钢 Q355NHE 钢种的连铸坯表面质量基本正常,但仍有部分异形坯、大方坯表面出现了轻重不一的横向凹陷,异形坯还出现了纵向凹陷,其中个别异形坯还出现了翼缘横裂,轧制中出现的 H 型钢烂边废品,形貌见图 2。

铸坯凹陷产生的原因认为有以下几方面:(1)由于高强度耐候钢对碳含量有上限要求($\leq 0.16\% \text{ C}$),同时为保证有一定强度,所以耐候钢的碳含量一般均在包晶钢(0.09% ~ 0.15% C)的范围。凝固时发生包晶反应,形成中心为 δ 相、周围为 γ 相的固溶体,继续凝固的过程中 δ 相向 γ 相转变,体积发生收缩,伴随包晶反应出现较大的体积变化、线收缩、凝固收缩和钢液静压力的不均衡作用,使薄坯壳表面粗糙、褶皱,形成凹陷,并在凹陷处伴随有皮下微裂纹^[6];(2)耐候钢中含有 Cr、Ni 等耐候元素,其中 Cr 元素提高钢的热膨胀性,降低导热性,使冷却不均匀,局部冷却强度小,加剧了铸坯的凹陷程度。钢中 $\text{C} = 0.10\%$ 时, $[\text{Ni}]/[\text{Cr}]$ 当量比为 0.55 时,铸坯凹陷出现最高值,见图 3^[7];(3)一冷过强加剧了坯壳的不均匀性,二冷冷却过强加剧了凹陷处微裂纹的程度,铸坯矫直变形时,内弧带有细小或皮下微裂纹的严重横向凹陷则出现较严重的横裂纹。

为避免和减少铸坯凹陷及程度,主要是控制钢中碳含量尽量避开包晶区域或包晶反应的中间值;控制 $[\text{Ni}]/[\text{Cr}]$ 当量比不在 0.55 左右区域;连铸采用弱冷的一次、二次冷却制度;结晶器保护渣选用缓冷型等。

3.2 力学性能

3.2.1 力学性能的检测结果及统计

共统计 Q355NHE 钢种 9 炉次 32 个批次的力学性能试样,见表 6。

3.2.2 -40℃低温冲击功

-40℃低温冲击功共做 32 轧制批次,合格率

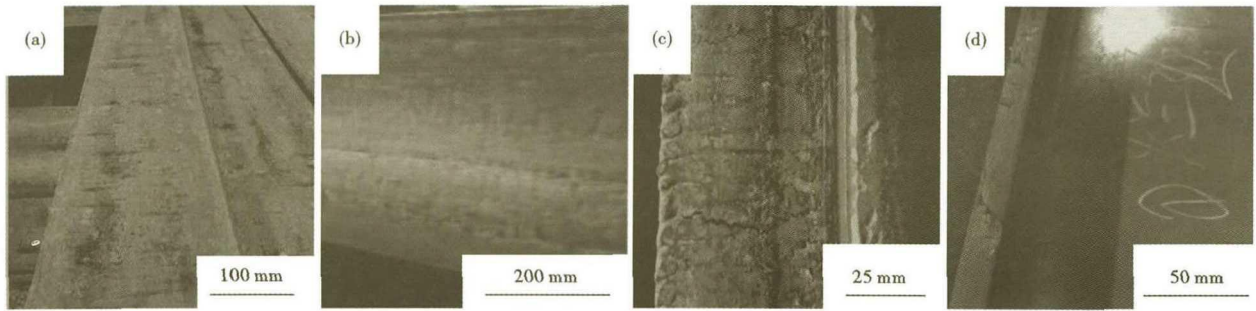


图 2 铸坯(a)和异形坯(b)表面凹陷、异形坯翼缘横裂(c)和 H 型钢烂边(d)的形貌

Fig.2 Morphology of surface depress of bloom (a)/ beam-blank (b), horizontal crack of flange on the beam-blank (c) and edge crack of H beam-steel (d)

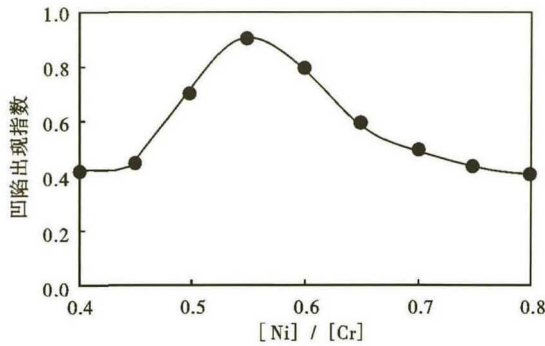


图 3 铸坯凹陷出现指数与钢液 [Ni]/[Cr] 当量比的关系

Fig.3 Relationship between index of depression occurrence index and [Ni]/[Cr]

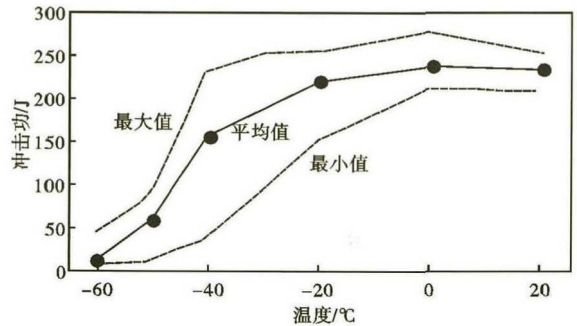


图 4 Q355NHE 钢冲击功与温度的关系

Fig.4 Relationship between impact toughness and temperature of steel Q355NHE

表 6 Q355NHE 钢力学性能检验结果

Table 6 Mechanical properties test results of steel Q355NHE

样本数 32 批次	ReL/ MPa	Rm/ MPa	A/%	-40℃ 冲击功/J
标准	≥355	490 ~ 630	≥22	纵向≥27
范围	396 ~ 437	497 ~ 535	28.5 ~ 30.5	40 ~ 251
平均	420.3	515	29.5	156.1

表 7 Q355NHE 钢 H250 mm × 250 mm 规格 11 批次 -40℃低温冲击功检测结果

Table 7 Test results of -40℃ low temperature impact work for 11 batches H250 mm × 250mm specifications of steel 355NHE

批号	1#/J	2#/J	3#/J	平均/J
JH019030002	175	141	92	136.0
JH019030003	222	251	229	234.0
JH019030004	112	94	101	102.3
JH019030005	237	227	218	227.3
JH019030006	186	158	173	172.3
JH019030007	233	246	236	238.3
JH019030008	196	147	178	173.7
JH019030009	189	212	190	197.0
JH019030010	112	126	134	124.0
JH019030011	45	59	40	48.0
JH019030012	52	72	69	64.3
平均冲击功				156.1

100%, 平均达 156.1 J, 远超标准要求 (≥27 J)。以 H250 mm × 250 mm × 9 mm × 14 mm 规格 11 轧制批次为例, -40℃ 低温冲击功测量值见表 7, 平均达 156.1 J。同时对不同温度下的冲击功做了试验, 得到冲击功随温度的变化曲线 (见图 4), 从图 4 中看出, 低温平均冲击功明显出现斜率突降 (低于 100 J) 的对应温度约 -45℃ 左右。

3.3 晶粒度、组织及夹杂物

检测 9 炉 32 个批次的晶粒度 9 ~ 10 级, 带状组织最高 3 级, 均符合设计预期, 高倍金相组织见图 5; 除 C 类夹杂物外其他类型钢中夹杂物均满足附加要求, 3.0 级 C 类夹杂物占比 26.9%, 略超预期。

3.4 C 类大型夹杂物电镜扫描

典型 3.0 级 C 类夹杂物长度较长, 最长为 706 μm, 经电镜扫描能谱见图 6, 经分析为 Ca、Si、Mg、Al、Mn 等元素构成, 应是外来的耐火材料与钢中内生的硅酸铝钙夹杂物的复合体。

针对此类复合型的大型夹杂物, 一是通过 LF 优化精炼工艺, 保证软吹时间 ≥ 10 min; 二是优化连铸中间包冶金功能, 延长钢水停留时间促使夹杂物充分上浮; 三是采用更加优良的耐火材料, 避免耐材

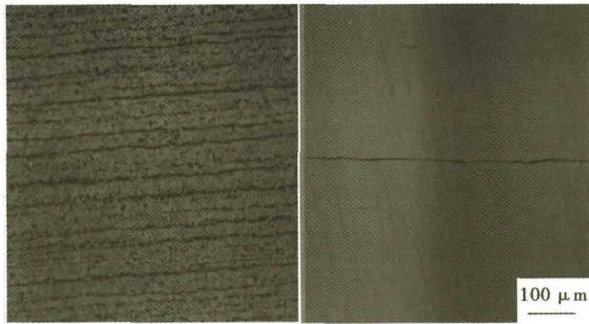
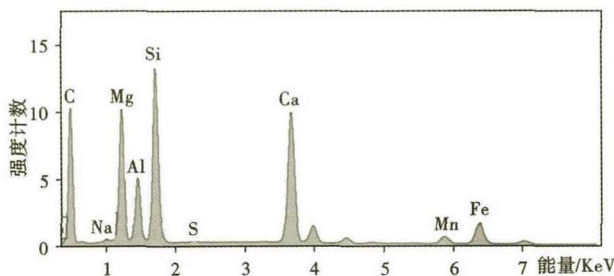


图 5 Q355NHE 钢金相组织(晶粒度 9.5 级)及 C 类夹杂物(3.0 级)

Fig.5 Metallographic structure (grain size rating 9.5) and Class C inclusions (rating 3.0) of steel Q355NHE



元素	Ca	Si	Mg	Fe	Al	Mn	S	Na
占比/%	14.88	12.7	10.79	6.44	4.99	2.07	0.23	0.21
氧化物	CaO	SiO ₂	MgO	FeO	Al ₂ O ₃	MnO	SO ₂	Na ₂ O
占比/%	20.82	27.18	17.88	8.29	9.43	2.67	0.59	0.28

图 6 Q355NHE 钢中 C 类夹杂物(3.0 级)电镜扫描图谱及构成

Fig.6 Electron microscopy scanning energy spectrum and composition of Class C inclusions(rating 3.0) in steel Q355NHE

对钢水的污染。

4 Q355NHE 耐候 H 型钢生产工艺优化对比及生产指标

根据耐候 H 型钢初步生产暴露的一些问题,在后续生产中对相关生产工艺做了针对性的优化,包括成分设计、连铸工艺、加热工艺等,关键工序技术参数优前后对比见表 8。

按本次试验方案设计的高强度 Q355NHE 耐候 H 型钢,生产过程中冷床上的耐候 H 型钢,表面就已经生成了耐候钢特有的典型“红锈”特征,综合合格率 95.13%,成材率 93.85%,均在控制范围内。

5 结论

(1) 通过控制钢中碳 0.06% ~ 0.10%, Ni/Cr 的当量比 0.35 ~ 0.45, 并配合连铸弱冷却及采用缓冷型保护渣等措施,可减少表面凹陷缺陷的程度及数量。

(2) 通过优化 LF 精炼工艺,优化连铸中间包冶金,控制浇注周期 35 ~ 40 min,采用更加优良的耐火材料等,杜绝大型复合 C 类夹杂物。

(3) 通过加热炉缩短 1 050 ~ 1 150 ℃ 的铸坯停留时间,总加热时间控制在 120 ~ 150 min, H 型钢表面未出现铜造成的龟裂缺陷。

(4) 通过添加 Nb 作为细化晶粒微合金化元素,利用精轧阶段的未再结晶区域的轧制累计变形率,获得相变后的铁素体晶粒细小、均匀,晶粒度达到 9 ~ 10 级。

表 8 优化前后关键工序技术参数

Table 8 Key process technical parameters before and after optimization

关键工序	内容	原工艺	优化工艺	目的
化学成分	[C]/%	0.10 ~ 0.14	0.06 ~ 0.10	减少裂纹及铸坯凹陷
化学成分	Ni/Cr	0.50 ~ 0.60	0.35 ~ 0.45	减少裂纹及铸坯凹陷
精炼工序	软吹时间/min	8 ~ 12	10 ~ 15	减少 C 类夹杂物
连铸工序	浇注周期/min	25 ~ 30	35 ~ 40	减少 C 类夹杂物
连铸工序	异形坯结晶器水流量(L · min ⁻¹)	宽 2 100, 窄 900	宽 1 890, 窄 810	减少裂纹及铸坯凹陷
连铸工序	二冷比水量(L · kg ⁻¹)	~ 0.80	~ 0.70	减少裂纹及铸坯凹陷
轧钢加热工序	加热时间/min	150 ~ 180	120 ~ 150	减少铜元素造成的龟裂

(5) 力学性能稳定符合 GB/T 4171-2008 要求,特别是 -40℃ 冲击功较高,平均 156 J。

参考文献

[1] 张振申. 厚规格耐候钢表面裂纹缺陷的分析与研究[J]. 河南冶金, 2016, 24(3): 11-12.
 [2] 杨浩. 含 Nb 船板钢再结晶行为及控轧工艺研究[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 36(3): 167-169.
 [3] 苏世怀. Nb 微合金化 H 型钢控制轧制技术研究[J]. 钢铁, 2002, 37(2): 36-38.
 [4] 余伟, 蔡庆伍, 宋勇, 等. 热轧钢材的组织性能控制 - 原理、工

艺与装备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016: 106-108.
 [5] 郭华. Nb 微合金化 E36 级海洋石油平台用 H 型钢的研究[J]. 钢铁研究, 2008, 36(1): 35-36.
 [6] 刘兴洪. 15CrMoG 钢连铸坯表面凹陷原因分析及改进措施[J]. 现代冶金, 2009, 37(5): 23-24.
 [7] 王文学. 不锈钢连铸坯表面缺陷及对策[J]. 钢铁钎钛, 2006, 27(3): 64-67.

李建中(1968-), 男, 硕士(2007 年安徽工业大学), 高级工程师, 1989 年包头钢铁学院(本科)毕业, 冶金工艺材料研究。E-mail: LJZH203@sina.com

收稿日期: 2019-05-29