

包晶耐候钢矩形坯连铸工艺优化研究

宋振东¹, 王永明¹, 王敏¹, 卜向东¹, 谭晓东¹, 崔弘², 祁祯¹

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司炼钢厂, 内蒙古包头 014010)

摘要:通过高温热模拟试验及计算机软件模拟生产断面尺寸为280 mm × 380 mm和320 mm × 415 mm两种矩形坯结晶器出口温度、二冷段出口温度、坯壳厚度等参数,对比两种不同断面生产同一钢种YQ450NQR1耐候钢生产工艺参数。结果表明,铸坯的低倍质量与结晶器振幅、二冷水量、铸机流数、出二冷段进拉矫机温度有关,随着结晶器振幅的减小,铸机流数的增加和进拉矫机温度升高,铸坯质量改善,当结晶器振幅在±2.5 mm、进拉矫机温度大于940 °C时,二冷水强度采用弱冷的条件下,包晶耐候钢280 mm × 380 mm断面铸坯低倍质量优于320 mm × 415 mm断面铸坯低倍质量。

关键词:结晶器振幅;包晶耐候钢;进拉矫机温度;铸机流数

中图分类号:TF777

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2025)01-0036-06

Study on Optimization of Continuous Casting Process for Rectangular Billet of Peritectic Weathering Steel

Song Zhendong¹, Wang Yongming¹, Wang Min¹, Bu Xiangdong¹,
Tan Xiaodong¹, Cui Hong², Qi Zhen¹

- (1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Steel-making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: Such parameters as the outlet temperatures of crystallizer and secondary cooling section and shell thickness of manufacturing 2 types of rectangular billet with cross-section dimensions of 280 mm × 380 mm and 320 mm × 415 mm are simulated through high temperature thermal simulation experiments and computer software as well as the production process parameters of manufacturing YQ450NQR1 weathering steel with the billets of 2 different cross sections are compared. The results showed that the low magnification quality of billet was related to amplitude of crystallizer, amount of secondary cooling water, number of strands for continuous casting machine and temperature of exiting secondary cooling section while entering tension leveler. With the decrease of amplitude of crystallizer, increase of number of strands for continuous casting machine and temperature of entering tension leveler, the quality of billet is improved. When the amplitude of crystallizer is ±2.5 mm and temperature of entering tension leveler is greater than 940 °C with the condition of weak cold

secondary cooling water, the low magnification quality of billet with cross section of 280 mm × 380 mm of peritectic weathering steel is better than that of billet with cross section of 320 mm × 415 mm.

Key words: amplitude of crystallizer; peritectic weathering steel; temperature of entering tension leveler; number of strands for continuous casting machine

当钢液发生包晶反应时,该过程将发生高温 δ 铁素体向 γ 奥氏体转变, δ 铁素体本身有 3.5% ~ 4.0% 的体积收缩, δ 铁素体密度比 γ 奥氏体小 0.5% ~ 1.0%, δ 铁素体向 γ 奥氏体转变过程表现为线收缩,且在固相线温度以下 25 ~ 100 °C,平均线收缩急剧增加^[1-3]。结晶器内初生坯壳脱离结晶器铜板形成气隙,使传热减慢,易导致坯壳较薄,铸坯表面裂纹及凹陷缺陷形成。耐候钢中含有较高的 Cu、Cr、Ni、V、N 等元素,高温下固溶的 Al、V 在温度降低时以 AlN、V(C,N) 等化合物形式在奥氏体晶界呈动态或静态析出,增加了应力集中源和裂纹敏感性^[4-5]。铸坯拉矫过程中内弧受张应力,由于振痕的缺口效应产生应力集中,会加速裂纹产生及扩展,尤其在铸坯角部裂纹更明显。当铸坯的角部裂纹较为严重时,会造成成品钢材产生表面质量问题,导致产品成材率下降。

1 生产工艺及设备参数

包晶耐候钢 YQ450NQR1 (以下简称 YQ450NQR1) 作为火车大梁钢典型钢种,其生产工艺如下:铁水预处理→转炉→精炼→连铸。成品

310 乙字钢可由 280 mm × 380 mm、320 mm × 415 mm 两个不同断面铸坯轧制。两种不同断面的铸机设备主要参数见表 1。

表 1 铸机设备参数

名称	280 mm × 380 mm	320 mm × 415 mm
铸机类型	弧形	弧形
流数	6	3
结晶器振幅范围/mm	±2.5	±6
结晶器电磁搅拌(M-EMS)	有	有
拉速范围/(m·min ⁻¹)	0.25 ~ 0.70	0.25 ~ 0.70
铸机弧半径/m	12	12
结晶器长度/mm	850	800
二冷方式	动态配水、气雾冷却	动态配水、气雾冷却
流间距/mm	1 650	3 000
水口内径/mm	40	45
水口浸入深度/mm	110 ~ 130	110 ~ 130
冶金长度/m	34.5	37

2 化学成分及特性

包晶耐候钢 YQ450NQR1 的化学成分见表 2。

表 2 包晶耐候钢 YQ450NQR1 的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Fe
≤0.14	≤0.50	≤1.30	≤0.020	≤0.015	≤0.40	≤0.40	≤0.40	≤0.14	其余

由 YQ450NQR1 化学成分中 C 含量可知, YQ450NQR1 的 C 含量处于包晶钢范围内,另外含有大量的 Mn、Cr、Cu、Ni 等合金元素。

计算 YQ450NQR1 的导热系数和焓值,其中连铸浇注温度为 1 547 °C,结晶器长 0.8 m,铸坯拉速为 0.65 m/min,二冷一、二段长度为 2.08 m。液相线温度为 1 510 °C,结晶器出口表面温度在 1 300 °C 上下,坯壳厚度在 17 mm 左右。图 1 为经计算后的

YQ450NQR1 基本物理参数曲线。

从图 1(a) 中可以看出,随着温度的升高, YQ450NQR1 的导热系数先不断下降,在 800 °C 时该材质的导热系数最低,之后随着温度的继续上升,其导热系数不断提高。图 1(b) 中 YQ450NQR1 的焓值随着温度的升高逐渐提高,说明 YQ450NQR1 随着温度的升高其内部能量转化激烈,其原子处在非常活跃的状态,这对包晶钢较薄的坯壳十分不利。

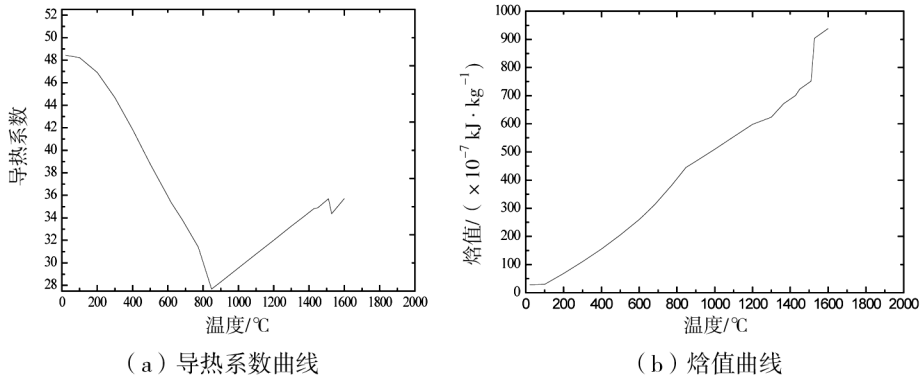


图 1 YQ450NQR1 导热系数和焓值曲线

3 低倍对比分析

采用两种不同断面生产 YQ450NQR1, 在两种断

面连铸过程中的拉速、过热度及保护渣均相同的情况下, 铸坯煮完热酸后, 两种断面的低倍情况如图 2 所示。

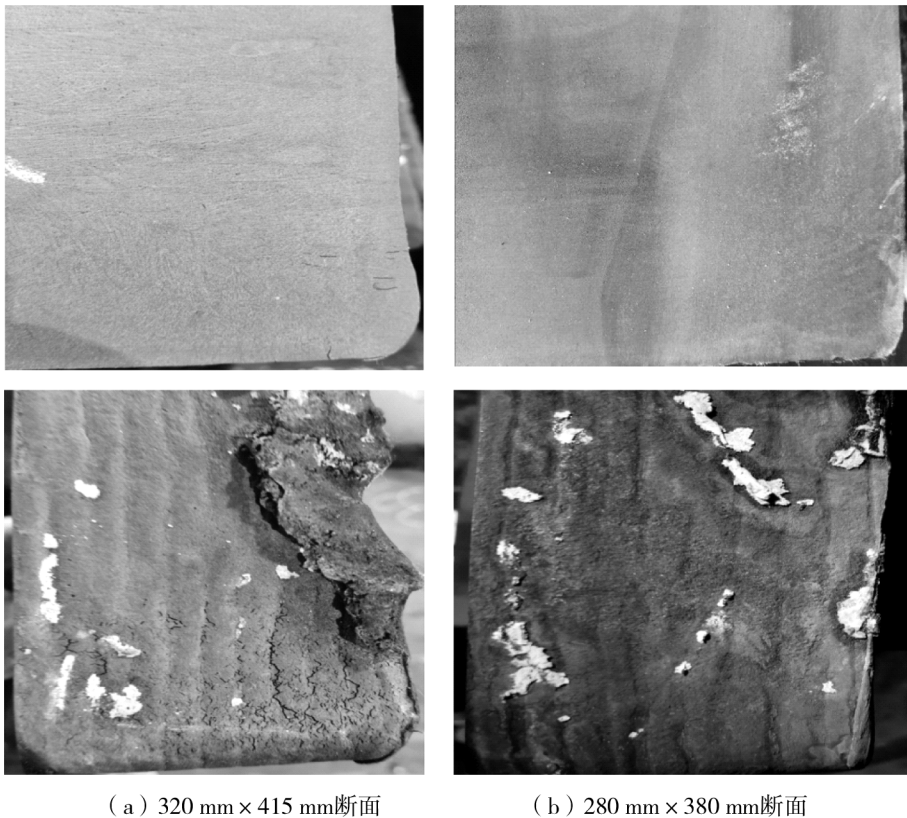


图 2 不同断面 YQ450NQR1 铸坯低倍照片

图 2(a) 为 320 mm × 415 mm 断面连铸坯低倍组织照片, 可以看出, 铸坯煮完热酸后, 在铸坯的角部和铸坯振痕处有裂纹产生, 在轧钢加热及轧钢过程中无法消除该裂纹, 铸坯角部裂纹会遗传到成品上, 对成品质量造成影响, 甚至会产生废品。图 2

(b) 为 280 mm × 380 mm 断面连铸坯低倍组织照片, 煮完热酸后, 角部及铸坯振痕处没有产生裂纹。

4 原因分析

影响包晶钢铸坯产生裂纹的因素有很多, 如钢

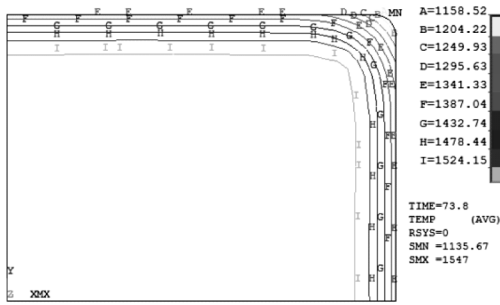
种的化学成分、锰硫比、保护渣、钢水温度、拉坯速度、结晶器液面控制、结晶器倒锥度、二次冷却和结晶器的振动等。表 3 为两种断面铸坯的连铸工艺对比。

表 3 不同断面连铸工艺对比

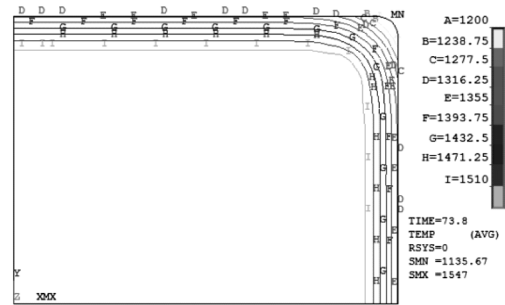
名称	280 mm × 380 mm	320 mm × 415 mm
结晶器冷却水量范围/(L · min ⁻¹)	3 155 ~ 3 238	3 200 ~ 3 250
结晶器水温差/℃	4 ~ 6.7	5 ~ 6
过热度范围/℃	25 ~ 30	24 ~ 31
结晶器振幅波动/mm	±2	±6
拉速/(m · min ⁻¹)	0.65	0.65
二冷水量/(mL · kg ⁻¹)	0.22	0.19
进拉矫机温度/℃	1 024	915

从表 2 可以看出,两种断面结晶器冷却水量、结晶器水温差、过热度、拉速基本接近,其中结晶器振幅波动和进拉矫机温度差别较大。280 mm × 380 mm 断面结晶器振幅波动上下限的差值为 4 mm, 320 mm × 415 mm 断面结晶器振幅波动上下限的差值为 12 mm。YQ450NQR1 材质中的 C 含量在包晶钢范围内,在凝固过程体积会发生收缩,在结晶器内形成的初始坯壳较薄,铸坯在脱模的过程中,结晶器振动的波动幅度会对铸坯表面质量造成影响。

对两种断面的铸坯进行结晶器出口温度、坯壳厚度、二冷段出口温度模拟分析,图 3 为 280 mm × 380 mm 断面铸坯结晶器出口温度和坯壳厚度模拟结果(凝固点 1 510 ℃)。



(a) 出口温度

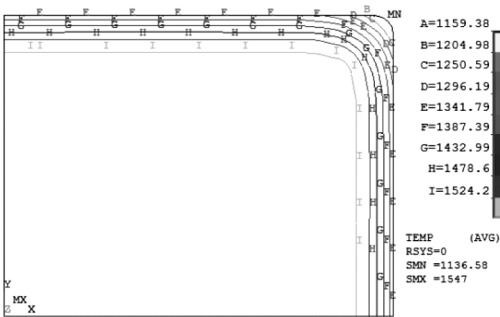


(b) 坯壳厚度

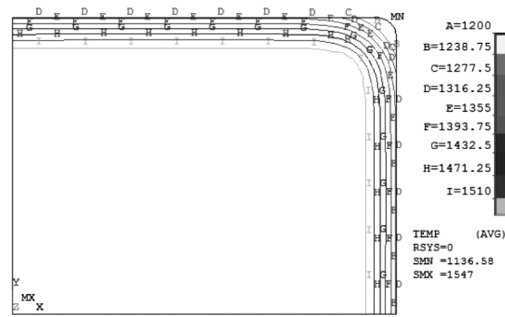
图 3 280 mm × 380 mm 断面铸坯结晶器出口温度分布和坯壳厚度

图 4 为 320 mm × 415 mm 断面铸坯结晶器出口温度和坯壳厚度模拟结果。从模拟数值上可知,两

个断面的结晶器出口温度和坯壳厚度差别不大,坯壳厚度约在 16.5 ~ 16.7 mm。



(a) 出口温度



(b) 坯壳厚度

图 4 320 mm × 415 mm 断面铸坯结晶器出口温度分布和坯壳厚度

图 5 为 280 mm × 380 mm 断面铸坯二冷段出口温度和坯壳厚度模拟结果,图 6 为 320 mm × 415 mm 断面铸坯二冷段出口温度和坯壳厚度模拟结果。

320 mm × 415 mm 断面铸坯的平均温度比 280 mm × 380 mm 断面铸坯的平均温度高 1 ℃ 左右。

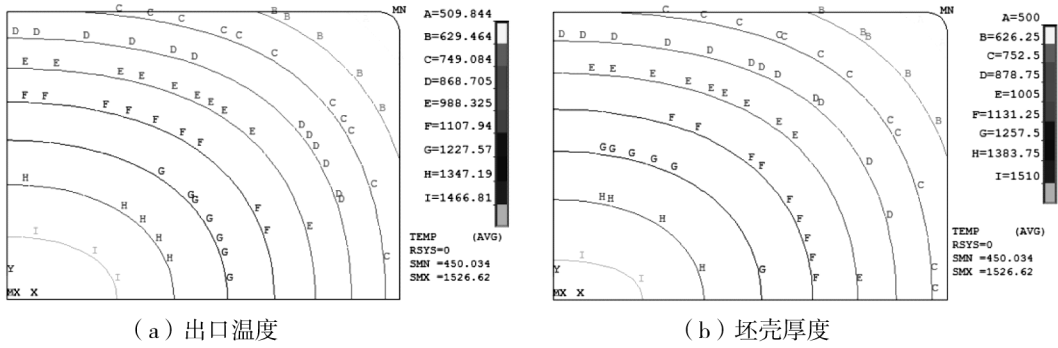


图 5 280 mm × 380 mm 断面铸坯二冷段出口的温度分布和坯壳的厚度

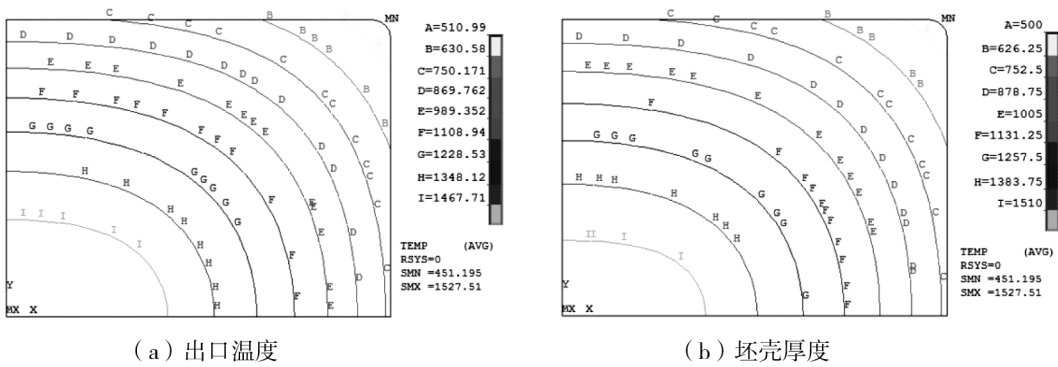


图 6 320 mm × 415 mm 断面铸坯二冷段出口的温度分布和坯壳的厚度

两种断面在相同冷却条件下,铸坯表面温度分布规律相近,出二冷段后铸坯中心的液相区域尺寸 320 mm × 415 mm 断面铸坯是 280 mm × 380 mm 断面铸坯的 2 倍左右,出现中心疏松的几率明显增加。

图 7 为不同断面铸坯进入铸机拉矫机前的温度,图 7(a)为 13 炉 280 mm × 380 mm 断面铸坯进入拉矫机前的温度,图 7(b)为 11 炉 320 mm × 415 mm 断面铸坯进入拉矫机前的温度。

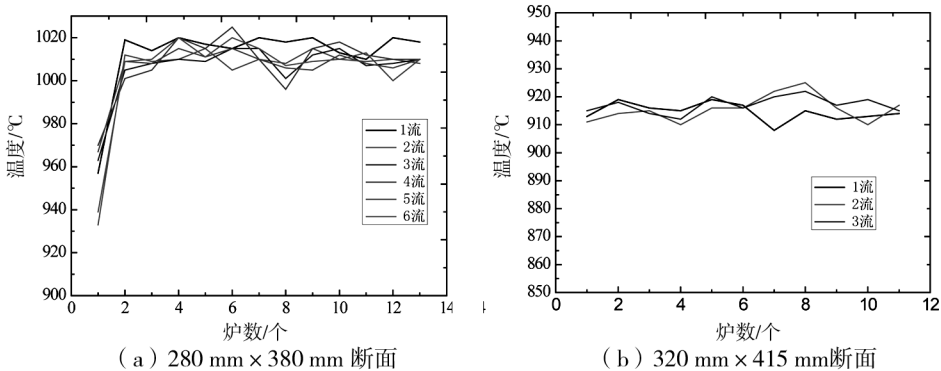


图 7 不同断面铸坯进入拉矫机前温度曲线

从图 7(a)可以看出,280 mm × 380 mm 断面铸坯第一炉进拉矫机温度在 940 °C 以上,后续随着浇注炉数的增加,铸坯进入拉矫机温度均在 1 000 °C

以上。由图 7(b)可知,320 mm × 415 mm 断面铸坯进入拉矫机温度均在 915 °C 左右,与图 7(a)相比进入拉矫机温度低 100 °C 左右。

图8为YQ450NQR1高温拉伸曲线,检测温度区间为800~1250℃,检测YQ450NQR1在此温度区间的拉伸性能,用面缩率来表征YQ450NQR1的高温塑性,当面缩率小于60%时,说明材料在此温度段存在高温脆性。

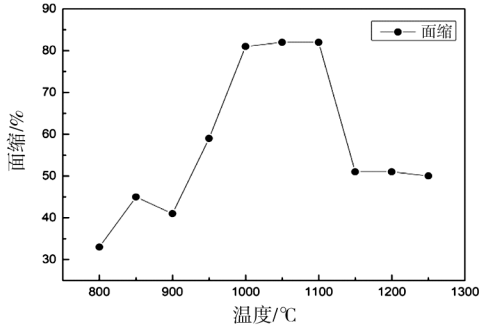


图8 YQ450NQR1 高温拉伸性能

从图8可以看出,YQ450NQR1的第一个高温脆性区间是在800~950℃之间,第二个高温脆性区是在1150~1250℃之间。结合图7不同断面进拉矫机的温度,可知320mm×415mm断面铸坯进拉矫机的温度大部分在YQ450NQR1的第一个高温脆性区,而280mm×380mm断面铸坯进入拉矫机前的温度则避开了YQ450NQR1第一个高温脆性区。

5 结论

(1)通过计算机软件模拟不同断面结晶器出口温度、坯壳厚度和二冷段出口温度、坯壳厚度发现,在相同冷却条件下,不同断面的铸坯表面温度分布

规律相近,但是在出二冷段后铸坯中心的液相区域尺寸,320mm×415mm断面铸坯是280mm×380mm断面铸坯的2倍左右,铸坯出现中心疏松的几率明显增加。

(2)对比连铸工艺及高温热模拟曲线可知,不同断面结晶器的振幅波动和进拉矫机的温度是影响铸坯质量的重要因素,包晶耐候钢YQ450NQR1在1000℃以上进入拉矫机可有效避开材质的高温脆性区,结晶器振幅波动在±2mm时,铸坯的振痕处裂纹几乎没有。

参 考 文 献

- [1] Mizutani Y, Ishibashi K, Yoshii K, et al. 590 MPa Class Fire-resistant Steel for Building Structural Use[J]. Nippon Steel Technical Report, 2004,90: 45-52.
- [2] R Uemori, R Chijiwa, H Tamehiro, et al. AP-FIM Study on the Effect of Mo Addition on Microstructure in Ti-Nb Steel[J]. Applied Surface Science, 1994,76:255-260.
- [3] Morcillo M, Chico B, Díaz I, et al. Atmospheric Corrosion Data of Weathering Steels[J]. A review Corrosion Science, 2013,77(12):6-24.
- [4] 张正延,孙新军,雍歧龙,等. Nb-Mo微合金高强钢强化机理及其纳米级碳化物析出行为[J]. 金属学报,2016,52(4):410-418.
- [5] 李麟,许珞萍. 钢中铌钒碳氮化合物的析出及其稳定性分析[J]. 上海金属,2005,27(2): 1-3.