

Q345 钢 250 mm × 2 000 mm 板坯连铸凝固规律及工艺优化

成日金¹ 王志衡² 王洪富² 夏金魁² 曹龙琼² 张 华¹

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 武汉钢铁集团鄂城钢铁有限责任公司炼钢厂, 鄂州 436002)

摘 要 针对 Q345 钢 (C : 0.14 ~ 0.18, Si : 0.20 ~ 0.50, Mn : 1.30 ~ 1.50, P : ≤ 0.025 , S : 0.015 ~ 0.060, Al) 250 mm × 2 000 mm 板坯中心偏析质量问题, 建立凝固传热数学模型, 并经射钉试验验证及修正, 研究二冷强度(弱冷、中冷、强冷)、连铸速度(0.80 ~ 1.10 m/s)对铸坯温度场和坯壳厚度的影响, 同时优化轻压下工艺和相应的连铸参数。结果表明, 在典型拉速 0.95 m/min 及弱冷制度下, 板坯凝固末端 23.43 m, 两相区长度 7.22 m; 减弱冷却强度, 凝固末端后移 0.56 ~ 0.67 m, 两相区长度变长 0.25 ~ 0.29 m; 拉速增大 0.15 m/min, 凝固末端后移 3.45 ~ 3.90 m, 两相区长度变长 0.94 ~ 1.22 m; 优化采用弱冷冷却制度, 拉速为 0.95 m/min, 轻压下位置对应固相率 $f_s = 0.4 \sim 0.9$, 总压下量达 6 mm 时, Q345 钢板坯中心偏析 I 级内平均合格率由 83.1% 提高到 98.0%。

关键词 Q345 钢 250 mm × 2 000 mm 板坯 连铸 数学模型 凝固末端 中心偏析

Solidification Rule for Casting 250 mm × 2 000 mm Slab of Steel Q345 and Process Optimization

Cheng Rijin¹, Wang Zhiheng², Wang Hongfu², Xia Jinkui², Cao Longqiong² and Zhang Hua¹

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education,

Wuhan Science and Technology University, Wuhan 430081; 2 Steelmaking Plant,

Echeng Iron & Steel Co Ltd, Wuhan Iron & Steel Group, Ezhou 436002)

Abstract In according with issue of central segregation of 250 mm × 2 000 mm slab of steel Q345 (C : 0.14 ~ 0.18, Si : 0.20 ~ 0.50, Mn : 1.30 ~ 1.50, P : ≤ 0.025 , S : 0.015 ~ 0.060, Al), a solidification heat transfer mathematical model is established, and verified and modified by nail shooting test to study the effect of secondary cooling intensity (light, middle and strong) and casting speed (0.80 ~ 1.10 m/min) on casting slab temperature field and shell thickness, and optimize the soft reduction process and correspondent casting parameters. Results show that with typical casting speed 0.95 m/min and light cooling scheduling, the final solidification point of slab is 23.43 m, the length of mushy (liquid-solidified phase) zone is 7.22 m; with decreasing the secondary cooling intensity, the final solidifying point extends 0.56 ~ 0.67 m and the length of mushy zone increases by 0.25 ~ 0.29 m; with increasing casting speed by 0.15 m/min, the final solidifying point extends 3.45 ~ 3.90 m while the length of mushy zone increases by 0.94 ~ 1.22 m; with optimized light cooling schedule, casting speed 0.95 m/min, solidified fraction f_s 0.4 ~ 0.9 at soft reduction zone, and total reduction amount 6mm, the qualified percentage for \leq I rating central segregation of slab of steel Q345 increases to 98.0% from original 83.1%.

Material Index Steel Q345, 250 mm × 2 000 mm Slab, Casting, Mathematical Model, Final Solidifying Point, Central Segregation

鄂城钢铁集团公司转炉厂板坯自从 2009 年 11 月投产以来, 其生产的 Q345 板坯中心偏析 I 级内的合格率不到 90%, 尤其是生产量较大的 250 mm 厚板坯中心偏析 I 级内合格率仅 83.1%。究其原因发现, 因板坯冷却水量控制不好、连铸末端位置预测不准确, 故轻压下位置不准而导致轻压下效果不佳、中心偏析合格率偏低。

针对鄂城钢铁公司(鄂钢)250 mm 厚的 Q345 板坯实际生产条件, 通过建立板坯连铸凝固规律的数学模型, 并经射钉试验验证、修正数学模型, 研究其凝固规律, 优化轻压下工艺及拉速、冷却制度等浇铸参数, 提高 Q345 板坯的中心偏析 I 级内合格率,

提高内部质量。

1 现场生产条件

鄂钢炼钢厂 Q345 的生产工艺为: KR 脱硫 → 130 t 转炉 → 130 t LF 精炼炉 → 板坯连铸机。鄂钢的直结晶器连续弯曲连续矫直弧形板坯连铸机, 中间包容量 42 t, 结晶器总长度及工作长度分别为 900、800 mm, 结晶器断面为 250 mm × 2 000 mm; 连铸机基本弧半径为 10 m, 冶金长度为 38.6 m; 铸机二冷段包括 16 个扇形段共 10 个冷却区, 其中 1 区采取喷淋冷却, 2 ~ 10 区采取气雾喷淋冷却, 二冷水温 31 °C; 连铸机典型拉速为 0.80 ~ 1.15 m/min, 冷却模式有弱冷、中冷和强冷; 钢水过热度为 9 °C, 浇

表 1 Q345DVK1 钢的化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of steel Q345DVK1 / %

C	Si	Mn	P	S	Als
0.14 ~ 0.18	0.20 ~ 0.50	1.30 ~ 1.50	≤ 0.025	≤ 0.025	0.015 ~ 0.060

铸钢种以 Q345DVK1 为例,其目标成分范围见表 1。鄂钢的板坯连铸机配用了奥钢联开发的 DynaGap 轻压下装置,可实现自动化操作。轻压下操作通过浇铸速度、钢种成分、冷却制度、钢水过热度及断面规格来调整轻压下区域和轻压下量。

2 Q345 板坯凝固末端位置研究

2.1 凝固传热模型的建立与验证

2.1.1 数学模型的建立

由于连铸过程传热的复杂性,故在建模前先需对其做一些假设来简化模型。假定结晶器上表面的钢液温度与浇铸温度相同;凝固潜热的释放按照等比热容来处理;忽略结晶器振动及其对传热的影响、忽略铸坯沿拉坯方向的传热及辊子的接触传热;板坯传热具有对称性。

假定板坯传热的对称性,以铸坯横断面的 1/4 为研究对象,铸坯的左下角为原点,宽度方向为 X 轴,厚度方向为 Y 轴,拉坯方向为 Z 轴来建立坐标系。研究平面从结晶器液面开始,至拉矫机出口结束,板坯凝固传热的二维偏微分方程为:

$$\rho C_e \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

式中: ρ - 钢的密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); C_e - 等效比热容/[$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]; t - 时间/s; T - 铸坯瞬时温度/ $^\circ\text{C}$; λ - 导热系数/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]。

2.1.2 数学模型的验证

射钉法在测量连铸凝固坯壳厚度方面具有简单易行、测量结果可靠、不影响生产、不产生废品等优点,故在测量连铸凝固坯壳厚度方面应用较广泛^[14]。通过射钉试验来测量了二冷段铸坯凝固坯壳厚度,以此验证并修正数学模型。试验中 3 支射钉枪安放在 8# 扇形段入口(距离结晶器液面 18.07 m)

和出口处(距离结晶器液面 20.40 m)进行拉坯方向和横向射钉试验。横向射钉试验选择 8# 扇形段入口处进行射钉试验,射钉在铸坯宽度方向 1/4 和 1/2 两个位置布置,即 1# 和 2# 测试点;拉坯方向射钉试验选择 8# 扇形段入口和出口处进行射钉试验,射钉在铸坯宽度方向 1/2 位置处布置,即 2# 和 3# 测试点。待完全凝固后,取 (mm) $250 \times 100 \times 40$ 的钢块进行铣、磨加工,做酸洗分析后,然后根据铸坯内射钉的形貌来确定坯壳的凝固厚度。

射钉试验测量结果与数学模型结果的误差在 $\pm 1.3\%$ 以内,模型计算结果能真实反应此钢种板坯凝固规律。有研究表明^[4-5],板坯表面较高温出现在宽度 1/4 处,但实际 8# 扇形段入口 1/4 与 1/2 处凝固厚度相差很小(测量值在 1 mm 以内),说明铸坯横断面方向液芯呈狭长的扁平带状,故认为铸坯最后凝固位置在中心位置亦可。射钉试样酸洗照片如图 1。

2.2 模拟结果及分析

应用 Q345 板坯凝固传热数学模型计算了正常浇铸温度下,不同拉速及冷却强度下的板坯凝固规律,板坯纵向中心面模拟计算结果见表 2;板坯在 0.95 m/min 及不同冷却强度下的铸坯温度场和坯壳厚度如图 2 所示;弱冷条件下,不同拉速时铸坯温度场和坯壳厚度如图 3 所示。

由表 2、图 2、图 3 可见:

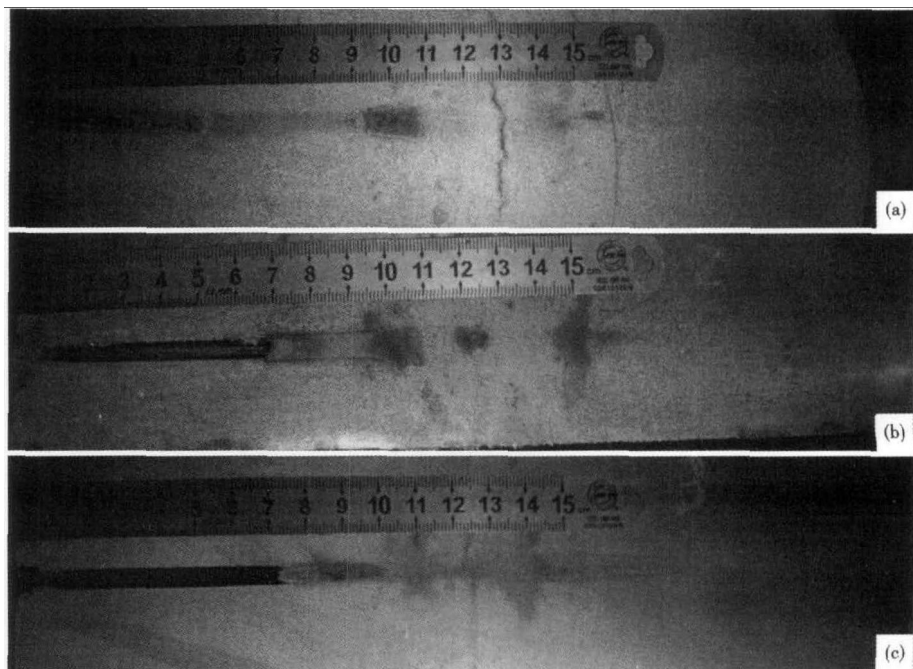


图 1 射钉试样酸洗照片:测试点(a)1#;(b)2#;(c)3#

Fig. 1 Acid picking sample photographs by nail shooting test: location of measured point (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#

表2 板坯纵向中心面模拟结果

Table 2 Simulated results for longitudinal centre surface of slab

冷却模式	1~8区比水量/(L·kg ⁻¹)	9,10区水量/(L·min ⁻¹)	拉速/(m·min ⁻¹)	两相始端/m	两相末端/m	两相区长度/m
强冷	0.795	4.032	0.95	15.52	22.20	6.68
中冷	0.682	4.032	0.95	15.83	22.76	6.93
弱冷	0.568	4.032	0.95	16.21	23.43	7.22
弱冷	0.568	4.032	0.80	13.53	19.53	6.00
弱冷	0.568	4.032	1.10	18.72	26.88	8.16

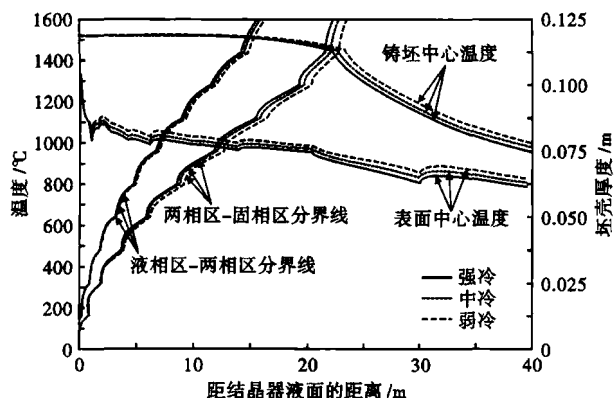


图2 冷却强度对铸坯温度场和坯壳厚度的影响(拉速 0.95 m/min)

Fig.2 Effect of cooling intensity on slab temperature field and shell thickness, casting speed 0.95 m/min

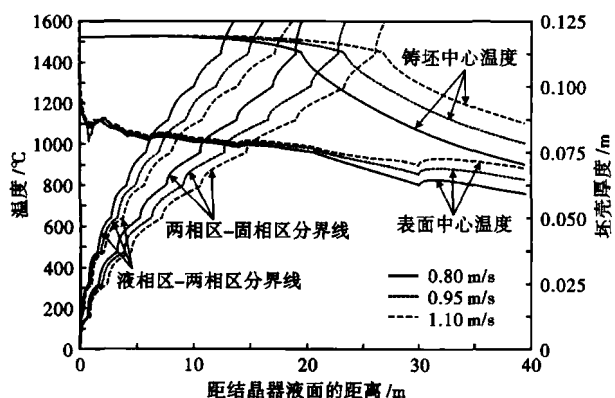


图3 拉速对铸坯温度场和坯壳厚度的影响(二冷-弱冷)

Fig.3 Effect of casting speed on slab temperature field and shell thickness, secondary cooling-light cooling

(1) 在典型拉速 0.95 m/min 及弱冷制度下,板坯凝固始端 16.21 m,凝固末端 23.43 m,两相区长度 7.22 m。

(2) 在典型拉速 0.95 m/min 下,减弱冷却强度,凝固始端和末端分别后移 0.31 ~ 0.38 m 及 0.56 ~ 0.67 m,两相区长度变长 0.25 ~ 0.29 m。

(3) 采取弱冷模式时,改变拉速对两相区始端、末端及两相区长度均有较大影响。拉速增大 0.15 m/min,两相区始端和末端分别后移 2.51 ~ 2.68 m

及 3.45 ~ 3.90 m,两相区长度变长 0.94 ~ 1.22 m。相比而言,拉速的变化比二冷制度的变化对凝固始端、末端及两相区长度的影响更大。

3 连铸工艺优化及结果

3.1 压下位置的讨论与设定

轻压下技术是在铸坯的凝固末端人为减少铸坯的厚度来补偿铸坯的凝固收缩量,这样可以消除或减少铸坯收缩形成的空隙和铸坯中心区域溶质的聚集,同时轻压下形成的挤压力使液芯富积溶质的钢水向反拉坯方向流动,促使溶质元素的重新分配,从而达到改善中心偏析和铸坯固-液界面不产生内裂纹的目的,故必须要有合适的压下位置。

压下位置是轻压下技术的一项重要参数,一般在铸坯凝固末端一个合适的固相率范围内实施轻压下。因钢种的差异与各企业铸机情况的不同,最佳压下位置也不一样。文献认为^[6-9]:恰当的轻压下位置应是在铸坯凝固末端附近某一临界固相率以上,比如固相率 $f_s = 0.85$,或是大于 0.8;而 VAI 则强调轻压下区域应该在凝固终点之前某一合适固相率范围内,在较其小或大的中心固相率范围内采取轻压下时,均达不到应有的效果。

综合考虑凝固与偏析和裂纹敏感性的要求,对应固相率 f_s 选在 0.40 ~ 0.90 比较好。

根据以上研究结果,鄂钢炼钢厂于 2011 年 8 月开始对原工艺进行了优化:(1) 调整冷却水量,采取弱冷的冷却模式,这样可延长两相区长度,充分利用轻压下机架,提高生产率;(2) 拉速的变化易引起凝固规律较大的变动,故采取现场常用拉速 0.95 m/min;在条件许可的情况下,可适当提高拉速来提高生产率;(3) 压下位置的固相率由优化前的对应固相率 $f_s = 0.50 \sim 0.95$ 调至 0.40 ~ 0.90,采取 8 ~ 9# 扇形段,对比优化前,加大压下量 1 mm,总压下量可达 6 mm。

板坯采用轻压下的区域应在对应固相率 $f_s = 0.4 \sim 0.9$ 的位置,板坯拉速及冷却强度不同,两相区长度不同,应选择不同的压下位置,不同工艺条件下的板坯压下位置如表 3 所示。

连铸工艺优化前后,Q345 板坯铸坯中心偏析

表3 不同工艺条件下的板坯压下位置

Table 3 Soft reduction zone for slab casting in different technological conditions

冷却模式	拉速/(m·min ⁻¹)	压下位置对应固相率 f_s	压下位置/m	扇形段号
弱冷	0.95	0.4 ~ 0.9	19.10 ~ 22.71	8 ~ 9#

表 4 轻压下工艺优化工业试验结果

Table 4 Commercial production optimization test results with soft reduction

坯厚/ mm	项目	优化前		提高值/ %
		2010年7月~ 2011年7月	2011年8月~ 2011年10月	
250	检验坯样数/块	598	49	14.9
	偏析I级内坯数/块	497	48	
	合格率/%	83.1	98.0	

发生情况见表 4、图 4。由表 4 及图 4 可见,采用优化的轻压下技术后,250 mm 厚的板坯中心偏析合格率由 83.1% 提高到 98.0%,提高值为 14.9%。可见,连铸工艺优化后,改善中心偏析效果显著。

4 结论

(1) 射钉试验测量结果与数学模型结果误差在

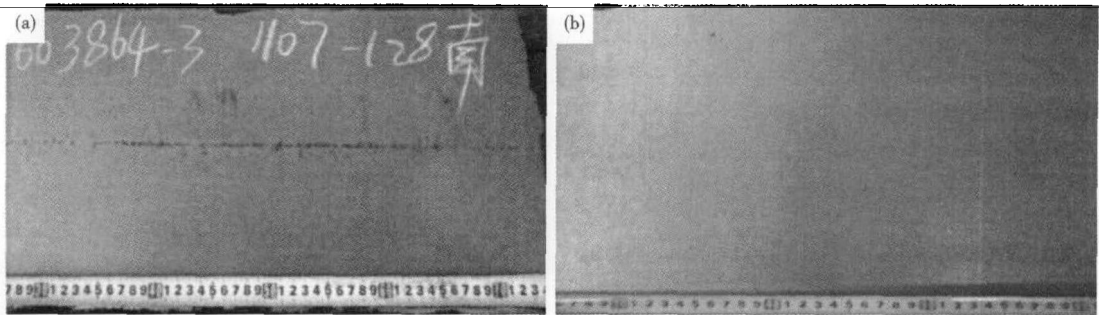


图 4 工艺优化前(a)后(b)铸坯中心偏析形貌

Fig. 4 Morphology of center segregation of slab before (a) and after (b) process optimization

$\pm 1.3\%$ 以内,模型计算结果能真实反应此钢种板坯凝固规律。

(2) 在典型拉速 0.95 m/min 及弱冷制度下,板坯凝固始端 16.21 m,凝固末端 23.43 m,两相区长度 7.22 m。

(3) 在典型拉速 0.95 m/min 下,减弱冷却强度,凝固始端和末端分别后移 0.31 ~ 0.38 m 及 0.56 ~ 0.67 m,两相区长度变长 0.25 ~ 0.29 m。采取弱冷模式时,拉速增大 0.15 m/min,两相区始端和末端分别后移 2.51 ~ 2.68 m 及 3.45 ~ 3.90 m,两相区

长度变长 0.94 ~ 1.22 m。相比而言,拉速的变化比二冷制度的变化对两相区始端、末端及两相区长度的影响更大。

(4) 优化采用弱冷冷却制度,拉速为 0.95 m/min,轻压下位置对应固相率 $f_s = 0.4 \sim 0.9$,轻压下采取 8 ~ 9° 扇形段,采取较大压下量,总压下量可达 6 mm。采用优化的轻压下技术后,Q345 板坯中心偏析 I 级内平均合格率由 83.1% 提高到 98.0%,连铸工艺优化后,改善中心偏析效果显著。

参考文献

- [1] 陈永,吴国荣,孙彦辉.大方坯连铸二冷区凝固坯壳厚度测试[J].钢铁钒钛,2009,30(1):60-63.
- [2] 栗伟,朱国森,王万军,等.连铸坯液相穴长度的测定研究[J].北京科技大学学报,2003,25(4):315-318.
- [3] 伍斌,陈永,赵克文,等.攀钢弧形板坯连铸机铸坯凝固层厚度的研究[J].钢铁,2000,35(10):27-29.
- [4] Long M J, Chen D F, Wang Q X, et al. Determination of CC Slab Solidification Using Nail Shooting Technique [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2012, 39(5): 370-377.
- [5] 张富强,王新华.连铸板坯二冷区宽度方向不均匀冷却的研究[J].钢铁,2006,41(9):30-32.
- [6] Clyne T W, Wolf M, Kurz W. The Effect of Melt Composition on Solidification Cracking of Steel, with Particular Reference to Continuous Casting [J]. Metallurgical and Materials Transaction B, 1982, 13(2): 259-266.
- [7] Davis G J, Shin Y K. Solidification Technology in the Foundry and Cast house [M]. London: The Metal Society, 1979: 517.
- [8] 程常桂,茅洪祥,胡琳.轻压下技术在连铸中的应用[J].炼钢,1998,14(5):42-45.
- [9] Mürwald K, Thalhammer M, Federspiel C, et al. SMART/ASTC 技术的冶金、操作和经济效果[J].钢铁,2003,38(11):21-25.

成日金(1983-),男,博士研究生,助理工程师,2007年武汉科技大学毕业。E-mail:chengrijin168@yahoo.com.cn

收稿日期:2012-10-22