

· 工艺技术 ·

重轨钢连铸凝固末端位置研究及工艺优化

张 华¹ 倪红卫¹ 成日金¹ 李 熠¹ 易卫东² 叶途明²

(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)公司第一炼钢厂, 武汉 430083)

摘 要 根据武钢第一炼钢厂重轨钢连铸生产条件, 建立 380 mm × 280 mm 方坯凝固传热数学模型, 并采用射钉法验证及修正。模拟结果表明, U71Mn 和 U75V 钢的凝固末端各自位于距结晶器液面 16.96 ~ 21.68 m 和 16.50 ~ 21.17 m; 减弱二冷强度或增大拉速, U71Mn 和 U75V 钢凝固终点均会明显后移。根据计算结果, 二冷制度由弱冷(0.346 L/kg) 改为超弱冷(0.218 L/kg), 拉速采用 0.7 m/min, 应用 1 ~ 4[#] 机架轻压下, 压下量为 5 ~ 7 mm, U71Mn 和 U75V 钢凝固终点延长至 21 m 以上。连铸工艺优化后, 重轨钢大方坯中心疏松 I 级内平均合格率由 89.64% 提高到 99.50%。

关键词 重轨钢铸坯 数值模拟 凝固末端 轻压下 中心疏松

A Study on End Position of Solidification for Casting Heavy Rail Steel and Its Process Optimization

Zhang hua¹, Ni Hongwei¹, Cheng Rijin¹, Li Yi¹, Yi Weidong² and Ye Tuning²

(1 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Unitization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 No1 Steelmaking Plant, Wuhan Iron and Steel (Group) Co, Wuhan 430083)

Abstract Based on condition for heavy rail steel concasting at No1 Steelmaking Plant, Wuhan Iron and Steel Co, the math model for solidification heat transfer model of 380 mm × 280 mm bloom has been established, and tested and modified by pin-shooting technique. Simulation results show that the distance of end position of solidification of heavy rail steel U71Mn and U75V from meniscus is respectively 16.96 ~ 21.68 m and 16.50 ~ 21.17 m; with decreasing intensity of secondary cooling or increasing casting speed, the end position of solidification of steel U71Mn and U75V is obviously prolonged forward. According calculated results, as secondary cooling schedule changes from weak cooling (0.346 L/kg) to extra-weak cooling (0.218 L/kg) with casting speed 0.7 m/min, using soft reduction 5 ~ 7 mm at No1 ~ 4 stand, the end position of solidification of steel U71Mn and U75V is prolonged to more than 21 m. After concasting process optimization, the qualified percentage for center porosity in bloom of heavy rail steel ≤ rating 1 increases from 89.64% to 99.50%.

Material Index Bloom of Heavy Rail Steel, Numerical Simulation, End Position of Solidification, Soft Reduction, Center Porosity

武钢高速重轨生产线的重要配套项目一炼钢分厂 3[#]大方坯连铸机已于 2007 年 12 月 26 日热负荷试车一次成功。该项工程投产后, 年产合格坯 110 万 t, 为武钢“万能轧机生产线”提供原料, 主要生产以重轨钢为主的 10 余个品种钢, 使武钢成为国内第 4 家、世界第 7 家能够按照国际技术标准生产百米重轨的生产企业。

3[#]大方坯连铸机投产初期, 重轨钢大方坯内部质量不稳定, 中心疏松平均 I 级内合格率不到 95%。因此研究重轨钢大方坯连铸凝固规律, 确定凝固末端位置, 优化连铸工艺及动态轻压下技术参数, 对提高重轨钢铸坯内部质量意义重大。

1 3[#]大方坯连铸机生产条件

1.1 基本情况

结晶器断面 380 mm × 280 mm; 结晶器高度 800

mm; 弧形半径 12 m; 冶金长度 36.5 m; 二次冷却系统由 1 个水冷区、4 个气雾冷却区和 1 个空冷区组成, 常用冷却模式包括弱冷和超弱冷, 其冷却强度见表 1; 典型拉速 0.6 ~ 0.7 m/min; 浇铸钢种 U71Mn、U75V, 主要成分范围见表 2。

表 1 重轨钢常用冷却模式

Table 1 General cooling mode of heavy rail steel

冷却模式	拉速/(m · min ⁻¹)	冷却强度/(L · kg ⁻¹)
弱冷	0.6	0.395
	0.7	0.346
超弱冷	0.6	0.213
	0.7	0.218

1.2 轻压下技术

为了保证重轨钢铸坯优良的内部质量, 武钢一炼钢分厂 3[#]大方坯连铸机采用了 VAI 的 SMART/

表 2 U71Mn 与 U75V 钢的化学成分/%

Table 2 Chemical composition of steel U71Mn and U75V /%

钢种	C	Si	Mn	P	S	V
U71Mn	0.65 ~ 0.76	0.15 ~ 0.35	1.10 ~ 1.40	≤ 0.030	≤ 0.030	-
U75V	0.71 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	0.70 ~ 1.05	≤ 0.030	≤ 0.030	0.04 ~ 0.12

ASTC 轻压下技术。轻压下系统由 SMART 智能扇形段、ASTC 控制系统及 DYNACS 计算模型组成。SMART 动态辊缝调节扇形段的主要特性是：液压系统稳定可靠、定位精度 ± 0.1 mm、液压缸内装有简单而无磨损的电子行程传感器。ASTC 是指自动铸坯锥度控制，主要根据热跟踪模型和预定的辊缝操作来计算辊缝设定值。热跟踪模型计算实际浇铸条件下铸坯的温度场，而辊缝操作则是与钢种有关的冶金诀窍。所谓动态辊缝调整，就是在铸坯靠近凝固终点的预定区域，减少铸坯厚度。

轻压下机架每流由 7 组机架组成，每流的机架包括：(1) 动态计算轻压设定点的过程控制模型；(2) 铸坯控制器（控制每一流上的夹送辊调节装置）；(3) 每个夹送辊装置上的位置变速器；(4) 每个夹送辊装置上的液压控制装置；(5) 机械设备（带有可调辊缝的夹送辊装置）。

此外，每个夹送辊装置的功能分为两部分：(1) 普通压下装置功能。夹送辊装置将根据机器方式和跟踪值以预选的热坯压力上下移动；(2) 位置可控的轻压下功能。铸坯控制器将凝固区的每个夹送辊装置转换到位置控制装置，同时辊缝设定点将根据各种参数（浇铸速度、钢种、铸坯冷却水、钢水过热度等）进行动态计算，从而得到最佳的压下位置和压下量。武钢 5 机 5 流大方坯连铸机每流 7 个轻压下机架距结晶器弯月面的距离如表 3 所示。

表 3 轻压下机架距结晶器弯月面的距离

Table 3 Distance from meniscus in mold to each soft reduction stand

机架编号	距结晶器弯月面距离/m
1 [#]	16.59
2 [#]	18.04
3 [#]	19.49
4 [#]	21.04
5 [#]	22.49
6 [#]	23.94
7 [#]	25.39

压下模式有 5 种，包括 ASTC-VERY-SOFT (A-V-S)、ASTC-SOFT (A-S)、ASTC-MEDIUM (A-M)、ASTC-HARD (A-H)、ASTC-VERY-HARD (A-V-H)。

5 种模式分别对应最大压下量为 2~7 mm。

2 重轨钢大方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 模型建立的几点假设

(1) 结晶器上表面的钢水与浇铸温度相同；(2) 凝固潜热的释放按等效比热容处理；(3) 忽略铸坯沿拉坯方向的传热及辊子的接触传热；(4) 忽略结晶器振动及其对传热的影响。

2.1.2 数学模型的建立

考虑到方坯传热的对称性，只取铸坯横断面的 1/4 为研究对象。以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，大方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/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$ ； λ - 导热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$ ； T - 铸坯瞬时温度/ $^\circ\text{C}$ 。

2.1.3 数学模型的验证

射钉法在测量连铸坯凝固坯壳厚度方面具有不影响生产、不产生废品、操作简便、测量精度高等优点，故在测量凝固坯壳厚度方面应用较广泛^[1-4]。为了验证并修正重轨钢凝固传热数学模型，进行射钉试验测量了二冷段铸坯凝固坯壳厚度。试验中两支射钉枪安放第 3 扇形段的空冷区，分别距结晶器液面 13.00 m (A 点) 与 14.83 m (B 点) 的铸坯宽面中央位置。射钉长度应超过坯厚 1/2，铸坯厚 280 mm，选择 150 mm 射钉。待完全凝固后，取 100 mm \times 50 mm \times 280 mm 小样，进行酸洗和硫印，用钢尺测量凝固厚度。

射钉试验检测结果和模型计算的结果比较发现，二者误差在 $\pm 3.2\%$ 以内，模型计算结果能真实反映重轨钢大方坯的凝固规律。典型铸坯酸洗硫印照片如图 1。

2.2 模拟结果及分析

应用重轨钢凝固传热数学模型计算了正常浇铸温度（过热度 18~28 $^\circ\text{C}$ ）下，不同冷却制度和拉速下的重轨钢大方坯凝固规律，计算结果见表 4、图 2。

由图 2、表 4 可见：

(1) U71Mn 和 U75V 钢的凝固末端各自位于距结晶器液面 16.96~21.68 m 和 16.50~21.17 m，两相区长度分别在 10.36~13.80 m 和 10.22~13.73

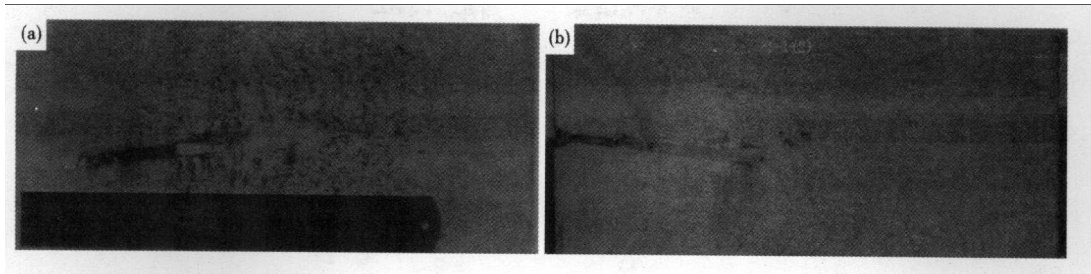


图1 U71Mn钢A点射钉试样低倍组织形貌,拉速0.7 m/min,弱冷:(a)硫印;(b)酸洗

Fig.1 Macrostructure morphology of steel U71Mn sample A by pin-shooting technique, casting speed 0.7 m/min, weak secondary cooling: (a) sulfur print; (b) acid pickling

表4 铸坯纵向中心面模拟结果

Table 4 Simulation results longitudinal center section of casting bloom

钢种	拉速/ ($m \cdot min^{-1}$)	二冷 模式	两相区 始端/m	凝固末端/ m	两相区 长度/m
U71Mn	0.7	超弱冷	7.88	21.68	13.80
	0.7	弱冷	7.91	19.36	11.45
	0.6	超弱冷	6.93	18.08	11.15
	0.6	弱冷	6.60	16.96	10.36
U75V	0.7	超弱冷	7.44	21.17	13.73
	0.7	弱冷	7.39	18.40	11.01
	0.6	超弱冷	5.97	17.74	11.77
	0.6	弱冷	6.28	16.50	10.22

m,波动范围较大。

(2)二冷制度采用弱冷,U71Mn和U75V钢凝固末端终点分别为16.96~19.36 m和16.65~18.40 m,二冷制度采用超弱冷,两钢种凝固末端终点分别为18.08~21.68 m和17.74~21.17 m;二冷强度减弱后,两钢种凝固终点分别后移了1.12~2.32 m和1.24~2.77 m,两相区长度延长了0.79~2.35 m和1.55~2.72 m,拉速越大凝固末端后移越大,两相区延长更长。

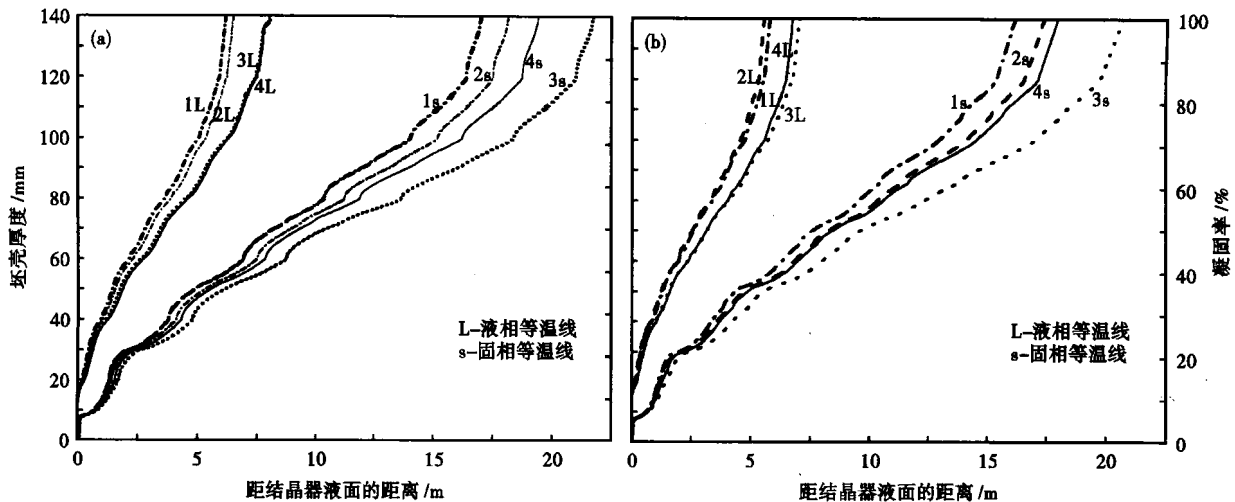


图2 U71Mn(a)与U75V(b)钢铸坯纵向中心面温度场的变化,铸速/ $(m \cdot min^{-1})$,二冷强度:1-0.6,弱;2-0.6,超弱;3-0.7,超弱;4-0.7,弱

Fig.2 Change of temperature field along longitudinal centre section of casting bloom of steel U71Mn (a) and U75V (b), casting speed/ $(m \cdot min^{-1})$, secondary cooling intensity: 1-0.6, weak; 2-0.6, ultra-weak; 3-0.7, ultra-weak; 4-0.7, weak

(3)拉速0.6 m/min时,U71Mn和U75V钢凝固末端终点分别为16.96~18.08 m和16.65~17.74 m,拉速0.7 m/min时,两钢种凝固末端终点分别为19.36~21.68 m和18.40~21.17 m;拉速增大,两钢种凝固末端终点分别后移了2.40~3.60 m和1.90~3.43 m,两相区长度分别延长1.09~2.65 m和0.79~1.96 m,二冷强度越弱,拉速的影响更大。

3 连铸工艺优化及结果

轻压下技术在减轻中心疏松,改善钢材质量方

面有着很好的效果,故在现场中应用广泛;轻压下的压下位置处的中心固相率应小于0.8;重轨由于大的凝固收缩比,采取高达7 mm的压下量甚至可完全消除内裂纹^[5-11]。

根据以上研究结果,武钢一炼钢分厂于2008年5月开始对原工艺进行了优化:(1)将二冷制度由弱冷改为超弱冷,并适当增大拉速至0.7 m/min,U71Mn和U75V钢的凝固末端位置由20 m以内,即4#轻压下机架前,延长至21 m以上,这样可以有效

采用 1~4#轻压下机架进行压下,提高铸坯内部质量,同时提高了生产率;(2)重轨钢属于高碳钢,其凝固收缩较大,使用 1~4#机架进行压下应采用较大压下量,压下总量可达 5~7 mm;(3)采用超弱冷模式后,水量较小,应注意确保喷嘴状况良好,保证雾化质量和冷却效果。

连铸工艺优化前后,重轨钢铸坯中心疏松发生情况见表 5、图 3。由表 5 及图 3 可见,连铸工艺优化后,重轨钢铸坯的中心疏松 I 级内平均合格率由 89.64% 提高到 99.50%,提高了 9.86%,改善重轨钢内部质量效果显著。

4 结论

(1) 建立的重轨钢大方坯凝固传热模型模拟结果与射钉实测结果误差在 $\pm 3.2\%$ 以内,模型计算结果能真实反应重轨钢大方坯凝固规律,预测凝固末端位置。

(2) U71Mn 和 U75V 钢的凝固末端分别位于距结晶器液面 16.96~21.68 m 和 16.50~21.17 m 时,受工艺参数影响较大。

(3) 二冷强度减弱或拉速增大,U71Mn 和 U75V 钢凝固终点均会明显后移。

(4) 二冷制度采用超弱冷,拉速 0.7 m/min, U71Mn 和 U75V 钢凝固终点延长至 21 m 以上,可有效应用 1~4#轻压下,压下量应在 5~7 mm,可提高铸坯内部质量和生产率。

(5) 连铸工艺优化后,重轨钢铸坯的中心疏松 I 级内平均合格率由 89.64% 提高到 99.50%,改善重轨钢内部质量效果显著。

参考文献

- 岳尔斌,李永林,王志道,等.射钉法在测量连铸坯凝固坯壳厚度方面的应用.物理测试,2004,22(3):22
- 王晓东,曹建刚,王宝峰,等.重轨钢大方坯连铸过程中凝固传热和坯壳生长的数值模拟.连铸,2007(3):5
- 王彪,谢植,汪灿荣,等.基于射钉法的小方坯凝固过程数值模拟.铸造技术,2007,28(3):435
- 罗森,朱苗勇,张书岩,等.方坯连铸凝固末端位置研究.炼钢,2008,24(3):37
- 叶途明,易卫东,王国平,等.第一炼钢厂 3 号大方坯连铸机特点及试生产.武钢技术,2008,46(3):18
- 杨素波,陈永,李桂军.大方坯连铸动态轻压下技术应用研究.钢铁,2005,40(6):24
- 王光进,刘宗毅,洪军.静态轻压下技术在高碳连铸方坯生产中的应用.钢铁研究,2006,34(4):36
- 林启勇,蒋欢杰,朱苗勇.连铸坯动态轻压下的压下参数分析.材料与冶金学报,2004,3(4):261
- 阎建兵,赵霞,严桢博.连铸静态轻压下模型的设计和应用.浙江大学学报(工学版),2007,41(增刊):49
- 刘伟,刘浏,何平.轻压下技术在高碳钢方坯连铸应用中的参数选取.钢铁钒钛,2008,29(4):58
- Li Guijun, Zhang Kaijian, Han Chuanji, et al. SMART/ASTC Dynamic Soft Reduction Technology and Its Application on the Bloom Continuous Caster at Pangang. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 13(2): 121

张华(1978-),男,博士研究生,讲师,2003年武汉科技大学毕业,连铸新技术、冶金过程模拟仿真与控制研究。

收稿日期:2010-03-19

表 5 2008 年工艺优化前后铸坯中心疏松合格率

Table 5 Center porosity qualified percentage of casting bloom before and after optimization of process in 2008

项目	优化前		优化后					
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
检验坯样数/块	99	86	205	315	213	87	272	117
疏松 I 级内坯数/块	90	76	203	313	210	87	272	117
疏松 I 级内合格率/%	90.91	88.37	99.02	99.37	98.59	100	100	100
平均合格率/%	89.64		99.50					

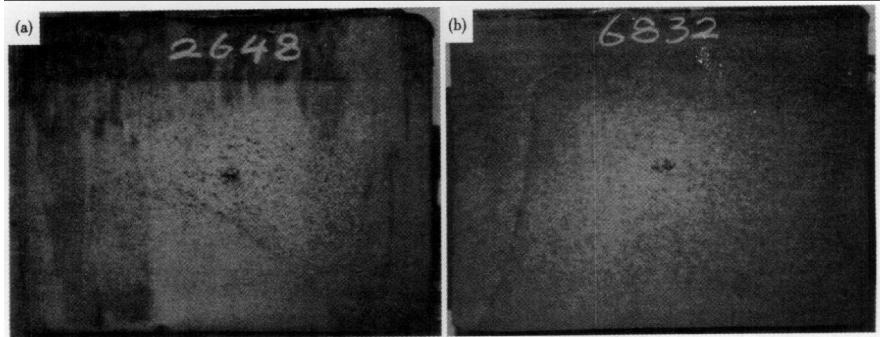


图 3 工艺优化前(a)后(b)的铸坯中心疏松形貌

Fig. 3 Morphology of bloom centre porosity before and after improvement of process