

• 实用成型技术 Practical Shaping Technology •

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.08.021

小方坯连铸模拟研究

周莞冬, 杨森, 王瑞敏

(河北钢铁集团邯钢公司一炼钢厂, 河北邯钢 056003)

摘要:针对小方坯连铸工艺,利用有限元计算软件 ProCAST 对其凝固的过程进行了模拟。结果表明,优化后的二次冷方案减轻了铸坯断面的应力集中,减少了铸坯表面的回温幅度,提高了产品质量。

关键词:连铸;二次冷;数值模拟;应力分析;温度场

中图分类号: TF777.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)08-0787-03

Simulation Study on Continuous Casting Small Billet

ZHOU Yuandong, YANG Shen, WANG Ruimin

(First Steelworks of Handan Iron and Steel Company of Hebei Iron and Steel Group Company, Handan 056003, China)

Abstract: The solidification process of billet continuous casting was simulated by the finite element software ProCAST. The results show that the optimized secondary cooling scheme can reduce the stress concentration of the slab section, reduce the temperature return range of the slab surface, and improve the product quality.

Key words: continuous casting; secondary cooling; numerical simulation; stress analysis; temperature field

在钢坯的连续铸造生产实践中,由于冷却制度不当,导致小方坯表面裂纹和内部裂纹的情况较多^[1,2]。连铸过程中二次冷却的参数对铸坯的内部质量有重要的影响^[3,4]。而连铸过程是一个非常复杂的高温过程,由于工艺复杂、工业试验成本高,很难通过生产试验的方式对工艺参数进行优化。因此,多通过数值模拟的方式对连铸过程进行研究^[5-8]。

本文通过有限元分析软件 ProCAST 建立了小方坯连铸模型,并进行了分析研究,最终获得了优化的二次冷却方案,以期消除小方坯缺陷的提供参考。

1 模型建立

1.1 建模与网格划分

以 150 mm×150 mm 断面方坯作为模拟对象。铸坯断面及网格划分如图 1 所示。

1.2 控制方程与模拟条件

在计算中采用如下传热控制方程:

$$\rho c = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

式中, T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ 为钢液密度, kg/m^3 ; λ 为导热

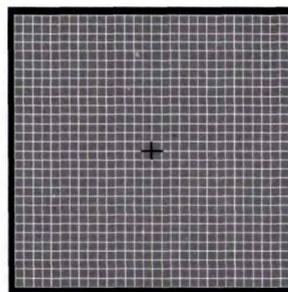


图 1 方坯断面及网格划分示意图
Fig.1 Schematic diagram of square billet section and grid subdivision

系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; c 为比热容 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

应力控制模型采用 ProCAST 数据库提供的弹塑性模型。

本模拟采用二维切片旅行的模拟方式,对小方坯的冷却凝固过程进行模拟,假设钢液流动为不可压缩流动,介质的导热系数具有各向同性,钢的热物性参数为温度的函数,考虑到连铸中钢液流动对传热的影响,设液相区热导率为绝对热导率的 6 倍,两相区热导率取固液相热导率的调和平均数。

1.2.1 初始条件

钢液初始温度为钢液中包温度。

1.2.2 边界条件

(1) 铸坯表面热流计算公式^[9]:

$$q_1 = h \times (T_s - T_c) \quad (1)$$

式中, q_1 为钢坯外表面的热流密度, W/m^2 ; h 为对流

收稿日期: 2020-05-30

作者简介: 周莞冬(1983-), 山西临汾人, 助理工程师, 主要从事炼钢工艺技术研究方面的工作。

电话: 18303388387, E-mail: zyd102550357@163.com

换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_{st} 为钢液温度, $^{\circ}C$; T_c 为环境温度, $^{\circ}C$ 。

(2) 辐射换热公式^[7]

$$q_2 = \varepsilon \times C_b \times \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

式中, q_2 为铸坯表面辐射换热的热流密度, W/m^2 ; C_b 为黑体辐射系数, $5.68 W/(m^2 \cdot K^4)$; ε 为表面黑度; T_p 为铸坯表面温度, $^{\circ}C$; T_c 为环境温度, $^{\circ}C$ 。

其中二冷换热系数 h 值由如下公式确定^[9]:

$$h = 1570 \times W^{0.57} (1 - 0.0075 \times Tw) / \alpha \quad (3)$$

式中, W 为冷却水量, $L/(m^2 \cdot s)$; Tw 为冷却水温度, $^{\circ}C$; α 为与拉矫辊相关的传热修正系数, 此处取 4。

1.2 连铸的相关参数

本文中连铸拉速为 2 m/min, 浇注温度为 1520 $^{\circ}C$ 。所使用的钢种成分参数见表 1。

表 2 为二冷优化前(方案 1)与优化后(方案 2)方案的具体情况。

表1 连铸钢种的主要成分
Tab.1 Main chemical components of continuous casting steel

C	Si	Mn
0.30	0.15	0.35

表 2 连铸二冷设置
Tab.2 Secondary cold setting of continuous casting

二冷区域	方案 1		方案 2	
	长度/mm	冷却水量(m^3/h)	长度/mm	冷却水量(m^3/h)
一区	800	7.8	500	9
二区	1800	4.8	1000	6.2
三区	1500	0.5	2200	4
四区	-	-	1600	0.5

2 模拟结果及分析

2.1 应力场模拟结果分析

图 2 为浇注温度 1520 $^{\circ}C$ 二冷方案 1 铸坯应力模拟结果, 随着时间的推移, 角部位置等效应力逐渐增加。其原因是角部为两个方向的传热, 降温速度最快, 其由于温度差造成的热应力明显高于铸坯断面

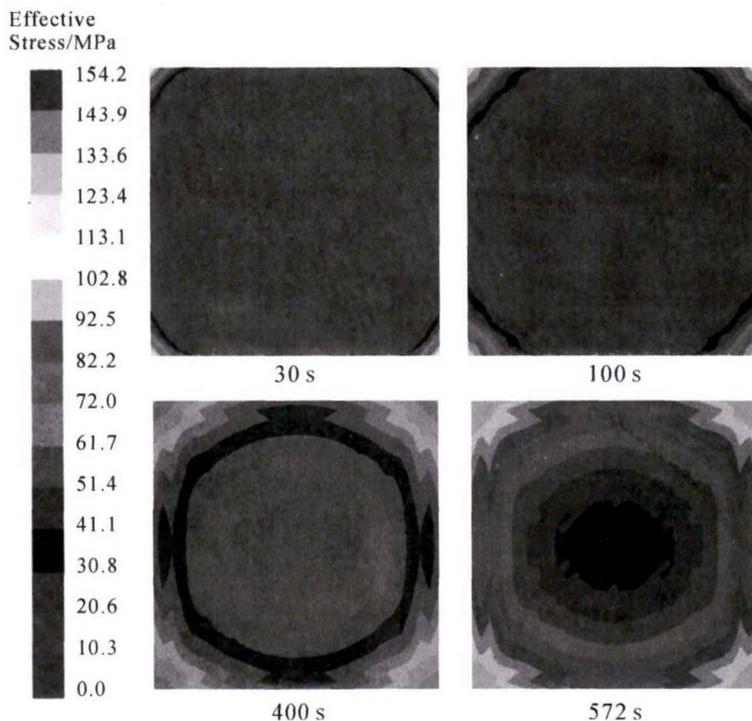


图 2 铸坯应力模拟结果

Fig.2 Simulation results of stress in billet

其他部分。根据模拟结果可知, 其角部应力最大值可达 185.7 MPa, 方案 2 角部应力最大值为 182.1 MPa。

图 3 为不同二冷方案的铸坯断面应力集中情况, 在二冷方案 2 中铸坯断面的应力分布相对较为分散, 其裂纹产生的几率相对较小。其原因是在方案 2 中, 铸坯凝固更为均匀, 从而减弱了应力的集中。

2.2 温度模拟结果分析

图 4 为不同二冷方案铸坯表面中点及铸坯中

心温度对比, 由于方案 2 冷却强度相对较强, 铸坯表面中点温度明显低于方案 1。在方案 1 中铸坯表面温度累计回升 145 $^{\circ}C$, 二冷段最大回温值为 103 $^{\circ}C$, 方案 2 铸坯表面温度累计回升 125 $^{\circ}C$, 二冷段最大回温值为 71 $^{\circ}C$ 。铸坯中心温度在切片旅行 300 s 左右(距弯月面 10 m)处发生明显分歧, 据模拟结果数据可知, 方案 1 液芯长度为 12.4 m, 方案 2 液芯长度为 11.5 m。根据现场工艺要求, 方案 2 更优。

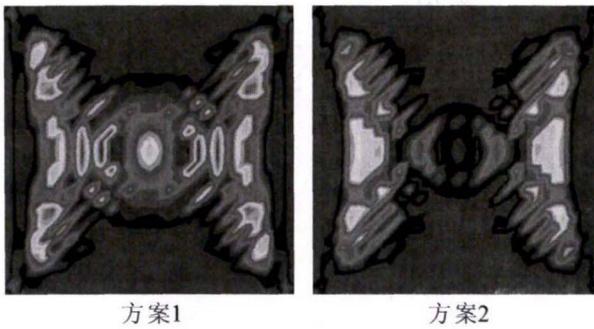


图3 不同二冷方案铸坯断面应力集中情况
Fig.3 Stress concentration of billet section in different secondary cooling schemes

3 结论

(1)小方坯凝固过程中,角部应力最大,二冷方案优化前其角部应力最大值为 185.7 MPa, 优化后为 182.1 MPa。

(2)在 2 m/min 拉速下,二冷优化前最大回温值为 103 °C,二冷优化后最大回温值为 71 °C。

(3)优化后的二冷方案减轻了铸坯断面的应力集中,减少了铸坯表面回温幅度,提高了产品质量。

参考文献:

[1] 伍帅,岳峰,魏勇,等.连铸工艺参数对高碳钢小方坯凝固组织的影响[J].铸造技术,2017,38(11):2687-2690.
[2] 徐旺,刘增勋,肖鹏程,等.方坯表面纵裂的数值模拟研究[J].炼

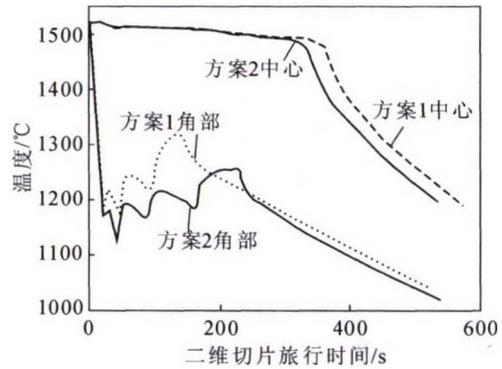


图4 不同二冷方案铸坯表面中点及铸坯中心温度对比
Fig.4 Comparison of surface mid point and billet center temperature of different secondary cooling schemes

钢,2020,36(2):48-52.

[3] 刘伟,莫志英,于兴旺,等.板坯二冷配水优化研究[J].铸造技术,2019,40(8):48-52.
[4] 孙立根,李晓斐,朱立光,等.基于二冷配水优化的65Mn板坯内部品质控制研究[J].铸造技术,2017,38(2):372-376.
[5] 崔立新,张家泉,陈素琼,等.连铸板坯在结晶器内凝固行为的研究[J].炼钢,2003,19(3):22-25.
[6] 李东辉,刘相华,邱以清,等.方坯连铸机结晶器凝固传热的数学模型[J].东北大学学报,2004,25(8):774-777.
[7] 康丽,王恩刚,赫冀成.连铸结晶器温度场及热变形的数值模拟[J].材料与冶金学报,2006,3(5):190-194.
[8] 刘俊平,张朝晖,冯璐,等.连铸坯凝固过程的数值模拟研究[J].铸造技术,2020,41(4):379-380.
[9] 干勇,倪满森,于志祥,等.现代连续铸钢实用手册[M].北京:冶金工业出版社,2010

(上接第 786 页)

Pneumoconiosis[M]. Clinical Respiratory Medicine (Fourth Edition), Agustí S G S A, Philadelphia:W.B.Saunders, 2012, 637-644.
[3] Dr. Ki P L K, Korhonen O, Mattsson T, et al. Lung contamination among foundry workers[J]. International Archives of Occupational and Environmental Health. 1979, 43(2):85-91.
[4] Jeong I, Ryu I, Kim B, et al. Two Cases of Lung Cancer in Foundry Workers[J]. Annals of Occupational and Environmental Medicine. 2013: 1-5.
[5] Kuo H W, Chang C L, Lai J S, et al. Prevalence of and factors related to pneumoconiosis among foundry workers in central Taiwan [J]. Science of The Total Environment. 1998, 222(3): 133-139.
[6] Rosenman K, Reilly M, Rice C, et al. Silicosis among foundry workers [J]. American Journal of Epidemiology. 1996, 144(9): 890-900.
[7] 盛亚光.大型喷砂房除尘系统的优化设计 [J].北京工业职业技术学院学报,2015,14(4):117-120.
[8] 刘忠慧,韩晋.落砂机除尘系统设计 [J].中国铸造装备与技术,

2000(4):44-44.
[9] 宋高举,秦洪建,杨磊.某铸造车间除尘系统实测与分析[J].广州大学学报(自然科学版),2010,9(2):30-35.
[10] Tohru Mizuki, Toshitake Kanno. Establishment of Casting Manufacturing Technology by Introducing an Artificial Sand Mold with Furan Resin and Realizing a Clean Foundry[J]. International Journal of Metalcasting, 2018, 12(4):1-7.
[11] Scholz R C, Jr. Euvrard L. Dust off your foundry's silica control measures[J]. Modern Casting. 2001, 91(11): 45-48.
[12] Fiebig W, Wróbel, Jakub. Two stage vibration isolation of vibratory shake-out conveyor [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17(2):199-204.
[13] TCFA030802-2-2017 铸造行业大气污染物排放限值[S].
[14] GBZ1-2010 工业企业设计卫生标准[S].
[15] 孙一坚,沈恒根.工业通风(第四版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
[16] GB3095-2012 环境空气质量标准[S].