基于PROCAST的82B连铸二冷温度场分布及凝固传热的研究

马光林[①1] 李京社[2] 刘 纲[2] 龚荣波[1] 杨宏博[2] 毕秀荣[2]
(1:首钢水城钢铁集团有限公司炼钢厂 贵州六盘水 553028;
2:北京科技大学冶金与生态工程学院 北京 100083)

摘要 以水钢炼钢厂2号连铸机二冷优化改造为研究对象,利用Procast数值模拟软件建立凝固传热模型,结合射钉实验,共同研究小方坯连铸机典型钢种拉坯工艺(拉速、过热度)对铸坯温度场分布的影响。通过对连铸机二冷制度的优化调整,探明二冷制度优化对提升铸坯凝固组织的作用,为首钢水钢连铸机二冷制度的优化改造提供了可靠的理论支撑和改造方案,从而提高铸坯质量,降低钢坯质量缺陷。

关键词 Procast模拟 温度场分布 凝固传热 拉坯工艺 质量缺陷
中图分类号 TF777 **文献标识码** A
doi:10.3969/j.issn.1001-1269.2013.03.005

Research on Temperature Field Distribution and Solidification Heat Transfer of the 82B Caster Secondary Cooling with PROCAST Numerical Simulation

Ma Guanglin[1] Li Jingshe[2] Liu Gang[2] Gong Rongbo[1] Yang Hongbo[2] Bi Xiurong[2]
(1:Steel Plant, Shougang Shuicheng Iron & Steel (Group) Co.,Ltd, Liupanshui 553028;
2:School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

ABSTRACT In this paper, take the optimization and modification of the secondary cooling in steel plant, Shougang Shuicheng Iron and Steel (Group) Co., Ltd. as the research object. Combined with the nail shooting experiment, establish the solidification heat transfer model with the help of Procast numerical simulation software to jointly study the influence of typical throwing process (drawing speed, degree of superheat) of the small billet caster on the slab temperature distribution. Then provide feasible theory support and solutions for optimization and transformation of the secondary cooling in Shougang Shuicheng Iron & Steel by making optimization adjustment on temperature distribution and optimizating the solidification heat transfer of caster secondary cooling, which can improve the billet quality and reduce quality defects.

KEYWORDS PROCAST numerical simulation Temperature field distribution Solidification heat transfer Drawing blank technics Quality defects

1 前言

在品种钢的开发过程中,铸坯中心偏析、疏松和缩孔等级偏高,特别是高碳钢,碳的选择性结晶造成中心偏析严重,对钢坯质量的稳定性影响较大,这直接制约着各钢厂品种钢开发的步伐[1]。为此,首钢水钢以提高铸坯质量为攻关点,以连铸

① 作者简介:马光林,男,1971年出生,毕业于贵州工学院钢铁冶金专业,学士,工程师,首钢水钢炼钢厂连铸科科长

万方数据

机二冷制度的优化改造为攻关切入点，通过二冷制度的优化控制，攻克典型钢种质量缺陷对其产品开发的影响。本文以首钢水城钢铁（集团）有限责任公司炼钢厂二连铸2#铸机二冷为研究对象，利用Procast数值模拟研究铸坯的温度场分布，建立满足水钢炼钢厂现有工艺、装备条件下的二冷数学模型，优化二冷凝固传热过程，提高铸坯质量，降低缺陷的发生。

2 Procast数值模拟研究

2.1 初始条件设定

初始条件包括：(1)结晶器液面温度。考虑到结晶器内部温度无法测量，以及水钢现场采用了中间包保护浇铸的措施，所以可以认为结晶器液面温度约等于中间包温度。(2)型腔初始温度。(3)重力方向为竖直向下。

2.2 边界条件设定

由于整个二冷过程不仅有动量传输同时也有热量传输，所以边界条件分为速度边界条件和传热边界条件。

1)速度边界条件

速度以现场拉速为准，由于Procast默认的单位是国际标准单位，所以需要将现场的拉速单位转换为国际标准单位。

2)传热边界条件

由于本模型包括结晶器段、足辊段、二冷一段、二冷二段、二冷三段和空冷段。所以传热边界条件比较复杂，应当分阶段分别确定。

(1)结晶器段传热

结晶器坯壳生长速度取决于结晶器的传热速率，而结晶器传热速率取决于结晶器内钢水热量传给冷却水间的换热系数，也可以说取决于结晶器内钢水与冷却水间的总热阻。结晶器的传热可以用下式来描述[2,3]。

$$q = h(T_{MS} - T_{CW}) = 1/R_T(T_{MS} - T_{CW})$$

式中　q—结晶器壁的热流量，W/m^2；

h—总换热系数，$W/(m^2 \cdot K)$；

T_{MS}—结晶器内钢水温度，℃；

T_{CW}—结晶器冷却水温度，℃；

R_T—总热阻，$m^2 \cdot K/W$。

结晶器壁的总热阻可以用各部分热阻之和来表示，公式如下：

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6$$

式中　R_1—结晶器壁冷却水间的热阻，$m^2 \cdot K/W$；

R_2—通过结晶器铜铸坯的热阻，$m^2 \cdot K/W$；

R_3—通过气隙的热阻，$m^2 \cdot K/W$；

R_4—通过保护渣膜的热阻，$m^2 \cdot K/W$；

R_5—通过坯壳的热阻，$m^2 \cdot K/W$；

R_6—钢水－坯壳间的热阻，$m^2 \cdot K/W$。

由于准确确定结晶器每个热阻的数值相当困难，所以考虑采用热流密度表示结晶器的传热能力。结晶器是用冷却水进行强制冷却的，若忽略从结晶器液面向保护渣所传的热量，冷却水所带走的热量应等于钢水的导出热量。因此，可将单位面积单位时间内由结晶器导出的热量称为结晶器的平均热流量，它与拉速，所浇筑的钢种，保护渣及冷却水量，流速，温差等参数有关，其计算公式为：

$$q = q_m \cdot C \cdot \Delta t / F$$

式中　q—结晶器平均热流量，W/m^2；

q_m—冷却水流量，kg/s；

C—冷却水比热容，$J/(kg \cdot K)$；

Δt—冷却水进出温差，℃；

F—结晶器有效面积，m^2。

其中，冷却水流量q_m由现场使用的水流量换算得到；结晶器的有效面积可通过结晶器的几何尺寸计算得到，通过计算可以得到水钢现场的结晶器有效面积为$0.608m^2$。具体数据见表1。

表1　结晶器换热能力分析表

项目	国际单位	数值
水流密度q_m	kg/s	36.31174444
水比热C	J/kg·K	993.4
进出水温差Δt	℃	6.7
结晶器有效面积F	m^2	0.608
热流密度q	W/m^2	1670208.853

(2)二冷段传热

在二冷区，铸坯表面接受喷水或气雾冷却，坯壳中存在着较大的温度梯度，热量源源不断地从铸坯内部传递到表面，然后被冷却水带走（大约210～294kJ/kg的热量被水带走），铸坯才能全部凝固。根据热平衡估算，二冷区铸坯表面的主要传热方式如图1所示[4,5]。

万方数据

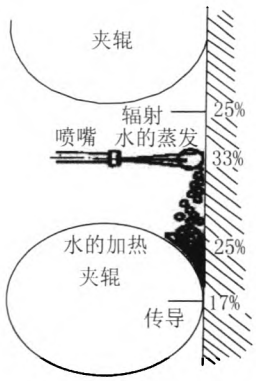

图 1　二冷区传热示意图

铸坯被带走的热量比例为:冷却水蒸发带走的热量 33%;冷却水加热带走的热量 25%;铸坯表面辐射热为 25%;铸坯与支撑辊接触传导传热为 17%。在铸机设备和工艺条件一定的情况下,铸坯辐射散热变化不大,支撑辊的接触导热变化也不大,占主导地位的是冷却水与铸坯表面的热交换(对流换热)。

由于无法精确确定同一时刻内冷却水蒸发量和未蒸发量,所以二冷段的换热系数的计算常采用经验公式进行计算。本文采用 M. Ishiguro 等提出的经验公式[6]:

$$h = 0.581W^{0.451}(1 - 0.0075T_w)$$

式中　T_w—冷却水温度。

由此公式可以计算出二冷区各个分段的换热系数。

3　82B 温度场及凝固传热的模型

表 2　82B 钢现场工艺参数

炉号	22300234
钢种	82B
C	0.76
Si	0.20
Mn	0.82
P	0.015
S	0.013
拉速,m/min	1.74
浇注温度,℃	1505
结晶器水流量,m^3/h	131.4
结晶器进水温度,℃	30.1
结晶器进出水温差,℃	5.8
足辊段水量,m^3/h	4.1
二冷一段水量,m^3/h	3.70
二冷二段水量,m^3/h	1.89
二冷三段水量,m^3/h	0.80

基于 82B 钢的物理特性,对现场工艺条件下的 82B 钢连铸过程进行了数值模拟。现场工艺参数如表 2。

根据表 2 中的工艺参数,设定合理的初始条件和边界条件,通过模拟计算得到如图 2 所示结果。

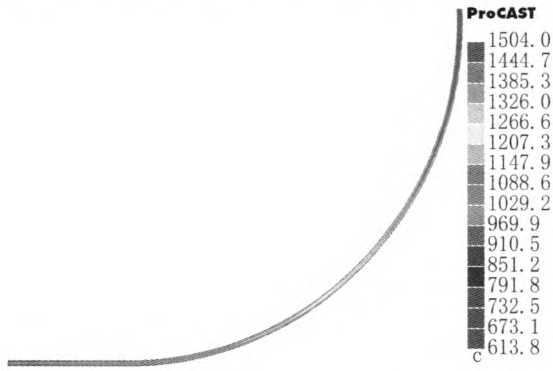

图 2　82B 钢铸坯剖面温度场分布结果

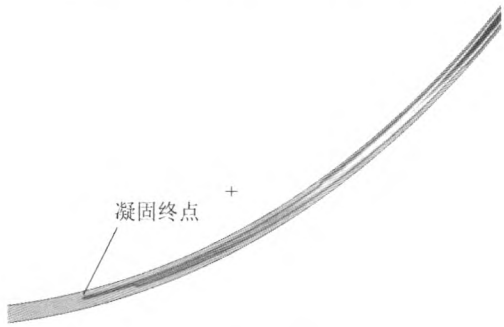

图 3　铸坯凝固终点

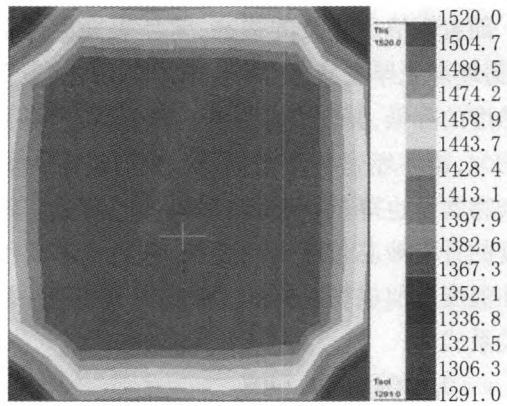

图 4　出结晶器段铸坯温度分布

从图 2 至图 4 的数值模拟结果可以得到整个铸坯凝固过程各阶段的温度场和凝固状态分布。通过分析拉矫前铸坯的温度场和凝固率分布结果,可得出该工艺条件下,铸坯拉矫前处温度在固相线以上的范围为:宽 80mm,高 88mm;固相率在 90% 以下的范围为:宽 11mm,高 27mm。(凝固率大

万方数据

于90%的铸坯组织已经很致密,在拉矫过程中不易发生变化,也不易产生应力裂纹或者收缩裂纹)

连铸过程关键位置铸坯横截面的温度场和固相率展示了铸坯经过结晶器、足管段、二冷一段、二冷二段、二冷三段、拉矫段以及火焰切割段的温度分布和固相率分布情况,通过对各个阶段温度场和固相率分布情况可以指导生产,调节相应的配水强度以达到所需的结果。

4　结果分析与讨论

4.1　拉速对二冷区内温度场分布的影响

随着拉坯速度的提高,铸坯表面温度提高,铸坯液芯长度增加,表面温度梯度减少,二冷强度也应做相应的调整,保证凝固过程的稳定。拉速的增大液芯长度不变长,并且液芯长度和拉速近似成线性关系,关系式为:

$$y = 9.567\,v - 5.172$$

式中　v—拉速,m/min;

y—液芯长度,m。

钢坯在凝固阶段,由于钢坯内部潜热的释放,钢坯中心温度降幅很小,从而在铸坯内部形成较长的液相穴,根据射钉试验的分析,随着拉速的提高,铸坯坯壳厚度减小,液芯变长,铸坯热应力与拉应力增加,在二力的共同作用下加速导致铸坯中间裂纹形成[7-10]。

4.2　钢液过热度对二冷区温度场分布的影响

随着钢液过热度的提高,铸坯表面温度也升高,铸坯坯壳厚度减薄,液芯长度增长。随着钢液过热度的降低,铸坯表面温度也降低,温度场分布更均匀,铸坯坯壳厚度增加,液芯长度减少,钢坯夹杂物含量也降低,钢材洁净度明显提高。浇注温度的升高液芯长度不断变长,并且液芯长度和浇注温度近似成线性关系。液芯长度和浇注温度的关系式为:

$$y = 0.0404t - 44.1408$$

式中　t—浇注温度,℃;

y—液芯长度,m。

5　结论

1)铸坯液芯长度和拉速近似成线性关系,关系式为:

$$y = 9.567\,v - 5.172$$

式中　v—拉速,m/min;

y—液芯长度,m。

依据该公式可以得出,在配水量不变的情况下,拉速每增大0.1m/min,液芯长度增加0.9567m;

2)液芯长度和浇注温度的关系式为:

$$y = 0.0404t - 44.1408$$

式中　t—浇注温度,℃;

y—液芯长度,m。

浇注温度每提高1℃,液芯长度延长0.0404m。

参考文献

[1]Lerner V. S, Lerner Y. S. Solidification Modeling of Continuous Casting Process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, Vol. 14:258 - 262.

[2]Shi Shengli, Huang Zhiqiang, Wang Haisheng. Research on process and equipment for cast iron small bar with double-current horizontal continuous casting[J]. Zhuzao Jishu/Foundry Technology, 2005, Vol. 26:14 - 17.

[3]KivelaE, KonttinenJ, Rautaruukki O. Dynamic secondary Cooling Model for continuous casting [A]. Steelmaking Conference Proceedings [C]. America 1995, 341.

[4]蔡开科,程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.

[5]Cui Kai, Xu Qingyan, Yu Jing. Radiative heat transfer calculation for super alloy turbine blade in directional solidification process[J]. Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica, 2007, Vol. 43:465 - 471.

[6]Seshadri V, Da Silva C. A, Silva I. A etal . A tundish to mold model for grade change during ladle change-over in continuous casting[J]. Iron and Steel Making, 2006, vol. 2:499 - 510.

[7]Griffiths, William David, Kayikci Ramazan. The effect of varying chill surface roughness on interfacial heat transfer during casting solidification[J]. Journal of Materials Science, 2007, Vol. 42:4036 - 4043.

[8]粟伟,朱国森,王万军,王新华. 连铸坯液相穴长度的测定研究. 北京科技大学学报,2003(4):315 - 318.

[9]T A Blasé, Z X Guoa. A 3D Conjugate Heat Transfer Model for Continuous Wire Casting [J]. Materials Science and Engineering, 2004(A365):318 - 324.

[10]You Bong Sun, Yim Chang Dong, KimSu Hyeon. Solidification of AZ31 magnesium alloy plate in a horizontal continuous casting process [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, Vol. 413:139 - 143.

(收稿日期:2013 - 01 - 06)

万方数据