

八流中间包耐材蓄热对中间包钢液温度的影响

颜慧成, 靖振权, 侯钢铁, 李金波, 巩彦坤, 史进强

(河钢集团邯钢公司技术中心, 邯郸 056015)

摘要: 对八流40 t中间包烘烤及浇钢过程的包壁与钢液温度进行了数值模拟计算与20CrMnTiH钢200 mm × 200 mm坯连铸现场实测。结果表明, 模拟计算烘烤期间中间包耐材升温缓慢, 浇钢后中间包内衬耐材升温加快, 第3炉外壁温度397 °C, 达到热平衡; 第2炉结束时, 计算两侧与中部钢液温度较第1炉对应位置分别升高5.2、1.5 °C, 计算边流与中部流钢液温差4.8 °C, 实测第2炉边流间与中部流间钢液温度相差4 °C, 中间包钢液温度均匀稳定, 计算值与实测值趋势一致; 烘烤包温度由900 °C提高至1 000 °C时, 第1炉中间包钢液温降减慢, 水口出钢温度略增, 各流间温差减少。

关键词: 八流中间包; 热状态; 钢液温度

Effect of Eight-strand Tundish Lining Heat Balance on Steel Temperature

Yan Huicheng, Jin Zhenquan, Hou Gangtie, Li Jinbo, Gong Yankun, Shi Jinqiang
(Technological Center, Hansteel Company, HBIS Group, Handan 056015)

Abstract: The numerical simulation and calculation on eight-strand 40 t tundish lining and liquid steel during roasting and casting have been carried out, and the 20CrMnTiH steel 200 mm × 200 mm billet casting process has been tested in situ. The results show that tundish lining is heat up slowly during roasting and warmed rapidly with steel tapping into tundish. Temperature of the out surface of tundish for the third heat reaches to 397 °C and get to heat balance. At end of the 2nd heat, steel temperature at the side and center part of tundish is respectively 5.2, 1.5 °C higher than the first heat, and modeling result also shows that steel temperature at center nozzle is 4.8 °C higher than that at side nozzle. Actual measuring data for second heat show that steel temperature at center part is 4 °C higher than at side position. Modeling results match with the measuring data and it shows that steel temperature distribution get to stable and uniform in tundish at the end of the 2nd heat. When the roasted temperature of tundish lining increases from 900 °C to 1 000 °C, the steel temperature of the first heat reduces slowly and the steel temperature at outlet of nozzle increases a little and the temperature difference between the streams dereases.

Material Index: Eight-Strand Tundish; Thermal State; Steel Liquid Temperature

八机八流整体中间包一般用于浇注小方坯, 由于中间包窄长, 散热面积大, 温降大, 并且边流与中部铸流钢液温差大, 浇次前三炉过热度难以稳定控制, 过热度偏低时影响连铸第1炉顺利开浇, 如生产150 mm方坯时, 08Al等冷镦钢一般可浇性较差, 边流因过热度低开浇难度加剧; 而过热度过高时对高端品种的质量造成影响^[1-2], 如生产轴承钢、SWRH82B等高碳钢时, 高过热度会导致中心偏析指数偏高。因此, 浇次前三炉窄长中间包过热度控制成为温度控制难点, 一直以来, 中间包热状态备受关注。职建军^[3]通过对宝钢双流板坯中间包包衬热状态进行全程测试, 分析了耐材蓄热对中间包温度的影响, 每炉钢液温度体现为“低-高-低”规律, 板坯流次少, 通钢量大, 与多流小方坯中间包存在较大的区别; 潘学峰等^[4]建立数模研究

了开浇、正常浇注、更换钢包、停浇等阶段单流中间包耐材与钢液温度变化规律, 分析了温度变化影响因素与减少温降措施, 没有涉及流次差异; 彭政等^[5]对五流中间包加挡墙前后流场与温度场进行数值模拟, 从各流温度差异分析结构调整的合理性, 缺乏实测数据的检验。为了澄清八机八流整体窄长中间包耐材烘烤与蓄热、钢液离站温度等对中间包钢液温度均匀性的影响, 本文从中间包烘烤到浇注前三炉, 对中间包系统进行传热数值模拟, 结合中间包钢液温度实测数据, 分析各流温度差异, 表明当前中间包内钢液均匀性良好, 为窄长中间包低温恒过热度浇注提供参考。

1 中间包系统传热数值模型

八机八流200 mm × 200 mm小方坯连铸机整体

中间包窄长,结构优化后,长水口冲击区具有稳流器与 V 型挡墙,浇钢区两侧各有 1 个矮坝。传热计算先后分别计算中间包烘烤过程、稳态下中间包流场,之后中间包流场和温度场耦合,在稳态计算的基础上,实现中间包烘烤→浇次第 1 炉→第 2 炉→第 3 炉的瞬态计算。

1.1 基本假设

(1) 不考虑中间包内表面波动及表面渣对流动的影响。

(2) 钢液流动为不可压缩性稳态流动液体由纯液相的初始速度来驱动。

(3) 钢液运动属于高雷诺数的紊流流动可采用 κ - ε 双方程对紊流进行描述。

(4) 由于中间包侧壁及底面各位置上包衬的厚度远小于其长和宽,可将包衬的传热视为一维多层壁传导传热,并假定在传热过程中:各层耐火材料及其与钢壳之间紧密接触其接触热阻可以忽略;工作层厚度均匀可忽略对包内衬工作层的侵蚀。

1.2 控制方程

描述钢液三维湍流流动的方程包括连续性方程、动量方程、湍流模型采用标准 κ - ε 模型:

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho\mu_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; μ_i 为速度分量, m/s ; x_i 为方向分量。

(2) 动量方程(N-S 方程):

$$\rho \frac{\partial \mu_i \mu_j}{\partial x_j} = \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 \mu_i}{\partial x_j^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中: P 为压力, Pa ; g_i 为重力加速度, m/s^2 ; F_i 为热浮力, N ; μ_{eff} 为有效粘度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(3) 标准 κ - ε 方程:

中间包内钢液流动均为湍流流动,最常用的湍流模型为标准 κ - ε 模型,其方程包括:湍动能(κ)方程:

$$\rho v_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{\text{eff}} \partial \kappa}{\sigma_k \partial x_i} \right) + \mu_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散率(ε)方程:

$$\rho v_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}} \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial x_j} \right) + C_1 \mu_i \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \frac{\varepsilon}{k} \rho \varepsilon \quad (4)$$

式中: μ_i 为湍流粘度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; v 为速度, m/s ; C_1 、 C_2 为经验常数^[5], C_1 取 1.44, C_2 取 1.92; σ_ε 为 ε 方程的普朗特数。

1.3 边界条件

(1) 入口边界: 根据质量守恒原理可由中间包的通钢量确定入口速度。

(2) 在自由表面上各个物理量的法向微商为零、法向速度为零。

(3) 出口设为压力出口,出口速度由总的质量平衡式求出。

(4) 壁面固体界面按标准壁面函数对流动为无滑移壁面。

(5) 包衬内壁: 按第一类边界条件处理给定内衬与钢液接触面的温度。

(6) 中间包外壁: 钢壳以对流和辐射的复合传热方式向外传热,主要为热辐射。

(7) 中间包渣层散热: 正常浇注过程中中间包钢液表面覆盖有保护渣和炭化稻壳对钢液实施保护。

边界传热条件采用 Chakraborty 和 Sahai 的推荐值^[6-8],即中间包纵向包壁、横向包壁、底面及表面渣层的热损失分别为 3.2、3.8、1.4、15 $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

1.4 模型主要参数

模型计算主要中间包介质参数见表 1,模型及网格划分见图 1。利用商业软件 ANSYS 建立三维立体几何模型,网格六面体结构,网格尺寸 20 mm,收敛条件为残差 $\leq 10^{-3}$ 。

2 计算结果与分析

计算条件: 烘烤温度 1 000 $^{\circ}\text{C}$,烘烤时间 3.5 h; 浇注过程考虑炉次变化,钢种第 1 炉钢液温度 1 510 $^{\circ}\text{C}$,浇注 60 min,第 2、3 炉钢液温度 1 495 $^{\circ}\text{C}$,

表 1 中间包内衬等参数

Table 1 Parameters of tundish lining etc

介质	厚度/mm	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比热容/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	导热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	粘度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$
钢壳	10	7 801	473	28.9	-
绝热层	4	1 200	816.4	0.261	-
永久层	150	2 800	1 000	2.7	-
工作层	50	1 900	1 260	0.9	-
钢液	-	7 000	680	26	0.006 2

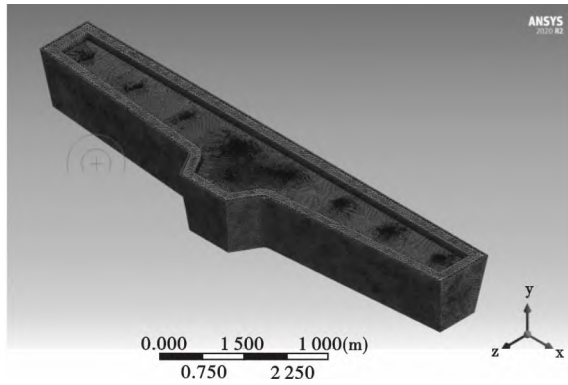


图1 中间包模型及网格划分
Fig. 1 Model and grids design of tundish

浇注 60 min, 浇注过程钢包钢液温降 0.3 °C/min。温度场计算从烤包开始计算时间, 中间包第 1 炉钢液注入考虑为钢液瞬间到 300 mm 深度(中间包开浇高度), 然后长水口满开度注入钢液到正常液位; 连浇换包考虑为无间隙注入, 中间包液面无变化。烤包过程(0~210 min)、浇钢第 1 炉(210~270 min)、第 2 炉(270~330 min)、第 3 炉(330~390 min), 浇钢过程包衬与外壁温度计算结果见图 2。第 1 炉开浇(215 min)、第 2 炉开浇(270 min)、第 3 炉开浇(330 min), 浇钢过程钢液温度计算结果见图 3。

2.1 中间包包衬与钢液过程温度变化

2.1.1 烘烤与浇注过程包衬与包壳温度变化

图 2(a、b、c) 分别是烤包 10、60、210 min(烤包完毕)的包壁温度分布, 图 2(d、e、f) 分别是 270 min(第 1 炉浇完)、330 min(第 2 炉浇完)、390 min(第 3 炉浇完)包壁温度分布, 可以看出, 烘烤阶段(0~210 min)中间包内壁温度保持稳定; 中间包外壁温度逐渐升高, 但升温幅度较小, 烘烤 3.5 h 仅升温 26.3 °C。中间包加钢液后(210~450 min)中间包内壁温度迅速增加并与钢液温度保持一致, 中间包外壁温度增速加快, 210~270 min 温度增加 25.1 °C, 270~330 min 温度增加 36.8 °C, 330~390 min 增加 35.3 °C, 外壁温度最低 140 °C, 永久层水口周围温度达到 400 °C 左右。

利用耐材、包壳的散热能力与包壁辐射散热的平衡, 各自传热公式如下:

耐材传热密度:

$$q = K \cdot (T_l - T_s) / h \tag{5}$$

式中: K -包壁耐材综合传热系数, $w/(m \cdot k)$; T_l 、 T_s -中间包内、外壁温度, h -中间包包衬厚度, mm 。

中间包外壁辐射散热:

$$E = \varepsilon \cdot E_b \cdot T_s^4 \tag{6}$$

式中: ε -黑度, 取 0.8; E_b -斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} (w \cdot m^{-2} \cdot k^4)$; T_s -中间包表面绝对温度, K 。

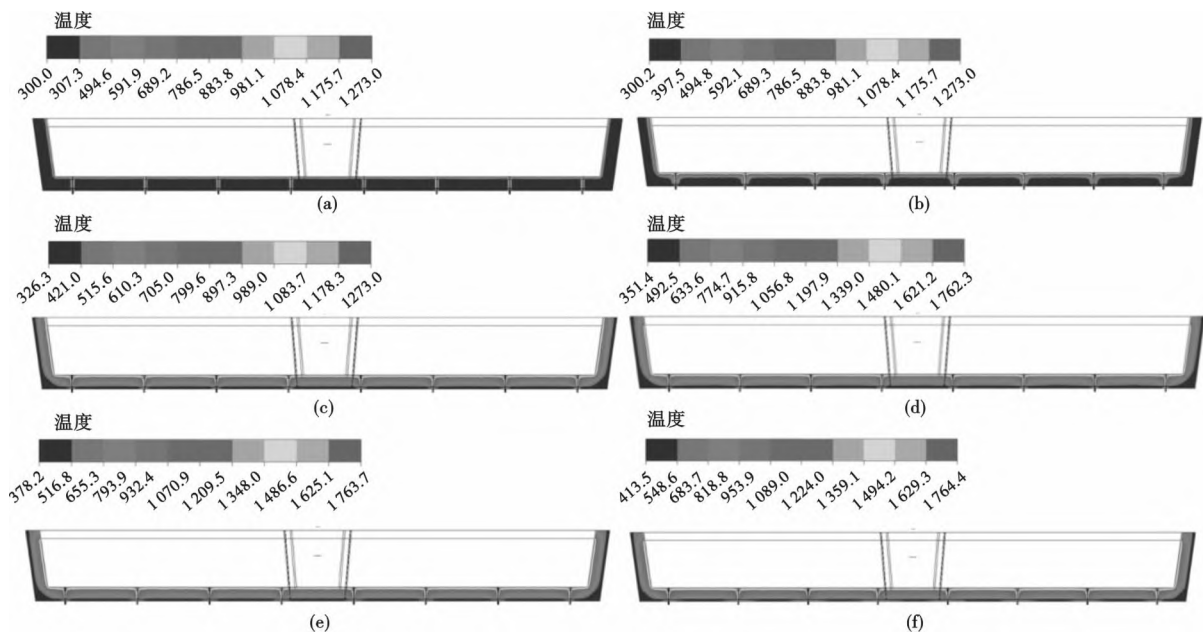


图 2 烘烤(a)(b)(c)与浇钢(d)(e)(f)过程中间包耐火材料与外壁温度分布: (a) 10 min, (b) 60 min, (c) 210 min, (d) 270 min, (e) 330 min, (f) 390 min

Fig. 2 Temperature distribution of tundish refractory material and outer plate wall during roasting (a) (b) (c) and casting (d) (e) (f) process: (a) 10 min, (b) 60 min, (c) 210 min, (d) 270 min, (e) 330 min, (f) 390 min

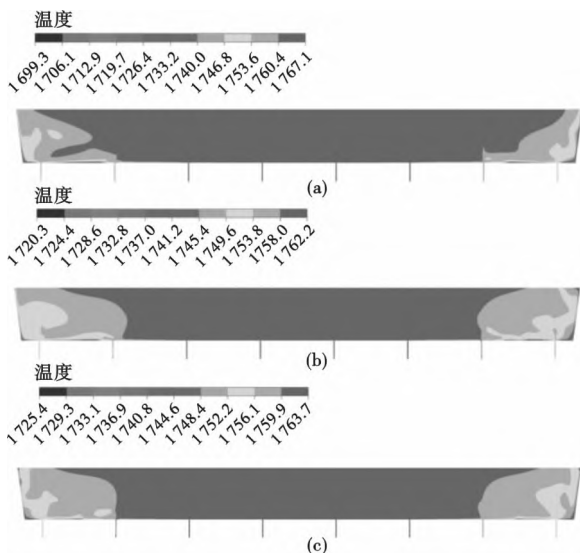


图 3 浇钢过程中间包内钢液温度分布: (a) 215 min, (b) 270 min, (c) 330 min

Fig. 3 Temperature distribution of liquid steel in tundish during casting process: (a) 215 min, (b) 270 min, (c) 330 min

计算包壁平衡温度为 397 ℃, 对照模拟计算, 第 3 炉中间包底水口附近温度接近平衡温度。

2.1.2 浇注过程中间包钢液温度变化

图 3 中 (a、b、c) 分别为中间包加热后 215、270、330 min 即第 1 炉中间包注满、第 1 炉、第 2 炉浇完时钢液温度场分布, 可以看出: 第 1 炉 (215 ~ 270 min) 钢液注入中间包后到两侧时温度降低较大, 中部和两侧温度相差 66.8 ℃, 随后两侧温度逐步升高, 至浇注结束 (270 min) 两侧温度升至 1447.2 ℃, 同时中部温度略微降低, 降至 1489.2 ℃, 中部和两侧温度相差 42 ℃; 第 2 炉 (270 ~ 330 min), 随着钢液的注入, 两侧温度呈现先增加后降低的趋势, 浇注结束时中部和两侧温度相差 38.3 ℃, 较第 1 炉所有降低; 两侧最低温度 1452.4 ℃, 比第 1 炉浇注结束温度高 5.2 ℃, 中间包中部温度较第 1 炉高 1.5 ℃。表明第 2 炉时中间包钢液温度基本趋于稳定。

2.2 烤包温度对中间包钢液温度均匀性影响

为了促进钢包开浇后中间包内钢液温度尽快稳定, 中间包包壁烘烤与保温状况非常关键。在中间包烘烤内壁温度分别为 900、1000 ℃, 第 1 炉钢液温度 1510 ℃、浇注时间 60 min, 第 2、3 炉 1495 ℃、浇注时间 50 min 的计算条件下, 由于对称性, 跟踪从边部到中间四个浸入水口 (依次为出口 1 ~ 出口 4) 钢液温度变化, 示于图 4 (a、b) 中。

从图 4 可以看出: (1) 两种烘烤温度下出口温

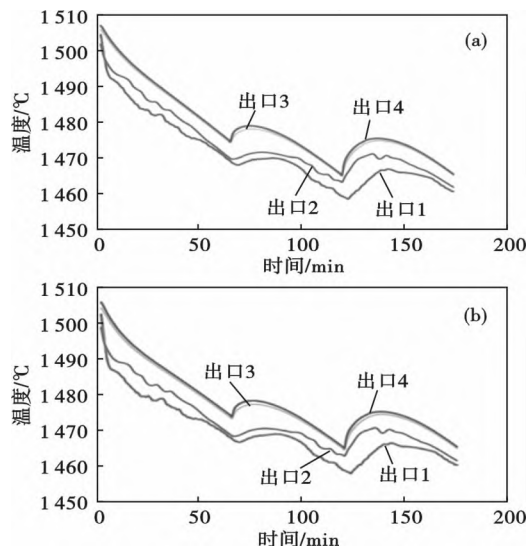


图 4 中间包烘烤温度对不同位置水口的钢液温度的影响: (a) 1000 ℃, (b) 900 ℃

Fig. 4 Affection of tundish roasting temperature on steel temperature at different position of nozzle: (a) 1000 ℃, (b) 900 ℃

度变化趋势基本相同, 出口 1、2 温度波动较大, 出口 3、4 温度接近, 第 1 炉浇注结束时出口 1、4 温差 6.6 ℃; 第 3 炉浇注终了温度与第 2 炉浇注终了温度基本相当, 可以认为第 2 炉已经基本达到热平衡; (2) 烘烤 900 ℃ 情况下, 第 3 炉浇完出口 1 和 4 的温度分别为: 1460、1465.2 ℃, 相差 5.2 ℃; (3) 烘烤 1000 ℃ 时, 第 3 炉浇完出口 1 和 4 的温度分别为 1460.8、1465.6 ℃, 相差 4.8 ℃; (4) 从上面数据可以看出, 烘烤温度提高, 出口温度均略微提高, 同时出口 1 和 4 的温差略微减少。

3 中间包温度实际控制效果

为了解窄长中间包钢液温度的均匀稳定性控制情况, 同时验证模型计算结果, 在实际生产中进行中间包温度检测。中间包容量 40 t, 通过采取中间包烘烤温度 ≥ 1050 ℃、中间包两侧烘烤温度均匀、缩短中间包停止烘烤到钢包开浇时间 ≤ 8 min、边流先开浇、碱性覆盖渣加碳化稻壳双层渣等措施, 有效降低并稳定了中间包过热度。

浇注 200 mm × 200 mm 方坯, 钢种 20CrMnTiH, 第 1 炉精炼离站温度 1610 ℃, 拉速 1.1 m/min; 第 2 炉精炼离站温度 1573 ℃, 拉速 1.2 m/min。采用手持热电偶从包盖加渣孔插入钢液进行测温, 对第 1、2 炉中间包钢液进行测温 (见表 2), 第 1 炉中部 (3/4 流间)、窄侧 (1/2 流间) 温度相差 2 ℃; 第 2 炉中部 (3/4 流间)、窄侧 (1/2 流间) 温度相差 4 ℃, 3/4

表2 40 t 中间包不同位置 20CrMnTiH 钢液温度
Table 2 Liquid temperature of 20CrMnTiH steel at different position in 40 t tundish

炉次	开浇时间	离站温度/℃	测量时间	测量位置	实测温度/℃	1/2 与 3/4 流间温度/℃
1	13:10	1610	13:35	1/2 流间	1553	2
				3/4 流间	1555	
2	14:07	1537	14:26	1/2 流间	1553	4
				3/4 流间	1537	
				5/6 流间	1536	

流、5/6 流之间温度相差 1℃,说明中间包内钢液温度均匀,第2炉温度场模拟计算结果显示热电偶测试位置温差为 4℃,见图 3(b、c),温度实测结果与模拟计算结果趋势一致。

4 结论

(1) 中间包包衬烘烤阶段升温缓慢,开浇后中间包包衬温度随钢液注入而升高较快,第3炉结束时外壁温度 397℃,趋于平稳。

(2) 第1炉开浇后,中间包钢液角部温度迅速降低,随后窄边温度逐步升高,中间包内钢液均匀性逐渐提高,第1炉结束时中部和窄边温差 42℃;第2炉浇注结束时中部和窄边温差 38.2℃,窄边温度比第1炉窄边高 5.2℃,中间包中部温度较第1炉中部高 1.5℃。

(3) 中间包耐材蓄热在第3炉接近平衡,而中间包内钢液在第2炉末期温度基本趋于稳定,模拟计算边流与中心流温差 4.8℃,边流间(1/2 流间)

与中部流(3/4 流间)间温度实测相差 4℃,计算与实测趋势一致。

(4) 烤包温度提高时,第1炉中间包钢液温降减慢,水口出钢温度略增,各流间温差减少。

参考文献

- [1] 包燕平,王敏. 中间包冶金技术发展趋势[J]. 连铸,2021,10(5):2-11.
- [2] 吕明,米小雨,张朝晖,等. 连铸工艺参数对 SWRH82B 高碳钢碳偏析的影响[J]. 过程科学学报,2020,42(z1):102-108.
- [3] 职建军. 宝钢连铸中间包热状态测试与分析[J]. 上海金属,2001,23(4):38-39.
- [4] 潘学峰,周海斌,朱苗勇. 连铸中间包内钢液温度变化规律的研究[J]. 中国冶金,2007,17(10):45-49.
- [5] 彭政,温良英,杨中平,等. 中间包传热边界对钢液流动及传热计算的影响[J]. 连铸,2012(6):13-18.
- [6] 钟良才,王明安,周小宾,等. 5 流连铸中间包流场温度场数学模拟[J]. 过程工程学报,2011,11(1):26-29.
- [7] 朱苗勇. 连铸中间包内钢液流动与传热耦合过程的计算机模拟[J]. 金属学报,1997,33(9):933-938.
- [8] 胡锐,陈登福,靳星. 小方坯连铸中间包流场温度场的数值模拟研究[J]. 甘肃冶金,2009,31(2):1-4.