

炼钢-连铸过程 300 t 钢包热状态测试研究

吴晓东¹, 周 丹¹, 郑建忠²

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 宝山钢铁集团公司 炼钢部, 上海 201900)

摘 要: 对宝山钢铁集团公司炼钢厂炼钢-精炼-连铸过程钢包的热状态进行了测试, 研究了钢包在各个周转阶段的包衬温度分布及其变化规律。测试结果表明, 在钢包的第 1 和第 2 个周转过程包衬吸热和蓄热明显, 该阶段应考虑钢水温降的热补偿。在钢包的第 3 和第 4 个周转过程中, 包衬各点的温度变化较平缓, 表明从第 4 个周转开始, 包衬的温度变化处于一种动态平衡的循环过程。

关键词: 钢包; 热状态; 测试

中图分类号: TF701 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-1043(2009)04-0049-05

Research on thermal status of 300 t ladle in the process of steel-making and continues casting

WU Xiao-dong¹, ZHOU Dan¹, ZHENG Jian-zhong²

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Department of Steel-making of Baosteel Group, Shanghai 201900, China)

Abstract: The thermal status of the ladle in the process of steel-making-refining-continues casting was tested and the distribution of the lining temperature and the law of the temperature variation in each and every turn-over phase of the ladle studied. The practical results show that the heat was obviously absorbed and stored in ladle lining in the first and second turn-over phases of the ladle and therefore the thermal compensation should be considered in those periods. However in the third and fourth phases of the ladle, the temperature in every points of the ladle lining changed smoothly. It shows that from the beginning of the 4th phase the change of the ladle lining was held in a recycling process of dynamic equilibrium.

Key words: Ladle; thermal status; test

钢铁生产流程是典型的高温冶金过程, 钢水温度的有效控制是保证生产顺行的关键之一^[1-2], 其中钢包内钢水温度控制的优劣是炼钢厂生产过程中一项重要的经济技术指标, 因此有必要了解影响钢水温度的各种因素。而钢包作为盛钢水的容器, 其热状态是影响钢水温度稳定的主要因素之一^[3-6]。不同的钢包状态会影响出钢温降、钢水在精炼工位时的升温及降温速率等。这些影响主要与包衬吸热和包内上方渣层散热行为有关, 因此为控制好钢水温度, 首先要弄清钢水在钢包内的传热行为。钢包内钢水温度控制的优劣可以用

钢包到达回转台钢水温度进行衡量, 只有全面掌握钢包的特性及其对钢水温度影响的规律, 才能对钢水温度进行准确的控制^[7-9]。基于上述原因, 对钢包周转过程的热状态进行跟踪测试是非常必要的。

1 钢包热状态测试实验

1.1 测试方案

为全面掌握钢包周转过程的热状态与温度的关系, 对整体浇铸钢包进行了跟踪测试。宝钢一炼钢厂整体浇铸钢包周转流程如图 1 所示。

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金(03KJB450022)

作者简介: 吴晓东(1969-), 男, 江苏大学材料科学与工程学院, 副教授, 博士, 从事炉外精炼及其工艺优化的研究。

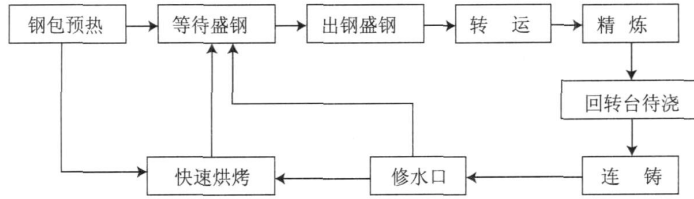


图 1 钢包周转流程图

根据钢包热周转的情况,制定如下测试方案:

- (1) 测定钢包运转过程中包衬耐材内部温度分布和包壳表面温度变化,全面了解钢包各周转阶段的热循环状态;
- (2) 测试各关键工序点的钢水温度值;
- (3) 测试运转钢包在各工序之间的运输时间。现场试验包括钢包周转过程各主要工序点,包括快速烘烤过程、出钢工序点、精炼工序点及连铸过程进行测试。主要选定以下测试点:(1)出钢前钢包台车;(2)出钢完毕,钢包台车开出;(3)精炼完毕,钢包台车开出;(4)钢包开始浇铸前;(5)浇铸过程。

1.2 热电偶布置

新包砌筑时,在钢包内衬埋入热电偶(如图 2 所示),通过补偿导线连接到固定于钢包滑动水口驱动机构处的快速接头上。热电偶尾部的接线头通过钢包侧壁中部的的气孔输出,钢包侧部的热电偶和钢包底部的热电偶在钢包内壁合并,输出的热电偶沿钢包中部圆环下部接到所需位置,同时采用石棉绳对热电偶在钢包外部的连接线进行保护。

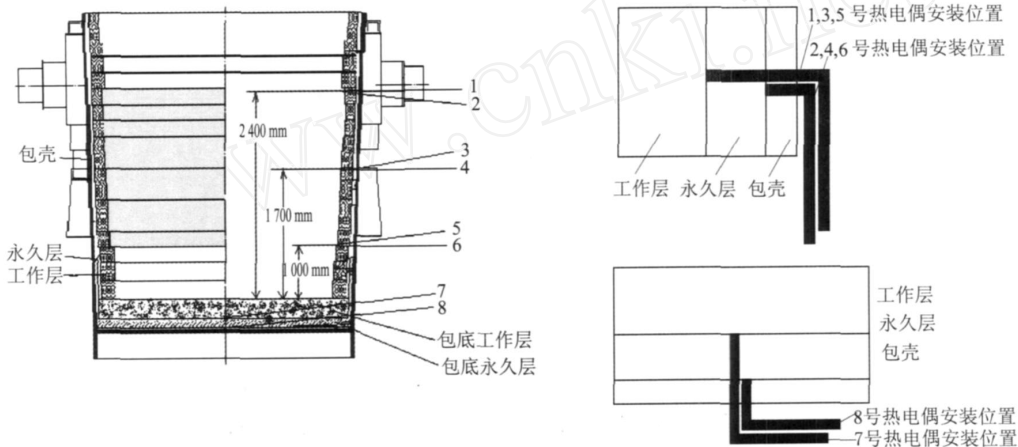


图 2 钢包热状态测试热电偶分布图

2 钢包热状态测试数据与分析

由于整体浇铸料钢包具有使用寿命长等优点,宝钢一炼钢厂在实际生产已使用了一部分整体浇注钢包,因此本文选择浇注料钢包(26号)作为研究对象,跟踪测试了该钢包的前4个周转周期。

2.1 钢包周转过程包衬热状态变化及其分析

钢包投入运转后,对钢包整个周转过程中包衬各点温度的变化情况进行了跟踪测试。该钢包前4个周转过程包衬温度变化情况如图3所示。

由图3可以很明显的看到,随着钢包周转次

数的增加,在每个周转过程中钢包温度的变化逐渐趋于平缓。在钢包的第1个周转过程中,从钢包盛钢开始一直到钢包浇铸结束的过程中,包衬各点处于不断的升温过程中,浇铸前期各点仍具有较大的升温速度,只是在浇铸后期各点升温速度下降;在钢包的第2个周转过程中,包衬各点的变化趋势与第一个周转过程相似,但可以看到整个浇铸过程中各点升温速度均呈下降趋势;同样,在钢包的第3和第4个周转过程中,包衬各点的温度变化更加平缓,而且在钢包的浇铸过程中,几乎看不出包衬各点温度的变化(图3中温度曲线上数据点比较密集的为浇铸过程)。这一测试结果说明,在新钢包投入周转后,从第3个周转过程

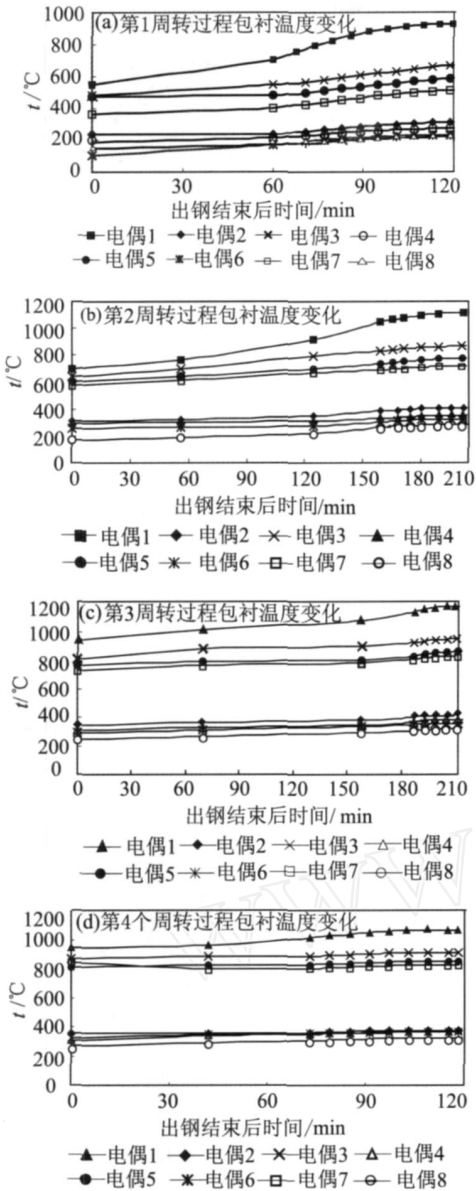


图 3 钢包前四个周转过程包衬各点温度变化

开始,钢包包衬的温度变化处于一种动态平衡的循环过程,而且随着钢包周转次数的增加,这种动

态平衡的循环过程将变得更为明显。

同时从图 3 中还可得知,钢包第 2 和第 3 个周转过程的浇铸阶段包衬温度明显高于第 1 和第 4 个周转过程浇铸阶段的温度。分析测试试验可知,钢包前 4 个周转过程所经过的工艺路线不同,其中第 1 个周转过程为转炉-RH-连铸,第 2 和第 3 个周转过程为转炉-RH-LF-连铸,第 4 个周转过程为转炉-CAS-连铸。由于第 2 和第 3 个周转过程经过的是双联的精炼处理,钢水在钢包内的停留时间也延长,钢包包衬被加热的时间也长,因此浇铸结束时钢包包衬的温度也相应较高。但同时通过与第 1 和第 4 个周转过程的对比可知,经过双联形式的精炼处理不会对钢包的下一个周转过程产生影响。

比较钢包 4 个周转过程钢包盛钢开始包衬温度的变化可知,第 1 个周转过程开始时包衬温度明显的低于以后的几个过程,第 2 个周转过程开始时,包衬温度有了较大的升高。这是由于在第 1 个周转过程中钢包包衬吸热和蓄热的结果,第 3 和第 4 个周转过程开始时,包衬温度比第 2 个周转过程开始时也有较大的升高,但比较第 3 和第 4 个周转过程开始时各点温度,可以认为它们处于同一水平。同样,对 4 个周转过程浇铸结束时钢包包衬温度进行比较可知,它们的规律与周转开始时相似。

2.2 钢包浇铸结束至出钢前快速烘烤或冷却阶段

浇铸结束后钢包需经过回转台等待、倒渣、运输、换水口、台车快速烘烤或冷却等一系列过程,该阶段的大部分时间(空包周转时间)钢包都处于散热状态,该阶段钢包包衬温度变化如表 1 所示。

表 1 26 号钢包浇铸结束至出钢前各阶段包衬温度变化

| 周转次数 | 阶段 | 包衬温度/ | | | | | | | |
|------|-------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 电偶 1 | 电偶 2 | 电偶 3 | 电偶 4 | 电偶 5 | 电偶 6 | 电偶 7 | 电偶 8 |
| 1 | 快速烘烤开始 | 548.7 | 236.3 | 492.2 | 191.8 | 477.5 | 101.4 | 152.4 | 352.2 |
| | 出钢前(距前者 10 min) | 551.9 | 242.7 | 495.8 | 197.0 | 481.5 | 108.9 | 157.3 | 357.3 |
| | 浇铸结束(距前者 136 min) | 923.6 | 314.4 | 668.3 | 274.2 | 589.4 | 234.1 | 222.1 | 514.3 |
| 2 | 钢包冷却(距前者 120 min) | 726.3 | 325.4 | 661.9 | 297.2 | 618.9 | 252.3 | 191.1 | 588.4 |
| | 出钢前(距前者 36 min) | 698.3 | 309.6 | 641.5 | 296.2 | 603.4 | 252.6 | 170.2 | 580.3 |
| | 浇铸结束(距前者 160 min) | 1 114.7 | 404.7 | 870.2 | 351.4 | 776.5 | 323.1 | 282.7 | 719.8 |
| 3 | 钢包冷却(距前者 70 min) | 1 002.5 | 429.7 | 868.0 | 362.2 | 801.8 | 316.5 | 277.2 | 758.4 |
| | 出钢前(距前者 20 min) | 992.9 | 418.1 | 863.3 | 351.9 | 794.8 | 313.6 | 268.6 | 752.7 |
| | 浇铸结束(距前者 240 min) | 1 169.1 | 417.2 | 962.5 | 392.0 | 871.5 | 364.9 | 329.1 | 841.9 |
| 4 | 钢包快烘(距前者 80 min) | 935.7 | 352.6 | 868.2 | 306.9 | 806.9 | 301.9 | 274.2 | 828.5 |

从表 1 可知,在该阶段工作层各点温度随着时间的延长温度显著下降,而钢包永久层各点温度则随着时间的延长温度基本保持不变,而且温度可能会有所升高,说明工作层对外散热较明显,而永久层处于钢壳与工作层之间,对外散热效果不明显,同时还能不断的吸收工作层散发的热量,保持温度基本不变或温度继续升高。但是,钢包盛钢时钢水与工作层直接接触,如果工作层温度太低,必然显著影响钢水的温降。同时从表 1 中还可知,浇铸结束时工作层温度越高,空包周转时间越长,其温降也越大。特别是钢包上部工作层温降速度能达到 $1.6 \sim 2.9 \text{ } / \text{min}$,而钢包中下部工作层温度的下降则不是很明显,这与空包主要是通过辐射进行散热的机理是相吻合的。

从钢包周转过程看,钢包的第 2 和第 3 个周转过程由于时间关系没有进行快速烘烤,因此钢包浇毕后一直处于空冷状态。分析测试数据可知,空包等待时间每增加 1 min,包衬钢壳内各点温度大约下降 $0.48 \text{ } / \text{min}$,上部包口永久层温度就会下降 $0.65 \text{ } / \text{min}$,下部永久层温降就会增加 $0.25 \text{ } / \text{min}$,

因此减少空包等待时间,增加快速烘烤时间,对减少钢包包衬的温降是实际可行且有效的。

2.3 出钢结束至精炼结束阶段

转炉出钢结束后钢水进入钢包,由于钢水温度相对包衬具有较高的温度梯度,钢水的热量必然会通过钢包包衬和包口向外传递。通过上面的分析可知,出钢前的空包阶段包衬温度不断下降,而且与钢水温度之间的温度梯度也是最高的,因此该阶段包衬温度上升速度也较快。对普通钢种而言,钢包周转路径一般为转炉-精炼-连铸。但是由于宝钢冶炼的部分钢种对质量的要求较高,需经过更为严格的精炼处理,如 RH-LF、RH-LF-RH、RH-KIP-LF 等处理路径,精炼处理时间的延长,钢水散热量也必然增加,而包衬温度也会有相应的变化。在钢包实测过程中,第 1 个周转过程为转炉-RH-连铸,第 2 和第 3 个周转过程为转炉-RH-LF-连铸,第 4 个周转过程为转炉-CAS-连铸。各周转过程在该阶段包衬各点的升温幅度及温升速率如表 2 所示。

从表 2 可知,在钢包的前两个周转过程中,包

表 2 出钢结束至精炼结束阶段包衬各点温升和温升速率

| 周转次数 | 处理路径 | 各电偶处升温幅度/ $^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | 各电偶处升温速率/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1})$ | | | | | | | |
|------|------------------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|--|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 出钢结束-RH 精炼结束 | 156.3 | 3.1 | 64.9 | 27.6 | 65.5 | 3.3 | 20.0 | 43.4 | 2.6 | 0.05 | 1.08 | 0.46 | 1.09 | 0.06 | 0.33 | 0.72 |
| 2 | 出钢结束-RH 精炼结束 | 72.3 | 15.1 | 56.3 | 6.2 | 37.3 | 15.0 | 22.6 | 33.9 | 1.29 | 0.27 | 1.01 | 0.11 | 0.67 | 0.27 | 0.40 | 0.61 |
| | RH 结束-LF 精炼结束 | 147.4 | 29.5 | 99.5 | 10.2 | 59.9 | 11.0 | 25.2 | 56.6 | 2.17 | 0.43 | 1.46 | 0.15 | 0.88 | 0.16 | 0.37 | 0.83 |
| 3 | 出钢结束-RH 精炼结束 | 78.3 | 12.4 | 67.9 | 15.5 | 25.4 | 19.9 | 12.1 | 32.0 | 1.12 | 0.18 | 0.97 | 0.22 | 0.36 | 0.28 | 0.17 | 0.46 |
| | RH 结束-LF 精炼结束 | 58.5 | 20.9 | 17.2 | 18.9 | 8.0 | 25.2 | 30.0 | 21.2 | 0.98 | 0.35 | 0.29 | 0.32 | 0.13 | 0.42 | 0.50 | 0.35 |
| 4 | 出钢结束-CAS 精炼结束 | 14.2 | 12.0 | 13.1 | 26.7 | 10.0 | 28.9 | 24.1 | 6.1 | 0.44 | 0.38 | 0.41 | 0.83 | 0.31 | 0.90 | 0.75 | 0.19 |

衬各点的温度变化比较显著,表明前两个周转过程由于包衬温度低,其吸热和蓄热比较显著。如钢包在第 1 个周转过程经过 RH 精炼时上工作层与上永久层间升温速率为 $2.6 \text{ } / \text{min}$,在第 2 个周转过程,钢包经过 RH 和 LF 双联精炼时上工作层与上永久层间升温速率分别为 $1.29 \text{ } / \text{min}$ 和 $2.17 \text{ } / \text{min}$ 。而在钢包的第 3 个和第 4 个周转过程中,包衬各点的温度变化就比较平缓了,如第 3 个周转过程,钢包经过 RH 和 LF 双联精炼

时上工作层与上永久层间升温速率分别为 $1.12 \text{ } / \text{min}$ 和 $0.98 \text{ } / \text{min}$,在第 4 个周转过程中,钢包经过 CAS 精炼时上工作层与上永久层间升温速率为 $0.44 \text{ } / \text{min}$,说明在经过前 3 个周转过程以后,精炼过程中包衬温度的变化与采取何种精炼方式已无太大关联,包衬在该阶段的升温幅度仅与钢水温度和钢包在该阶段的处理时间有关。

2.4 钢包浇铸阶段

在整个浇铸过程中钢包包衬温度的升幅不大

(如表3所示),其中第1个周转钢包上部包衬升温速率大于其他几个周转,说明钢包包衬的蓄热主要在第1个周转中完成,此时需要考虑的温度补偿较大。在钢包第2个周转过程中,上部包衬升温速率比第1周转有所减缓,但是仍然高于后两个周转过程,表明包衬吸热和蓄热还没有达到平衡,仍需要考虑热补偿。由表3可知,在第3和

第4个周转过程中,包衬各点的升温速率基本相近,说明在后两个周转过程中包衬达到动态平衡状态的过程是相似的。同时与表1和表2进行对比可知,该阶段的升温速率与出钢结束至精炼结束阶段相比也小,说明钢包包衬蓄热主要集中在出钢结束至精炼结束阶段。

表3 钢包浇铸阶段包衬各点温度变化

| 周转次数 | 阶段 | 包衬温度/ | | | | | | | |
|------|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 电偶1 | 电偶2 | 电偶3 | 电偶4 | 电偶5 | 电偶6 | 电偶7 | 电偶8 |
| 1 | 浇铸开始 | 756.6 | 249.4 | 552.6 | 222.1 | 490.6 | 179.2 | 176.1 | 419.9 |
| | 浇铸结束 | 923.6 | 314.4 | 668.3 | 274.2 | 589.4 | 234.1 | 222.1 | 514.3 |
| 2 | 浇铸开始 | 1 052.1 | 383.4 | 834.8 | 327.5 | 737.4 | 299.2 | 264.7 | 691.8 |
| | 浇铸结束 | 1 114.7 | 404.7 | 870.2 | 351.4 | 776.5 | 323.1 | 282.7 | 719.8 |
| 3 | 浇铸开始 | 1 142.9 | 398.8 | 930.3 | 365.5 | 835.0 | 353.1 | 308.1 | 812.9 |
| | 浇铸结束 | 1 169.1 | 417.2 | 962.5 | 392.0 | 871.5 | 364.9 | 329.1 | 841.9 |
| 4 | 浇铸开始 | 1 018.9 | 363.0 | 892.6 | 348.4 | 834.4 | 360.8 | 305.8 | 806.0 |
| | 浇铸结束 | 1 051.5 | 380.3 | 920.8 | 373.1 | 855.9 | 366.0 | 326.2 | 832.0 |

3 结 论

(1)在钢包的第1和第2周转过程包衬吸热和蓄热明显,包衬温度有了较大的升高,为了使钢水到达回转台达到预定目标温度范围,这个阶段应考虑钢水温降的热补偿,目前温度补偿建议已被宝钢炼钢厂采用。在钢包的第3和第4个周转过程中,包衬各点的温度变化较平缓,而且在钢包的浇铸过程中包衬各点温度基本不变。说明在新钢包投入周转后,从第3个周转过程开始,钢包包衬的温度变化处于一种动态平衡的循环过程。

(2)钢包浇铸结束至出钢前快速烘烤或冷却阶段,工作层各点温度随着时间的延长温度显著下降,而钢包永久层各点温度则随着时间的延长温度基本保持不变,而且温度可能会有所升高。浇铸结束时工作层温度越高,空包周转时间越长,其温降也越大,特别是钢包上部工作层温降速度能达到 $1.6 \sim 2.9 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$,而钢包中下部工作层温度的下降则不是很明显。

(3)在经过前3个周转过程以后,包衬温度的变化与采取何种精炼方式无关,包衬在该阶段的

升温幅度仅与钢包在该阶段的处理时间有关;而且钢包在整个周转过程中,包衬蓄热主要集中在出钢结束至精炼结束阶段。

[参考文献]

- [1] 李里,周瑞和,薛念福,等.攀钢连铸钢包热循环的现状与分析[J].钢铁钒钛,2002,23(1):6-11.
- [2] 洪军,李小虎,李艳爽.高效连铸钢包周转的动态管理模式[J].钢铁研究,2001,120(3):22-26.
- [3] 刘晓,顾文斌,王洪兵,等.钢包的热分析[J].宝钢技术,1998(3):13-17.
- [4] 职建军,郑贻裕,崔健,等.宝钢连铸中间包热状态测试与分析[J].炼钢,2001,17(4):60-62.
- [5] 李晶,傅杰,周德光,等.60t钢包的传热分析[J].特殊钢,2001,22(4):16-18.
- [6] 职建军,郑贻裕,崔健,等.宝钢连铸中间包热状态测试与分析[J].钢铁,2002,37(1):26-27.
- [7] 卢翔宇,杨吉春,王宏明.钢包热行为数学模型研究[J].包头钢铁学院学报,2000,19(2):124-127.
- [8] 李里.钢包热循环过程热状态的数学模拟[D].重庆:重庆大学,2001.
- [9] 李顶宜,王永然.连铸用钢水温度传热物理数学模型[J].钢铁,1996,31(11):17-21.

(修回日期:2008-08-05)

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告