生产实践

鞍钢100 t钢包保温性能研究

郭庆涛[1],王鹏[2],孙振宇[2],唐雪峰[3],柴明亮[3],潘栋[1]
(1.鞍钢集团北京研究院有限公司,北京 112200;
2.鞍钢股份有限公司炼钢总厂,辽宁 鞍山 114021;
3.鞍钢集团钢铁研究院,辽宁 鞍山 114009)

摘要:通过数值仿真与实验研究相结合,并统计生产现场的数据,研究了钢包盖、绝热毡等对100 t钢包钢水温度的影响。仿真结果显示,带盖钢包钢水出钢30 min后中心温降比不带盖钢包钢水的少17.9 ℃,生产统计结果显示钢包出钢后21~30 min,带盖钢包钢水的平均温降比不带盖的减少约16.52 ℃,钢包盖保温效果明显。研究结果显示绝热毡厚度越大保温效果越好,出钢72.32 min时,绝热毡厚度15.00 mm的钢水温度比无绝热毡的钢水温度高8.77 ℃,可创效1.26元/t。

关键词:钢水温度;钢包盖;绝热毡;传热
中图分类号:TF769 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-4613(2026)05-0053-07
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.05.009

Study on Thermal Insulation Performance of 100 t Ladle

GUO Qingtao[1], WANG Peng[2], SUN Zhenyu[2], TANG Xuefeng[3], CHAI Mingliang[3], PAN Dong[1]
(1. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 112200, China;
2. General Steelmaking Plant of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China;
3. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: By combining numerical simulation with experimental research and statistical datas from production sites, the effects of the ladle lid and thermal insulation blanket on the molten steel temperature in a 100 t ladle was investigated. Simulation results showed that, after 30 minutes of tapping, the central temperature drop of molten steel in a ladle with a lid was 17.9 ℃ lower than that without a lid. Production statistics indicated that, within 21~30 minutes after tapping, the average temperature drop of molten steel in a ladle with a lid was reduced by approximately 16.52 ℃ compared to one without a lid, which demonstrated significant thermal insulation performance of the ladle lid. The results also revealed that a greater thickness of the thermal insulation blanket led to better heat preservation. At 72.32 minutes after tapping, the molten steel temperature with a 15.00 mm thickness thermal insulation blanket was 8.77 ℃ higher than that without any blanket, yielding a cost benefit of 1.26 yuan per ton.

Key words: molten steel temperature; ladle lid; thermal insulation blanket; heat transfer

钢水从转炉出钢到精炼处理结束,经历的运输和处理过程时间长、工序多、温降大,钢水温度降低直接影响到精炼处理、连铸工艺等生产流程的管理以及钢包寿命等[1-4]。而钢包作为储存、转运钢水的重要设备,在储存、转运钢水的过程中起到保温作

郭庆涛,博士,高级工程师,2007年毕业于大连理工大学材料科学与工程专业。E-mail: qtguo_china@sina.com

用，其保温性能直接影响钢水温降。因此，分析和研究钢包材料的保温性能，对提高钢包隔热保温，降低出钢温度具有重要作用。

诸多专家学者开展了钢包结构对其保温性能影响的研究工作。何平等[5]进行了钢包温降规律与全程加盖保温节能技术研究，基于现场数据分析认为，生产过程中的敞口钢包散热很大，不利于节能降耗，通过钢包全程扣盖保温系统的应用，取得了出钢前包衬温度提高300 ℃以上，转炉出钢温度降低16.2 ℃的效果。孙晓婷等[6-7]为优化钢包耐火材料，利用ANSYS对钢包壁耐火材料温度分布进行计算，优化设计了钢包的工作衬与永久衬所用耐火材料，结果表明，耐火材料导热率越低，钢包罐表温度降低速度越快，通过降低耐材的导热系数，可以实现钢包热损失减少、包壁减薄、增加钢水容量，达到节能减排的目的[8]。张利民等[9-10]进行了钢包保温层优化与应用研究，钢包保温层使用新型气凝胶绝热板后，在一个使用周期内减少钢水温降9.88 ℃。敬业钢铁[11]采用钢包纳米绝热板、钢包覆盖剂，同时应用钢包加盖保温技术，比普通罐表温降少26 ℃左右。河钢集团[12]通过采用高强保温绝热板、优化炼钢生产节奏等措施，钢包全流程的钢水平均温降约为94.6 ℃，比上一年同期降低1.9 ℃。

上述研究多采用单一手段开展钢包保温性能的研究，很容易导致数据误差无法有效修正，影响研究精度和参数优化后的迭代效率。因此，需要采用实验-仿真耦合手段来开展研究。本文统计分析了鞍钢股份有限公司炼钢总厂（以下简称“炼钢总厂”）钢包不带盖和带盖条件下钢水温度随时间的变化，同时将数值仿真与现场测量结果相结合，分析了钢包盖、绝热毡等对钢水温度的影响，为提高钢水温度稳定性、减少能源消耗提供技术参考。

1 研究方法

采用ANSYS数值仿真软件，分析100 t钢包钢包盖、绝热毡等对钢水温度的影响，并将仿真结果与生产实际相对比，验证模型的准确性，进而为实际生产提供参考。100 t钢包数值仿真模型示意图见图1，数值仿真材料尺寸及导热系数见表1。

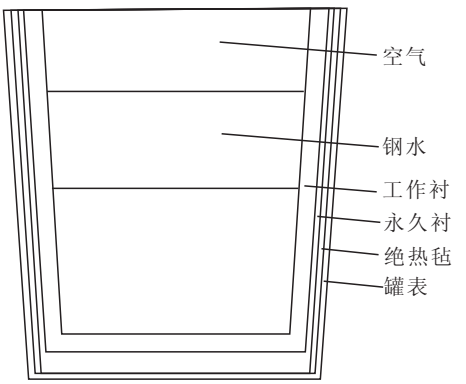


图1 100 t钢包数值仿真模型示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Numerical Simulation Model of the 100 t Ladle

表1 数值仿真材料尺寸及导热系数

Table 1 Material Dimensions and Thermal Conductivity Used in the Numerical Simulation

项目	顶部外径/mm	底部外径/mm	高度/mm	厚度/mm	导热系数/(W·m^{-1}·℃$^{-1}$)
罐表	1 745	1 500	3 850	24	41.87
绝热毡	1 721	1 476	3 826	3.75、7.50、15.00	0.348
永久衬	1 691	1 446	3 826	66	11
工作衬	1 625	1 356	3 626	210	22
钢水	1 415	1 206	3 400	—	648

2 研究结果及分析

2.1 钢包盖对钢包保温效果的影响

统计分析了现场3 926罐不带盖和9 948罐带盖钢包钢水平均温降随时间变化的情况，见表2。由表2看出，钢包搁置时间在11～20 min时，带盖钢包钢水平均温降数值比不带盖钢包低22.25 ℃。随着搁置时间的增加，两者的温降差逐渐减小，搁置时间大于60 min后，两者的平均温降差为10.22 ℃。

针对不带盖和带盖钢包罐内和罐表温度分布开展数值仿真分析。不带盖钢包出钢钢水温度为1 591.7 ℃，出钢后30 min的温度分布见图2。

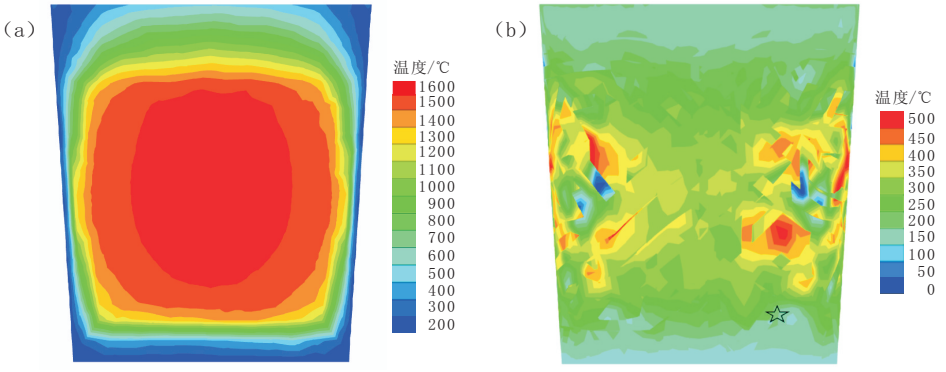
表2 不带盖和带盖钢包钢水温降随时间变化的情况

Table 2 Molten Steel Temperature Drop over Time for Ladles with and without Lids

时间/min	不带盖钢包钢水平均温降/℃	带盖钢包钢水平均温降/℃
0~10	53.25	30.92
11~20	57.94	35.69
21~30	63.96	47.44
31~40	70.00	57.70
41~50	76.96	66.65
51~60	82.87	73.34
61~200	90.82	80.60

由图2可以看出，出钢后30 min钢水中心温度为1 523.7 ℃，温降为68 ℃。统计生产过程中390罐不带盖钢包30 min的温降为65 ℃，与仿真结果相差约为4.4%。

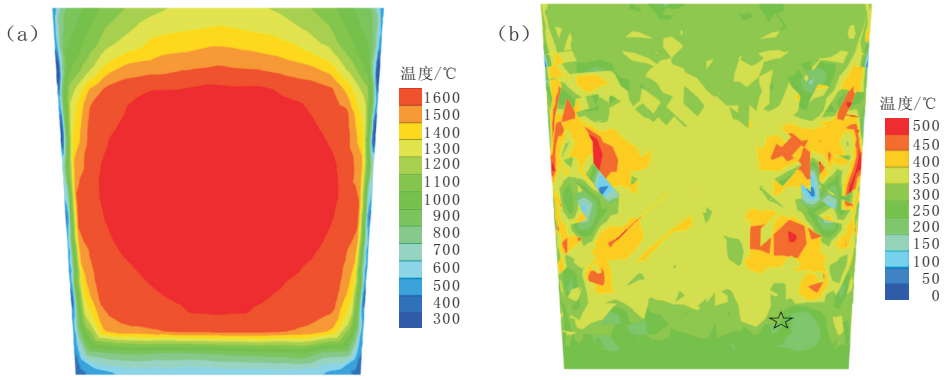
图3为带盖钢包出钢后30 min的温度分布，由图3看出中心钢水温度为1 541.6 ℃，经计算，比出钢时钢水温度低50.1 ℃。统计生产过程中138罐带盖钢包钢水30 min的温降为53 ℃，与仿真结果相差约为5.5%。罐表右下方标记位置比不带盖的高1.58 ℃，说明有钢包盖后，从钢包顶部的散热减少，相同时间(30 min)的钢水温度高，传递给罐表的热量也多，从而导致罐表温度有所升高。



(a) 钢包纵剖面；(b) 罐表(右下方标记位置温度为256.90 ℃)

图2 不带盖钢包出钢后30 min的温度分布

Fig. 2 Temperature Distribution of the Ladle without a Lid 30 Minutes after Tapping



(a) 钢包纵剖面；(b) 罐表(右下方标记位置温度为258.48 ℃)

图3 带盖钢包出钢后30 min的温度分布

Fig. 3 Temperature Distribution of the Ladle with a Lid 30 Minutes after Tapping

图4为生产过程中不带盖和带盖钢包钢水平均温降差随时间的变化拟合曲线，每个时间段取中间点。由图4可以看出，随着时间的延长，钢水的温降差逐渐减小，钢包盖的保温效果在短时间周期内更加明显。由于生产节奏不同，统计的不带盖钢包和带盖钢包转炉出钢到精炼位平均时间不一

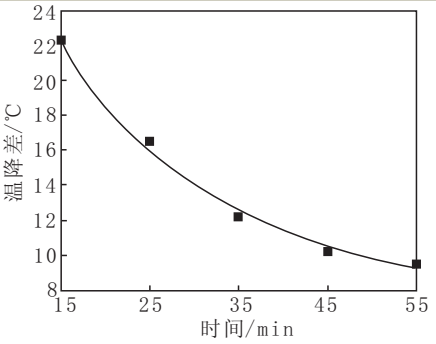


图 4　不带盖和带盖钢包钢水平均温降差随时间的变化拟合曲线

Fig. 4　Fitted Curve of the Average Molten Steel Temperature Drop Difference between Ladles with and without Lids over Time

样，不带盖钢包从转炉出钢到精炼位的平均时间约为 28.3 min，根据表 2 统计数据分析，平均温降为 65.8 ℃。带盖钢包从转炉出钢到精炼位的平均时间为 18.1 min，平均温降为 39.7 ℃。以不带盖钢包从转炉出钢到精炼位的平均时间 28.3 min 为参考，统计带盖钢包数量为 1 920 罐，平均温降为 49.87 ℃，比不带盖钢包温降低 15.93 ℃。图 4 中的曲线可拟合为如下公式：

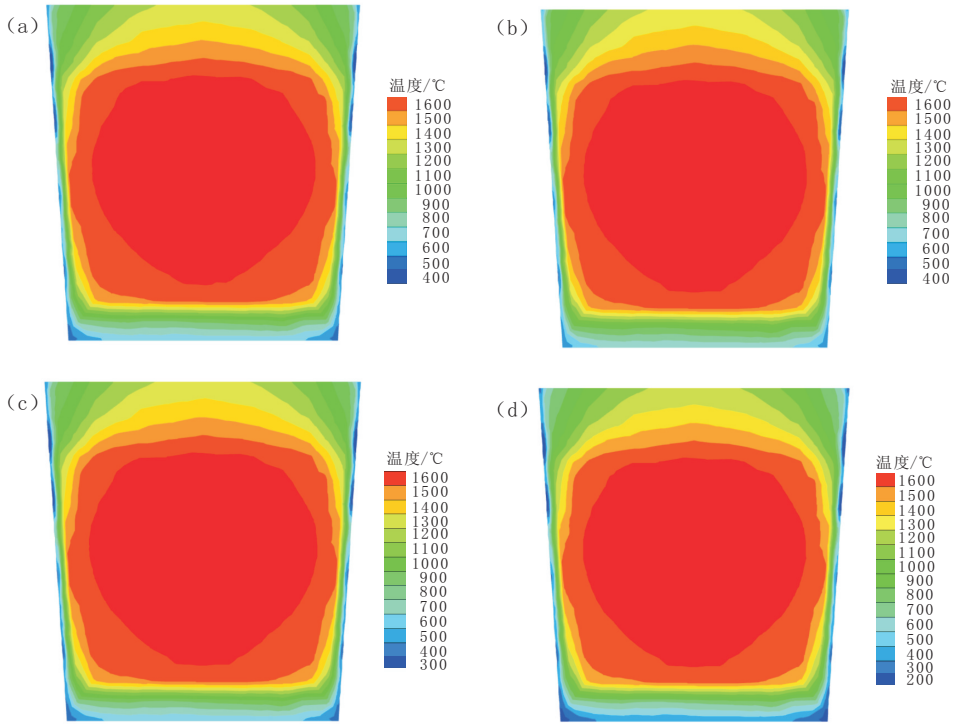
$$T=141.55t^{-0.679} \quad (1)$$

式中，T 为不带盖和带盖钢包钢水的温差，℃；t 为时间，min。将时间 28.3 min 代入，得到此时温降差为 14.6 ℃，与生产统计数据接近。

在不带盖的情况下，钢水表面浮有保护渣，该渣层对钢水具有一定的保温效果。钢包钢水上表面的换热以钢渣表面的对流和辐射换热为主。而带盖钢包在刚开始的一段时间，钢包盖将钢渣表面的对流和辐射换热大幅降低，因此钢包盖具有较明显的保温效果。但当停留较长时间后，如超过 30 min，钢包盖的温度明显上升，因此钢包上部的散热以钢包盖的对流和辐射换热为主，此时钢包盖的保温效果相对较弱。

2.2　绝热毡厚度对钢包保温效果的影响

图 5 为不同绝热毡厚度、出钢 30 min 后钢水温度分布的仿真结果。

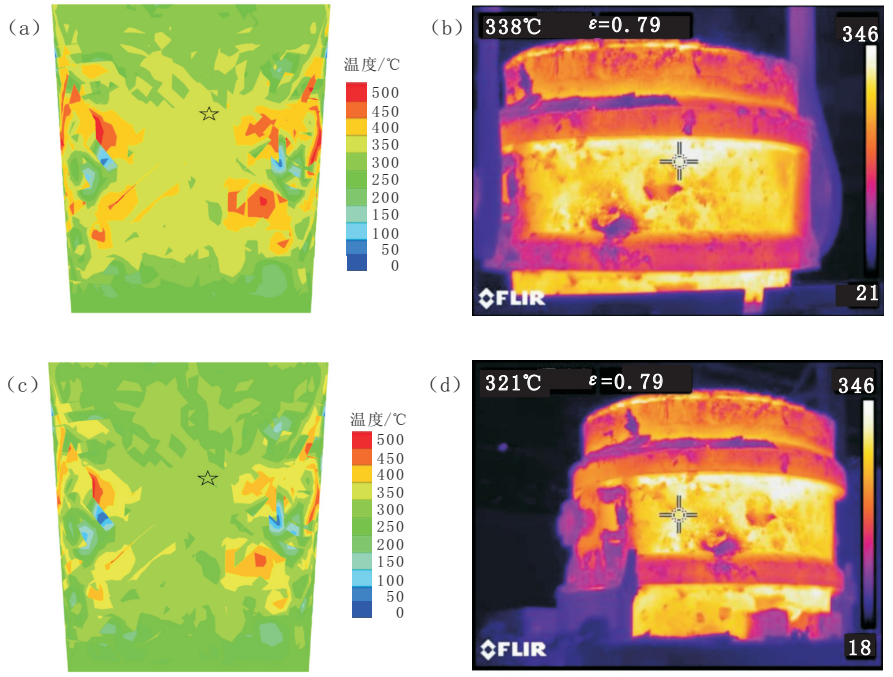


(a) 0 mm(无绝热毡)；(b) 3.75 mm；(c) 7.50 mm；(d) 15.00 mm

图 5　不同绝热毡厚度，出钢 30 min 后钢水温度分布的仿真结果

Fig. 5　Simulation Results of Molten Steel Temperature Distribution 30 Minutes after Tapping with Different Thermal Insulation Blanket Thickness

由图5看出，当绝热毡厚度分别为0 mm、3.75 mm、7.50 mm、15.00 mm时，钢水中心温度分别为1 539.31℃、1 540.03 ℃、1 541.44 ℃、1 544.90 ℃，绝热毡厚度为15 mm时的钢水温度比3.75 mm时的提高了4.87 ℃。绝热毡厚度越大，对钢水的保温效果越好。考虑成本问题，针对绝热毡厚度为7.50 mm与15.00 mm的钢包进行表面温度数值仿真及红外测温，结果见图6。



(a)、(b) 分别为7.50 mm时钢包表面温度数值仿真和红外测温结果；
(c)、(d) 分别为15.00 mm时钢包表面温度数值仿真和红外测温结果

图6 绝热毡厚度分别为7.50 mm和15.00 mm时钢包表面温度数值仿真及红外测温结果

Fig. 6 Numerical Simulation and Infrared Thermography Results of the Ladle Surface Temperature with Thermal Insulation Blanket Thickness of 7.50 mm and 15.00 mm

由图6看出，绝热毡厚度为7.50 mm时，所选点的温度仿真值大约为324 ℃，实测温度为338 ℃；绝热毡厚度为15.00 mm时，所选点的温度仿真值大约为316 ℃，实测温度为321 ℃。由此可见，仿真数值和实测数值接近，计算得出相差在5%以内。

通常100 t钢包使用绝热毡30~40 m^2，7.50 mm厚的绝热毡约500元/m^2。粗略估算，100 t钢包使用绝热毡的材料成本最多约2万元。假设一个钢包周转100次，每次钢水100 t，则绝热毡的成本约为2元/t 。三种厚度绝热毡系统效益损失计算如下：

（1）当绝热毡厚度为3.75 mm时，绝热毡使用成本约为1 元/t。30 min内钢水温度比没有绝热毡时提高了0.72 ℃，按照吨钢每升高1℃所需费用为0.6元计算，吨钢保温创效为0.72×0.6=0.432 元/t，系统效益损失为：

材料成本−保温创效=1−0.432=0.568 元/t

（2）当绝热毡厚度为7.50 mm时，30 min内的钢水温度比没有绝热毡时提高了2.13 ℃，吨钢保温创效为2.13×0.6=1.278 元/t，系统效益损失为：

2−1.278=0.722 元/t

（3）当绝热毡厚度增加到15.00 mm时，吨钢绝热毡使用成本约为4元。此时的钢水比无绝热毡时高了5.59 ℃，保温创效为5.59×0.6=3.354 元/t。系统效益损失为：

4−3.354=0.646 元/t

从上述计算可以看出，在仿真计算的30 min时间内，随着绝热毡厚度的增加，系统效益损失增加。

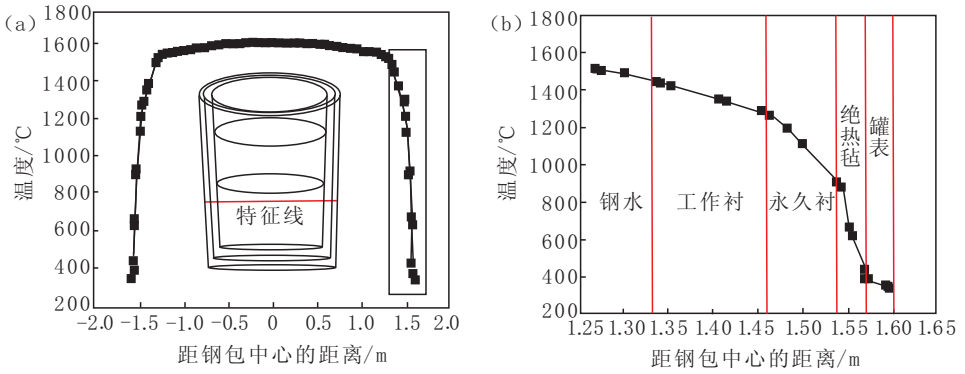
炼钢总厂钢包从出钢到连铸开始浇钢，平均

时间约为72.32 min。绝热毡厚度15.00 mm时，钢水温度比无绝热毡的钢水温度高8.77 ℃，钢水保温创效约为5.26元/t，去除绝热毡成本，则系统创效为1.26元/t；绝热毡厚度7.50 mm时，72.32 min的温度比没有绝热毡的钢水温度高3.77 ℃，此时系统创效约为0.26元/t。当绝热毡厚度在3.75 mm时，在72.32 min时的温度比没有绝热毡的钢水温度高1.73 ℃，系统创效为0.04元/t。

由此得知，提高绝热毡厚度可以有效降低钢水温降，且性价比随着钢包周转周期的延长而增加。在较短生产周期，如30 min时，使用厚度3.75 mm的绝热毡性价比最高；但生产过程中钢包盛放钢水的时间较长，如72.32 min，使用厚度15.00 mm额度绝热毡性价比最高。因此，在实际生产中要综合考虑生产节奏及钢包结构等，采用合适厚度的绝热毡，以获得高的性价比。目前鞍钢炼钢总厂在100 t钢包砌筑时，结合实际生产情况，多选用7.50 mm厚的绝热毡。

2.3 钢包内外温度分布

由上述结果可知，采用数值仿真方法得到的结果与红外热成像仪得到的结果自洽。因此，采用数值仿真方法对100 t钢包从内到外的温度变化进行了计算，所选的绝热毡厚度为7.50 mm，计算结果见图7。钢包内不同位置温度分布见表3。



(a) 钢包特征线位置温度；(b) 局部放大温度

图7 100 t钢包从内到外的温度变化

Fig. 7 Temperature Variation from the Inner to the Outer Wall of the 100 t Ladle

表3 钢包内不同位置温度分布

Table 3 Temperature Distribution at Different Positions Inside the Ladle　　℃

钢水	工作衬	永久衬	绝热毡	罐表
1 450.0~ 1 582.5	1 193.2~ 1 450.7	910.1~ 1 193.2	390.3~ 910.1	347.6~ 390.3

由图7和表3可知，在钢水范围内的温度分布相对比较均匀，从工作衬一直到最外面的罐表，温度变化较大，其中绝热毡内外表面的温差最大，说明相较工作衬、永久衬等耐材，绝热毡在阻挡热传导过程中的效果最明显。生产中需综合考虑冶炼周期和生产成本，选择不同厚度的绝热毡。

3 结论

（1）仿真结果显示，不带盖钢包钢水出钢30 min后中心温降比带盖钢水出钢30 min后中心温降低17.9 ℃。生产统计结果显示，钢包出钢后21~30 min，带盖钢水的平均温降比不带盖的减少约16.52 ℃。钢包盖保温效果明显。

（2）研究结果显示，绝热毡厚度越大，保温效果越好。仿真结果显示出钢30 min后，绝热毡厚度为15.00 mm时，钢水中心温度比3.75 mm厚时提高了4.87 ℃。出钢后72.32 min时，绝热毡厚度15.00 mm的钢水温度比无绝热毡的钢水温度高8.77 ℃，去除绝热毡成本，系统可创效1.26元/t。生产中需综合考虑冶炼周期和生产成本，选择不同厚度的绝热毡。

参考文献

[1] 彭翼军，尹冬航，周鹏，等. LF精炼钢水温度预测模型的开发与应用[J]. 自动化应用，2024，65(1)：224-225，228.

[2] 程亦，黄春，陈腾飞. 钢包全程加盖技术的应用实践[J]. 山西冶金，2023(9)：195-196，243.

[3] 张艳利,彭西高,程庆先.连铸钢包及炉外精炼钢包用耐材技术的研究与发展[J].耐火与石灰,2023,48(6):5-17.
[4] 郝明,孙凯明,张建平,等.基于红外热成像的钢包监测系统设计[J].自动化技术与应用,2024(6):32-34.
[5] 何平,李勇,张海风,等.钢包温降规律与全程加盖保温节能技术研究[C]//第十八届全国炼钢学术会议论文集,西安:中国金属学会,2014:81-85.
[6] 孙晓婷,田琳,李国栋,等.基于ANSYS模拟钢包壁耐火层温度分布及优化设计[J].冶金能源,2018(3):21-24.
[7] 秦永坤,赵艳宇,程树森.钢包热状态数学模型[J].中国冶金,2025,35(6):54-56.
[8] 秦志伟,张萌.我国金属材料工业节能减排与环境保护分析[J].黑龙江环境通报,2024(7):41-43.
[9] 张利民,朱立光,肖鹏程,等.钢包保温层数值模拟分析及应用[J].铸造技术,2020,41(9):852-856.
[10] 张利民,朱立光,张利军,等.钢包保温层优化及应用[J].中国冶金,2020,30(5):11-16.
[11] 徐海强,王胜,郭士萌,等.钢包钢水保温技术效果对比[J].河北冶金,2020(3):61-65.
[12] 温巨文,武晓阳,路博勋,等.降低钢包全流程钢水温度损失的措施与实践[J].天津冶金,2022(4):14-17.

(编辑 许营)
修回日期:2025-04-10

(上接第38页)

[8] 吴红艳,翁镭,魏子荐.铁路车辆用高Cr耐蚀钢的组织和性能[J].材料热处理学报,2018,39(4):93-99.
[9] 曹国良,李国明,陈珊,等.Cu对低合金钢耐海水腐蚀的影响[J].材料工程,2011(9):62-67.
[10] 马丽微,王向东,陈小平,等.铜对碳钢耐大气腐蚀性能的影响[J].天津冶金,2007(5):21-24.
[11] 李琳,钟斌,高鹏,等.Q690qENH钢暴晒两年的大气腐蚀性能[J].腐蚀与防护,2015,36(9):869-872.

(编辑 白璐)
修回日期:2024-07-24

(上接第42页)

度及良好的韧性,是重型卡车大梁的优选材料。

参考文献

[1] 郑东升.汽车大梁板P510L生产工艺优化研究[D].沈阳:东北大学,2008:3-15.
[2] 李光瀛,马鸣图.我国汽车板生产现状及展望[J].轧钢,2014,31(4):22-32.
[3] 刘丽萍,关晓光.700 MPa级高强汽车用钢热轧工艺研究与应用[J].轧钢,2018,35(2):20-25.
[4] 李永亮.700 MPa级高强度汽车大梁钢成分设计与组织控制研究[D].北京:北京科技大学,2017.
[5] 张智刚,刘妍,宿成.Ti微合金化700 MPa级大梁钢组织和性能研究[J].包钢科技,2022,48(2):42-45.
[6] 杨栋,李超.微钛处理对钒氮微合金H型钢组织性能影响[J].山西冶金,2022,45(8):1-2,29.
[7] 惠亚军,潘辉,周娜.650 MPa级V-N微合金化汽车大梁钢化机制研究[J].金属学报,2015,51(12):1481-1488.
[8] 雍岐龙,刘正东,孙新军.钛微合金钢中碳氮化钛固溶量及化学组成的计算与分析[J].钢铁钒钛,2005,26(3):12-16.
[9] 田云生,孙拓,王佰双.安钢700 MPa低碳高强钢碳氮控制工艺研究[J].特钢技术,2020,26(2):16-20.
[10] 中华人民共和国国家质量监督检验疫总局中国国家标准化管理委员会.GB/T 3075—2021 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法[S].北京:中国标准出版社,2022.

(编辑 白璐)
修回日期:2025-07-03