

低碳背景下铁水罐烘烤补热与加盖保温技术研究与应用

徐大勇^{1,2}, 孙守斌^{1,2}, 马光宇^{1,2}, 刘常鹏^{1,2}, 赵侯^{1,2}

(1. 海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室, 辽宁鞍山 114009;

2. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁鞍山 114009)

摘要: 钢铁长流程工艺体系中碳排放量占比非常大, 炼铁发展绿色低碳技术对降低碳排放量尤为重要。针对铁水采用敞口铁水罐运输导致铁水热量损失大的问题, 分析了敞口铁水罐运输铁水热量损失构成和对应的碳排放量实际情况, 对铁水罐采取烘烤补热和加盖保温的节能减排效果进行对比分析, 结果均可以提高铁水温度 30 °C 以上。两种方式的应用实证和实现碳减排的结果表明, 对铁水罐空罐期实施加盖保温效果最好, 更有利于减排, 且几乎不需要提供外部能源就可以大幅度减少铁水热量损失和降低碳排放量; 烘烤补热是对加盖保温的补充和辅助, 可实现传统高炉炼铁工艺的高炉煤气自循环, 对于碳减排具有重要意义。

关键词: 低碳; 铁水罐; 保温; 补热; 加盖

中图分类号: TF5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)02-0031-07

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 02. 004

Research on Technologies of Compensatory Heating and Cover Insulation for Hot Metal Ladles under a Low-carbon Background and Their Applications

XU Dayong^{1,2}, SUN Shoubin^{1,2}, MA Guangyu^{1,2}, LIU Changpeng^{1,2}, ZHAO Yu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: In the long-process steelmaking system, the proportion of carbon emissions is extremely high. Therefore, the development of green and low-carbon technologies in ironmaking is crucial for emission reduction. In allusion to the significant heat loss during the transportation of hot metal ladle without cover insulation, the composition of such heat loss and the corresponding actual carbon emissions were analyzed. A comparative analysis was carried out on the energy-saving and emission-reduction effects of hot metal ladle for heat compensation and ladle covering for heat preservation. The results showed that both methods could increase the molten iron temperature by more than 30 °C. Empirical applications of these two methods and the achieved carbon emission reduction results indicated that applying cover insulation during hot metal ladle empty period was the most effective measure, which was more conducive to emission reduction. Moreover, it significantly reduced heat loss and carbon emissions with almost no external energy supply. Compensatory heating served as a supplement and auxiliary measure to cover insulation, could realize the self-circulation of blast furnace gas within the traditional blast furnace ironmaking process, which was of great significance for carbon emission reduction.

Key words: low-carbon; hot metal ladle; insulation; compensatory heating; cover insulation

目前,全世界的钢铁生产依然以传统的高炉-转炉生产流程为主,对于高炉而言,与碳排放密切关联的焦炭是必不可少的。炼铁工序作为钢铁行业的“龙头”,能耗占整个钢铁行业总能耗的70%左右,发展绿色低碳技术对降低钢铁行业碳排放量、发展低碳钢铁新格局尤为重要。《2030年前碳达峰行动方案》指出,要通过节能降碳增效等10个行动实现碳减排^[1-3]。炼铁工序面临的碳减排任务艰巨,随着我国“双碳”目标的逐步落实,迫切需要开拓炼铁区域降低碳排放的新技术,以满足碳达峰、碳中和的目标愿景。

大型钢铁企业的高炉铁水量达千万吨级以上,有很大比例的铁水采用敞口铁水罐盛装输送。在盛装和运输过程中,敞口铁水罐中铁水的热量损失和温降都很大,直接影响炼钢生产和冶炼废钢比^[4],由于高冶炼废钢比有利于CO₂排放强度的降低,开展减少铁水盛装输送环节的热量损失研究以提高铁水温度,对保障炼钢生产和铁钢界面工艺顺行,推进铁钢界面的碳减排非常重要^[5]。

1 烘烤补热与加盖保温技术研究

1.1 铁水热损失的产生、构成和解决对策

目前,高炉出铁后一般采用铁水表面撒保温剂保温,到转炉兑铁后铁水罐罐衬呈红热状态,罐衬温度1260℃以上,其后空罐期间的罐衬直接暴露在空气中,无任何保温措施,循环运到高炉装铁时罐衬温度普遍低于350℃,罐衬温度下降超过900℃。高炉出铁时高温铁水的热量被低温的铁水罐罐衬吸收,铁水温度大幅下降。盛装运输铁水期间,通过罐口和罐壳也会产生一定的热损失,造成铁水从高炉到转炉的整体运输过程中温降严重,部分铁水温降达到180℃,经常发生罐底结壳,导致铁水倒不净,再回到高炉时铁水已凝固,在出铁时需要消耗高温铁水的热量融化已凝固铁水,其潜热等热量损失很大,导致罐容下降,出现恶性循环^[6]。经计算,1t铁水温度下降180℃对应的热损失是84.0MJ,产生碳排放7.58kg^[7],对于一个千万吨级以上钢铁企业,碳排放量将达到75000t以上,是铁钢界面降低碳排放的重要制约因素。

在敞口运输过程中,铁水热量通过三个渠道散失:①通过铁水表面以辐射和对流的方式散失,由

于铁水表面覆盖有保温剂,目前铁水表面散热损失可以控制在铁水全部热损失的35%以下。②铁水与铁水罐罐衬的传导热损失,其与罐衬的材料、重量以及初始蓄热量有关。对于固定的铁水罐,热损失大小主要取决于罐衬蓄热量的变化,表现为罐衬温度的变化。铁水罐从高炉到转炉完成铁水运输后,罐衬热量以辐射和对流的方式通过罐口散失,高温铁水的热辐射和对流强度非常大,铁水因罐衬蓄热损失产生的传导热损失约占全部热损失的45%以上。③铁水罐罐壳表面散失的热量,由于罐衬材料的隔热保温作用,罐壳表面的温度相对较低,热辐射和对流强度较小,罐壳表面散失的热量约占全部热损失的20%^[8]。

综上所述,铁水热损失主要取决于罐衬蓄热量损失,可采取下述控制铁水热损失的措施:①对铁水罐实施补热,使罐衬温度重新恢复或接近铁水温度,缩小罐衬与铁水的温差,控制罐衬对铁热水量的吸收。②维持铁水罐罐衬温度不下降,对敞口铁水罐实施加盖保温,控制罐口的辐射和对流散热。由于铁水表面的热损失主要通过罐口散失,在罐口实施加盖保温可同时解决重罐期铁水表面的热损失和空罐期罐衬的热损失。

1.2 烘烤补热时间和效果分析及对碳排放的影响

铁水罐罐衬耐火材料一般分三层,内层厚度10~18cm,中层厚度5cm,外层厚度3.2cm。罐衬温度变化主要体现在耐火材料的内层和中层,而罐衬外层为隔热层,温度变化不明显。铁水罐从装铁水到转炉兑铁完成以及返回高炉重新装铁的循环周转过程中,罐衬内壁在高炉出铁完成后温度最高,通常在1450℃;其次是在转炉兑铁完成后,通常在1260℃以上;在高炉装铁前温度最低,普遍低于350℃。装铁水后罐衬温度随时间变化情况如图1所示,可以看出,装铁水后到转炉兑铁前,罐衬各层接受高温铁水传热,温度以不同速度上升。装铁水后1h左右温度上升不再明显,高温铁水的传热与铁水罐外壁散热达到平衡,罐衬蓄热达到饱和。

转炉兑铁完成后,高温红热的罐衬暴露在空气中,靠近表面的耐火材料(内层)温度下降速度非常快,内部耐火材料(中层)的温度下降速度相对缓慢。铁水罐返回高炉重新装铁前会经过2~3h,

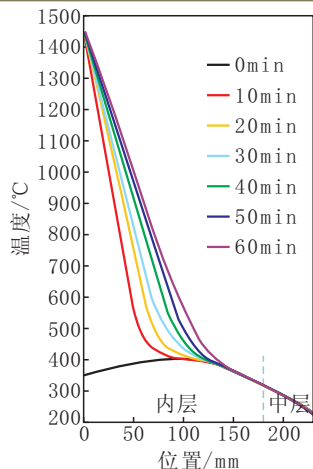


图1 装铁水后罐衬温度随时间变化情况

Fig. 1 Temperature Variation of Ladle Lining with Time after Hot Metal Charging

兑铁后罐衬温度随时间变化情况如图2所示,可以看出,返回高炉后内层耐火材料温度明显下降,平均温度不到最高时的一半,因此衬蓄热量也损失50%以上,在高炉装铁时高温铁水的热量将被低温罐衬吸收,这是导致铁水温度大幅下降的主要原因。

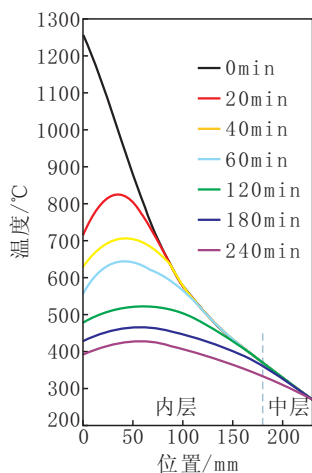


图2 兑铁后罐衬温度随时间变化情况

Fig. 2 Temperature Variation of Ladle Lining with Time after Hot Metal Delivery

如果在铁水罐返回高炉重新装铁期间对铁水罐实施烘烤补热,提高罐衬温度,使罐衬耐火材料损失的热量得到补充恢复,铁水的热量损失将大幅减少。实施烘烤补热时罐衬温度随时间变化情况如图3所示,可以看出,对铁水罐烘烤30min的补热效果已经可以使罐衬恢复到转炉兑铁后的温度水平和蓄热量,大幅度减少装铁时高温铁水的

热量损失,实现提高铁水温度的目的。

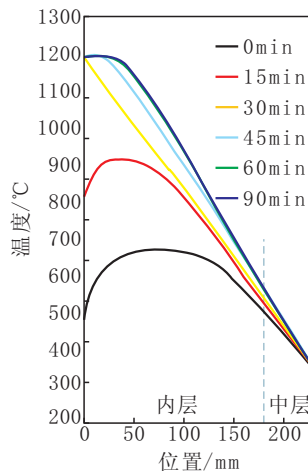


图3 实施烘烤补热时罐衬温度随时间变化情况

Fig. 3 Temperature Variation of Ladle Lining with Time during Compensatory Heating

对铁水罐烘烤补热需要消耗外部能源,在钢铁企业最经济的烘烤方式是采用生产工艺的副产品如焦炉煤气、高炉煤气等燃料作为能源,燃料通过喷嘴燃烧,由燃烧的火焰对罐衬冲刷加热,喷嘴燃烧产生的高温火焰具有足够的长度和刚性,以火焰的高温 and 冲刷速度实现对罐衬高强度的辐射和对流传热,提高加热速度,快速补充恢复罐衬耐火材料损失的热量。因为火焰的温度和冲刷速度产生的辐射和对流强度远大于自然条件下空罐期间罐衬辐射和对流散失热量的强度,所以烘烤补热的加热速度远大于铁水罐自然散热的速度。例如,鞍钢本部95t敞口铁水罐在高炉装铁水期间罐衬温度355℃,有效蓄热量为 3.9×10^6 kJ^[8],当罐衬烘烤到1000℃时,有效蓄热量增加到 7.5×10^6 kJ,可提高铁水温度44℃,吨铁水减少碳排放1.85 kg;当罐衬烘烤到1100℃时,可提高铁水温度52℃,吨铁水减少碳排放2.19 kg;当罐衬烘烤到1200℃时,可提高铁水温度60℃,吨铁水减少碳排放2.53 kg,能够减少千万吨级钢铁企业碳排放量18000~25000 t以上。烘烤补热对后续转炉炼钢的促进作用和经济效益要远远大于其能源投入,且可以更灵活地处理各种温度状态的铁水罐,适用于不具备加盖条件或者铁水运输线过长加盖保温效果不好的情况。

烘烤补热采用能够使用高炉煤气作为燃料的

蓄热式燃烧技术,不仅可以极致回收燃料燃烧产生烟气的余热,而且可以利用过去高炉生产需要放散掉或者无谓空烧的高炉煤气^[8],降低温室气体排放,实现煤气自循环。对于高炉炼铁工艺来讲,煤气自循环技术是实现超低碳排放最重要的技术手段,对于碳减排具有重大意义^[9]。

1.3 加盖保温效果分析及对碳排放的影响

对敞口铁水罐实施加盖保温是提高铁水温度最直接有效的方法。在铁水热损失构成分析中,铁水表面散失热量以辐射和对流的方式通过罐口散失,占铁水全部热损失的35%以下,铁水罐衬在空罐期间通过罐口散失热量占铁水全部热损失的45%以上,通过以上两个渠道产生的铁水热损失占总热量损失的80%左右,因此对运输过程中装满铁水的重铁水罐和转炉兑铁完成后到回到高炉的空铁水罐均实施加盖保温,可同时解决铁水表面通过罐口散失的热量和空罐期间红热的罐衬通过罐口以热辐射和对流的方式散失的热量,极致减少铁水温降,同时控制罐内烟尘等污染物通过敞开的铁水罐口飘散,节约能源减少环境污染。另外,铁水罐衬在空罐期间通过罐口散失热量是铁水热损失的主要因素,比例大于铁水表面热损失,在空罐期实施加盖保温的效果要大于重罐期。

为模拟计算铁水罐加盖保温的效果,选取两个同样条件的完成兑铁后的铁水罐,在红热状态下对加盖和敞口的温降过程进行测试,对比分析铁水罐加盖保温的温度参数。铁水罐加盖1.5 h后,开始测温,红热状态铁水罐加盖和敞口温降实测曲线如图4所示。

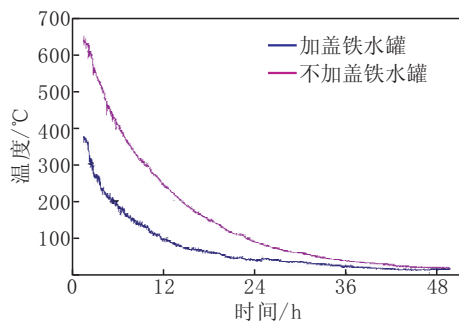


图4 红热状态铁水罐加盖和敞口温降实测曲线

Fig. 4 Measured Temperature Drop Curves of Red-hot Metal Ladle with and without a Cover

由图4可以看出,1.5 h后,加盖铁水罐温度为640 °C,不加盖的铁水罐温度为370 °C,不加盖状态的铁水罐温度比加盖铁水罐的温度低270 °C,相当于加盖铁水罐7.5 h后的温度水平。随着对铁水罐加盖时间的增加,其延长铁水罐温度水平的时间也逐渐增加,铁水罐加盖24 h温度降到100 °C左右,相当于不加盖铁水罐放置约11 h的温度水平,铁水罐加盖延长铁水罐温度水平约13 h。由于加盖24 h后铁水罐温度已经降到100 °C以下,对铁水保温意义不大,因此不分析铁水罐加盖24 h后的保温数据。

根据铁水罐直径与罐衬厚度、罐盖厚度比值悬殊特点,保温效果按照圆柱和平板传热模型计算,其中罐衬视为圆柱传热模型,罐底、罐盖视为平板传热模型。

圆柱散热量计算公式为

$$Q = -\lambda F \frac{\partial t}{\partial x} = -\lambda 2\pi r L \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1)$$

式中, Q 为散热量, W/m^2 ; λ 为耐火材料综合导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; F 为表面积, m^2 ; t 为表面温度, $^\circ C$; x 为耐火材料砌筑厚度, m ; r 为圆柱半径, m ; L 为耐火材料砌筑半径, m 。

对公式(1)积分后得到罐衬散热量计算公式:

$$q_1 = \frac{2\pi (t_{nb} - t_{wb})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\lambda_4} \ln \frac{r_5}{r_4}} \quad (2)$$

式中, q_1 为罐衬散热量, W/m^2 ; t_{nb} 为罐衬内表面温度, $^\circ C$; t_{wb} 为罐衬外表面温度, $^\circ C$; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 为罐衬各层耐火材料导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 为各层耐火材料砌筑半径, m 。

罐底、罐盖(平板)散热量计算公式为

$$q_2 = \frac{\Delta t}{k} = \frac{t_1 - t_5}{\frac{s_1}{\lambda'_1} + \frac{s_2}{\lambda'_2} + \frac{s_3}{\lambda'_3} + \frac{s_4}{\lambda'_4}} \quad (3)$$

式中, q_2 为罐底、罐盖散热量, W/m ; Δt 为总温差, $^\circ C$; k 为热阻, $^\circ C/W$; t_1, t_5 为罐底、罐盖内外温度, $^\circ C$; s_1, s_2, s_3, s_4 为各层耐火材料厚度, m ; $\lambda'_1, \lambda'_2, \lambda'_3, \lambda'_4$ 为罐底、罐盖各层耐火材料导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

根据测试结果进行模拟计算得出,在铁水运输过程中对敞口铁水罐实施全程加盖保温,能够降低铁水温降20%左右,即如果原来铁水温降1 °C/min,

采取加盖保温技术后铁水温降为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。按照原铁水从高炉到转炉期间温度下降 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 计算,采取加盖保温可减少铁水温降 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$,吨铁水可减少碳排放量 1.82 kg ,千万吨级钢铁企业减少碳排放量 $18\ 000\text{ t}$ 以上。

1.4 烘烤补热和加盖保温的位置和时机

周转过程中敞口铁水罐空罐期间高温红热的罐衬直接暴露在空气中,蓄热损失非常大,计算和实际测试表明,空罐时间每增加 1 h ,铁水温降平均增加 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上^[10],因此周转过程中空罐时间对铁水温降的影响非常大。实施铁水烘烤补热和加盖保温可以控制和弥补敞口铁水罐空罐时的热损失,周转过程中敞口铁水罐实施烘烤补热和加盖保温的位置和时机对减少铁水热损失,提高铁水温度的实际效果非常关键。

(1) 铁水罐实施烘烤补热的位置和时机

根据铁水罐烘烤技术的特点,铁水罐必须在静止时间段进行烘烤,且需提供足够的烘烤时间以保证补热效果。铁水罐周转过程中在转炉完成兑铁后一般需要 $30\sim 150\text{ min}$ 的静止待运时间,再运到检罐车间进行 $30\sim 90\text{ min}$ 的检查修补,此时铁水罐也处于静止状态,然后运到高炉前等待高炉出铁,在高炉前等待出铁的时间长达 $60\sim 200\text{ min}$ 。由于在转炉完成兑铁后罐衬温度非常高,没有必要补热;在检罐车间进行补热虽具备设备和空间条件,但影响对铁水罐的检查修补,检查修补完成后到铁水罐运输到高炉期间以及高炉前等待高炉出铁期间罐衬热量还是有很大损失,难以实现提高铁水温度的效果;在高炉前等待高炉出铁期间的铁水罐按照罐车长度依次停靠在高炉出铁口前,烘烤补热完成后可按照高炉出铁节奏立即配送到高炉出铁口使用,中间不再有停留等待时间,所以烘烤补热位置应选择在高炉出铁口前区域,时机应选择在高炉出铁口前区域。

高炉前等待高炉出铁期间的铁水罐按照罐车长度依次停靠在高炉出铁口前,这个区域位置除出铁口下的罐位需要敞口做装铁准备外,其他铁水罐可根据罐车长度设置一个或者多个烘烤补热设施,与铁水罐停靠罐位一一对应。设置两个烘烤位可为每个铁水罐提供 $30\sim 60\text{ min}$ 的烘烤补热时间,能够将罐衬烘烤至 $1\ 000\sim 1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足铁

水罐基本的补热需求。这样布置的优点是可以按照高炉出铁节奏对准备装铁的铁水罐逐个接力烘烤补热,保证烘烤时间和补热效果。

(2) 铁水罐实施加盖保温的位置和时机

铁水罐在转炉兑铁完成后到空罐返回到高炉配罐期间,敞口的铁水罐无任何保温措施,红热的罐衬直接暴露在环境中,罐衬温度从 $1\ 260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上下降到不到 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$,是铁水热损失的主要原因。加盖保温应该在兑铁完成期间的转炉区工艺位置尽快实施,否则罐衬温度下降速度非常快,只能在之后再选择机会进行补热。出铁后罐中铁水表面的热损失也是通过敞开的罐口散失的,在高炉区域对装满铁水的重铁水罐及时实施加盖也非常重要。因此对周转过程中敞口铁水罐全程实施加盖保温可以最大程度地控制热量散失,极致减少铁水热损失。

2 烘烤补热与加盖保温技术应用效果

2.1 铁水罐实施烘烤补热的应用及实际效果

对敞口铁水罐实施烘烤补热技术已经在鞍钢本部的高炉生产中实施,位置选择在高炉出铁期间的高炉出铁区域,按照高炉单罐铁水 15 min 的出铁节奏,采用连续两套烘烤装置根据罐车长度布置,在出铁前和出铁过程中对停靠在高炉出铁口前的铁水罐依次实施接力烘烤。原来暗黑的铁水罐经过烘烤补热达到红亮状态,具体效果见图5。



图5 铁水罐实施烘烤补热的效果

Fig. 5 Effect of a Hot Metal Ladle with Compensatory Heating

烘烤补热采用蓄热式燃烧技术极致回收烟气余热,烟气排放温度 $107\text{ }^{\circ}\text{C}$,利用放散的低热值燃料高炉煤气作为能源,实现了高炉煤气自循环。

煤气喷嘴燃烧产生的高温火焰具有足够的长度和刚性,以火焰的高温 and 冲刷速度强化对罐衬的高强度辐射和对流传热,提高加热速度。烘烤时间不小于 30 min,罐衬温度提升到 950~1 100 °C,罐盖、罐底温度提升到 1 100~1 200 °C,达到了快速补充恢复罐衬耐火材料损失热量的目的。

铁水罐实施烘烤补热与不补热状态的铁水温度对比见表 1,可以看出,实施烘烤补热后铁水平均温度提升 31.0 °C,经计算,吨铁水减少碳排放 1.30 kg。

表 1 铁水罐实施烘烤补热与不补热状态的的铁水温度对比

Table 1 Comparison of Molten Iron Temperature in Hot Metal Ladles with and without Compensatory Heating

罐号	铁水温度(不烘烤)/°C	罐号	铁水温度(烘烤)/°C
171	1 344	112	1 369
34	1 326	173	1 366
175	1 332	43	1 354
87	1 354	165	1 364
175	1 337	52	1 369
71	1 321	167	1 372
25	1 330	146	1 367
平均	1 334.9	平均	1 365.9

2.2 铁水罐实施加盖保温的应用及实际效果

对敞口铁水罐实施加盖保温技术在鞍钢本部、鲅鱼圈分公司、朝阳钢铁等生产现场实施,保温罐盖为适应高炉出铁特点采用剖分式结构,

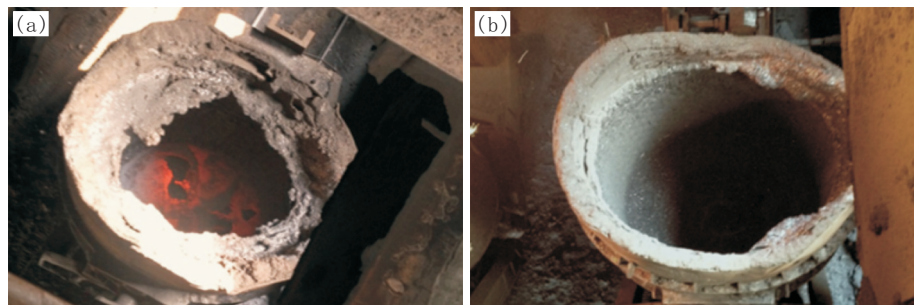
运输过程中可以紧密扣在铁水罐口,现场照片见图 6。罐盖采用重量轻、热容量小、耐急冷急热性好的高强隔热保温材料,保证罐盖的严密性和保温性能,对装铁水的重铁水罐和转炉兑铁后罐衬红热状态的空铁水罐均在第一时间进行加盖保温。



图 6 铁水罐实施加盖保温现场照片

Fig. 6 On-site Photo of a Hot Metal Ladle with Cover Insulation

实施加盖保温技术明显提高了铁水罐罐衬温度和工艺状态。铁水罐不加盖和加盖的罐口情况如图 7 所示。分析周转过程中罐内残铁量发现,随着装铁次数的增加,不加盖的铁水罐残铁量增加,导致罐龄降低。加盖保温的铁水罐罐口和内壁始终保持光洁状态,铁水罐烟尘等污染物无序排放的状态得到明显改善,罐内残铁平均降低了 8.9 t,解决了化解罐中残铁需消耗高温铁水和其他能源的问题,既节约了能源又减少了碳排放。



(a) 不加盖; (b) 加盖

图 7 铁水罐不加盖和加盖的罐口情况

Fig. 7 Ladle Mouth Conditions of Hot Metal Ladles with and without Covers

铁水罐敞口运输与加盖保温铁水温降对比如图 8 所示。铁水运输实施加盖要比不加盖的温度平均提

升 38.9 °C,经计算,吨铁水减少碳排放 1.64 kg,对于千万吨级钢铁企业可减少碳排放量 16 000 t 以上。

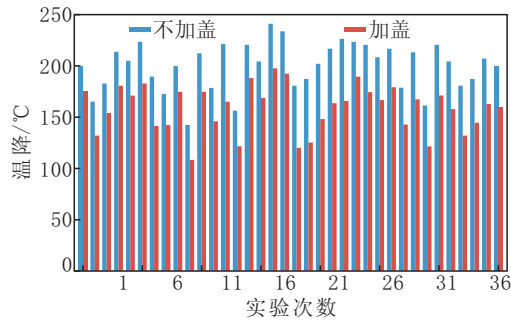


图8 铁水罐敞口运输与加盖保温铁水温降对比

Fig. 8 Comparison of Molten Iron Temperature Drop during Transport with and without Cover Insulation

3 结语

对铁水罐烘烤补热和加盖保温都可以达到提高铁水温度目的,无论是烘烤补热还是加盖保温均通过控制或者弥补罐衬散失的热量来提高铁水温度。烘烤补热可提高铁水温度约 31.0°C ,是提高铁水温度的重要途径,吨铁水减少碳排放 1.30 kg 。加盖保温几乎不需要消耗外部能源,铁水温度可提升 38.9°C ,同时可减少铁水罐烟尘排放对环境的污染,吨铁水减少碳排放 1.64 kg ,是节能减排的最佳模式,千万吨级钢铁企业可减少碳排放量 $16\ 000\text{ t}$ 以上。补热并不是节能减排的最佳模式,但对转炉的促进作用和经济效益要远大于其能源投入,生产中需灵活处理各种温度状态的铁水罐,对于不具加盖条件或者铁水运输线过长加盖效果不好的情况,可同时实施烘烤补热和加盖保

温以进一步提升铁水温度。利用高炉煤气补热能实现传统炼铁工艺的高炉煤气自循环,对于碳减排具有重大意义,是实现超低碳排放的重要手段,能够促进低碳绿色生产模式的实现。

参考文献

- [1] 杨天钧,张建良,刘征建,等. 关于新形势下炼铁工业发展的认识[J]. 炼铁,2020,39(5):1-9.
- [2] 刘然,张智峰,刘小杰,等. 低碳绿色炼铁技术发展动态及展望[J]. 钢铁,2022,57(5):1-10.
- [3] 张继文,牛禄青. 百年首钢绿色低碳发展的实践探索与启示[J]. 新经济导刊,2021(2):41-46.
- [4] 邵玉良,池桂兴. 铁水降耗综合分析[J]. 钢铁,1996(12):55-57,61.
- [5] 殷瑞钰,上官方钦,崔志峰. 钢铁行业低碳发展对策研究:回顾与展望[J]. 中国冶金,2025,35(3):1-15.
- [6] 徐春柏,徐大勇,刘常鹏. 铁水保温输送现状及提高铁水到达钢厂温度的技术和管理措施[J]. 鞍钢技术,2005(1):9-11.
- [7] 吴小弟,佟岗,张永杰,等. T/CISA 087—2021 高炉—转炉界面能效评价技术规范[S]. 北京:中国钢铁工业协会,2021.
- [8] 徐春柏,徐大勇,刘常鹏. 铁水罐在线烘烤工艺试验[C]//2004 全国能源与热工学术年会论文集(2). 云南:中国金属学会能源与热工分会,2004:511-514,517.
- [9] 张寿荣,潘国友,柳萌. “双碳”目标下我国炼铁技术发展路径[J]. 炼铁,2022,41(6):1-7.
- [10] 刘常鹏,徐大勇,张宇,等. 铁水装运过程的温降分析[J]. 冶金能源,2009,28(5):10-12.

(编辑 查松妍)

修回日期:2025-09-22

(上接第30页)

- [9] 张真,杜宪军. 碳中和目标下氢冶金减碳经济性研究[J]. 价格理论与实践,2021(5):65-68.
- [10] 姜周华,杨策,朱红春,等. 氢冶金炼铁技术的研究现状与展望[J]. 钢铁,2024,65(9):18-19.
- [11] 张颖,王莹,查松妍,等. 钢铁行业氢冶金技术路线及发展现状[J]. 烧结球团,2023,48(4):8-15.
- [12] 卢立金,王海风,王锋,等. 氢冶金工艺技术发展现状及应用[J]. 钢铁,2024,59(3):183-196.
- [13] 王晓飞. 基于Deltav系统的串级控制在氢冶金工程中的应用[J]. 冶金信息导刊,2024,19(3):13-16.
- [14] 鲁雄刚,张玉文,祝凯,等. 氢冶金的发展历程与关键问题[J]. 自然杂志,2022,44(4):251-266.
- [15] 郭学益,陈远林,田庆华,等. 氢冶金理论与方法研究进展[J]. 中国有色金属学报,2021,31(7):16-18.
- [16] 鞠茂奇,程水明,夏昌勇,等. 氢冶金用耐火材料体系综述与展望[J]. 陶瓷学报,2024,45(3):437-445.
- [17] 魏炜,饶文涛. 氢冶金场景下规模化固态氢储运技术的开发及应用[J]. 科技导报,2024,42(15):40-48.
- [18] 佟帅,艾立群,洪陆阔,等. 30·60目标下中国氢冶金发展现状及应用前景[J]. 材料导报,2023,37(23):113-120.
- [19] 杨倩鹏,仲理科,王辉,等. 面向氢能冶金的风光互补制氢系统优化配置与经济性分析[J]. 青海科技,2024,31(4):53-60,109.
- [20] 白晓光,冯聪,李玉柱. 低碳氢冶金炼铁技术进展及包钢氢能炼铁技术途径探讨[J]. 包钢科技,2024,50(4):14-20.

(编辑 许营)

修回日期:2025-05-10