

壁面结构对渣包保温行为的影响与效果评价

孙磊, 张玉柱, 甄常亮, 赵凯

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

[摘要] 为了实现熔融钢渣余热资源, 元素资源高效利用及回收, 针对熔渣转运过程中由于热量散失引起的温降问题, 通过数值模拟的方法, 建立渣-包界面二维传热模型, 研究了熔渣转运过程中通过改变渣包壁保温结构和烘烤渣包温度对熔渣温降及保温效果的影响, 并进一步对保温包壁结构进行经济性分析。结果表明: 相比传统渣包的温降情况, 采用保温包壁结构可以明显减小熔渣温降, 熔渣温降减少42~75℃; 渣包工作层以镁铝尖晶石浇注料组合较镁碳砖组合保温效果更加明显, 温降幅度减少30℃; 采用烘烤渣包预热工艺处理后, 熔渣边缘平均温降速率由14.11℃/min降低到4.26℃/min; 不同壁面结构保温效果经济性分析结果显示, 渣包包壁采用镁铝尖晶石浇注料120mm、高铝浇注料110mm、轻质保温砖20mm时, 保温效果的经济性最优, 可节省195kW·h的电加热, 有利于实现渣热高效回收利用。

[关键词] 渣包; 熔渣; 耐火材料; 数值模拟; 保温

[中图分类号] TF71; TP391.99 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2023)02-0138-11

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2023.02.017

熔融钢渣是炼钢过程中的副产物, 不仅拥有钙、硅、镁等有价值元素资源, 同时包含巨大的热能资源^[1], 但由于钢渣中胶凝活性物质相对较少, 胶凝活性降低, 同时存在游离的氧化镁和氧化钙等物质, 致使其安定性不良, 严重制约了钢渣的高效利用。传统渣包采用铸钢材料, 在现有熔渣运输工艺下存在熔渣热量散失较多、不能减少熔渣热量流失等问题, 造成巨大的资源浪费^[2-3]。熔融钢渣温度为1300~1600℃, 按照回收温度1000℃计算, 每吨熔渣可回收显热约1.2GJ, 相当于41kg的标准煤完全燃烧释放的热量^[4]。按照每年产1亿t钢渣计算, 相当于每年浪费了约400万t标准煤。利用熔融钢渣余热将改质成分与钢渣进行反应, 进而对钢

渣组分进行重构, 提高钢渣的胶凝活性和安定性, 实现钢渣的渣-铁-热全量资源化利用, 不仅是提高经济效益、社会效益的必要手段, 也是降低环境污染的有效途径^[5-7]。

渣包作为转炉-钢渣处理界面的重要设备, 现有钢渣转运工艺及渣包内钢渣温度会直接影响钢渣在线重构技术进行及电炉加热改质工序的能量和物质消耗。在转运过程中, 要严格控制熔渣温降, 熔渣温度过低, 会造成余热资源浪费, 也导致电炉加热改质的投资成本增加; 减少转运过程中熔渣的热量流失, 能够实现物质流、能量流的高效持续^[8], 并在后续工艺中实现更合理的电量投入。目前国内外对渣包保温数值模拟研究较少, 主要研究集中在铁水包和钢包方面^[9-12]。李辉等^[13]通过改变烘烤、表面补热等方式, 得出减少熔渣温降和凝固的相关参数, 但该研究并未针对保温层材质及厚度进行研究。Santos F M等^[14]通过对比4种不同的钢包内衬结构, 对钢包的耐火性进行仿真模拟, 得到最优的设计方案。Mantripragada等^[15]对钢包的内应力进行了数值模拟, 研究其应力分布, 并对部分参数进行了优化。徐国涛等^[16]针对钢包扩容及实践存在的问题, 分别对工作层、

[收稿日期] 2022-11-12

[第一作者] 孙磊(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为冶金节能与资源优化。

[通信作者] 甄常亮(1983—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事炼铁工艺及钢铁工业节能减排技术等方面的研究工作。

[基金项目] 中央引导地方科技发展资金项目“钢渣高温熔态活性调控与全量资源化利用基础研究”(226Z3802G)。

[引用格式] 孙磊, 张玉柱, 甄常亮, 等. 壁面结构对渣包保温行为的影响与效果评价[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(2): 138-148.

永久层进行减薄,结果表明,永久层减薄增加散热,其他影响较小;工作层和永久层同时减薄30 mm可提高钢包容量,并且不会形成安全隐患,达到扩容效果。李公法等^[17]通过对比具有纳米保温材料的新型钢包和传统钢包在烤包和盛钢2种工况下的温度分布,具有纳米保温材料的新型钢包温度分布明显优于传统钢包,并且新型钢包纳米材料导热系数下降80%时,钢包热量损失更小。袁飞等^[18-19]研究了铁水包加盖对转运过程的保温影响,结果表明加盖不仅对铁水转运过程具有保温作用,还对空包回程过程铁水包具有保温效果,进而对下一包的铁水具有保温效果。上述众多学者在材质、厚度、应力、添加包盖、烘烤等方面进行了研究和改进,但忽略了探究包壁结构对熔渣的温降影响及耐火材料成本问题,不同结构包壁的物性参数、成本不相同,其保温效果、制造成本也不同。

本文以传热模型为基础,对渣-包界面的传热过程进行数值模拟,通过改变渣包壁保温结构和烘烤温度2种工艺参数,探究渣包壁保温结构和烘烤温度对转运过程中的传热行为、温降规律的影响,并对保温包壁结构进行保温性价比分析。该研究可为减少钢渣温降、提升转炉-钢渣处理界面能量利用率、促进钢渣在线重构技术生产实践的发展以及渣包的合理选择提供借鉴意义。

1 渣包保温过程数值模拟

图1(a)为传统的熔融钢渣处理工艺;图1(b)为熔融钢渣处理新工艺,该工艺目的是对熔融钢渣的元素资源和余热资源双利用,工艺流程是将转炉产生的钢渣使用保温结构渣包转运并进行在线调质,然后对电炉加热改质后的熔融钢渣进行粒化处理。新工艺提高了钢渣的胶凝活性和安定性,从根本上解决了尾渣性能问题,从而实现了尾渣的高效利用,也能够更加充分利用余热资源和有价元素资源。

本文重点研究熔融钢渣转运过程减少熔渣温降,实现钢渣余热回收利用,进而节约钢渣电炉加热成本。渣包作为核心设备,传统渣包采用单层铸钢材料,熔渣热量散失大,保温效果差,电炉改质升温成本增加,因此设计新型三层耐火材料砌筑方式(工作层、永久层、绝热层)的保温型渣包,并试着通过改变包衬耐火材料的组合搭配及耐火材料总厚度相同下改变各层的厚度来提升熔渣保温效果,减少熔渣热量流失,增加企业经济效益。熔渣表面直接与包壁和空气接触,不能用来反映熔渣的温降及凝固情况,因此在熔渣区域分别设置4个监测点(图2(a)中的A、B、C、D点),采用熔融钢渣各监测点温降趋势评价设计保温渣包的保温效果。

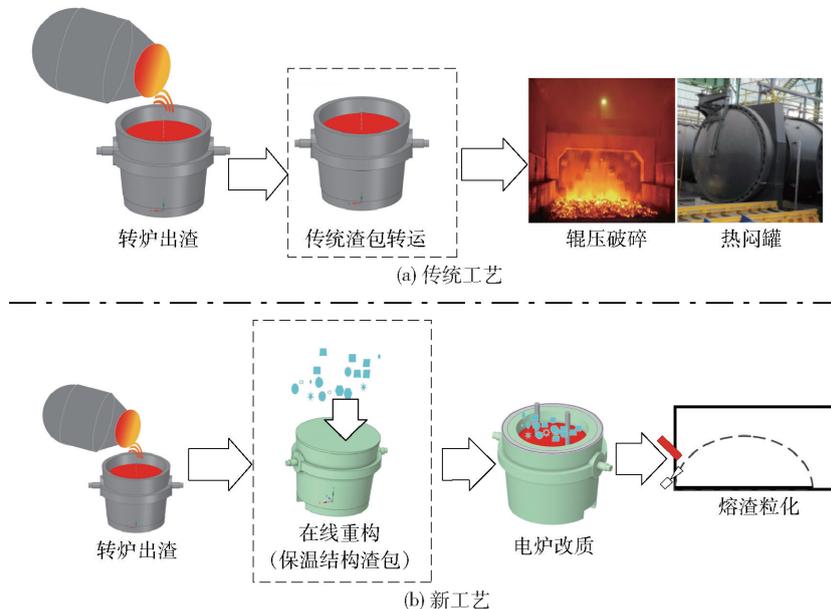


图1 熔渣处理工艺

Fig. 1 The new process of slag treatment

1.1 物理模型

本文对不同渣包包衬的材质、厚度以及不同烘烤温度进行数值模拟,设计渣包的结构由工作层、永久层、绝热层和钢壳4层组成,其中渣包包底工作层比包侧壁工作层厚 20 mm,其他结构厚度与渣包侧壁相同,包盖采用高铝浇注料和钢壳2层结构,其中高铝浇注料厚度为 50 mm、钢壳厚度为 20 mm。工作层、永久层、绝热层和钢壳的材料和侧壁厚度见表 1,根据表 1 对不同渣包组合侧壁的数据进行建模及结构化网格划分。熔渣和渣包结构及网格图如图 2 所示。

表 1 渣包结构材质和厚度

Table 1 Data sheet of slag ladle structure (material and thickness) mm

方案 编号	钢壳		绝热层		永久层	工作层	
	Q345	硬质纳米 绝热板	轻质保 温砖	高铝浇 注料	镁铝尖晶 石浇注料	镁碳 砖	
1 [#]	20	20	—	80	—	150	
2 [#]	20	20	—	110	—	120	
3 [#]	20	—	20	80	150	—	
4 [#]	20	—	20	110	120	—	

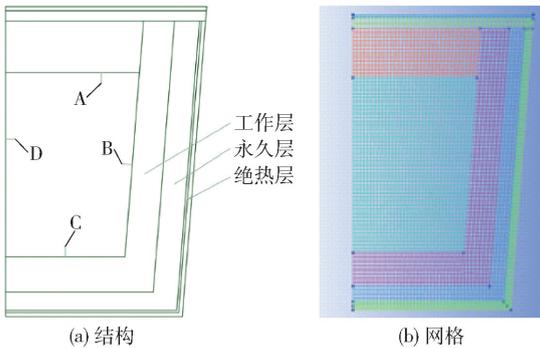


图 2 熔渣和渣包结构及网格图

Fig. 2 Structure and grid diagram of slag and slag ladle

1.2 数学模型

1.2.1 控制方程

圆柱坐标系下导热温度场的数学表达式根据能量守恒和傅里叶定律来建立,根据渣包模型具有对称性的特点,采用二维轴对称模型,在保温层间传热只考虑导热,渣包无内热源,圆柱坐标系下构建的渣包导热微分方程见式(1)。

$$\rho_x C_x \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial t}{\partial \varphi} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial t}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中: ρ_x 为渣包内衬和熔渣密度, kg/m^3 ; C_x 为渣包内衬和熔渣的比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; t 为钢渣温度, $^\circ\text{C}$; τ 为时间, s ; r 为半径, m ; z 为厚度, m ; λ 为物体导热率, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; φ 为圆柱坐标变量。

1.2.2 边界条件

渣包的保温边界条件有以下几种:熔融钢渣内部和渣包内衬不同材质之间的热传导(式(1));熔融钢渣表面的对流换热和辐射换热;以及渣包外壁的对流换热和辐射换热。

1) 熔融钢渣表面和空气的对流换热和辐射换热边界条件的具体表达见式(2)。

$$Q_1 = h_1(T_1 - T_2) + \varepsilon_1 \sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (2)$$

式中: Q_1 为熔渣表面散热量, J ; h_1 为熔渣表面和空气对流换热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; ε_1 为熔渣的发射系数; T_1 为熔渣温度, $^\circ\text{C}$; T_2 为渣包内空气温度, $^\circ\text{C}$; σ 为斯忒藩-波耳兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

2) 渣包外壁的对流换热和辐射换热边界条件的具体表达见式(3)。

$$Q_2 = h_2(T_3 - T_4) + \varepsilon_2 \sigma(T_3^4 - T_4^4) \quad (3)$$

式中: Q_2 为渣包钢壳表面散热量, J ; h_2 为渣包钢壳表面和空气对流换热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; ε_2 为钢壳的辐射系数; T_3 为渣包钢壳表面温度, $^\circ\text{C}$; T_4 为空气温度, $^\circ\text{C}$ 。

1.2.3 物性参数

钢渣的物性参数:密度 $3220 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 比热容 $1250 \text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; 导热系数 $4 \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{k})^{-1}$; 表面发射率 0.6; 相变潜热 $210 \text{kJ}/\text{kg}$; 动力黏度 $0.45 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。熔融钢渣初始温度为 $1650 \text{ } ^\circ\text{C}$, 熔渣的凝固点为 $1350 \text{ } ^\circ\text{C}$, 渣包保温层耐火材料物性参数参考文献[20-21]。

1.2.4 基本假设

1) 忽略渣包耳轴、吊耳等渣包外侧结构,采用二位轴对称模型计算。

2) 钢渣与渣包各个保温层导热系数不变,且渣包内衬保温材料物性为各向同性。

3) 忽略渣包各层之间的接触热阻,且忽略渣包内部空气的辐射吸热。

4) 壁面无滑移, 高温熔渣不与渣包内壁材料发生化学反应, 即熔渣不侵蚀渣包内壁。

2 结果分析与讨论

2.1 渣包结构对熔渣温降的影响

2.1.1 传统渣包温降情况

实际生产过程中渣包选用 ZG230-450 铸钢材质且通常不设置包盖和保温结构, 致使熔渣温降非常迅速, 并且熔渣转运过程中存在局部凝固现象。针对传统渣包转运过程进行数值模拟, 传统渣包转运后温度云图和凝固云图, 如图 3 所示结果显示, 传统渣包温降较大, 凝固量较多, 高温区域主要集中在熔渣中心部分, 温度由内到外依次降低; 渣包外表面最高温度接近 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度较高易引起渣包材料热疲劳, 缩短了渣包使用寿命; 凝固区域主要集中在熔渣上表面-空气、熔渣侧面和底面-包壁接触部分。

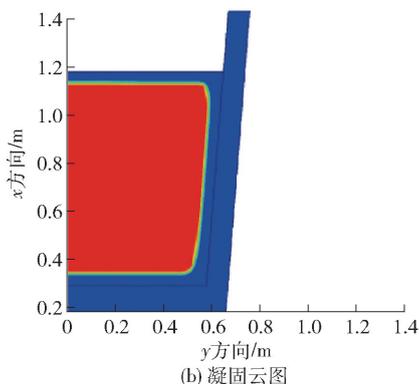
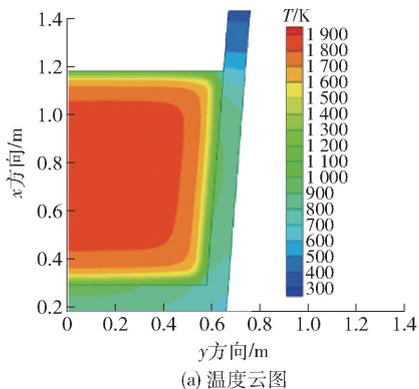


图3 传统渣包转运后温度云图和凝固云图

Fig.3 Temperature cloud map and solidification cloud map of traditional slag bales after transport

图4为传统渣包熔池各监测点温降曲线, 由图可知, 在熔池顶点、侧壁和底部 $0\sim 5\text{ min}$ 内温降趋

势明显, 温降均达到了 200 K , 此后 $5\sim 25\text{ min}$ 内温度下降速度较为缓慢, 但温降达到了 145 K 左右, 并且转运结束后熔渣温度均低于 1650 K , 其中侧壁熔渣监测点 B 温度最低。传统渣包熔渣的大量显热散失到空气中一部分是由于未设置包盖, 熔渣和空气接触直接散失到空气中, 另一部分是由于铸钢材料热导性好, 熔渣热量被铸钢吸收并间接散失到空气中。传统渣包熔渣转运后温度较低, 凝固量较大, 浪费大量的熔渣显热, 不利于熔渣的倾倒在在线重构的顺行。

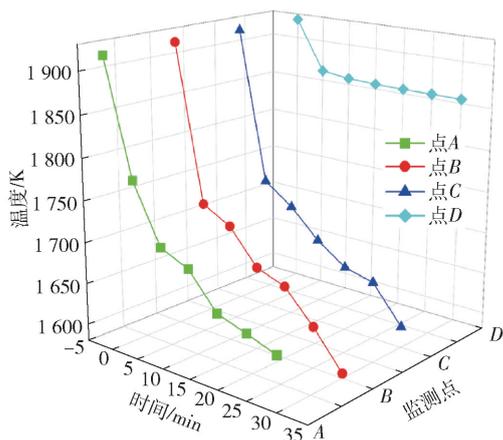


图4 传统渣包的各监测点温降曲线

Fig.4 Temperature drop curve of each monitoring point of traditional slag bag

2.1.2 不同保温层结构温降情况

针对传统渣包存在的问题, 对渣包进行保温层设计以减少熔渣热量散失, 并根据数值模拟结果对保温层的材质和厚度进行优化。

图5是工作层为镁碳砖组合下不同厚度保温层的熔渣各点温降曲线。图5(a)为钢渣进入方案1[#]渣包转运过程中的温降曲线, 可见熔渣顶部、侧壁、底部在 $0\sim 10\text{ min}$ 内温降迅速, 温降速率分别为 19.49 、 20.32 、 20.86 K/min , 此后 $10\sim 20\text{ min}$ 内温度下降减缓, 温降速率分别为 7.40 、 9.21 、 6.35 K/min 。熔渣中心处在 $0\sim 5\text{ min}$ 内温度迅速下降了 45.67 K , 此后 25 min 内熔渣温度由 1877.33 K 缓慢降低到 1870.29 K 。图5(b)为钢渣进入方案2[#]渣包转运过程中的温降曲线, 与图5(a)相比, 整体温降趋势相同, 熔渣顶部 A 点、侧壁 B 点、底部 C 点在 $0\sim 10\text{ min}$ 内温降速率基本相同, 温降速率分别为 19.59 、 20.45 、 20.97 K/min 。熔渣中心 D 处在 $0\sim$

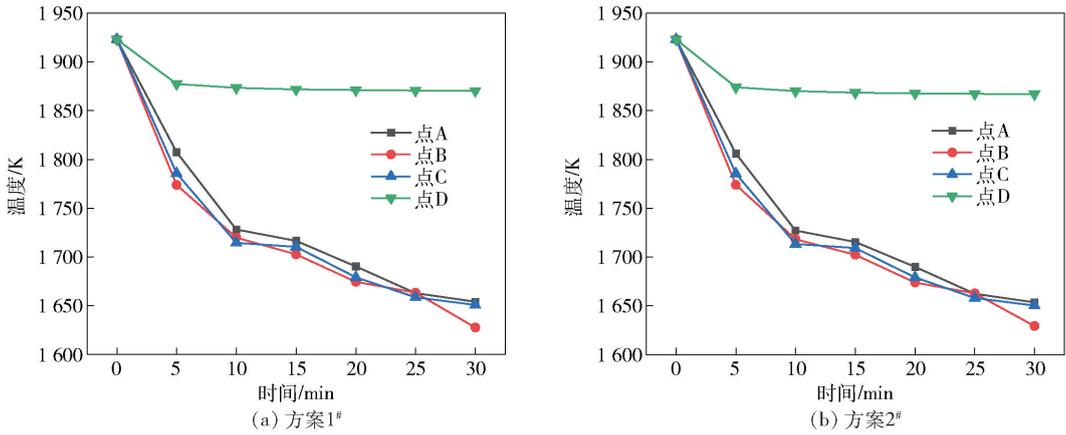


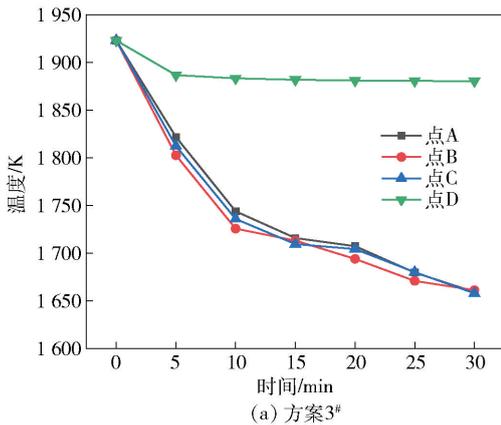
图5 工作层为镁碳砖的各点温降曲线

Fig.5 Temperature drop curves of different thickness working layers with MgO-C Bricks

5 min 内温度下降 49.04 K, 此后 25 min 内熔渣温度由 1 873.96 K 缓慢降低到 1 866.87 K。

对比方案 1# 和 2#, 熔渣各点的温降趋势基本一致, 监测点 A 的温降曲线始终在点 B 和点 C 上方, 原因是渣包壁处于常温状态, 高温钢渣和包壁温差大, 包壁大量吸收熔渣热量, 此外由于渣包具有包盖, 渣包内空气吸收热量散失较少, 空气温度上升, 减少了空气和熔渣的对流换热。方案 2# 熔渣各监测点转运最终温度较方案 1# 相差 0.68、-1.5、0.73、3.42 K。可知方案 2# 熔渣最终温度比方案 1# 低。通过数值模拟证实方案 1# 渣包结构对熔渣保温效果较好。

图 6 是工作层为镁铝尖晶石浇注料组合下不同厚度保温层的各点温降曲线。图 6(a) 为钢渣进入方案 3# 渣包转运过程中的温降曲线, 熔渣顶部、侧壁、底部在 0~10 min 内温降迅速, 温降速率分别为



17.92、19.74、18.72 K/min, 此后 10~20 min 内温度下降减慢, 温降速率分别为 8.47、6.44、7.80 K/min。熔渣中心处在 0~5 min 内温度迅速下降了 36.34 K, 此后 25 min 内熔渣温度由 1 886.65 K 缓慢降低到 1 880.26 K。图 6(b) 为钢渣进入方案 4# 渣包转运过程中的温降曲线, 与图 6(a) 相比, 整体温降趋势相同, 熔渣顶部 A 点、侧壁 B 点、底部 C 点在 0~10 min 内温降速率基本相同, 温降速率分别为 18.00、19.79、18.74 K/min。熔渣中心 D 处在 0~5 min 内温度下降 39.19 K, 此后 25 min 内熔渣温度由 1 883.815 K 缓慢降低到 1 877.37 K。

对比方案 3# 和方案 4# 熔渣各个监测点转运最终温度, 方案 4# 比方案 3# 分别低 0.59、0.57、0.54、2.89 K。可见方案 4# 熔渣最终温度比方案 3# 低。可以认为方案 3# 渣包结构对熔渣保温效果较好。

不同保温材料的各点温降曲线如图 7 所示, 1#、

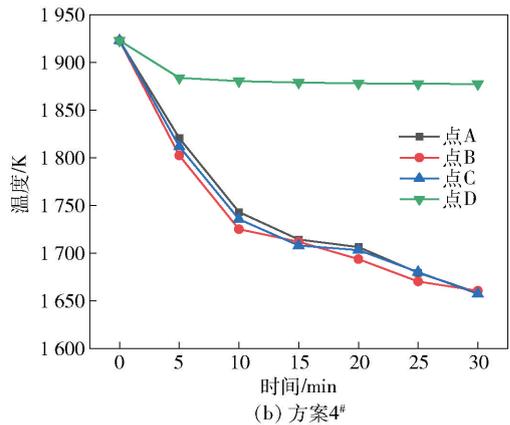


图6 工作层为镁铝尖晶石浇注料的各点温降曲线

Fig.6 Temperature drop curves of different thickness working layers for high alumina spinel castables

2[#]方案为镁碳砖工作层组合,3[#]、4[#]方案为镁铝尖晶石浇注料工作层组合,各保温层厚度见表1。对比各监测点在各保温层厚度相同的渣包内所引起的熔渣温降曲线差异,可见不同材质保温层各检测点温度变化趋势基本相同,熔渣顶部A点、侧壁B点、底部C点在0~10 min内温降迅速,中心D处在0~5 min内温降较迅速。由图7可知,采用镁铝尖晶石

浇注料组合所得的温降曲线优于采用镁碳砖组合,温降速率更低;图7(b)、(d)中镁铝尖晶石浇注料组合在B、D监测点最终温度比镁碳砖组合分别高30、10 K,表明镁铝尖晶石浇注料组合可以有效减少熔融钢渣的温度下降、热量散失,有利于获得较高熔融钢渣显热。

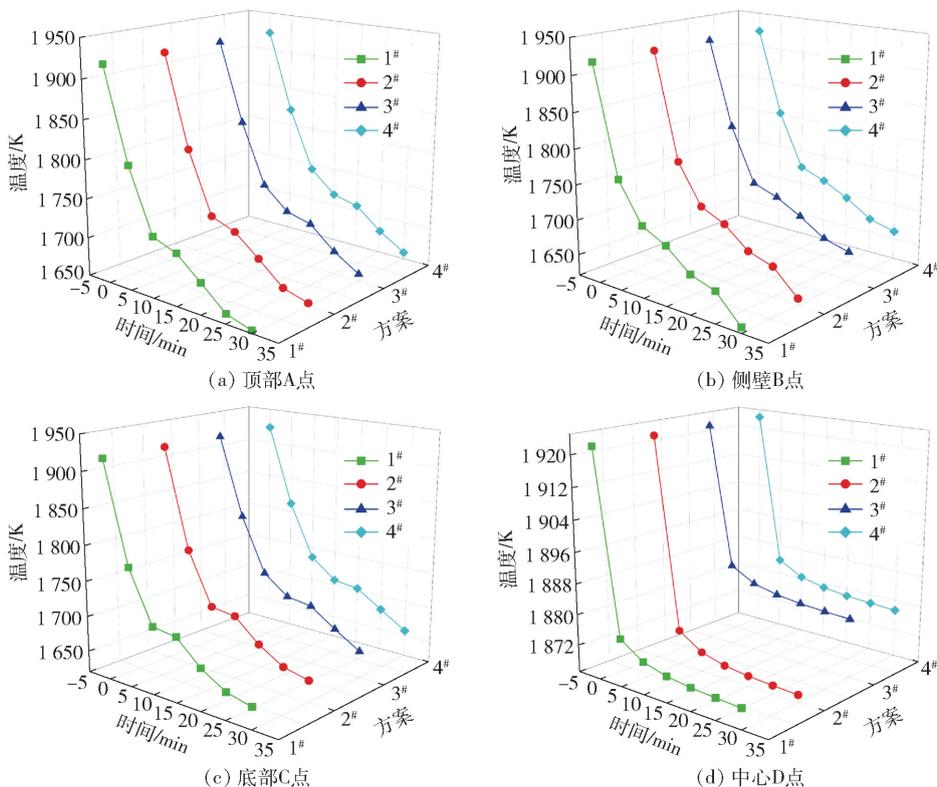


图7 两组厚度相同保温层不同保温材料的各点温降曲线

Fig. 7 Temperature drop curves of different insulation materials with the same thickness of insulation layer

2.2 烘烤渣包制度对熔渣温降的影响

模拟结果表明渣包保温体系对熔渣具有保温效果,可以使熔渣温降和凝固情况得到有效缓解,熔渣在0~10 min温降迅速,后20 min温降趋势有所改善。但常温下的渣包属于冷包,熔渣和包壁初始接触过程中,温差较大,热量交换剧烈,造成熔渣的热量散失,熔渣的部分显热被渣包各保温层吸收,因此常温下的渣包保温结构的保温效果未达到最佳保温状态。

针对上述问题,本文提出保温结构渣包的烘烤预热措施,以达到更好的熔渣保温效果。由于镁铝尖晶石浇注料的工作层组合保温效果比镁碳砖组合更明显,因此对工作层采用设计方案4[#]镁铝尖晶石

浇注料组合的渣包进行变温烘烤模拟,烘烤渣包内壁温度分别为600、800、1 000 ℃。为了得到渣包内壁指定烘烤温度,简化假设,采用稳态计算,对渣包内壁设为所需要的烘烤温度,待计算达到平衡时,继续采用瞬态计算烘烤渣包预热后熔渣转运过程的温降。渣包在各烘烤温度下转运后的温度云图如图8所示。

图8(a)可知,在不烘烤情况下熔渣热量主要被工作层吸收,导致熔渣温降迅速,并且熔渣顶部、侧面和底部温降迅速,降至1 500 K以下,中心处虽然在1 800 K以上,但是温降达到了150 K。烘烤渣包对各保温层进行蓄热,可减少熔渣和渣包内壁的温差,进而减少熔渣因接触面温差大造成的熔渣热

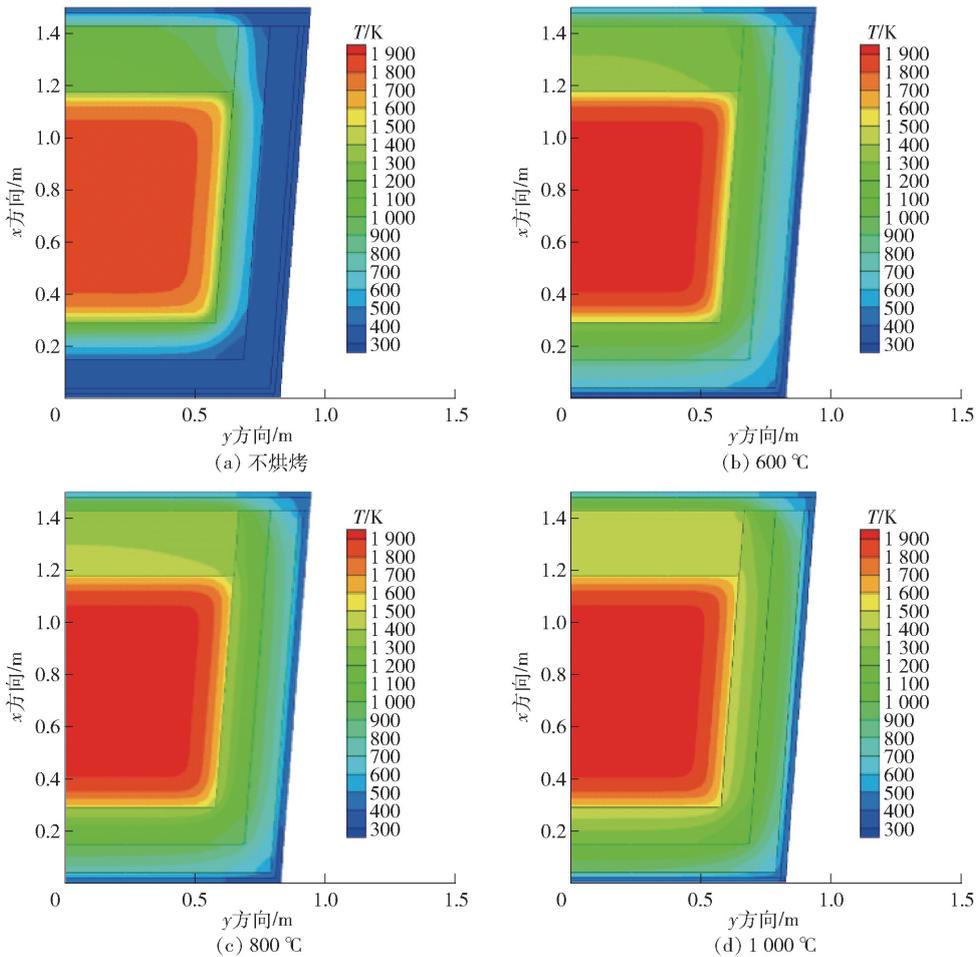


图8 不同温度烘烤下转运后温度云图

Fig. 8 Temperature cloud diagram after transfer under different baking temperatures

量流失,减少熔渣温降。随着烘烤温度的增加,熔渣内部的红色高温区占比逐渐增加,顶部、侧壁、底部黄色和绿色低温区域逐渐缩小,烘烤温度至1 000 °C (图8(d))时仅在渣包顶部和底部边角有少量的黄色(低温)区域。

由图9可知,在不烘烤情况下,熔渣顶部A点、侧壁B点和底部C点在0~15 min内温降迅速,温降速率分别为13.91、14.08、14.34 K/min,后15 min内温降有所降低,在熔渣中心处在0~5 min内温降迅速,温降速率为7.84 K/min,后25 min基本平稳。随着烘烤温度的提升,熔渣在顶部A点、侧壁B点和底部C点温降明显改善,烘烤温度越高温降越平缓。在熔渣中心处由于烘烤对渣包具有一定蓄热量,熔渣中心的温度基本没有降低,顶部、侧壁、底部和中心处在0~15 min内温降改善效果较好。烘烤温度为1 000 °C时,顶部、侧壁和底部前15 min温降

速率分别为4.28、4.29、4.21 K/min,熔渣在各点的温降明显改善,并且随着烘烤温度的增加各点的最终温度提升。

不同温度下渣包的凝固云图见图10。由图10可知,不烘烤时熔渣凝固量较多,随烘烤温度的增加,凝固量逐渐减少;烘烤温度在1 000 °C时,侧壁和底部无凝固,仅在流动死区有少量凝固。

3 成本效益核算

3.1 新渣包保温成本

渣包的耐材成本是工艺运行成本的重要部分,在满足熔渣高显热、少凝固,同时确保安全使用的前提下,降低耐材的使用成本可为冶金钢铁行业创造可观的经济效益。由于渣包砌筑工艺复杂,为便于计算,对比每平方米渣包侧壁所有设计方案的耐材制造成本,计算方法见式(4),结果见表2。

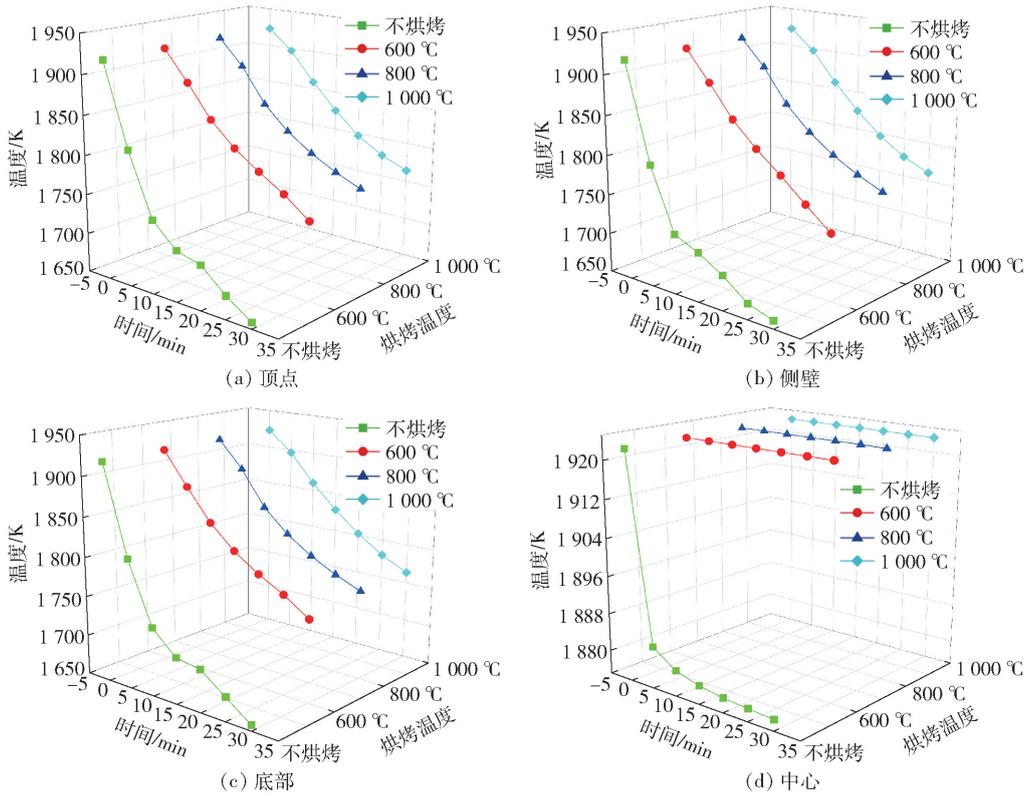


图9 不同烘烤温度下渣包各点温降曲线

Fig. 9 Temperature drop curve of slag ladle at different baking temperatures

表2 每平方米渣包耐材成本

Table 2 Manufacturing cost of slag bag per square meter

保温层	材料	单价	方案1 [#]	方案2 [#]	方案3 [#]	方案4 [#]
工作层	镁铝尖晶石浇注料	9 500 元/t	—	—	5 101	4 081
	镁碳砖	6 800 元/t	3 060	2 448	—	—
永久层	高铝浇注料	4 200 元/t	924	1 270	924	1 207
绝热层	硬质纳米绝热板	220 元/m ²	440	440	—	—
	轻质保温砖	3 元/块	—	—	36	36
总计/(元/m ²)	—	—	4 424	4 158	6 061	5 387

$$K = \sum L_i \rho_i P_i \quad (4)$$

式中: K 为耐材成本, 元; L_i 为耐火材料厚度, m; ρ_i 为耐火材料密度, kg/m³; P_i 为耐火材料单价, 元/t。

由表2可知不同渣包设计方案的耐材成本, 工作层采用镁铝尖晶石浇注料组合的成本高于工作层采用镁碳砖组合的成本, 每平方米价格高1 000 ~ 2 000元。以渣包侧壁监测点B点温降数据为标准, 对比各方案的保温性价比, 结果见表3, 单位成本保温计算式见式(5)。

$$R = \frac{\Delta t_c - \Delta t_i}{K} \quad (5)$$

式中: R 为单位成本保温, °C/元; Δt_c 为传统渣包监测点B熔渣30 min温降, °C; Δt_i 为保温结构渣包监测点B熔渣30 min温降, °C。

3.2 传统渣包耗电成本

由表3可知, 传统渣包温降为337.21 °C, 热能损失为20.44%。传统渣包热量损失较大, 钢渣温降较大, 不利于钢渣在线调质工艺顺利进行, 此外由于材质特性, 传统渣包不能直接用作加热反应容器。

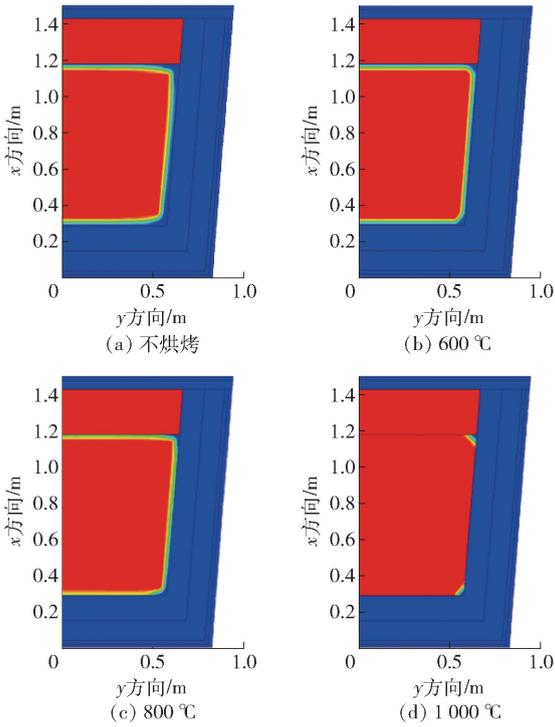


图 10 不同烘烤温度下渣包各点温降曲线
Fig. 10 Temperature drop curve of slag ladle at different baking temperatures

表 3 各个方案保温性价比

Table 3 Insulation cost performance of each scheme

方案	耐材成本/ 元	监测点 B 温降/°C	热能损失/ %	单位成本保 温/(°C/元)
传统	—	337.21	20.44	—
1#	4 424	295.28	17.90	0.009 5
2#	4 158	293.78	17.80	0.010 4
3#	6 061	261.87	15.87	0.012 4
4#	5 387	262.44	15.91	0.013 9

保温结构渣包相对传统渣包优势在于温降小,有效减少熔渣热量流失,回收更多的热能资源,进而节约了加热的能源消耗和成本。传统渣包转运熔渣升至保温结构下熔渣的实际温度需要吸收 7×10^8 J 能量(钢渣按 1 m^3 计算,计算方式见式(6),以电加热为例电能核算需要 195 kW·h 的电能(式(7))。

$$Q = C\rho_g V\Delta T + \rho_g V\Delta H_x \quad (6)$$

式中: Q 为加热吸收热量, J; C 为钢渣比热容, $1 250 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; ρ_g 为钢渣密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; V 为单位体积, m^3 ; ΔT 为传统渣包熔渣升至保温结构下熔

渣的温度, $^\circ\text{C}$; ΔH 为钢渣相变潜热, J/kg ; x 为钢渣凝固占比。

$$W = \frac{Q}{3 600 000} \quad (7)$$

式中: W 为加热需要的电能, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

3.3 效益核算

保温结构渣包中采用镁碳砖组合的(方案 1#、2#)温降在 $293 \sim 295 \text{ }^\circ\text{C}$,热能损失约为 18%,采用镁铝尖晶石浇注料组合(方案 3#、4#)的温降在 $261 \sim 262 \text{ }^\circ\text{C}$,热能损失约为 15%。虽然采用镁铝尖晶石浇注料组合耐火材料成本较高,但采用镁铝尖晶石浇注料组合下熔渣温降更低,热能损失更小。对比单位成本保温镁铝尖晶石浇注料组合更高,其中方案 4#单位成本保温为 $0.013 9 \text{ }^\circ\text{C}/\text{元}$,相对方案 1#单位成本保温 $0.009 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{元}$ 提高了近 0.5 倍。

综上所述方案 4#(镁铝尖晶石浇注料 120 mm、高铝浇注料 110 mm、轻质保温砖 20 mm)有以下优点:①保温效果好,熔渣温降小;②单位成本保温更高,为 $0.013 9 \text{ }^\circ\text{C}/\text{元}$ 。因此方案 4#为不同保温结构的性价比最高的渣包砌筑方案。选择镁铝尖晶石浇注料组合可以减少熔渣热量损失,提高企业经济效益。

4 结论

本文以钢渣处理新工艺为背景,针对熔融钢渣转运过程温降问题,设计了保温结构渣包,并对熔融钢渣转运过程进行数值模拟,分析了不同保温结构、烘烤温度对熔渣转运过程的温度变化规律,讨论了耐火材料成本的影响,得出以下结论。

1)传统渣包温降较大,保温结构渣包可以减少熔渣的温降,相同保温材质不同保温层厚度,熔渣温降效果基本一致,熔渣转运最终温度相差不大。

2)对比工作层为镁铝尖晶石浇注料的组合和镁碳砖的组合温降曲线,在各监测点镁铝尖晶石浇注料组合温度均高于镁碳砖的组合温度,工作层采用镁铝尖晶石浇注料的组合比采用镁碳砖的组合保温效果更好。

3)采用烘烤渣包的方法,前 15 min 内熔渣边缘平均温降速率由 $14.11 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 降低到 $4.26 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,可以减少熔渣温降和凝固,渣包内壁烘烤为 $1 000 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,熔渣全部为熔融状态没有凝固,可以获得较大的熔渣显热。

4) 使用镁铝尖晶石浇注料组合比镁碳砖组合虽然在耐材制造成本大,但在减少熔渣热量流失和单位成本保温方面优异性明显,因此使用保温型渣包设计方案中的方案4[#](镁铝尖晶石浇注料120 mm、高铝浇注料110 mm、轻质保温砖20 mm)可以减少熔融钢渣的热量散失,提高企业经济效益。

[参考文献]

- [1] 张琦, 张薇, 王玉洁, 等. 中国钢铁工业节能减排潜力及能效提升途径[J]. 钢铁, 2019, 54(2):7-14.
ZHANG Qi, ZHANG Wei, WANG Yujie, et al. Potential of energy saving and emission reduction and energy efficiency improvement of China's steel industry[J]. Iron and Steel, 2019, 54(2):7-14.
- [2] ZHANG Hui, WANG Hong, ZHU Xun, et al. A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry[J]. Applied Energy, 2013, 112(4):956-966.
- [3] 杜传明, 于耀辉, 袁磊, 等. 钢渣中磷分离及回收的研究现状和发展趋势[J]. 钢铁, 2020, 55(12):1-9.
DU Chuanming, YU Yaohui, YUAN Lei, et al. Research status and development trend of phosphorus separation and recovery from steel slag[J]. Iron and Steel, 2020, 55(12):1-9.
- [4] 张宇, 张健, 张天有, 等. 钢渣处理与余热回收技术的分析[J]. 中国冶金, 2014, 24(8):33-37.
ZHANG Yu, ZHANG Jian, ZHANG Tianyou, et al. Analysis of steel slag treatment technology and waste heat recovery technology[J]. China Metallurgy, 2014, 24(8):33-37.
- [5] 蔡九菊, 王建军, 陈春霞, 等. 钢铁企业余热资源的回收与利用[J]. 钢铁, 2007, 42(6):1-7.
CAI Jiujū, WANG Jianjun, CHEN Chunxia, et al. Recovery of residual-heat integrated steelworks[J]. Iron and Steel, 2007, 42(6):1-7.
- [6] 郜学, 尚海霞. 中国钢铁工业“十二五”节能成就和“十三五”展望[J]. 钢铁, 2017, 52(7):9-13.
GAO Xue, SHANG Haixia. Energy saving achievements of 12th Five-Year Program and prospect of 13th Five-Year Program for Chinese steel industry[J]. Iron and Steel, 2017, 52(7):9-13.
- [7] 周继程, 郦秀萍, 上官方钦, 等. 钢铁制造流程能源转换机制与能源利用效率分析[J]. 钢铁, 2019, 54(4):73-82.
ZHOU Jicheng, LI Xiuping, SHANGGUAN Fangqin, et al. Energy conversion mechanism and energy efficiency of steel manufacturing process[J]. Iron and Steel, 2019, 54(4):73-82.
- [8] 甄常亮, 于恒, 赵凯, 等. 基于界面技术的钢渣热态转运路径优化[J]. 钢铁, 2021, 56(8):119-124.
ZHEN Changliang, YU Heng, ZHAO Kai, et al. Optimization of hot transfer path of steel slag based on interface technology[J]. Iron and Steel, 2021, 56(8):119-124.
- [9] YING Sun, TIAN Jinrong, DU Jiang, et al. Numerical simulation of thermal insulation and longevity performance in new lightweight ladle[J]. Concurrency and Computation Practice and Experience, 2020, 32(2).
- [10] 韩伟刚, 郦秀萍, 张春霞, 等. 铁水包空包加盖保温效果[J]. 钢铁, 2015, 50(12):91-94.
HAN Weigang, LI Xueping, ZHANG Chunxia, et al. Heat preservation of hot metal ladle by capping[J]. Iron and Steel, 2015, 50(12):91-94.
- [11] ZHANG Limin, ZHU Liguang, ZHANG Caijun, et al. Physical experiment and numerical simulation on thermal effect of aerogel material for steel ladle insulation layer[J]. Coatings, 2021, 11(10):1205-1205.
- [12] 马学东, 蒋全强, 马硕, 等. 320t鱼雷罐铁水温降的有限元计算[J]. 材料与冶金学报, 2015, 14(1):14-17, 35.
MA Xuedong, JIANG Quanqiang, MA Shuo, et al. Finite element computation on molten iron temperature drop of 320 t torpedo ladle[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2015, 14(1):14-17, 35.
- [13] 李辉, 苍大强, 白皓, 等. 溶渣双利用保温容器中动态降温与控温的研究[J]. 工业加热, 2009, 38(6):6-10.
LI Hui, CANG Daqiang, BAI Hao, et al. Research on dynamic cooling and temperature control of dual-use slag in insulation container. Industrial Heating, 2009, 38(6):6-10.
- [14] M F Santos, M H Moreira, M Campos, et al. Enhanced numerical tool to evaluate steel ladle thermal losses[J]. Ceramics International, 2018, 44(11):12831-12840.
- [15] V T Mantripragada, Teja Vishnu, Sarkar, et al. Wall stresses in dual bottom purged steel making ladles-science direct[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 139:335-345.
- [16] 徐国涛, 张美杰, 吴杰, 等. 钢包扩容的结构模拟与应用实践中存在的问题探讨[J]. 耐火材料, 2022, 1-6.
XU Guotao, ZHANG Meijie, WU Jie, et al. Structure simulation of ladle's volume expansion and discussion to the actual questions for application practice[J]. Refractories, 2022:1-6.
- [17] 李公法, 刘泽, 孔建益, 等. 新型钢包的温度场及其影响因素模拟分析[J]. 武汉科技大学学报, 2015, 38(6):401-407.
LI Gongfa, LIU Ze, KONG Jianyi, et al. Simulation analysis of temperature field and its influence factors of the new type ladle[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2015, 38(6):401-407.
- [18] 袁飞, 杨光, 徐安军, 等. 基于不同保温措施下的铁水包热状态模拟分析[J]. 工程科学学报, 2018, 40(1):31-40.
YUAN Fei, YANG Guang, XU Anjun, et al. Thermal state simulation analysis of molten iron ladle based on different insulation measures[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(1):31-40.
- [19] 杨光, 徐安军, 贺东风, 等. 多功能铁水包加盖保温效果分析[J]. 钢铁, 2017, 52(7):96-103.
YANG Guan, XU Anjun, HE Dongfeng, et al. Analysis on heat preservation of multifunctional hot metal ladle[J]. Iron Steel,

2017, 52(7): 96 - 103.

[20] 孟庆新. 钢包外壁热像与内衬厚度之间关系的模拟研究 [D]. 武汉:武汉科技大学, 2007.

MENG Qingxin. Simulation study of the relationship between thermal image on outside shell and inner lining thickness of ladle [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,

2007.

[21] 王淼. 新型耐火材料改善钢包热特性的研究 [D]. 沈阳:东北大学, 2017.

WANG Miao. Study on improvement of thermal properties of ladle with new refractory materials [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.

Influence of wall structure on thermal insulation performance of slag ladle and its effect evaluation

SUN Lei, ZHANG Yuzhu, ZHEN Changliang, ZHAO Kai

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: In order to realize the efficient utilization and recovery of molten steel slag waste heat resources and element resources, aiming at the problem of temperature drop caused by heat loss during slag transportation, a two-dimensional heat transfer model of slag-clad interface was established by numerical simulation. The effects of changing the insulation structure of slag cladding and the temperature of baking slag ladle on the temperature drop and insulation effect of slag during slag transportation were studied, and the economic analysis of insulation cladding structure was further carried out. The results show that compared with the traditional slag ladle, the temperature drop of slag can be significantly reduced by using the insulation wall structure, and the slag temperature drop decreased by 42 ~ 75 °C. The insulation effect of magnesia-alumina spinel castable combination in slag ladle working layer is more obvious than that of magnesia-carbon brick combination, and the temperature drop is reduced by 30 °C. The average temperature drop rate of slag edge decreased from 14.11 °C/min to 4.26 °C/min after preheating of baking slag ladle. The economic analysis results of heat preservation effect of different wall structures show that When the magnesia alumina spinel castable is 120 mm, the high alumina castable is 110 mm, and the lightweight insulation brick is 20 mm are used in slag ladle wall, the economy of heat preservation effect is the best, which can save 195 kW·h electric heating, and is beneficial to realize efficient recovery and utilization of slag heat.

Key words: slag ladle; slag; refractory material; numerical simulation; heat preservation

2022 年我国锂离子电池行业产值突破 1.2 万亿元

2月23日,工业和信息化部官网发布消息,2022年我国锂离子电池行业总产值突破1.2万亿元。

2022年,我国锂离子电池行业坚持供给侧结构性改革,加快技术创新和转型升级发展,不断提升先进产品供给能力,总体保持快速增长态势。根据行业规范公告企业及研究机构测算,2022年,全国锂离子电池产量达到750GWh,同比增长超过130%。其中,储能型锂电产量突破100GWh;正极材料、负极材料、隔膜、电解液等锂电一阶材料产量分别约为185万吨、140万吨、130亿平方米、85万吨,同比增长均达60%以上。

锂离子电池产业主要指标的增长,与新能源汽车等产业快速发展紧密相关。2022年,锂电在新能源汽车领域以及风光储能、通信储能、家用储能等储能领域加快兴起并迎来增长窗口期。2022年,全国新能源汽车动力电池装车量约295GWh,储能锂电累计装机增速超过130%;2022年,全国锂电出口总额3426.5亿元,同比增长86.7%,为新能源高效开发利用和全球经济社会绿色低碳转型作出了积极贡献。

(资料来源:中国有色金属报)