

提高方坯优质碳素结构钢连浇过程中包温度的稳定性

龚磊¹, 孙波², 朱勇², 王尚¹, 熊磊¹, 孔磊¹

¹马鞍山钢铁股份有限公司特钢公司, 安徽 马鞍山

²马鞍山钢铁股份有限公司长材事业部, 安徽 马鞍山

收稿日期: 2022年7月5日; 录用日期: 2022年8月1日; 发布日期: 2022年8月8日

摘要

在生产牌号为20#~70#的钢种中, 中包钢水过程温度波动性较大。对钢水中包过程温度极差值超过范围的炉次从其精炼过程、温度、浇注、节点等方面进行分析, 找出影响浇注过程前期和后期中包温度波动较大的主要因素。通过减少过程温降、优化钢水罐使用、改进精炼炉造渣等措施使方坯优质碳素结构钢连浇过程中包温度的稳定性大幅度提高, 有利于铸坯质量的稳定提高, 降低冶炼成本15.96元/t, 效益明显。

关键词

温降, 导热系数, 热等级, 碱度

To Improve the Stability of Ladle Temperature during Continuous Casting of High Quality Carbon Structural Steel Billet

Lei Gong¹, Bo Sun², Yong Zhu², Shang Wang¹, Lei Xiong¹, Lei Kong¹

¹Special Steel Company, Ma'an Shan Iron and Steel Co. Ltd., Ma'an Shan Anhui

²Department of Long Products, Ma'an Shan Iron and Steel Co. Ltd., Ma'an Shan Anhui

Received: Jul. 5th, 2022; accepted: Aug. 1st, 2022; published: Aug. 8th, 2022

Abstract

In the production of steel grade 20#~70#, the temperature fluctuation of the tundish molten steel

文章引用: 龚磊, 孙波, 朱勇, 王尚, 熊磊, 孔磊. 提高方坯优质碳素结构钢连浇过程中包温度的稳定性[J]. 冶金工程, 2022, 9(3): 155-161. DOI: 10.12677/meng.2022.93020

process is large. The furnaces with a temperature range exceeding the range in the ladling process were analyzed from the aspects of the refining process, temperature, pouring and node, and the main factors affecting the large temperature fluctuation in the tundish at the early and late stages of the pouring process were found out. By reducing the temperature drop in the process, optimizing the use of the molten steel tank and improving the slag formation of the refining furnace, the stability of the ladle temperature in the continuous casting process of the high-quality carbon structural steel of the billet was greatly improved, which was beneficial to the stable improvement of the quality of the billet, and the smelting cost was reduced by CNY 15.96/t, with obvious benefits.

Keywords

Temperature Drop, Thermal Conductivity, Thermal Rating, Alkalinity

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着钢铁市场竞争日益激烈，资源、能源价格逐步上涨，在提高产品质量的前提下，挖潜增效、节能降耗已成为钢铁企业科技进步和可持续发展的必然选择[1] [2] [3] [4] [5]。方坯优质碳素结构钢是工业常用钢的一种，其表示方法为钢号开头的两位数字表示钢的碳的质量分数，以平均碳的质量分数的万分几表示[6]。某钢厂对生产牌号为 20#~70# 的钢种的中包温度单炉极差值进行了统计，极差均值为 11.74℃，其中在[0℃, 12℃]范围的比例为 61.7%，表明中包钢水过程温度波动性较大。因此对生产过程及工艺进行优化，以达到提高方坯优质碳素结构钢连浇过程中包温度的稳定性，降低吨钢冶炼成本的目的。

2. 主要影响因素分析

2.1. LF 炉出站温度到中包第一个温度的温降

从表 1 可以看出在不同极差范围内，从 LF 炉出站温度到中包第一个温度的温降有所差异。中包浇注过程温度极差值大的炉次，其该温降值或速率也偏大，表明中包浇注过程温度波动与出站至中包温降速率有关。

Table 1. Analysis of outlet temperature and temperature drop and rate of LF furnace

表 1. LF 炉出站温度与温降及速率的分析

温降(℃)	极差范围		温降速率(℃/min)	极差范围	
	[0, 12]	>12		[0, 12]	>12
平均值	33	35	平均值	1.8	1.9
最小值	20	18	最小值	0.8	0.8
最大值	49	52	最大值	4.1	4.5

对中包浇注过程取 4 个温度值，分别为大包剩余 100 吨钢水时对中包测温定义为温度 1、大包剩余

70 吨钢水时对中包测温定义为温度 2、大包剩余 30 吨钢水时对中包测温定义为温度 3、大包剩余 0 吨钢水时对中包测温定义为温度 4。从表 2 可以看出, 中包温度 1~温度 2 一般处于升温, 约升高 3℃, 从温度 2 开始进入降低阶段, 尤其是温度 3~温度 4 阶段, 降低值偏大, 对于统计的极差值 > 12 的炉次, 其该阶段温降值尤其突出, 达到 13℃。因此如何减小钢水浇注后期温降是要解决问题的关键之一。

Table 2. Temperature change in tundish pouring stage

表 2. 中包浇注阶段温度变化

温度阶段	温度 1~温度 2	温度 2~温度 3	温度 3~温度 4	温度 2~温度 4	温度 1~温度 4
平均值	升高 3℃	降低 5℃	降低 7℃	降低 10℃	降低 9℃

2.2. LF 炉出站至大包开浇的时间

从表 3 可以看出中包温度过程极差不同范围对应的钢水出站到大包开浇时间有一定差异, 但二者没有明显对应性, 且占比相当。目前钢水出站到大包开浇时间平均 20 分钟。表明 LF 炉出站至大包开浇的时间控制正常, 对中包温度波动即极差值影响不明显。

Table 3. Analysis of casting time and range from outgoing station to ladle of LF furnace

表 3. LF 炉出站至大包开浇时间与极差范围的分析

出站 - 大包开浇的时间(min)	极差范围	
	[0, 12]	>12
平均值	19.5	20.3
最小值	10	6
最大值	35	41
时间 > 20 分钟的占比	47%	51%

2.3. LF 炉处理周期

从表 4 中可以看出 LF 精炼炉平均处理周期为 90 分钟, 且有 41%的炉次平均处理周期 > 90 分钟, 处理周期与极差范围无明显对应关系, 即表明 LF 炉处理周期控制正常, 对中包温度波动即极差值影响不明显。

Table 4. Analysis of LF furnace treatment cycle and range

表 4. LF 炉处理周期与极差范围的分析

LF 炉处理周期	极差范围		
	[0, 12]	>12	>0
平均值	89	91	
最小值	46	53	
平均值(总)			90
时间 > 90 分钟的占比	39%	43%	
合计			41%

2.4. 大包浇注周期

从表 5 中可以看出极差较大的炉次的浇注平均浇注周期约 60 分钟，极差较小炉次则为 57 分钟。主要原因是因为流数不足或拉速偏低造成的，属于生产异常状况，与出站钢水温度控制无明显对应性。

Table 5. Analysis of casting period and range of large ladle
表 5. 大包浇注周期与极差范围的分析

大包浇注周期(min)	极差范围	
	[0, 12]	>12
平均值	57	60

2.5. 钢罐等级

通过对不同钢罐等级对应的炉次的温降极差值的统计分析发现(见表 6、表 7)，中包过程温降极差与钢水罐等级的关系如下：① 在同一等级钢罐类别统计条件下，A 类钢罐生产的炉次极差值 > 12℃ 的占比为 37%，D 类及 B + C + D 类钢罐生产的炉次极差值 > 12℃ 的占比为 44%；② 在同一极差统计范围条件下，极差[0, 12]的炉次，D 类及 B + C + D 类钢罐占比 12%、19%，极差 > 12℃ 的炉次，D 类及 B + C + D 类钢罐占比 15%、24%。即钢罐热等级较好，发生温降极差大的概率低。要针对钢罐的使用制定相应的措施。

Table 6. Analysis of casting period and range of large ladle (same level)
表 6. 钢罐热等级与极差范围分析(同等级)

钢罐等级影响分析	极差范围		占比
	[0, 12]	>12	
A 类	60	35	37%
B 类	1	1	50%
C 类	4	3	43%
D 类	9	7	44%
B + C + D 类	14	11	44%

Table 7. Analysis of thermal grade and range range of steel tank (same range)
表 7. 钢罐热等级与极差范围分析(同极差)

钢罐等级影响分析	极差范围	
	[0, 12]	>12
D 类/总炉数	12%	15%
(B + C + D 类)/总炉数	19%	24%

2.6. 中包拉速

通过对中包浇注拉速进行统计，将当炉 6 个流的拉速累加值与浇注过程温降极差进行分析，发现存在如下关系：① 中包温降极差在[0, 12]范围的中包浇注总拉速平均值为 12.6 m/min，高于中包温降极差

在 >12 范围的中包浇注总拉速平均值为 12.1 m/min ; ② 在同一极差统计范围条件下, 极差 $[0, 12]$ 的炉数中, 总拉速低于平均值的炉数占比 34% , 而在极差 >12 的炉数中, 总拉速低于平均值的炉数占比 63% 。即表明中包浇注拉速与温降极差对应关系; 中包浇注总拉速低, 发生温降极差值偏大的概率大。

2.7. 精炼炉造渣情况

优质碳素结构钢精炼渣系主要成分是以 CaO 和 SiO_2 为主的酸性玻璃态熔渣, 其碱度一般在 $0.9\sim 1.3$ 之间, 2020 年某钢厂优质碳素结构钢精炼终渣平均碱度为 1.04 。熔渣的熔化温度和粘度在碱度 R 为 1 左右时最小, 熔渣流动性最小[7], 导热系数最大, 导热性最好[8] (见图 1)。大包上部钢水由于不断通过渣层辐射散热, 钢水温度较低, 浇铸后期(大包 30 t 以后)中包温度温降速度较快, 造成中包温度后期温降较大, 平均约为 10°C 。为了提高渣层的保温性, 可适当提高精炼终渣碱度和终渣量。

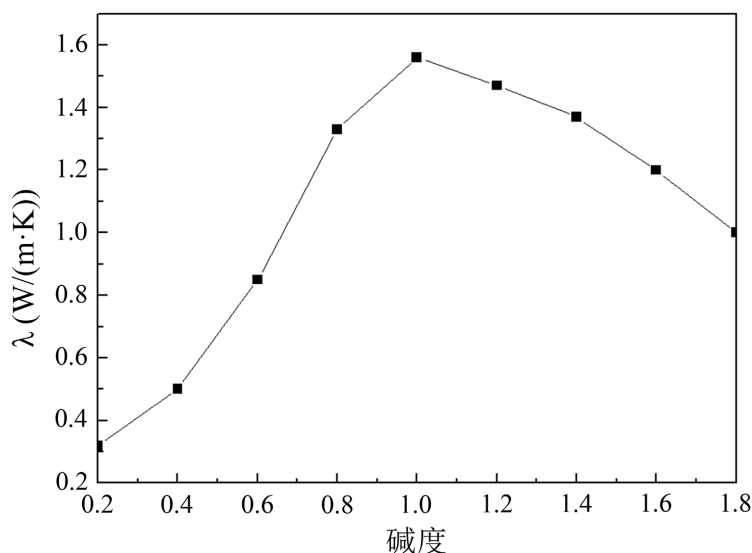


Figure 1. Relationship curve between slag thermal conductivity and alkalinity

图 1. 熔渣导热系数与碱度的关系曲线

3. 应对措施

3.1. 减少过程温降

钢水出站时, 在钢渣面加入大包覆盖剂, 降低钢水过程温度损失。

3.2. 优化钢水罐使用

- 1) 提前根据优碳钢生产计划, 调整在线钢水罐的包龄结构, 使用包龄偏小的钢罐。
- 2) 优先将计划用于优碳钢的钢水罐, 参与前一浇次方坯直上钢种的生产, 保证钢水罐的洁净度及热连用等级。
- 3) 钢水罐在线周转时, 归位钢罐在吹氩站根据时间节点, 进行在线烘烤保温。
- 4) 针对优碳钢对钢罐内衬侵蚀加剧的情况, 尤其是渣线部位侵蚀较严重, 生产优碳钢的钢罐罐龄按照 1.5 次进行折算, 钢罐运行正常。

3.3. 精炼炉造渣优化

针对优碳钢精炼终渣碱度为 1.04 时, 渣层稀薄, 为透明的玻璃渣, 熔渣导热系数最大, 导热性最

好,造成大包上部钢水由于不断通过渣层散热而温度较低,浇铸后期(大包 30 t 以后)中包温度温降较大,为了提高渣层的保温性,且在合适的渣系范围内,对优碳钢精炼终渣系进行了适当调整,适当提高了精炼终渣碱度和终渣量,并与调整前精炼造渣过程进行对比分析,调整前后精炼终渣成分和过程渣料如表 8 所示。

Table 8. Comparison of composition of refining slag and additive of process slag before and after adjustment
表 8. 调整前后精炼终渣成分和过程渣料加入对比

优碳钢	出钢渣料/kg		精炼过程渣料/kg		总渣量/kg		精炼终渣成分/%			
	硅灰石	电石	石灰	硅灰石	电石	Σ	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	碱度 R
调整前	1491	170	401	241	46	2349	38.09	6.47	39.27	1.04
调整后	1499	170	967	300	47	2983	46.97	6.1	36.99	1.27

调整前的精炼终渣渣样为流动性好、稀薄的玻璃渣,碱度较低为 1.04,根据渣样成分和 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 三元相图,其熔化温度约为 1380℃,粘度约为 1.2 Pa·s,熔化温度和粘度均较低,导热系数较大,约为 1.56 W/(m·K),钢水通过渣层散热较多;调整后的精炼终渣渣样为流动性较好的偏白渣,碱度为 1.27,碱度有所提高,熔化温度约为 1400℃,粘度约为 5.0 Pa·s,精炼终渣熔化温度和粘度均有所提高,导热系数减小约为 1.44 W/(m·K),提高了渣层的保温性能。

此外,调整后的总渣量也较调整前多了约 634 kg,渣层厚度相对增厚,进一步提升渣层的保温性能,有利于减少浇铸过程大包钢水的温降。调整前后精炼终渣状态颜色如图 2 所示。



Figure 2. Color of final slag state before and after adjustment
图 2. 调整前后精炼终渣状态颜色

精炼渣系调整前后,对优碳钢钢水浇铸过程中包温降极差值进行对比统计,统计结果如表 9 所示,调整渣系后,钢水浇铸过程中包温度极差基本在 10℃ 以内,极差均值为 5.7℃,极差 ≤ 12℃ 比例约为 82%,相比调整前(1~4 月份)极差均值为 11.7℃,极差 ≤ 12℃ 比例约为 62%有较大幅度进步。

钢的纯净度主要受非金属夹杂物的影响,非金属夹杂物破坏了钢的连续性和致密性,对钢的产品质量将会带来极大的危害[9]。考虑到渣系调整可能对夹杂产生影响,对后道工序产品性能参数情况进行跟踪了解,其中延伸率、抗拉强度、脱碳层、面缩率等指标未反馈异常。

Table 9. Statistics of temperature range of refined slag system high carbon steel
表 9. 精炼渣系优碳钢中包温度极差统计

优碳钢	中包温度极差			
	均值	最大	最小	≤12℃比例
调整前	11.7	24	2	62%
调整后	5.7	15	2	82%

4. 应用效益

该效益由两部分组成,分别为中包温降减少带来的 LF 炉出站温度降低、大包提前转钢水带来的损失,其中 LF 炉出站温度降低可分成电量消耗降低和电极消耗降低来计算。① 2020 年方坯优质碳素结构钢生产数据 LF 炉钢水出站平均温度 1564.8℃,2021 年 LF 炉平均出站温度为 1560.4℃,按照吨钢升温 1℃消耗电能 0.5 kWh/t·℃,电能费用按 0.5 元/kWh 计,则温降减少带来的电耗节约费用为:温降值(4.4℃)×0.5 kWh/t·℃×0.5 元/kWh=1.1 元/t。② 钢水升温电极消耗约 7 g/kWh (折合 0.007 kg/kWh),吨钢升温 1℃电耗为 0.5 kWh/t·℃,精炼炉出站平均出站温度降低了 4.4℃,电极平均价格为 45,000 元/t (折合 45 元/kg),电极消耗节约费用:0.007 kg/kWh×0.5 kWh/t·℃×45 元/kg×温降值(4.4℃)=0.693 元/t。即 LF 炉出站温度降低带来效益 1.80 元/t。③ 根据统计,2020 年合计生产 120 炉,累计转钢水 204 吨,平均转钢水 1.7 吨/炉,钢水与铸坯的差价按照 1000 元/t,即可测算出该部分产生的效益=1.7 t/120t×1000 元/t=14.16 元/t。两项合计可节约成本 15.96 元/t。

5. 结论

从降低钢水中包过程温度极差出发,通过减少过程温降、优化钢水罐使用、改进精炼炉造渣等措施,使方坯优质碳素结构钢连浇过程中包温度的稳定性大幅度提高。保证铸机低过热度恒速拉钢,提高铸坯质量的稳定性,降低冶炼成本 15.96 元/t,效益明显。对其他钢铁企业具有良好的借鉴和推广意义。

参考文献

- [1] 卢鑫,白皓,赵立华,等. 钢铁企业能源消耗与 CO₂ 减排关系[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(12):1445-1452.
- [2] 丁毅,陈光,李莉,等. 钢铁企业能源流管理模型与系统架构探讨[J]. 钢铁, 2012, 27(10): 87-91.
- [3] 张琦,蔡九菊,沈峰满,等. 钢铁企业系统节能减排过程集成研究进展[J]. 中国冶金, 2011, 21(1): 3-6.
- [4] 彭岩,曹先常,张玉柱. 钢铁典型工序流程节能技术新进展[J]. 中国冶金, 2017, 27(5): 8-12.
- [5] 张春霞,王海风,张寿荣,等. 中国钢铁工业绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁, 2015, 50(10): 1-7.
- [6] 张博学,王宝华,刘玉伟,等. 提高优质碳素结构钢纯净度的研究[C]//河北省 2011 年炼钢连铸生产技术与学术交流会论文集. 石家庄: 河北省炼钢连铸生产技术与学术交流会, 2011: 131-153.
- [7] 德国钢铁工程师协会. 渣图集[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
- [8] 万爱珍,张羨夫. 碱度对熔渣导热系数的影响[J]. 河北理工学院学报, 2001, 23(1): 18-20.
- [9] 马学刚,张爱民,孙俊生. 转炉生产低合金钢的纯净度研究[J]. 物理测试, 2005, 23(1): 14-16.