

灰铸铁铁水炉前浇包内补碳工艺研究

李婕, 张行河, 王鹏, 廉贞松, 李月锋, 鲍俊敏

(潍柴(潍坊)材料成型制造中心有限公司, 山东 潍坊 261000)

*通讯作者: 鲍俊敏, 女, 高级工程师, 硕士研究生。E-mail: junmin00102003@163.com

摘要: 本文研究了中频感应电炉生产灰铸铁铁水的炉前浇包内补碳工艺。为保证浇包内铁水碳含量满足与原铁水 $\pm 0.050\%$ 差值稳定性的要求, 按照 2-5 包铁水 0.020%碳烧损率, 增碳剂 60%吸收率的方案实现了铁水炉前包内补碳。结果表明, 包内补碳工艺可以满足浇包内铁水碳含量的稳定性, 保障包内铁水碳含量与原铁水碳含量的差值在 $\pm 0.050\%$ 范围内; 并且可以包容出火重量($\pm 100\text{kg}$)对增碳剂吸收率的影响。

关键词: 灰铸铁; 气缸体; 碳含量; 吸收率

Research on Carbon Replenishment in Ladle at the Furnace Tapping Point for Gray Iron

LI Jie, ZHANG Xing-he, WANG Peng, LIAN Zhen-song, LI Yue-feng, BAO Jun-min
(Weichai Material Forming and Manufacturing Center Co., Ltd, Weifang 261000, China)

Abstract: This study focused on the carbon replenishment process applied to gray iron molten iron in the ladle at the furnace tapping point of a medium-frequency induction furnace. To ensure that the carbon content in the ladle meets the stability requirement of a $\pm 0.050\%$ deviation from the original molten iron, carbon additives were introduced into the ladle based on a carbon loss rate of 0.020% (observed in 2-5 batches of molten iron) and a carbon absorption efficiency of 60%. The results demonstrate that this ladle-based carbon replenishment process effectively stabilizes the carbon content within the $\pm 0.050\%$ target range. Furthermore, it accommodates the influence of tapping weight variations ($\pm 100\text{ kg}$) on the carbon absorption rate.

Key words: gray iron; cylinder block; carbon content; absorption

1 前言

灰铸铁件因其高强度、良好的热稳定性、出色的减震性等优势, 在发动机市场上始终保持高认可度。随着行业技术的持续发展, 铸件质量成为市场的关注焦点^[1]。铁水凝固过程中易在热节等部位产生缩松缺陷, 对铸件质量存在恶劣影响^[2,3]。而铁水碳含量对灰铁铸件的凝固收缩倾向存在显著影响: 凝固初期, 过高的碳含量促使石墨化提前发生, 阻碍液态金属的正常补缩通道, 凝固结束后易形成缩松; 铁水碳含量过低会增大其凝固收缩倾向, 易使铸件出现缩松缺陷^[4,5]。因此, 稳定铁水的碳含量对保障铸件的质量具有重要意义。

笔者公司使用 12 吨中频感应电炉熔炼铁水, 每炉产出五包铁水, 出火过程中存在铁水碳含量烧损的情况, 故采用炉内升温补碳工艺保障浇包内铁水

的碳含量在工艺要求范围内: 根据浇包内铁水温度情况, 炉内剩余 3 包/2 包/1 包铁水时在电炉内加入增碳剂进行升温。随机抽取目前炉内补碳工艺下 10 炉铁水碳含量数据, 并统计出火的五包铁水与电炉原铁水碳含量最大差值, 如图 1 所示。抽查的数据显示包内铁水与原铁水碳含量最大差值均为负值, 且最大差值达到了 -0.091% , 超出与原铁水碳含量 $\pm 0.050\%$ 差值稳定性的要求, 说明铁水熔炼结束至出火结束过程中碳烧损情况严重。电炉内铁水在出火过程中氧化生成的釉渣随铁水位的降低难以扒除, 对增碳剂的吸收存在不利影响, 易导致浇包内铁水碳含量不稳定。为保证浇包内铁水碳含量的稳定性, 笔者公司对铁水炉前包内补碳工艺进行研究, 讨论了其对铁水碳含量稳定性及增碳剂吸收率的影响。

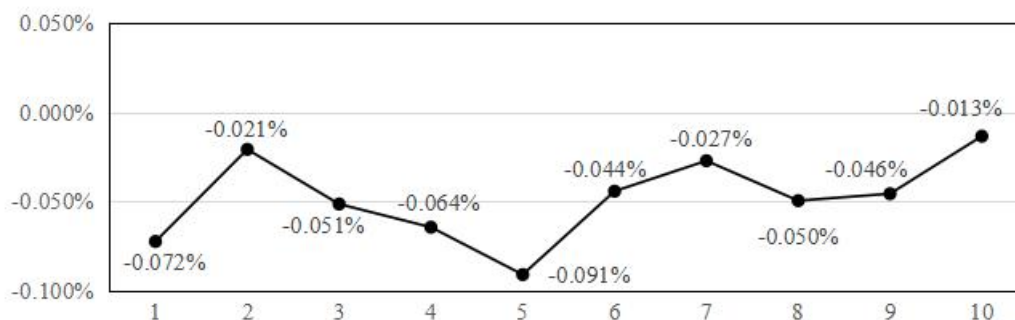


图 1 包内铁水与原铁水碳含量最大差值统计—炉内补碳工艺

Fig.1 Statistics Chart of the Maximum Difference in Carbon Content between the Molten Iron in the Ladle and the Original Molten Iron-Carbon Supplementation Process Inside the Furnace

2 试验

为保障铁水碳含量的稳定性，改善增碳剂的吸收率，笔者公司进行铁水炉前包内补碳试验，使用 HORIBA EMIA-820V2 型碳硫仪检测铁水的碳含量。首先针对铁水碳含量的烧损情况进行了炉前碳烧损率试验，试验过程不通过任何方式对铁水进行补碳操作。试验过程数据及结果如表 1 所示。

其中，包_n碳烧损率=包_n碳含量-包_{n-1}碳含量，

2≤n≤5。

针对碳烧损率试验数据，考虑第 1 包铁水在出火过程中的氧化烧损程度较小，因此针对 2-5 包铁水进行包内补碳，并控制出火重量满足 2200±50kg 进行炉前包内铁水补碳试验，设计表 2 所示试验方案。炉前包内铁水补碳试验过程数据及结果如表 3 所示，其中，

$$\text{增碳剂吸收率} = \frac{(\text{包内实际碳含量} - \text{包内理论烧损后碳含量}) \times \text{出火重量}}{\text{补碳重量}}$$

表 1 碳烧损率试验数据

Tab.1 Data of the Carbon Burn-off Quantity

	原铁水	包 1	包 2	包 3	包 4	包 5
碳含量/wt. %	3.278%	3.276%	3.248%	3.217%	3.190%	3.150%
出火重量/kg		2201	2209	2240	2221	2174
碳烧损率		0.002%	0.028%	0.031%	0.027%	0.040%

表 2 铁水炉前包内补碳工艺试验方案

Tab.2 Experimental Protocol of the Carbon Replenishment in Ladle at the Furnace Tapping Point

方案	理论增碳剂吸收率	第 2-4 包碳烧损率	第 5 包碳烧损率
1	40%	0.030%	0.040%
2	60%	0.030%	0.040%
3	60%	0.020%	0.020%

表 3 铁水炉前包内补碳工艺试验过程数据

Tab.3 Data of the Verification of the Carbon Replenishment in Ladle at the Furnace Tapping Point

方案	试验	原铁水	包 2	包 3	包 4	包 5
1	一	补碳重量/kg	1.65	3.30	4.95	7.15
		碳含量/wt. %	3.702%	3.712%	3.701%	3.697%
		出火重量/kg	2216	2220	2219	2225
		出火时长/s	59	63	69	54
		增碳剂吸收率	53.72%	39.69%	38.10%	46.30%
	二	补碳重量/kg	1.65	3.30	4.95	7.15
		碳含量/wt. %	3.271%	3.291%	3.307%	3.334%
		出火重量/kg	2226	2208	2213	2237
		出火时长/s	73	79	81	86
		增碳剂吸收率	67.45%	66.01%	69.92%	58.38%
2	三	补碳重量/kg	1.15	2.25	3.35	4.90
		碳含量/wt. %	3.300%	3.327%	3.334%	3.341%
		出火重量/kg	2159	2269	2262	2281
		出火时长/s	51	60	61	59
		增碳剂吸收率	107.01%	94.79%	88.45%	80.07%
	四	补碳重量/kg	0.74	1.48	2.20	3.00
		碳含量/wt. %	3.280%	3.277%	3.302%	3.295%
		出火重量/kg	2379	2058	2108	2358
		出火时长/s	78	53	82	71
		增碳剂吸收率	54.65%	86.21%	71.86%	69.95%

3 试验结果及分析

3.1 铁水碳烧损情况及影响因素分析

表 1 铁水碳烧损率的数据表明, 第 1 包铁水在出火过程中的氧化烧损程度较小, 仅 0.002%, 2-4 包铁水的碳烧损率在 0.030%左右、第 5 包铁水的碳烧损率最高, 达到 0.040%。最后一包铁水的碳烧损率程度最高与电炉内铁水量骤减有关, 炉内剩余一包铁水保温时, 铁水在电炉内受到的电磁感应作用更剧烈, 翻涌程度更强烈, 与空气的接触面积增大, 氧化程度变高, 导致碳烧损率增大。

一般来说, 出火温度和出火速度对铁水中碳含量的烧损均存在影响: 出火温度的升高和出火速度的减慢均会导致铁水碳烧损率增大。在高温下, 铁水中碳原子的活性增强, 更容易发生氧化反应, 使铁水的碳烧损率变高。而出火速度直接影响出火时长, 随着出火时长的延长, 铁水暴露在空气中的时间更久, 被氧化的程度更高, 碳烧损率更大。

3.2 增碳剂吸收率情况及影响因素分析

目前, 高碳铁水包内补碳时增碳剂的吸收率在 40%左右。所以为保障生产灰铸铁时浇包内铁水碳

含量的稳定性, 根据包内铁水碳烧损率的试验结果, 采用方案 1 对 2-4 包铁水按照 0.030%碳烧损率、第 5 包铁水按照 0.040%碳烧损率, 均按照 40%增碳剂吸收率进行炉前包内铁水补碳试验, 数据结果如表 3 试验一和试验二所示。使用高碳铁水进行试验时, 如试验一所示, 增碳剂的吸收率在 40%左右, 且根据图 2 所示包内铁水与原铁水碳含量差值, 包内铁水与原铁水碳含量的差值均在 $\pm 0.050\%$ 范围内, 满足碳含量稳定性的要求; 而使用低碳铁水进行试验时, 如试验二所示, 包内铁水与原铁水碳含量的差值超出 $\pm 0.050\%$ 范围, 不满足碳含量稳定性的要求, 并且每包铁水的增碳剂吸收率均大于 40%, 最高达到了 69.92%。

认为上述现象一方面受原铁水碳含量的影响, 试验一原铁水的碳含量远高于试验二, 有研究表明, 铁水的碳含量越低, 增碳剂的吸收率越高^[6]。此外, 试验二的出火时长普遍高于试验一, 认为出火时长对增碳剂的吸收率也存在影响: 较长的出火时长使增碳剂得到了充分地搅拌, 有利于增碳剂的溶解与扩散。实验二增碳剂的吸收率高于理论值, 可以认为出火时长对增碳剂吸收率的影响大于对铁水碳烧损率的影响。

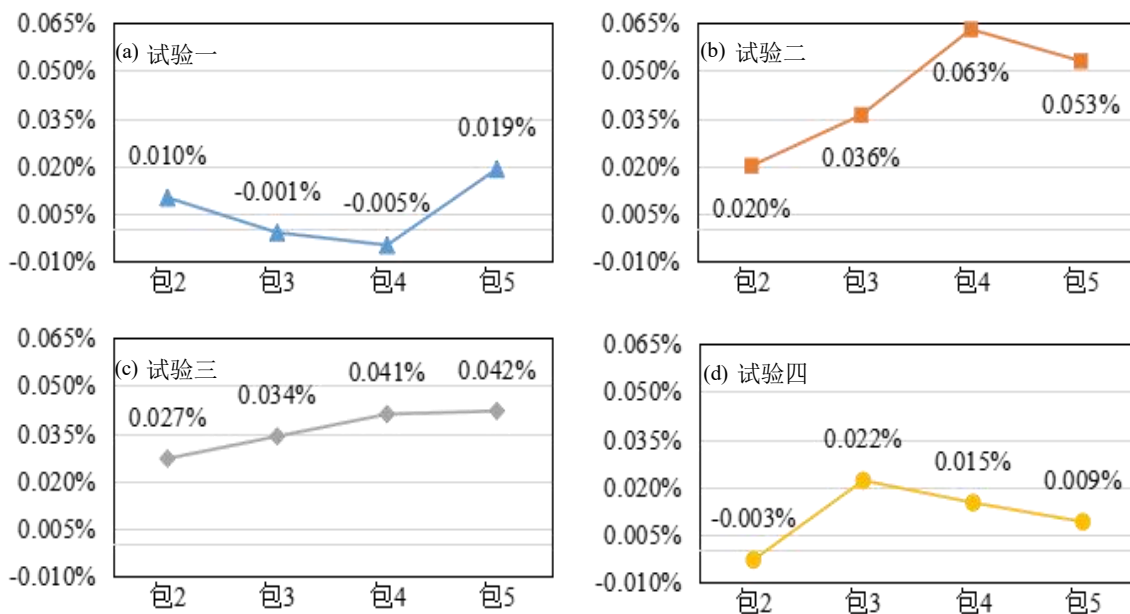


图 2 包内铁水与原铁水碳含量差值

Fig.2 Difference in Carbon Content between the Molten Iron in the Ladle and the Original Molten Iron

基于上述结果，按照方案 2 将增碳剂的吸收率调整至 60% 进行铁水炉前包内补碳试验得到表 3 所示试验三的数据。结果显示，增碳剂的实际吸收率超过了 60%，但包内铁水均满足碳含量稳定性的要求，如图 2 所示。增碳剂的吸收率受增碳剂溶解扩散速度和氧化损耗的综合影响，增碳剂实际吸收率超过 60% 是基于实际烧损值等于理论烧损值的理想状态下所得，但实际生产中无法准确得到铁水的碳烧损情况，限制增碳剂的实际吸收率与理论吸收率一致时计算得到的每包铁水实际碳烧损率如表 4 所示，均未达到铁水的理论碳烧损率。

表 4 碳烧损情况（按照增碳剂 60% 吸收率计算）

Tab.4 Carbon Burn-off Situation (Calculated According to the 60% Absorption Rate of the Carburant)

试验	包 2	包 3	包 4	包 5
三	0.003%	0.023%	0.023%	0.039%

试验三第 2 包出火时长相比较其他三包明显偏短，铁水在空气中暴露的时间短，导致实际碳的烧损最低，只有 0.003%。可以认为在出火时长的影响下，铁水的碳烧损率低造成了增碳剂吸收率虚高的结果。此外，第三包与第四包铁水的碳烧损率也均未达到 0.030%。通过上述试验可知，单独考虑碳烧损率或增碳剂吸收率，任一者都没有达到理论值，且最后一包铁水的碳含量偏高，认为包内补碳工艺

对铁水在出火过程的实际碳烧损率也存在一定影响；所以基于目前的试验情况，改进铁水的理论碳烧损率，如方案 3 所示：按照 2-5 包 0.020% 碳烧损率，增碳剂仍为 60% 吸收率进行铁水的炉前包内补碳试验，数据结果如表 3 试验四所示。增碳剂的吸收率在 60% 上下波动，最高时达到 85.06%。根据图 2 可知包内铁水与原铁水的碳含量差值最大仅为 0.022%，在 $\pm 0.050\%$ 范围内，满足碳含量稳定性的要求。试验四第三包铁水在达到最高吸收率 86.21% 时出火时长仅为 53 秒。这与试验三第 2 包情况一致，可以认为出火时长短会导致实际碳烧损率远低于理论烧损率，出现增碳剂吸收率虚高的情况。

此外，浇注原因导致四包铁水出火重量存在较大差异，相比于 $2200 \pm 50 \text{Kg}$ 存在 $\pm 100 \text{Kg}$ 的波动，但是包内铁水与原铁水的碳含量差值波动均在 $\pm 0.050\%$ 范围内，说明按照该补碳方式可以包容出火重量对增碳剂吸收率的影响。

根据上述试验结果，按照方案 3 进行 3 炉次小批量炉前包内铁水补碳试验，铁水出火重量依据铸件牌号、型号不同存在差别，试验结果如表 5 所示。在出火重量影响下，包内补碳重量改变，但由图 3 可以发现浇包内铁水的碳含量与原铁水的差值均在 $\pm 0.050\%$ 范围内，满足铁水碳含量稳定性的要求。

表 5 铁水炉前包内补碳工艺试验过程数据及结果

Tab.5 Data and Results of the Verification of the Carbon Replenishment in Ladle at the Furnace Tapping Point

试验		原铁水	包 2	包 3	包 4	包 5
炉 1	补碳重量/kg		0.80	1.50	2.30	3.05
	碳含量/wt. %	3.309%	3.293%	3.301%	3.315%	3.324%
炉 2	补碳重量/kg		0.76	1.52	2.30	3.04
	碳含量/wt. %	3.325%	3.329%	3.304%	3.318%	3.314%
炉 3	补碳重量/kg		0.75	1.50	2.30	3.05
	碳含量/wt. %	3.307%	3.322%	3.295%	3.346%	3.316%

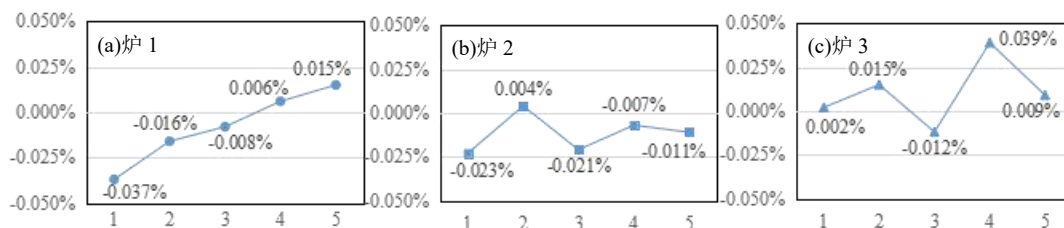


图 3 包内铁水与原铁水碳含量差值

Fig.3 Difference in Carbon Content between the Molten Iron in the Ladle and the Original Molten Iron

综合上述试验结果，将炉内升温补碳工艺切换为炉前包内补碳工艺，并且结合出火时长对铁水碳烧损率以及增碳剂吸收率的影响，为避免增碳剂吸收率波动引起浇包内铁水碳含量的波动，将出火时长限制在 60-90s 内。随机抽取 10 炉铁水成分数据，并统计浇包内五包铁水成分与电炉原铁水成分最大

差值，如图 4 所示。抽查电炉的包内铁水与原铁水碳含量最大差值正负均匀，均满足与原铁水碳含量 $\pm 0.050\%$ 差值稳定性的要求。说明炉前包内铁水补碳改善了炉内增碳剂吸收不良的情况，可以保障铁水碳含量稳定性的要求。

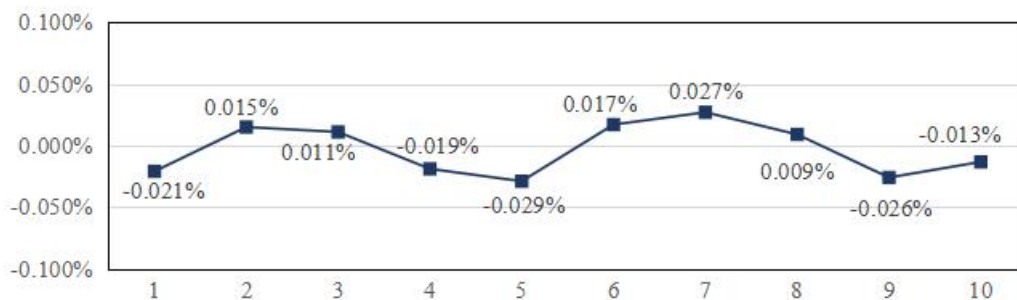


图 4 包内铁水与原铁水碳含量最大差值统计—炉前包内补碳工艺

Fig.4 Statistics Chart of the Maximum Difference in Carbon Content between the Molten Iron in the Ladle and the Original Molten Iron-Carbon Replenishment in Ladle at the Furnace Tapping Point

4 结论

(1) 铁水的碳烧损率随出火温度的升高、出火时长的延长而变大。

(2) 增碳剂吸收率受原铁水碳含量、出火时长等因素的影响：原铁水碳含量的升高对增碳剂的吸收存在抑制作用；而较长的出火时长有利于增碳剂的吸收，且对增碳剂吸收率的影响大于对铁水碳烧

损率的影响。

(3) 按照 0.020% 碳烧损率，增碳剂 60% 吸收率的方案对 2-5 包铁水进行炉前包内铁水补碳可以保证浇包内铁水碳含量的稳定性，改善增碳剂的吸收率；并且能够包容出火重量 ($\pm 100\text{kg}$) 对增碳剂吸收率的影响。



参考文献:

- [1] 李克锐,李增利,崔宇,等.我国铸铁生产技术现状与发展趋势[J].铸造,2022,71(02):123-135.
- [2] 林献辉,孙帆,孙长伟,等.柴油机灰铸铁铸件常见孔洞缺陷微观特征与形成机理[J].中国铸造装备与技术,2023,58(02):48-53.
- [3] 姜建光,厉运杰,孙志扬,等.气缸体铸件裂隙状气孔产生原因及对策[J].铸造设备与工艺,2021(06):55-57.
- [4] 田永富,杨群收.增碳剂的选择及使用方法对铸件质量的影响[J].金属加工(热加工),2016(03):15-17.
- [5] 宋克非.增碳剂对于铸件微观组织品质和整体生产成本的影响[J].铸造技术,2006(04):425-428.
- [6] 柳建忠,薄玉发,崔红艳.中频感应电炉熔炼影响增碳剂吸收率的因素[J].现代铸铁,2010,30(06):64-66.