

120 t RH-LF 生产低碳钢 QD08 的工艺实践

刘列喜 范石伟 徐雷 李海恩 王文培 李海
(芜湖新兴铸管有限责任公司炼钢部, 芜湖 241000)

摘要 介绍了芜湖新兴铸管有限责任公司炼钢厂采用 RH-LF 精炼法生产低碳钢 QD08 的工艺实践。通过对转炉出站钢水初始条件, RH 真空脱碳原理和过程控制, 后续 LF 冶炼 3 个方面的分析研究, 结果表明, 初始钢水控制条件为 $[C]$ 0.04% ~ 0.10%, $[O] > 300 \times 10^{-6}$, 转炉终点出钢温度 $T \geq 1650$ °C。随真空处理时间延长, 真空度降低, 真空室内 P_{CO} 减少, 碳氧浓度积呈降低的趋势, 真空室内因发生碳氧反应进行脱碳, RH 真空脱碳满足热力学条件; 脱碳速率的变化规律为先增大后减小, 脱碳速率有一定的规律; RH 真空处理后的钢水需在 LF 完成脱硫、升温、合金化等操作, 并且需保证终渣量 20 ~ 23 kg/t, 终渣 $(FeO) + (MnO) < 1.2\%$, 碱度 $R \geq 3.5$ 等工艺条件。

关键词 RH-LF QD08 真空脱碳 热力学条件 脱碳速率

Process Practice of Low Carbon Steel QD08 Production by 120 t RH-LF

Liu Liexi, Fan Shiwei, Xu Lei, Li Haien, Wang Wenpei and Li Hai
(Steelmaking Department, Wuhu Xinxing Casting Pipe Co Ltd, Wuhu 241000)

Abstract This paper introduces the practice of producing low carbon steel QD08 by using RH-LF refining method at Wuhu Xinxing Pipe Co Ltd. We analyzed and studied the initial conditions of converter outbound molten steel, RH vacuum decarburization principle and process control, LF smelting from three aspects. The results show that the initial molten steel control conditions are $[C]$ 0.04% ~ 0.10%, $[O] > 300 \times 10^{-6}$, and the converter end temperature $T \geq 1650$ °C. With the increase of the vacuum treatment time, the vacuum degree decreased, the P_{CO} in the vacuum chamber decreased, the concentration of carbon and oxygen decreased, and the decarburization was carried out in the vacuum chamber. The vacuum decarburization was determined by RH vacuum decarburization. The decarburization rate changed increase first and then decrease, the decarburization rate has some regularity. After the RH vacuum treatment, the molten steel needs to be operated in the LF, such as desulfurization, heating and alloying, and the amount of slag is 20 ~ 23 kg/t, final slag $(FeO) + (MnO) < 1.2\%$, $R \geq 3.5$.

Material Index RH-LF, QD08, Vacuum Decarburization, Thermodynamic Conditions, Decarburization Rate

RH 循环脱气是在一个砌有耐火材料内衬的真空室内进行的^[1]。真空脱碳是在所生成的一氧化碳的作用下完成的。真空脱碳是 RH 的重要功能之一, 和其他精炼设备相比, RH 真空度高, 并且通过采用大氩气量循环, 精炼强度高, 是冶炼超低碳钢的必备工艺^[2]。

QD08 钢主要用于生产汽车发动机爪极, 爪极是汽车发动机的关键部件^[3], 其碳含量要求 $\leq 0.05\%$, 具体化学成分要求见表 1。考虑在 LF 冶炼时期需要加入 SiC 等原辅料脱氧、发泡埋弧, 而这些原辅料的加入会导致钢水增碳, 因此必须要求进 LF 时钢水 $C \leq 0.035\%$, 即转炉需低碳出钢。为提高低碳钢 QD08 转炉终点碳含量, 降低钢水氧化性, 减少转炉炉衬耐火材料的侵蚀, 降低炉后脱氧材料, 降低合金使用成本, 拟通过 RH-LF 双精炼工艺生产低碳钢, 将脱碳和脱硫任务分别分配给 RH 和 LF 精炼工序。

结合芜湖新兴铸管炼钢厂现有设备和实际生产

情况, 按 LD 转炉 → RH 真空脱碳 → LF 精炼 → 连铸工艺路线进行。控制转炉出站钢水初始条件, 通过理论分析, RH 真空脱碳和 LF 精炼实现了生产低碳钢 QD08 的工艺实践。

1 钢水初始条件

芜湖新兴铸管炼钢厂为两座 120 t 转炉。转炉装入量控制在 (130 ± 5) t, 出钢量控制在 125 t 左右, 钢包自由空间 ≥ 400 mm。采用高拉碳补吹工艺。其中供氧: 工作氧压 0.70 ~ 0.85 MPa, 流量 26 000 ~ 30 000 m³/h。转炉造渣: 碱度 2.8 ~ 3.2, 含 7% ~ 9% MgO, 12% ~ 16% SiO₂。出钢口维护良好, 出钢时间控制在 ≥ 4 min。严禁下渣, 防止回磷过量, 要求回磷量 $\leq 0.003\%$ 。在 1 600 °C, 标准大气压下, 经过多次试验测定芜湖新兴铸管炼钢厂转炉终点碳含量、氧活度, 实际碳氧浓度积平均值为 0.002 5%。转炉出钢平均温降为 37.46 °C, 吊包运输过程平均温降为 18.5 °C, RH 真空处理过程温降为 35 °C, 为

表 1 QD08 钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of steel QD08 / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al
试验钢	0.05	0.18 ~ 0.23	0.35 ~ 0.40	0.028	0.010	0.20	0.015 ~ 0.10	0.20	0.016 ~ 0.036
目标值	≤0.05	0.20	0.38	≤0.025	≤0.008	-	0.020	-	0.015

避免 RH 真空处理完毕结冷钢, 必须保证 RH 进站温度 ≥ 1 600 °C, 转炉终点出钢温度 T ≥ 1 650 °C。出钢终点成分 [C] 0.04% ~ 0.10%, [P] ≤ 0.018%, 出钢时不加合金、脱氧剂、出钢前中期加顶渣白灰 200 kg。

2 RH 真空脱碳实践

2.1 RH 真空脱碳原理

脱碳反应服从以下机理:



反应平衡与压力有关, 平衡常数

$$K = \frac{P_{\text{CO}}}{[C][O]} \quad (2)$$

其中在 1 600 °C 时,

$$[C] \cdot [O] = 0.0025 P_{\text{CO}} \quad (3)$$

式(3)表明, RH 真空处理过程中, 随着 P_{CO} 的降低, 反应向右进行, 钢水发生脱碳, 满足热力学条件。不同真空度下的碳氧平衡如图 1 所示, 其中压力越低, 实际生产中的平衡偏离越大, 这主要是由于渣、耐火材料以及处理时间等因素影响的。

在抽真空的情况下, 钢水中的碳和氧会依照下式的比例进行脱氧和脱碳。

$$\Delta [C] \times 16 = \Delta [O] \times 12 \quad (4)$$

$$\Delta [C] = 0.75 \times \Delta [O] \quad (5)$$

只要钢中有足够的氧, 脱碳反应就可以发生。

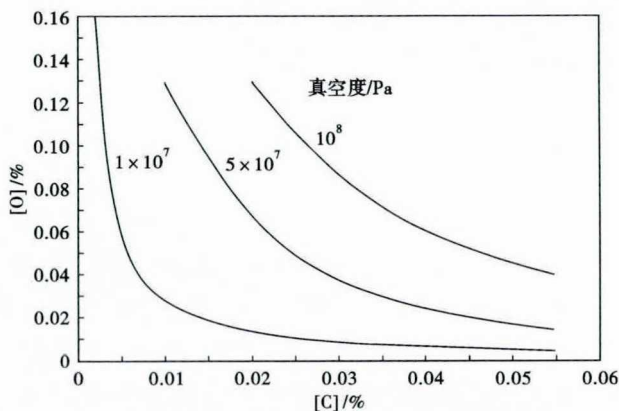


图 1 不同真空度下的碳氧平衡

Fig. 1 Carbon and oxygen balance at different vacuum

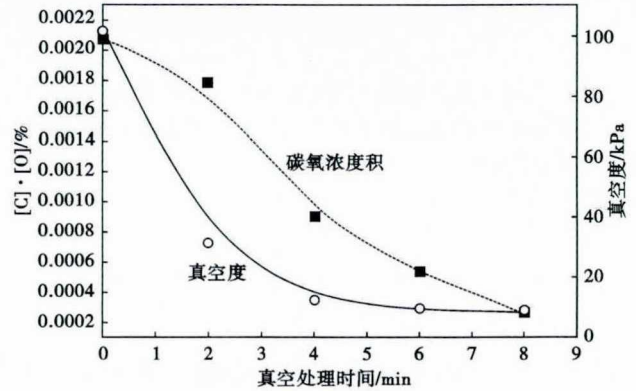


图 2 真空处理时间对碳氧积和真空度的影响

Fig. 2 Effect of vacuum treatment time on carbon-oxygen product and vacuum

实际生产中, 这种真空脱碳可以用于起始氧含量在 0.03% 以上, 碳含量在 0.04% ~ 0.10% 的情况。

如图 2 所示, 可以看出, 随真空处理时间延长, 真空度降低, 真空室内 P_{CO} 减少, 碳氧浓度积呈降低的趋势。这也验证了式(3)的反应。

2.2 RH 真空脱碳过程控制

芜湖新兴铸管有限责任公司炼钢厂 RH 炉主要技术参数如表 2。

初始条件合适的钢水进 RH, 蒸汽压力 ≥ 1.0 MPa 时开启五级泵, 32 kPa 时开启四级泵, 真空度达到 4 ~ 8 kPa 保持 6 ~ 8 min。提升气体压力 1.3 MPa, 流量 500 L/min。脱碳期提升气体流量 500 L/min, 相当于搅拌能 332 W/t, 混匀时间 78 s, 脱碳速度达到最大值 0.008 3%/min。

图 3 是此炉进站定氧 0.042 5%, 初样 C 为 0.06%,

表 2 RH 系统主要技术参数
Table 2 RH system main technical parameters

RH 系统名称	主要参数
公称容量/t	120
处理钢水量/t	Max. 135 t/Min. 100 t
热弯管形式	U 形(带顶枪座孔及摄像机)
热弯管尺寸/mm	Φ1 960 × 20
真空罐形式	分体式罐体(卡紧螺栓快速连接)
真空罐尺寸/mm	Φ2 460 × 25
真空罐总高度/mm	~ 8 000(含吸嘴高度)
吸嘴内径/mm	Φ480
气体冷却器/mm	Φ2 200, 带水冷板加水冷盘管
真空泵形式	5 级蒸汽喷射泵(第 4、5 级带有并联泵)
真空泵抽气能力/(kg · h ⁻¹)	600(67 Pa)/4 000(8 kPa)

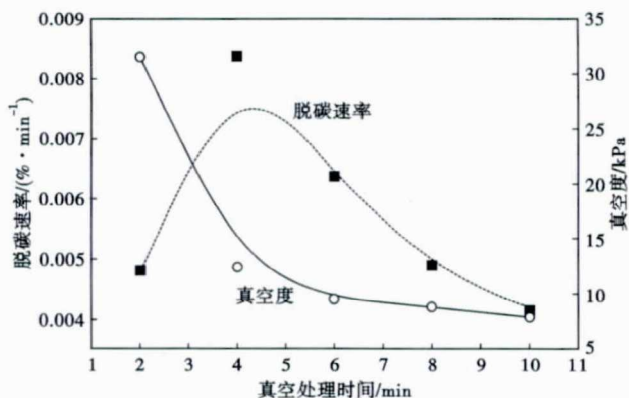
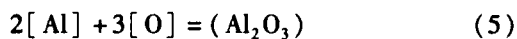


图3 真空处理时间对脱碳速率和真空度的影响

Fig. 3 Effect of vacuum treatment time on decarburization rate and vacuum

图3中可以看出,脱碳速率先增大后减小,处理时间4.5 min,真空度约9 kPa时,脱碳速率达到最大值(约0.0083%/min),后随处理时间延长,速率开始下降。此时只开启了四级泵。

RH抽完真空后定氧、取样,并且根据定氧结果喂入铝线。铝氧反应公式如下:



由上可得,含游离氧0.0001%需铝量 $120 \times 1000 \times 0.0001\% \times 54/48 = 0.135 \text{ kg}$ 。为提高钢水纯净度需要提前脱氧,在实际生产中,喂线量可按 $(0.0001\%/\text{氧含量} + 100)\text{m}$ 经验公式计算,出站进LF继续冶炼。

3 LF 冶炼过程

LF法的主要任务是:脱硫、造渣、温度调节、精确的成分微调、改善钢水纯净度^[6]。RH真空处理

后的钢水进入LF炉完成脱硫、升温、合金化等操作。由于转炉出站时白灰量较少,为快速脱硫、埋弧升温,LF炉需加入 $\geq 1000 \text{ kg}$ 白灰及适量渣剂造渣。QD08钢在特殊的使用环境下,要求钢材具有良好的抗疲劳特性,夹杂物是钢材疲劳破坏的主要诱因^[7-10],因此,QD08钢对夹杂物要求较为严格,为控制B类、Ds类夹杂物超标,需保证终渣量20~23 kg/t。在送电、精炼过程中,加入硅铁粉、Al粒脱氧,根据发泡情况,少量加入硅碳粉,减少增碳,白渣保持时间 $\geq 20 \text{ min}$,精炼周期 $\geq 40 \text{ min}$,软吹前喂入100~150 m钙线进行钙处理,保证Ca/Al比在0.07~0.12。软吹时间 $\geq 15 \text{ min}$ 。QD08精炼渣系组成为(%):55~60CaO,20~25Al₂O₃,10~12SiO₂,终渣(FeO)+(MnO)<1.2%,碱度 $R \geq 3.5$ 。将温度、成分等工艺条件合格的钢水吊至连铸进行浇铸。

4 结论

(1)RH真空脱碳需满足的钢水初始条件,转炉终点出钢温度 $T \geq 1650 \text{ }^\circ\text{C}$,出钢终点成分[C]0.04%~0.10%, $[\text{O}] > 0.03\%$,出钢时不加合金、脱氧剂,出钢前中期加顶渣白灰200 kg。

(2)随真空处理时间延长,真空度降低,真空室内 P_{CO} 减少,碳氧浓度积呈降低的趋势,真空室内因发生碳氧反应进行脱碳,满足热力学条件。

(3)真空脱碳时只需开启三/四级泵,真空度达到4~8 kPa保持6~8 min。脱碳速率的变化规律为先增大后减小,并且在拐点处有最大脱碳速率。

(4)真空处理后的钢水需在LF精炼完成脱硫、升温、合金化等操作,保证终渣量20~23 kg/t,终渣(FeO)+(MnO)<1.2%,碱度 $R \geq 3.5$ 。

参考文献

- [1] 陈家祥. 钢铁冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2007:275-278.
- [2] 王振光,董方,姜敏凤. RH真空脱碳工艺的研究分析[J]. 山东冶金,2016,39(6):33-35.
- [3] 秦义. QD08轴心晶间裂产生原因及其改进[J]. 浙江冶金,2012,5(2):40-42.
- [4] 冯聚和,艾立群,刘建华. 铁水预处理与钢水炉外精炼铁[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [5] Cao Jian-guo, Zhang Jie and Chen Xian-lin, et al. Control of Roll Contour for Strip Profile and Flatness in Hot Rolling[A]. 44th Mechanical Working and Steel Processing Conference Proceeding[C]. Orlando; David L. Kanagy,2002:1001-1010.
- [6] 张士充,赵晓萍. 炉外精炼工[M]. 北京:化学工业出版社,2012:100-109.
- [7] Yang Z G, Li S X and Zhang J M, et al. The Fatigue Behaviors of Zero Inclusion and Commercial 42CrMo Steels in the Super-Long Fatigue Life Regime[J]. Acta Mater,2004,52(18):5235-5237.
- [8] Chapetti M D, Tagawa T and Miyata T. Ultra Long Cycle Fatigue of High-Strength Carbon Steels; Part I. Review and Analysis of the Mechanism of Failure. Mater Sci Eng A,2003,356(1-2):227-229.
- [9] Chapetti M D, Tagawa T and Miyata T. Ultra Long Cycle Fatigue of High-Strength Carbon Steels; Part II. Estimation of Fatigue Limit for Failure From Internal Inclusions. Mater Sci Eng A,2003,356(1-2):236-240.
- [10] 姜敏,王昆鹏,侯泽旺,等. 低氧特殊钢中大尺寸DS类夹杂物生成机理[J]. 工程科学学报,2016,38(6):780-786.

刘列喜(1981-),男,工程师,2004年武汉科技大学(本科)毕业,冶金设备和炼钢工艺研究。
E-mail:353260209@qq.com

收稿日期:2018-09-28