

120 t RH 自然脱碳精炼低碳钢 QD08 的生产实践

李海 刘列喜 张洪彪 介瑞华 王立青 陆曼 徐雷
(芜湖新兴铸管有限责任公司炼钢部, 芜湖 241000)

摘要 基于生产数据对120 t RH 精炼低碳钢 QD08 ($w\%$: $\leq 0.07C, 0.15 \sim 0.35Si, 0.25 \sim 0.45Mn, \leq 0.035P, \leq 0.035S$) 进行了 RH 碳氧反应的热力学、动力学分析和自然脱碳分析, 得出 RH 精炼自然脱碳的优化工艺。结果表明, BOF 终点温度 $\geq 1650\text{ }^\circ\text{C}$, RH 初始温度 $\geq 1600\text{ }^\circ\text{C}$, BOF 终点 $[C] 0.04\% \sim 0.10\%$, $[P] \leq 0.018\%$, 出钢前加顶浇石灰 200 kg, 出钢不加合金和脱氧剂, RH 真空度 4~8 kPa, 6~8 min 可使钢水 $[C] \leq 0.05\%$ 。

关键词 QD08 低碳钢 RH 精炼 自然脱碳 热力学 脱碳速率

Production Practice for Low Carbon Steel QD08 Steelmaking by Natural Decarburization during 120 t RH Refining Process

Li Hai, Liu Liexi, Zhang Hongbiao, Jie Ruihua, Wang Liqing, Lu Man and Xu Lei
(Steelmaking Division, Wuhu Xinxing Casting Pipe Co Ltd, Wuhu 241000)

Abstract Based on the production data the analysis on thermodynamics, kinetics of RH carbon-oxygen reaction and natural decarburization in 120 t RH refining process of low carbon steel QD08 ($w\%$: $\leq 0.07C, 0.15 \sim 0.35Si, 0.25 \sim 0.45Mn, \leq 0.035P, \leq 0.035S$) has been carried out to get the optimized process for RH refining natural decarburization. The results show that with BOF end temperature $\geq 1650\text{ }^\circ\text{C}$, RH initial temperature of liquid $\geq 1600\text{ }^\circ\text{C}$, BOF end $[C] 0.04\% \sim 0.10\%$, end $[P] \leq 0.018\%$, before BOF tapping adding top slag lime 200 kg and during tapping non-adding alloy and deoxidation agent, and RH vacuum 4~8 kPa for 6~8 min, the liquid $[C]$ shall decrease to $\leq 0.05\%$.

Material Index Low Carbon Steel QD08, RH Refining, Natural Decarburization, Thermodynamics, Decarburization Rate

RH 精炼装置用于超低碳钢深脱碳和厚板、管线、重轨等钢种脱氢, 工艺技术已很成熟。RH 在生产超低碳钢方面表现出明显的优越性^[1]。1988 年日本川崎钢铁公司开发出了 RH-KTB 新技术, 开启了 RH 顶吹氧工艺时代, 随后又出现了 RH-MFB 和 RH-TOP 等用氧工艺。尽管各种工艺所使用氧枪系统的功能不同, 导致叫法不同, 但就吹氧对 RH 脱碳过程作用的原理是相同的。采用吹氧技术, 可以显著提高 RH 脱碳速率, 钢水终点碳含量也更低^[2-5]; 同时, 利用 CO 二次燃烧的放热可以对钢水进行温度补偿^[3,6-8]。国内应用 RH 工艺技术是在 1970 年代及以后逐渐广泛进行的, 但近几年随着低碳钢在市场的所占比例越来越高, RH 用途越来越广。目前一般中、大型钢厂都配置有 RH 炉。武钢、宝钢等均是国内较早使用 RH 设备的企业。

QD08 钢由于碳含量较低, 转炉需要进行强拉后吹, 这样严重影响了转炉炉衬寿命。考虑 QD08 并非超低碳钢, 因此利用 RH 脱碳时不需要进行强制吹氧, 即采用 RH 自然脱碳就可以实现, 但是目前利用 RH 自然脱碳生产低碳钢 QD08 缺少理论及实践方面可供参考的相关资料。本文结合芜湖新兴铸

管公司 RH 实际生产条件从热力学和动力学的角度出发, 考虑初始碳氧含量以及真空度变化等因素, 研究 RH 的碳氧反应, 系统分析和研究低碳钢 QD08 的生产工艺制度, 对了解 RH 自然脱碳冶炼 QD08 钢理论依据进行探讨, 并且为利用 RH 装置生产低碳钢提供了重要技术支持。

1 RH 真空脱碳理论分析

1.1 热力学分析

利用 RH 自然脱碳生产低碳钢 QD08 的脱碳反应遵从以下机理:



反应平衡与压力有关, 平衡常数

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

其中在 1600 $^\circ\text{C}$ 时, $[C] \cdot [O] = 0.0025P_{CO}$ (3)

式(3)表明^[9], 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。芜湖新兴铸管公司的 RH 处理钢水容量为

120 t,并分析 RH 自然脱碳生产 QD08 钢在不同真空度下的碳氧平衡(图 1),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的影响。

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^[10]。

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

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

只要钢中有足够的氧,脱碳反应就可以发生。在芜湖新兴铸管公司 QD08 钢实际生产中,这种 RH 自然脱碳可以用于起始氧含量在 0.030% 以上,碳含量在 0.04% ~ 0.10% 的情况。

芜湖新兴铸管公司 RH 自然脱碳生产 QD08 钢的碳氧积、真空度和真空处理时间之间的关系如图 2

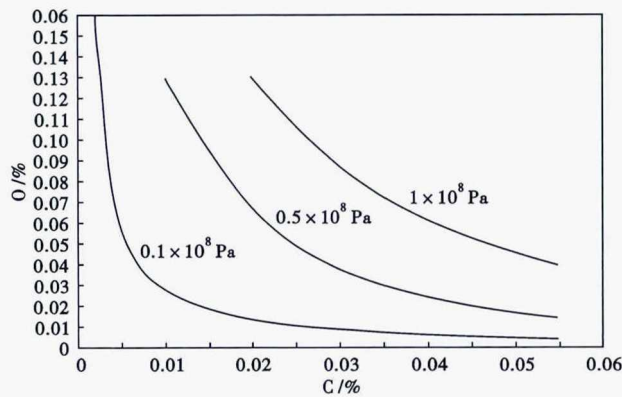


图 1 120 t RH 精炼 QD08 钢在真空度 0.1×10^{-8} Pa, 0.5×10^{-8} Pa 和 1×10^{-8} Pa 时碳氧平衡曲线

Fig. 1 Carbon-oxygen equilibrium curves of steel QD08 in 120 t RH refining with vacuum 0.1×10^{-8} Pa, 0.5×10^{-8} Pa and 1×10^{-8} Pa

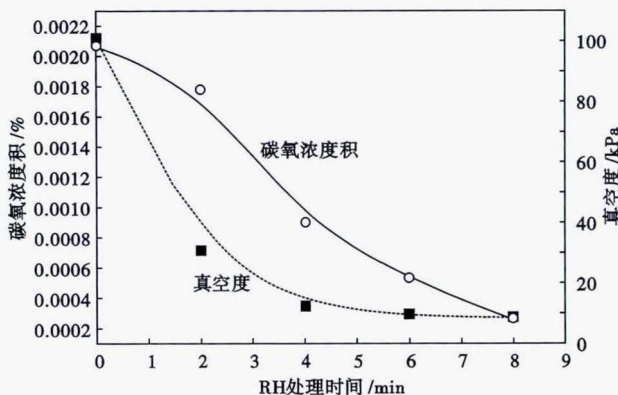


图 2 QD08 钢碳氧积和 RH 真空处理时间、真空度的关系, 初始 $[O] \geq 0.030\%$, $[C] 0.04\% \sim 0.10\%$

Fig. 2 Relation between $[C][O]$ product and RH vacuum treatment time and vacuum, steel QD08, initial $[O] \geq 0.030\%$ and $[C] 0.04\% \sim 0.10\%$

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} 减小,碳氧浓度积呈降低的趋势。这也验证了式(3)的反应。一般情况下,钢中氧含量都有足以把钢中碳含量在真空条件下降低至 0.005% 以下。为了达到最佳的脱碳效果,通常钢中氧含量会略高于当量平衡的含量。如果氧含量过高的话,就要进行预脱氧,如果采用碳脱氧,钢中碳含量会略有增加;如果采用铝脱氧,钢中碳含量就不会增加。

1.2 动力学分析

根据前面的分析,碳氧反应只能在现成的钢水-气相界面上进行。在实际的炼钢条件下,这种现成的液-气相界面可以由与钢水接触的不光滑的耐火材料或吹入钢水的气体来提供。在炼钢过程中,总是存在着现成的液-气界面。因此,可以认为碳氧反应的步骤是:(1) $[C]$ 、 $[O]$ 元素在钢水内部的传质过程到达反应界面;(2) 在反应界面形成 CO 气泡;(3) CO 气泡上浮进入气相中。

传质速度可以用下式来表述:

$$n_c = k_c \cdot A \cdot (m_{[c]} - m^*_{[c]}) \quad (6)$$

式中: k_c - 传质系数; A - 反应界面的面积; $m_{[c]}$ - 钢水中 c 浓度; $m^*_{[c]}$ - 饱和时钢水中 c 浓度; n_c - 摩尔通量。

如果在气相与液相之间还有另外的相的话,就会使传质系数大为降低。这种情况是有可能发生的,例如气相不止一个的情况。

脱碳速率可以描述为:

$$\left\{ -\frac{dC}{dt} \right\} = \frac{1}{t_c} ([C] - [C]_e) \quad (7)$$

式中: t_c - 反应常数,取决于总的反应面积和气液界面; $[C]$ - 碳浓度; $[C]_e$ - 平衡浓度。

总体上,瞬时的脱碳速度可以用(8)式表示:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{D \times A}{\delta \times V} \times (c - c_e) \quad (8)$$

式中: D - 扩散常数; A - 反应界面的面积; δ - 相界面的厚度; V - 钢液的体积。

这个等式的应用条件是物质的传质方式是依靠扩散传质,可以用于脱氢、脱碳、氮(氧和硫的含量很低的情况下)。

对公式进行简化处理,把 D 、 A 、 V 等合并成一个变量 k ,这个变量考虑了热力学和动力学因素(如真空炉直径、吸嘴直径、钢水深度、提升气体流量等因素)。

对这个公式进行积分等数学处理后,得到下述

公式:

$$\ln \frac{[C]_t - [C]_e}{[C]_0 - [C]_e} = -k_c \times t \quad (9)$$

式中:[C]₀- 初始碳浓度;[C]_t- t时刻碳浓度。

在压力很低的情况下,公式可以简化成:

$$\ln \frac{[C]_t}{[C]_0} = -k_c \times t \quad (10)$$

整理后得到:[C]_t = [C]₀ × exp(-k_c × t) (11)

式中:t- 处理时间;k_c- 传质系数。

这个公式可以用于近似的计算。前提是其它条件没有太大的变化。一旦碳含量达到 0.003% 左右,传质系数就会大幅降低。在实际脱碳过程中,真空度降低的速度也会影响到脱碳的速度常数,抽真空速度越快,反应的时间就越短,所以真空泵的能力对于 RH 而言,也是一个重要的参数。

2 RH 工艺自然脱碳分析

2.1 钢水初始条件

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^[1],其碳含量要求 ≤ 0.05%,具体化学成分见表 1。芜湖新兴铸管公司炼钢厂为两座 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 ~ 3.2,7% ~ 9% MgO,12% ~ 16% SiO₂。出钢口维护良好,出钢时间控制 ≥ 4 min。严禁出钢下渣,防止回磷过量,要求回磷量 ≤ 0.003%。在 > 1 600 °C,标准大气压下,经过多次试验测定该炼钢厂转炉终点碳含量、氧活度,实际碳氧浓度积平均值约为 0.002 9%。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% ~ 0.010%, [P] ≤ 0.018%,出钢时不加合金、脱氧剂、出钢前中期加顶渣白石灰 200 kg。

表 1 QD08 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel QD08 / %

| 项目 | C | Si | Mn | P | S | Al |
|----|-------|-------------|-------------|---------|---------|---------------|
| 标准 | ≤0.07 | 0.15 ~ 0.35 | 0.25 ~ 0.45 | ≤ 0.035 | ≤ 0.035 | - |
| 内控 | ≤0.05 | 0.18 ~ 0.23 | 0.35 ~ 0.40 | ≤ 0.022 | ≤ 0.015 | 0.010 ~ 0.030 |

2.2 RH 自然脱碳过程

芜湖新兴铸管公司炼钢厂 RH 的主要技术参数如表 2。

对多炉 QD08 钢水过 RH 自然脱碳数据分析可知,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 是此炉钢水进站时定氧为 0.042 5%,初样 C 0.06%,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 0.008 3%/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:

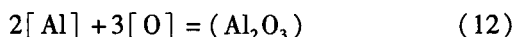


表 2 RH 系统主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of RH system

| 项目 | 主要参数 |
|---------------------------------|------------------------|
| 公称容量/t | 120 |
| 处理钢水量/t | Max. 135; Min. 100 |
| 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) | 600/4 000 |

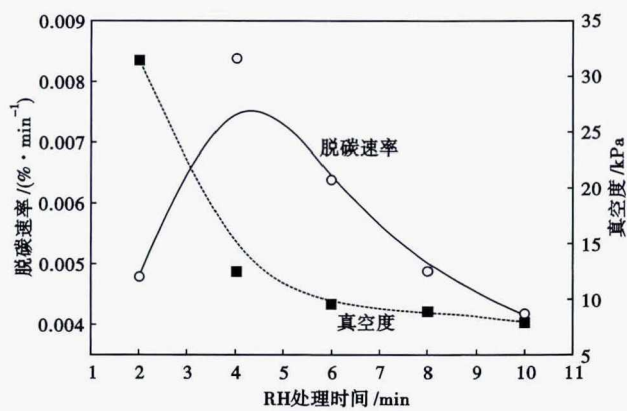


图 3 QD08 钢脱碳速率和 RH 真空处理时间、真空度的关系,初始 [O] 0.042 5%, [C] 0.06%

Fig. 3 Relation between decarburization rate and RH vacuum treatment time and vacuum, steel QD08, initial [O] 0.042 5% and [C] 0.06%

由上可得,含游离氧 0.0001% 需铝量 $120 \times 1000 \times 0.0001\% \times 54/48 = 0.135 \text{ kg}$ 。为提高钢水洁净度需要提前脱氧,在实际生产中 RH 真空处理后,进 LF 精炼前喂入铝线量可按 $(0.0001\%/\text{氧含量} + 100)m$ 经验公式计算,出站进 LF 继续冶炼,完成脱硫、升温、合金化等操作。由于 QD08 钢特殊的使用环境,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^[12-15],因此为控制夹杂物除了在冶炼过程中保证合适的渣量,还需要在 RH 自然脱碳、喂线处理后有足够的软吹时间以促进夹杂物充分上浮、去除。

3 结论

(1)RH 真空处理过程中,随真空处理时间延长,真空度降低,真空室内 P_{CO} 降低,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 自然脱碳满足热力学条件。

(2)RH 自然脱碳反应速度取决于 $[C]$ 、 $[O]$ 元素在钢水内部的传质系数、真空处理时间、抽真空的速度。

(3)RH 自然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 $[C] 0.04\% \sim 0.10\%$, $[O] > 0.030\%$,出钢时不加合金、脱氧剂、出钢前中期加顶渣白石灰 200 kg。

(4)进行 RH 自然脱碳时只需开启 3/4 级泵,真空度达到 $4 \sim 8 \text{ kPa}$ 保持 $6 \sim 8 \text{ min}$ 。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。

参考文献

- [1] 徐国群. RH 精炼技术的应用于发展[J]. 炼钢, 2006, 22(1): 12-14.
- [2] Yamaguchi K, Kishimoto Y and Sakuraya T, et al. Effect of Refining Conditions for Ultra Low Carbon Steel on Decarburization Reaction in RH Degasser[J]. ISIJ International, 1992, 32(1): 126-127.
- [3] Kobayashi H and Donahue F. Start up of KTB(Oxygen Top Blowing in RH) at National Steel Great Lakes Division[C] // Steelmaking Conference Proceedings. Nashville: 1995.
- [4] Ahn S B, Choi H S and Kim J S, et al. Oxygen Blowing Technology for Production of Ultra-Low Carbon Steel on RH Degasser[C] // Steelmaking Conference Proceedings. Toronto: 1998.
- [5] 李扬洲, 张大德, 薛念福, 等. RH-MFB 真空处理工艺技术[J]. 钢铁钒钛, 2001, 22(3): 42-45.
- [6] 林利平, 田义胜. RH-KTB 技术在武钢二炼钢厂的应用实践[J]. 武钢技术, 2003, 41(3): 14-16.
- [7] Kunitake O, Imai T and Mukawa S, et al. High Speed Decarburization by Modernized RH-OB and New Decarburizing Technology Under Reduced Pressure by CAS-OB[C] // Steelmaking Conference Proceedings. Baltimore: 2001.
- [8] Kang S C, Kim K C and Park J M, et al. Improvement of Decarburization Capacity of RH Degasser by Revamping at Kwangyang Works, POSCO[C] // Steelmaking Conference Proceedings. Pittsburgh: 2000.
- [9] 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.
- [10] 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 Metallurgical Working and Steel Processing Conference Proceeding[C]. Orlando: David L. Kanagy, 2002. 1001-1010.
- [11] 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.
- [12] 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 Materialia, 2004, 52(18): 5235-5239.
- [13] 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[J]. Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications, 2003, 356(1-2): 227.
- [14] 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[J]. Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications, 2003, 356(1-2): 236.
- [15] 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.

李 海(1985-), 男, 硕士(2012 年内蒙古科技大学), 工程师, 2008 年内蒙古科技大学(本科)毕业, 二次精炼研究和品种开发。

收稿日期: 2017-12-05