

转炉-吹氩站脱氧工艺中降低脱氧剂用量的研究

董广正¹ 齐 韦²

1. 上海梅山钢铁股份有限公司, 江苏 南京 210039

2. 上海务宝机电科技有限公司, 上海 200940

摘要: 在炼钢脱氧过程中, 脱氧剂的使用是影响板坯质量和生产成本的重要一环。本文介绍了梅山钢铁转炉-吹氩站脱氧工艺, 分析了脱氧剂利用率低的原因, 建立了脱氧工艺模型优化了脱氧剂的用量。验证了降低脱氧剂消耗的生产效果, 已成功应用于普通低碳铝镇静钢的生产。

关键词: 转炉; 吹氩站; 脱氧工艺; 脱氧剂; 生产成本

1 概述

低碳铝镇静钢被广泛应用于深冲用冷轧薄钢板, 对力学性能和夹杂物的控制均有严格的要求。对于洁净度要求较高的钢种, 一般使用 KR-BOF-LF/ RH-CC 工艺进行生产^[1-3]。对于普通钢种的生产, 则使用 KR-BOF-CAS-CC 工艺的成本较低^[4-6]。随着市场对洁净度的要求越来越高, 势必降低钢中氧含量, 其中脱氧工艺就起到了至关重要的作用。

低碳钢在转炉脱碳过程中需要消耗大量的氧气, 导致钢液中溶解氧含量升高。饱和氧的钢液在冷却凝固时, 会因 FeO 及 FeO-FeS 晶体析出而发生热脆, 也会因氧的溶解度降低而与碳继续反应生成一氧化碳, 导致钢液沸腾或出现气孔^[7]。所以需在转炉出钢过程中加入脱氧剂, 使溶解氧转变为不溶解的氧化物, 再将氧化物从钢液中排除。而脱氧剂的种类和用法, 对脱氧效果影响较大, 国内对此已有较多的研究^[8-9]。但就脱氧剂用量的控制而言, 相关研究较少。炼钢过程中, 为满足产品的脱氧需求, 实际生产容易出现脱氧剂用量偏高的现象, 造成生产成本的浪费。

本文针对梅钢炼钢工艺段的转炉-吹氩站脱氧工艺展开研究, 分析了脱氧剂用量对脱氧效果的影响, 以及转炉出钢脱氧与吹氩站脱氧之间的关系。根据生产数据提出减少脱氧剂用量的可行性, 解释了脱氧剂利用率低的根本原因, 并验证了降低脱氧剂消耗的可行性, 为节约生产成本提出建议。

2 脱氧工艺现状分析

2.1 工艺流程介绍

梅钢炼钢工艺段的主要设备包括: KR 铁水脱硫站、BOF 氧气顶吹转炉、CAS-OB 吹氩站、LF 精炼炉、RH 真空脱气装置、CC 连铸等。普通低碳铝镇静钢的生产流程为: 钢水进厂经倒罐进入脱硫站, 使用氧气顶吹转炉法炼钢, 转炉出钢后经吹氩站去除杂质和有害气体, 最后进行板坯连铸。炼钢过程中不使用 LF 精炼炉和 RH 真空脱气装置, 以降低炼钢成本。炼钢工艺流程如图 1 所示:

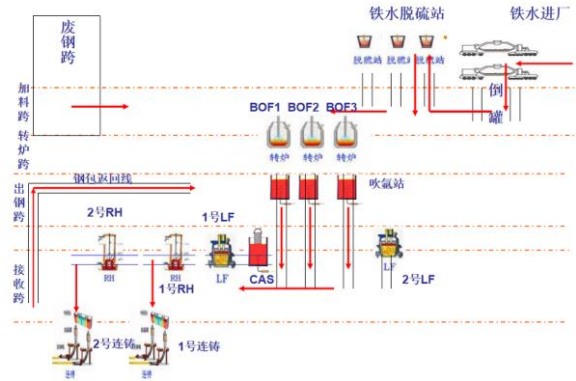


图 1 炼钢工艺流程图

转炉-吹氩站脱氧工艺是在转炉出钢 30%时加入铝锰钙合金、在吹氩站喂入铝线等脱氧剂, 利用脱氧剂与氧的亲合力比铁大, 形成稳定的脱氧产物, 借助自身浮力或吹氩产生的对流自钢液中排出。铝锰钙合金元素均具有脱氧能力, 其脱氧能力从强到弱依次为 Ca、Al、Mn。铝是主要的脱氧元素, 与溶解氧反应生成 Al_2O_3 , 锰可加速脱氧反应进行, 钙的脱氧产物 CaO 易与 Al_2O_3 生成钙铝酸盐易与上浮。吹氩站喂入的铝线为纯铝, 除了进一步减低钢液中的溶解氧, 还需调控酸溶铝 Als 符合产品要求。

转炉-吹氩站脱氧工艺分为全脱氧和半脱氧两种^[10]：全脱氧工艺在转炉出钢时铝锰钙合金的加入量为2.5~3.5kg/t，进吹氩站时钢液中溶解氧含量为0.002%~0.008%，用于生产 $\omega[O]<0.005\%$ 的镇静钢种；半脱氧工艺在转炉出钢是铝锰钙合金的加入量为1.0~2.0kg/t，进吹氩站时钢液中溶解氧含量为0.015%~0.025%，用于生产 $0.004\%<\omega[O]<0.008\%$ 的镇静钢种。但两种工艺均出现不同程度的脱氧剂烧损，全脱氧工艺的脱氧剂中铝的烧损量为0.693kg/t，半脱氧工艺的脱氧剂中铝烧损量是0.409kg/t，严重降低了脱氧剂的利用率，增加了脱氧剂的用量，造成了经济损失。所以脱氧工艺参数的优化是降低脱氧剂消耗的必由之路。

2.2 工艺参数分析

在控制转炉出钢含氧量、终点碳含量、出钢温度、酸溶铝Als含量的条件下，全脱氧和半脱氧的工艺参数如表1所示：

表1 脱氧工艺参数

脱氧方式	出钢含氧量 (ppm)	终点碳含量 (%)	碳氧积	出钢温度 (°C)	钢液重量 (kg)	铝锰钙 (kg)	Als含量 (%)	铝线 (kg)
全脱氧	699	0.034	0.0024	1676	272900	822	0.0362	105
半脱氧	686	0.038	0.0026	1667	267800	348	0.0297	307

根据钢水铝脱氧的反应方程式： $2Al+3O=Al_2O_3$ ，质量比Al：O=1.125:1，脱出1kg氧，理论耗铝1.125kg。已知铝锰钙合金中铝的质量分数为58.3%，铝线中铝的质量分数为99%，脱氧剂中铝元素的消耗进行计算如下式（单位与表1、2相同），结果如表2所示：

脱氧剂中铝的单耗= $\frac{\text{铝锰钙} \times 0.583 + \text{铝线} \times 0.99 - \text{Als含量} / 100}{\text{钢水重量} \times 1000}$

脱氧剂中铝的利用率= $\frac{\text{出钢含氧量} \times 0.1125}{\text{脱氧剂中铝的单耗}}$

脱氧剂中铝烧损的量=(1-脱氧剂中铝的利用率)×脱氧剂中铝的单耗-Als单耗

表2 脱氧参数的计算

脱氧方式	铝锰钙单耗 (kg/t)	Als单耗 (kg/t)	铝线单耗 (kg/t)	脱氧剂中铝的单耗 (kg/t)	脱氧剂中铝的利用率 (%)	脱氧剂中铝烧损的量 (kg/t)
全脱氧	3.01	0.36	0.38	1.78	44.29	0.63
半脱氧	1.30	0.29	1.13	1.59	48.41	0.52

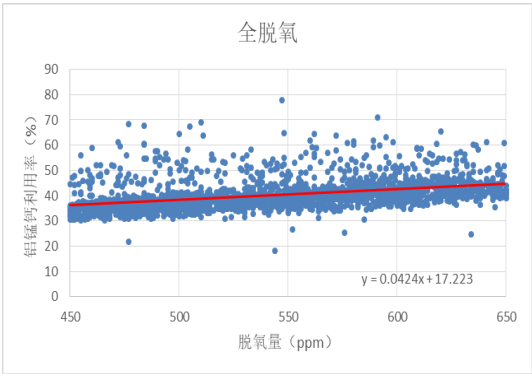
由表2可知，全脱氧工艺中铝锰钙合金的加入量大，铝线的加入量小，脱氧剂的利用率低，铝烧损的量高；半脱氧工艺中铝锰钙合金的加入量小，铝线的加入量大，脱氧剂的利用率高，铝烧损的量低。因为脱氧过程中先用铝锰钙合金把钢液的氧脱除到较低的水平，然后在吹氩站喂入铝线进一步脱氧，属于先强后弱的脱氧模式。铝锰钙合金用量大，势必导致铝线用量小，而铝锰钙用量大容易导致铝烧损的量增加。

3 脱氧工艺模型的建立与应用

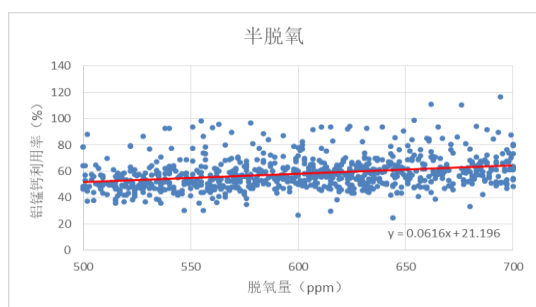
3.1 脱氧工艺模型的建立

根据表2所示的生产现状，需进一步调查铝锰钙用量对铝烧损的影响。对于转炉出钢氧含量在500ppm~700ppm的钢液，全脱氧工艺要求进入吹氩站时钢液的氧含量降低至20ppm~80ppm，半脱氧工艺要求进入吹氩站时的钢液氧含量降低至150ppm~250ppm，此阶段的脱氧主要依靠铝锰钙单耗和铝锰钙利用率。如模型（1）计算锰钙合金利用率和脱氧量之间的关系，统计生产数据结果如图3所示：

铝锰钙利用率= $\frac{(\text{转炉出钢氧含量} - \text{进吹氩站氧含量}) \times 1125}{(\text{铝锰钙单耗} \times 0.583 - \text{Als单耗})} \times 100\%$ (1)



(a) 全脱氧



(b) 半脱氧

图 3 铝锰钙合金脱氧量与其利用率的关系

如图 3 可知，不论是全脱氧工艺还是半脱氧工艺，当预脱除的氧含量较低时，铝锰钙合金的利用率也低，当预脱除的氧含量较高时，铝锰钙的利用率也高。说明铝锰钙合金的使用是过量的，存在大量的烧损。由于转炉出钢的温度在 1600℃ 以上，铝锰钙合金通过溜管从顶部加入，容易与空气中的氧气发生氧化。被烧损的合金中 Ca 的沸点低易挥发，Al 和 Mn 与空气中的氧气反应生成 Al_2O_3 和 MnO ，以氧化物的形式与钢液混合。 Al_2O_3 以氧化物的形式上浮，而 MnO 在高温下会被铁还原： $MnO+Fe=FeO+Mn$ ，相当于引入了新的氧元素。铝锰钙合金因使用过量而引起的烧损产物 FeO ，这将需要在吹氩站时喂入更多的铝线来脱除。

使用模型 2 计算铝线用量，通过减少铝锰钙用量提高其利用率，再结合 Als 含量要求，在吹氩站喂入少量铝线即可满足脱氧需求：

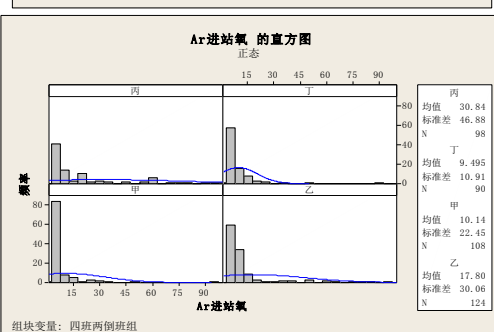
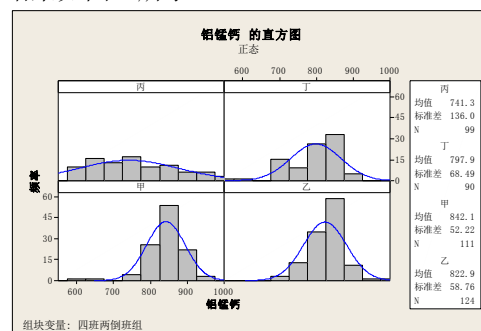
$$\text{铝线} = \frac{\text{转炉出钢含氧量} \times \text{钢液重量} \times 1.125 + \frac{\text{Als 含量}}{100} \times \text{钢液重量} - \text{铝锰钙} \times 0.583 \times \frac{\text{铝锰钙利用率}}{100}}{1000000} \quad (2)$$

使用模型 (1) 和模型 (2) 计算表 1 中铝线的理论值应为：全脱氧时在吹氩站中需喂入铝线 46.96kg，半脱氧时在吹氩站中需喂入铝线 79.54kg。而实际值均比理论值高出 40.65kg 和 227.03kg，证明了以上结论：铝锰钙合金的过量使用，造成了铝锰钙合金利用率的下降，而其烧损产物又需使用更多的铝线来脱除，这是脱氧剂利用率低下的主要原因。

3.2 产线应用效果

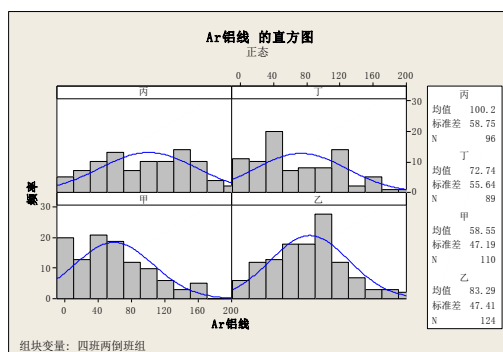
通过脱氧工艺模型 (1) 和 (2) 的建立，在转炉-吹氩站工艺段投入运行。选甲乙丙丁四个班组进行普通低碳铝镇静钢的生产（全脱氧方式），甲班、乙班使用原参数，丙班、丁班使用新参数。新参数中降

低了铝锰钙合金的用量，并重新计算了铝线的加入量。结果如图 4 所示：

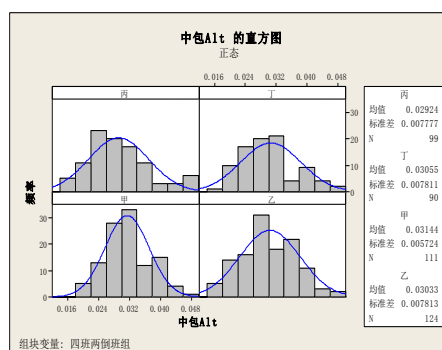


(a) 铝锰钙直方图

(b) 进站氧直方图



组块变量：四班两倒班组



(c) 铝线直方图

(d) Als 直方图

图 4 脱氧工艺模型的应用效果

由图 4 可知，丙丁班降低了铝锰钙合金的用量至 750kg，甲乙班仍保持在 850kg 左右，钢液进吹氩站的氧含量均在 0.002% 以下，说明减少铝锰钙用量仍能满足生产要求。各班组铝线用量约为 80kg，Als 均控制到 0.03%，产品达标。对脱氧情况进行统计，

丁班的脱氧剂中铝的烧损量相对较小，为 0.466kg/t；其次为丙班，为 0.527kg/t；而甲班和乙班脱氧剂中铝的烧损量最大，为 0.6kg/t。实验班组的脱氧剂中铝的烧损量降低了 17%左右。

对板坯中的氧含量测试采用 GB/T 11261-2006《钢铁氧含量的测定-脉冲加热情气熔融-红外线吸收法》，测试结果如表 3：

表 3 板坯中氧含量的测试

氧含量 (ppm)	甲班	乙班	丙班	丁班
第一次	37	39	27	29
第二次	33	33	29	32
第三次	31	35	31	27
平均值	34	36	29	29

从测试的结果看，使用新参数脱氧的板坯的氧含量比原参数低 5ppm。在降低铝锰钙合金用量的情况下，不但可以减少烧损，通过计算铝线用量，还可进一步降低板坯中的氧化铝夹杂，有利于提高板坯质量。

4 结论

(1) 转炉-吹氩站脱氧工艺中，全脱氧工艺的脱氧剂利用率低于半脱氧工艺，与全脱氧工艺中铝锰钙合金用量偏高有关。

(2) 铝锰钙合金用量偏高，在与高温的钢液接触时，易与空气中的氧气发生氧化而烧损。所生成的二氧化锰被铁还原生成氧化亚铁，增加了脱氧难度，需要吹氩站喂入更多铝线，是导致脱氧剂利用率低的主要原因。

(3) 使用数据统计证明了降低铝锰钙合金用量的可行性，并建立了脱氧工艺模型用于计算铝线的用量。提出铝锰钙合金的利用率、节约铝线的用量的方案，并生产验证其生产普通低碳铝镇静钢时脱氧效果达标。

(4) 通过转炉-吹氩站脱氧工艺的优化，梅钢炼钢工艺段脱氧剂中铝的消耗量降低了 0.11kg/t，在提高钢板质量的同时，降低了生产成本，现场使用效果明显。

参考文献：

- [1] 李军明, 杨晓江, 王书桓等. 冷轧用 SPHC 钢硅含量影响因素分析[J]. 钢铁, 2010, 45(7): 33~35
- [2] 马焕珣, 王新华, 黄福祥, 季晨曦, 潘宏伟. 脱氧工艺对低碳铝镇静钢洁净度的影响[J]. 钢铁, 2016, 51(01): 19-24
- [3] 杨忠平, 温良英, 彭政. SPHC 钢铸坯夹杂物分布及组成分析[J], 第 15 届冶金反应工程学会会议论文集, 2011: 405-409
- [4] 李源源, 邓深, 宾利文, 杨剑洪, 陈立鹏, 陈利. BOF-CC 工艺生产 SPHC 钢的洁净度研究及实践[J], 柳钢科技, 2018(01): 10-13
- [5] 刘晓峰, 张杰新, 文敏. 转炉-吹氩站-连铸工艺生产含铝钢试验[J]. 炼钢, 2011, 27(06): 24-27
- [6] 张杰新, 刘晓峰. 吹氩站精炼含铝钢的生产实践[J]. 炼钢, 2013, 29(01): 4-6
- [7] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 冶金工业出版社, 2013. 01: 537-559
- [8] 韩乃川, 杨素波, 文永才, 张大德, 王胜. 炼钢脱氧工艺现状及改进攀钢脱氧工艺的建议[J]. 钢铁钒钛, 2000, 21(04): 34-38
- [9] 王敦旭. 炼钢脱氧工艺及夹杂物控制探讨[J]. 四川冶金, 2021, 34(05): 9-13
- [10] 王多刚, 虞大俊, 左康林. 吹氩钢脱氧铝消耗及脱氧工艺对夹杂物的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(6): 45-51