

吹氩流量对 RH 精炼过程钢液质量的影响研究

白旭旭*, 张敏, 袁开通, 曾建华

攀钢集团研究院有限公司, 攀枝花 617000

Study on the Effect of Argon Blowing Flow Rate on the Quality of Liquid

Steel in RH Refining Process

Bai Xuxu*, Zhang Min, Yuan Kaitong, Zeng Jianhua

Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua, 617000, China

1. 前言

近年来,冶金工业发展迅速,对钢材品质的要求越来越高,对钢中有害元素的含量要求越来越低^[1-2]。RH 真空精炼是提高产品质量、降低成本、保证连铸顺行的重要技术措施^[3]。许多冶金学者对 RH 精炼过程做了大量的优化和研究,其中包括提高 RH 真空精炼过程中循环流量的研究^[4]。王晓冬^[5]等通过数值模拟对不同充气量条件下的循环流量进行了预测,发现循环流量随充气量的增加而增加。耿佃桥^[6]等采用数值模拟方法分析了不同工艺因素对 RH 精炼中夹杂物去除过程的影响。数值结果表明在浸渍管插入深度为 500 mm,真空度为 1kPa 的条件下,吹氩量达到 2000 L 时夹杂物去除率可达到 75%;吹氩量达到饱和值后,进一步增大吹氩量不能继续促进 10 μ m 以上夹杂物的去除。艾新港^[7]等通过现场试验研究了 RH 纯脱气时间、吹氩量和初始 T.O 对脱氧和去除夹杂物的影响,发现 RH 提升气体量由 60m³/h 增大到 72m³/h,取得良好的脱氧效果。因此,有必要采取合理的吹氩流量增大循环流量,提高 RH 的生产效率。本文针对攀钢 RH 精炼工序,开展了不同吹氩流量对钢液质量的影响研究。

2. 计算及方案

氩气作为驱动气体由插入管上升管吹入,带动钢液循环,吹氩流量的大小对循环流量有一定影响。钢液在真空室内的循环流量计算公式如下:

$$U=3.8\times 10^{-3}\times D^{1.4}\times Q^{0.31}\times H^{0.5}$$

其中, U: 钢液循环量, t/min; Q: 吹氩流量, L/min; D: 插入管直径, cm; H: 循环气体用循环管长度, cm。

RH 精炼炉基本参数如下:

表 1 RH 基本参数

Table 1 Basic parameters of RH

D/cm	H/cm	钢水/t
50	108	130

经计算,当 RH 吹氩流量增大后,循环流量增大,在相同的 RH 处理时间下,吹氩流量越大,循环次数越多,越有利于钢水夹杂物上浮,提高钢液质量。

为验证上升管吹氩流量对 RH 精炼过程钢液质量的影响，主要开展了吹氩流量分别为 1200NL/min、1400NL/min、1600NL/min 三组工业试验，从而确定合适的吹氩流量，提升 RH 精炼效率。

3. 结果与分析

3.1. 过程 O 活度及 H 含量控制

从表中可以看出，RH 进站 a[O]大部分炉次分布在 12.1~20.5ppm 之间，大生产数据大部分分布在 13~17ppm。RH 出站 a[O]分布在 9.3~12.2ppm 之间，提升其体 1600NL/min 时，RH 出站 O 活度低于 1400ML/min。采用三种吹氩流量下，RH 出站氢均在 1ppm 以下。

表 2 冶炼数据

Table 2 Smelting data

编号	RH 进站 [O]/ppm	RH 出站 [O]/ppm	RH 进站 T/°C	RH 出站 T/°C	RH 出站 [H]/ppm	提升气体流量/(NL·min ⁻¹)
1	12.1	10.7	1554	1527	0.73	1600
2	15.1	9.3	1557	1529	0.89	1600
3	14.6	11.8	1560	1530	0.88	1400
4	20.5	12.2	1573	1528	0.74	1400
5	15.3	9.7	1561	1536	0.77	1200
6	16.6	10.9	1568	1541	0.76	1200

3.2. 钢液成分及渣成分变化

对试验后炉次 C、Si、Mn、P、S 成分控制情况进行对比，如表 3 所示。可见，不同流量下冶炼，炉次各成分控制稳定。

表 3 试验炉次成分控制情况/%

Table 3 Composition control of test furnace/%

编号	提升气体流量/ (NL·min ⁻¹)	工序	C	Si	Mn	P	S
1	1600	RH 进站	0.734	0.703	0.908	0.013	0.007
		RH 出站	0.763	0.731	0.905	0.013	0.007
2	1600	RH 进站	0.732	0.708	0.917	0.016	0.006
		RH 出站	0.759	0.748	0.932	0.017	0.006
3	1400	RH 进站	0.715	0.686	0.887	0.017	0.004
		RH 出站	0.75	0.713	0.918	0.017	0.004
4	1400	RH 进站	0.738	0.72	0.881	0.012	0.003
		RH 出站	0.766	0.693	0.916	0.012	0.003
5	1200	RH 进站	0.753	0.704	0.913	0.013	0.005
		RH 出站	0.762	0.724	0.914	0.013	0.005
6	1200	RH 进站	0.745	0.72	0.903	0.0013	0.003
		RH 出站	0.759	0.729	0.935	0.0014	0.003

对试验后炉次 RH 精炼渣进站成分及碱度进行对比，如表 4 所示。可见，RH 进站钢渣碱度分布范围在 2.04-2.61 之间，经 RH 处理后，渣碱度分布在 1.98-2.40 之间，与大生产渣成分相比，变化不大。

表 4 RH 进出站精炼渣成分

Table 4 Composition of RH inlet and outlet refining slag

编号	工序	分析结果/%							R
		CaO	FeO	MgO	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F ⁻	
1	RH 进站	53.45	0.713	6.52	0.238	20.36	10.98	2.28	2.61
	RH 出站	51.92	0.736	8.13	0.232	22.01	10.51	2.23	2.36
2	RH 进站	52.78	0.687	5.75	0.209	25.81	11.89	2.12	2.04
	RH 出站	51.26	0.678	6.26	0.224	25.63	12.16	2.02	2.00
3	RH 进站	51.69	0.679	6.09	0.210	23.45	11.66	2.04	2.20
	RH 出站	50.01	0.703	7.36	0.256	24.77	11.71	1.94	2.02
4	RH 进站	55.01	0.781	6.79	0.179	22.99	10.12	1.96	2.39
	RH 出站	53.66	0.896	7.21	0.186	23.64	9.89	1.99	2.27
5	RH 进站	54.81	0.901	6.26	0.167	21.55	12.88	1.93	2.54
	RH 出站	52.93	1.102	6.35	0.187	22.09	12.65	2.02	2.40
6	RH 进站	53.11	0.996	7.22	0.241	25.87	8.93	2.08	2.05
	RH 出站	51.23	1.038	9.03	0.239	25.92	7.26	1.94	1.98

3.3. 非金属夹杂物变化

对所取试样进行线切割、粗磨、细磨、精抛后，采用 Aspex 全自动夹杂物分析仪扫描 100 mm² 视场内尺寸为 1 μm 以上有效夹杂物，对所得数据进行统计分析，确定钢中非金属夹杂物的成分并归类。

经统计发现 RH 进站夹杂物主要为 MnS、CaO-SiO₂、Al₂O₃-SiO₂、CaO-Al₂O₃-SiO₂、CaO-Al₂O₃-SiO₂-MnO 和 Al₂O₃-SiO₂-MnO 五类夹杂，如图 1 所示。

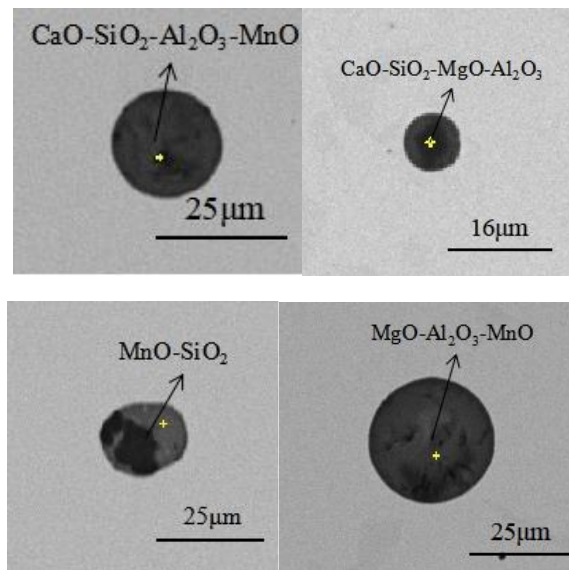


图 1 RH 进站典型夹杂物

Fig.1 Typical inclusions in RH inlet

采用不同吹氩流量时，夹杂物出站的典型夹杂物类型主要为硅酸盐和钙铝酸盐，如图 2、3、4 所示。

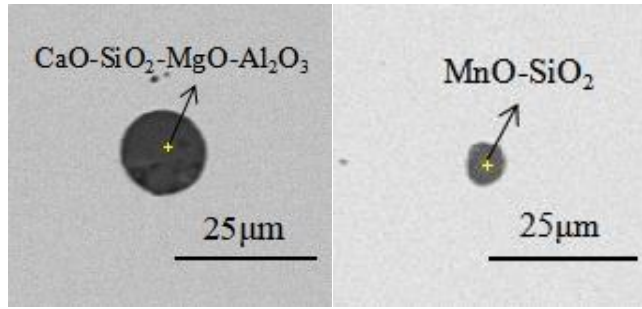


图 2 RH 出站典型夹杂物（提升气体流量为 1200NL/min）

Fig.2 Typical inclusions at RH outlet (lift gas flow rate of 1200NL/min)

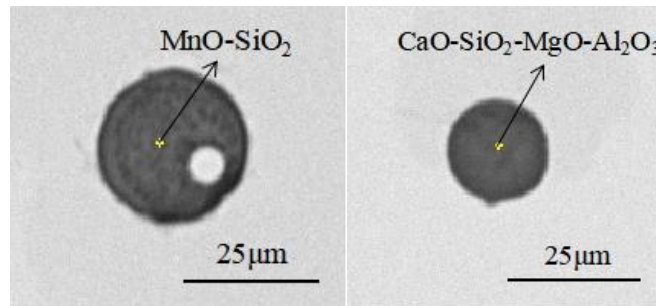


图 3 RH 出站典型夹杂物（提升气体流量为 1400NL/min）

Fig.3 Typical inclusions at RH outlet (lift gas flow rate of 1400NL/min)

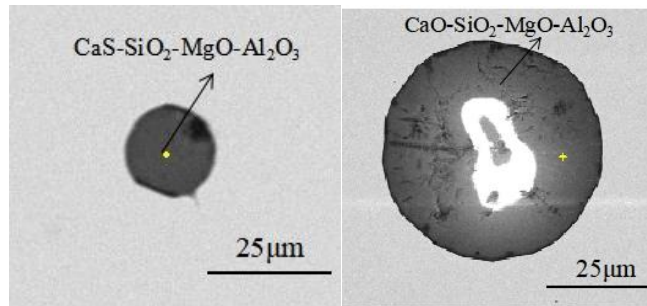


图 4 RH 出站典型夹杂物（提升气体流量为 1600NL/min）

Fig.4 Typical inclusions at RH outlet (lift gas flow rate of 1600NL/min)

表 5 RH 出站夹杂物数量密度及平均直径

Table 5 Quantity, density and average diameter of inclusions at RH outlet station

编号	提升气体流量/ (NL/min)	数量密度/ (个·mm ⁻²)	平均直径/μm
1	1600	6.17	1.11
2	1600	4.32	1.53
3	1400	9.53	1.02
4	1400	3.41	1.66
5	1200	6.70	1.19
6	1200	9.16	1.45

对 RH 出站夹杂物数量密度和平均直径进行了统计分析，发现不同气体流量下 RH 出站夹杂物平均直径均在 1.02-1.66 μm 范围内，夹杂物数量密度在 3.41-9.53 个/ mm^2 范围内，提升气体流量为 1200NL/min 时，其数量密度相对较大。

统计分析了不同提升气体流量下 RH 出站时钢中夹杂物粒径分布，从表中可以看出，提升气体流量越大，粒径 1-3 μm 的夹杂物多占比例越多，3-6 μm 的夹杂物多占比例越来越少，大于 10 μm 的夹杂物多占比例也增多，且大尺寸夹杂物基本为氧化物复合夹杂，可能是 3-6 μm 的夹杂碰撞长大未来得及上浮导致。

表 6 RH 出站夹杂物粒径分布数据

Table 6 Inclusion particle size distribution data of RH outlet station

炉号	提升气体流量 (NL/min)	夹杂物粒径分布 (%)			
		1-3 μm	3-6 μm	6-10 μm	>10 μm
1	1200	89.08	9.93	0.85	0.14
4	1400	92.89	5.95	0.83	0.33
5	1600	95.52	2.78	0.62	1.08

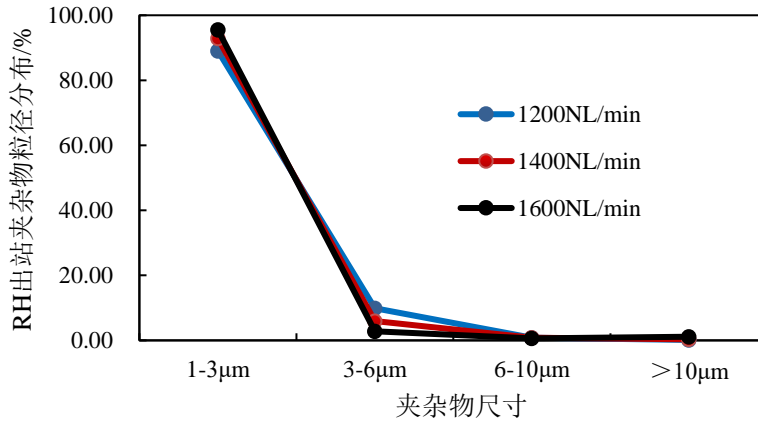


图 5 RH 出站夹杂物粒径分布

Fig. 5 Inclusion particle size distribution at RH outlet

经过分析统计发现，提升气体流量增大为 1600NL/min 时，其夹杂物数量密度、平均直径与提升气体为 1400NL/min、1200NL/min 相比，变化不大，但夹杂物粒径分布在 1-3 μm 范围内所占比例最高，>10 μm 的夹杂所占比例也最高，其 3-10 μm 范围内的夹杂所占比例最少，可能是其碰撞长大未上浮导致。

通过分析可知，提升气体流量为 1600NL/min 时，其脱气能力与现有工艺相比，相差不大，但其出站时 3 μm 以下的夹杂物所占比例最高，钢中夹杂物的数量密度也较低，更有利于夹杂物的去除。

4. 结论

(1)循环流量随着吹氩流量的增加而增加。随着 RH 精炼对去除夹杂物要求的提高，需要制定合理的吹氩流量以满足钢液精炼的要求。

(2)当上升管吹氩流量为 1600NL/min 时，RH 出站 3 μm 以下的夹杂物所占比例最高，钢中夹杂物的数量密度也较低，更有利于夹杂物的去除。

参考文献

- [1] 潘秀兰, 李震, 王艳红等. 国内外纯净钢生产先进技术[J]. 炼钢, 2007, (01): 59-62.
- [2] 魏军, 刘中柱, 蔡开科等. 炼钢—精炼—连铸工艺生产高碳钢的质量控制[J]. 炼钢, 2000, (03): 46-51.
- [3] 刘浏, 曾加庆. 纯净钢及其生产工艺的发展[J]. 钢铁, 2000, (03): 68-72.
- [4] Zhang Z, Ma P, Dong J, et al. Effects of different RH degasser nozzle layouts on the circulating flow rate[J]. Materials, 2022, 15(23): 8476.
- [5] 王晓冬, 王维娜. RH 真空精炼吹氩参数对循环流动影响的数值分析[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(06): 682-685.
- [6] 耿佃桥, 雷洪, 赫冀成. 不同工艺因素对 RH 精炼夹杂物去除过程的影响[J]. 钢铁, 2009, 44(10): 26-30.
- [7] 艾新港, 包燕平, 吴华杰等. RH 工艺生产轴承钢脱氧和去除夹杂物研究[J]. 钢铁, 2009, 44(07): 43-46.