高钙线在LF精炼炉的生产实践*

梁光生,李东明,李 伟

(内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章主要研究转炉炼钢现有生产条件下高钙线钙处理的可行性、工艺技术方法及冶金效果,与原铁钙线处理做比较,并进一步优化高钙线处理工艺,提高钙回收率,改善钢水流动性、降低吨钢钙处理成本,减少烟尘的排放。

关键词: 高钙线; 铁钙线; 水口堵塞; 成本

中图分类号: TF713 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)01-0041-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.01.012

Production Practice on High Calcium Line in LF Refining Furnace

Liang Guang-sheng, Li Dong-ming, Li Wei

(*Steel Tube Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, it is mainly studied the comparison of feasibility, technology method and metallurgical effects for calcium treatment of high calcium line under the existing production conditions of converter steel-making with those of original iron calcium line so as to further optimize treatment process of high calcium line, improve recovery rate of calcium and fluidity of molten steel as well as reduce cost of calcium treatment per ton of steel and dust emissions.

Key words: high calcium line; iron calcium line; nozzle clogging; cost

随着钢铁市场化改革,对产品质量与环保要求越来越高,不仅要求提高工艺质量、优化控制过程,同时考虑成本与环境指标,尽量减少烟尘排放。钢管公司制钢部主要设备有120 t氧气顶底复吹转炉2座,LF精炼炉2座,5机5流大小圆坯连铸机2台。可生产石油套管、高中低压锅炉管、液压支架管、高压气瓶管、结构用无缝管、输送流体用管、车轿管、方矩管等管坯。钢种多数为铝镇静钢,为提高钢水质量和保证连铸可浇性,需要对钢水进行钙处理。以往采用铁钙线进行钙处理,由于钙粉与铁粉比重不同,经常出现铁粉与钙粉混合不均匀现象,造成钢水钙处理效果不稳定,在喂丝过程中,铁钙线容易在钢渣表面反应,产生大量烟尘,使钙处理操作难以把握,钢水絮流现象时有发生。为了解决上述问题,2020年钢管公司制钢部开始引进实芯高钙线进行钙处理,进行高钙线在LF精炼炉的工艺技术优化,保证了钢水钙处理效果稳定可靠,提高了钙收得率,在提高经济效益的同时,减少烟尘排放量。

1 钙处理机理

对铝镇静钢钙处理主要目的是将铝脱氧产生的高熔点脆性Al_2O_3夹杂物变性成钙含量较高的低熔点钙铝酸盐夹杂(如$12CaO \cdot 7Al_2O_3$),同时减少钢中有害的沿晶界分布的Ⅱ类硫化物的数量,改变其

* 收稿日期: 2020-12-01

作者简介: 梁光生(1973-),男,内蒙古包头市人,高级技师,现从事炼钢精炼工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

组成和性质，达到洁净钢水、改善钢质量、解决连铸过程中水口堵塞等问题。

1.1 钙处理脱氧机理

钢水在冶炼、精炼过程中会生成大量氧化物或脱氧产物，这些氧化物如不去除将对钢的内在质量产生致命影响，因此向钢液中喂入钙线，利用 Ca 的强还原性，与脱氧产物作用还原钢中金属氧化物，生成钙的氧化物，或与其它氧化物形成容易在钢中上浮的低熔点复合化合物，即 Ca 的氧化物变性，从而减少钢中氧化物，净化钢液，提高钢的纯洁度。

1.2 钙处理对 Al_2O_3 夹杂物的变性机理

铝脱氧钢水钙处理过程中[1]可能形成的有 Al_2O_3、CaO、CaS、$CaO\cdot 6Al_2O_3$（CA_6）、$CaO\cdot 2Al_2O_3$（CA_2）、$CaO\cdot Al_2O_3$（CA）、$12CaO\cdot 7Al_2O_3$（$C_{12}A_7$）、$3CaO\cdot Al_2O_3$（C_3A）等，随着 Ca 含量的增加，Ca 将不断地将 Al 从 Al_2O_3 中置换出来，发生如下反应：

$$x[Ca] + y(Al_2O_3) = x(CaO)(y - 1/3x)(Al_2O_3) + 2/3x[Al] \quad (1)$$

如式（1）所示，夹杂物逐步发生 $Al_2O_3 \rightarrow CaO\cdot 6Al_2O_3 \rightarrow CaO\cdot 2Al_2O_3 \rightarrow CaO\cdot Al_2O_3 \rightarrow 12CaO\cdot 7Al_2O_3 \rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3 \rightarrow CaO$ 的转变。形成复合 Ca－Al 夹杂物时，钢中 Ca 含量与 Al 含量的关系见图1。

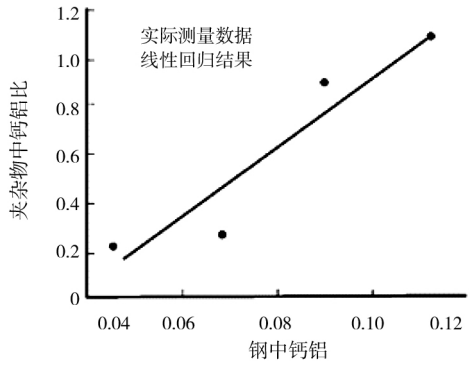


图1 夹杂物和钢中钙铝比变化趋势

铝脱氧钢中存在的氧化铝夹杂物（CA_6、CA_2、CA）熔点很高，在连铸温度下呈固态，很容易在中间包水口处聚积引起堵塞，而残留在钢中 Al_2O_3 夹杂物与钢的基体相比呈硬脆性，在轧制过程中很容易破碎并且延轧制方向连续分布，从而造成严重的缺陷。向铝脱氧钢液中喂入钙线，就能改变铝氧化物夹杂的形态，使其尽量生成液相的 $12CaO\cdot 7Al_2O_3$，其熔点很低，而且密度小，在钢液中处于液态，易于集聚上浮至炉渣，在进入中间包前从钢液中上浮去除，不仅可以减轻中间包水口堵塞问题，保证连铸顺利进行，改善钢液的浇铸性能，还可以增加钢的清洁度，改善钢的质量。

1.3 钙处理对钢中 [O]、[S] 含量的影响

Ca 与钢种的 [O] 和 [S] 的亲合力都很强，生成的 CaS 夹杂，易在水口部位聚集，导致结瘤或加剧 Al_2O_3 水口结瘤。为保证钙处理效果，钙的加入量须满足生成液态铝酸钙夹杂物，同时避免 CaS 夹杂析出，通常把钢水中的 [Al] 及 [S] 含量降低到与 $C_{12}A_7$ 平衡值以下进行钙处理。

2 高钙线与铁钙线理化指标对比

高钙线与铁钙线理理化指具体见表1。

表1 高钙线与铁钙线理化指标对比

名称	钙含量/%	粉重/（$g\cdot m^{-1}$）
高钙线	98.6	58.0
铁钙线	39.2	257.8

3 高钙线与铁钙线钙处理效果比较

铁钙线为铁钙比为 1.56∶1 的粉剂，在喂丝过程中[2]，铁钙线容易在钢渣表面反应，造成钢水钙处理效果不稳定，钢水絮流现象时有发生，降低钢水的可浇性；另外钙粉与铁粉比重不同，经常出现铁粉与钙粉混合不均匀现象，也会造成钢水钙处理效果不稳定。

实芯高钙线是用纯钙锭高压热拔抽拉成的 Φ7.5～Φ7.8 mm 规格的高钙线作为包芯线芯料，外壳采用冷轧光亮钢带包裹而成，与钙铁线相比线径均匀，具有抗拉强度高、韧性好、不易断线等优点，更利于喂线量准确控制。实芯高钙线具有易控制、易保存、钙含量高的特点，钙处理效果稳定且成本低。

3.1 钙吸收率

高钙线的外包钢壳更厚，可以将钙喂到钢水更深部位，并在临界深度以下停留更长的时间，从而达到更高的钙回收率。实芯高钙线与钙铁线在制钢部冶炼铝镇静钢处理过程中效果显示，在保证钢水相同钙含量情况下，实芯高钙线比钙铁线的喂线长度平均减少 54%，喂线重量仅为钙铁线的 1/4；钙处理时间平均 9～15 s，比铁钙线钙处理（60～120 s）大大缩短，排放的烟尘也大大降低。表2 为铁钙线和高钙线使用情况。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　铁钙线与高钙线钙收得率对比

名称	产量/t	使用量/t	钙收得率/%
铁钙线	115 963.844	113.48	55.6
高钙线	140 339.911	51.56	59.6

3.2　提高钢水可浇性

铁钙线芯料为含钙粉剂，容易出现芯料不匀和空心现象，而高钙线的芯料为高密度的纯钙芯棒，每米含钙量更高、更均匀、更稳定，确保了钙处理效果更稳定，为钢水 Al_2O_3 夹杂完全变性提供保证，减少了连铸钢的水口堵塞几率，保证了铸机顺行、提高了产量。

3.3　有效降低吨钢成本

在 LF 精炼炉，对 34Mn6、20#、37Mn/1 等钢种进行对比实验，不同钢种的铝含量、氧含量和夹杂物均有所不同，进行钢水钙处理的包芯线消耗也存在较大差异，使用实芯高钙线的消耗基本为铁钙线消耗的的 1/3 – 1/4。在平均增钙量基本相同的条件下，使用实芯高钙线进行钢水钙处理，成本能降低 50% ~60%，优势非常明显。表 3 为铁钙线和高钙线使用成本。

表 3　铁钙线与高钙线成本指标对比

名称	产量/t	使用量/t	单价/元	总价/元	吨钢成本/(元·t^{-1})
铁钙线	115 963.844	113.48	6 260.58	710 450.62	6.13
高钙线	140 339.911	51.56	8 800	453 728	3.01

如表 3 所示，2019 年，铁钙线平均加入量为每炉 100 ~150 m，平均收得率为 50.94%，钢中平均钙含量为 0.001 2%；2020 年，高钙线平均加入量为每炉 30 ~40 m，平均收得率为 57.17%，钢中平均钙含量为 0.001 42%。使用高钙线的成本明显减低。

由于使用高钙线，吨钢成成本降低 3.12 元/t，按全年处理 180 万 t 钢水核算，全年降低成本 562 万元。

3.4　有利于纯净钢生产

在 2020 年 5 月在 LF 精炼炉，对 34Mn6 钢种进行铁钙线、高钙线处理钢冶炼 60 炉，分别取样，进行夹杂物分析，金相检验结果见表 4。

表 4　金相检验对比结果　　级

名称	A		B		C		D		DS
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	
高钙线	0	0	0	0.5	0	0	0	0.5	0
铁钙线	0	0	0	2.0	0	0	0	0.5	0

由于实芯高钙线为高密度纯钙芯棒，质量易于检测，更小的芯线比表面积，不易氧化而失去活性，使其具备更长的保存期，可以将污染钢液的氧化钙夹杂物降到最低；实芯高钙线的钙处理过程不会带入粉剂包芯线存在的其他氧化物而污染钢液（如铁钙线里的氧化铁）。工艺优化后，用高钙线代替铁钙线后，对进一步改善钢中夹杂物形态，降低 B 类夹杂物数量起到一定的作用。

3.5　减轻作业强度

铁钙线是粉末状填充的，芯料不匀和空心现象较多，喂线过程常出现断线和卡线情况，对炼钢生产造成一定的影响，实芯高钙线是用厚钢壳包裹的高密度实芯高钙棒，线质较硬，喂线时不打滑、不跑偏，操作非常顺畅。另外，实芯高钙线单盘线长比钙铁线要长 1 倍左右，而用量只有铁钙线长度的 1/3 左右，单盘实芯高钙线的使用炉数是钙铁线的 4 倍。因此，使用实芯高钙线不但喂线操作非常顺畅，而且更换、穿线次数大幅减少，工人作业强度明显减轻。

4　LF 精炼炉的工艺优化措施

4.1　合理调整喂线速度

精炼喂线速度对 Ca 吸收率的影响较大，过快和过慢均会导致吸收率降低，合适的喂线速度可以提高钙的收得率。如果速度过快，一方面会因局部

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

产生的大量钙蒸气而使得钢液剧烈翻腾，大量钙蒸气直接挥发到空气中；另一方面钙蒸气来不及溶解而大量上浮，从而降低其收得率。反之，如果速度过慢，会导致喂入深度不足，在其能完全溶解于钢液前便上浮到钢液面而浪费掉。

实芯高钙线的钙含量比铁钙线高，如果采用相同的喂线速度，钢液翻腾将更加剧烈，不利于钙吸收。不同的钢种、不同的钢包容量，最佳喂线速度有所不同，需要根据现场实际情况进行选择。实践表明2.6～3.0 m/s的喂线速度效果最佳[3]。

4.2 正确选择喂线位置

喂线位置对于钙的收得率也有很大影响，实芯高钙线喂入点应选择在钢液下降流的中心位置，尽量远离吹氩亮圈，这样无论钙是以气态还是以液态进入钢液，都会在下降流的作用下强制其下降，从而延长其在钢液中的停留时间，使其被钢水充分吸收。

4.3 软吹及镇静时限要求

经过高钙线处理后的钢水，必须有一定的钢水静置时间并辅以软吹氩弱搅拌，以确保改质及变性后的夹杂物集聚、长大、上浮。结合LF精炼炉的工艺优化特点，根据斯托克定理结合钢水的净深进行理论计算并验证其合理性，一般弱搅拌时间控制8～15 min，镇静时间保持在8 min。这样提高了钢水的纯净度及可浇性。

5 结论

(1) 采用实芯高钙线代替铁钙线进行钙处理，调整钙处理操作，如喂入深度、喂线速度、喂线角度等，合适的氩气流量、合适的喂线速度，可提高钙的释放深度与钢水直接反应，提高钙的收得率，有效的避免中包水口堵塞，降低了吨钢钙处理成本，缩短了钙处理时间，有效减少烟尘排放。

(2) 经过实践证明，选用实心高钙线进行钙处理能够满足生产实际需要，在提高钢水洁净度、提高铸坯质量、保证生产顺行、提高产能方面起到了较大的作用，并给企业带来了可观的经济效益。

参 考 文 献

[1] 贺道中，苏振江，周志勇. 铝脱氧钢水钙处理热力学分析与应用[J]. 湖南工业大学学报，2010，24(3)：5－9.

[2] 徐太安，宋明峰. 喂线技术在LF精炼炉的应用[J]. 一重技术，2007，(5)：34－35.

[3] 张青山，王春旭，关军学，等. 钢包喂线技术的应用[J]. 黑龙江科技信息，2003，(9)：98.

(上接第40页)

参 考 文 献

[1] 周朝刚. 转炉双渣脱磷一次倒渣温度研究[J]. 钢铁，2014，(3)：24－28.

[2] 冯士超. 转炉炼钢终点控制技术应用现状[J]. 冶金自动化，2016，(2)：1－6.

[3] 叶玉奎. 复吹转炉双渣脱磷工艺实践[J]. 中国冶金，2018，(1)：40－44.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net