# 稀土车轮用钢炼钢生产实践*

魏晓东[1,3], 崔海平[2], 宿 成[1], 刘德勤[1], 张嘉华[1], 张振杰[1]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司生产部, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古自治区稀土钢产品研发企业重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要**: 介绍了稀土车轮钢在炼钢各个工序的关键控制及冶炼工艺, 通过采用不同炼钢工艺控制, 实现钢中稀土收得率及铸机可浇性稳定控制。为提高钢中稀土元素收得率, 结合稀土元素脱氧、脱硫特性, 炼钢环节通过对 KR 脱硫工序、转炉终点及出钢控制、LF 和 RH 精炼过程控制、铸机浇注控制等各个工序进行严格把控, 保证了稀土元素收得率稳定控制 38% ~40%, 完成稀土车轮钢炼钢环节生产控制。

**关键词**: 稀土钢; 车轮钢; 收得率; 脱氧脱硫
**中图分类号**: TF723 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009 - 5438(2019) 06 - 0010 - 04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.06.003

# Production Practices for Steel Making of Wheel Steel with Rare Earth

*Wei Xiao - dong*[1,3], *Cui Hai - ping*[2], *Su Cheng*[1], *Liu De - qin*[1], *Zhang Jia - hua*[1], *Zhang Zhen - jie*[1]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Productive Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
3. *Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

**Abstract**: In the paper, the key control and smelting process in each procedure of steel making for wheel steel with rare earth are introduced. The stable control for the yield of rare earth in steel and pourability of casting machine is realized with different controls of steel making process. Such procedures as KR desulfurization process, end point of converter, steel tapping, LF and RH refining process and casting in steel making are strictly controlled combining with the characteristics of deoxidation and desulfurization for rare earth elements to increase the yield of rare earth elements in steel. As a result, the yield of rare earth elements is guaranteed to be stably controlled at 38% ~40% so that the production control for wheel steel with rare earth in steel making is completed.

**Key words**: rare earth steel; wheel steel; yield; deoxidation and desulfurization

**收稿日期**: 2019 - 09 - 16

**作者简介**: 魏晓东(1986 - ), 男, 内蒙古乌兰察布市人, 助理工程师, 现从事汽车与家电用钢研发工作。

我国是拥有世界第一钢产量的钢铁大国，还是拥有世界第一稀土资源储备量和产量的稀土大国。稀土在钢中有净化钢液、使夹杂物变性和微合金化等作用。一般情况下，稀土能显著提高钢材的各类性能，钢铁厂多年的实践证明，对钢进行稀土处理，是提高钢质量、发展钢新品种的有效措施之一。近几年，我国低合金钢和合金钢的年产量大幅增加，产品也不断向高附加值方向发展，为稀土在钢中应用提供了广阔的空间，将稀土的资源优势转化为稀土钢的品种和质量优势，提高钢铁品种及质量，具有重要的现实意义。

## 1　稀土在钢液中的反应机理

根据热力学计算给出了稀土化合物的标准生成自由能与温度的变化关系[1-2]，在炼钢温度下稀土首先生成 $RE_2O_3$，然后是 $RE_2O_2S$、$RE_xS_y$、RES、$RE_x(As、Sn、Sb、Pb、Bi)_y$、REN、$REC_2$。

由于稀土元素与氧、硫的亲合力很强，为避免稀土脱硫影响收得率，炼钢环节对钢水中硫含量进行控制，在 RH 工序添加稀土合金时钢中硫含量均不大于 0.001%，稀土与氧反应生成的氧化物最常见的是 $RE_2O_3$ 化合物，稀土氧化物的熔点都很高，且生成自由能(－628 ~ －1 047) kJ/mol，说明它们都是很稳定的稀土化合物。因此，炼钢工序要尽可能降低钢水中氧含量，降低稀土脱氧反应对稀土总量的消耗。

## 2　稀土冶炼炉渣性能对洁净度影响

由于转炉炼钢工艺特性，生产过程不可避免产生一系列脱氧产物夹杂，而钢中夹杂物直接影响钢质洁净度，因此，在精炼过程通过调整炉渣成分最大限度将钢中的夹杂物排除。精炼过程中主要的夹杂物是铝脱氧产生的 $Al_2O_3$ 夹杂，精炼渣的吸附 $Al_2O_3$ 能力与渣系中 CaO 和 $Al_2O_3$ 活度有关系。降低 $Al_2O_3$ 活度有利于铝氧反应的进行，促进脱氧产物 $Al_2O_3$ 进入精炼渣中。同时提高 CaO 活度，有利于脱氧产物被精炼渣吸附，提高渣系脱氧能力。

## 3　工艺参数控制

稀土在在钢中具有较强脱氧、脱硫能力，而添加稀土目的在钢中要求实现变质夹杂，因此，稀土脱氧、脱硫作用退居次要地位，如果稀土作为钢液的预脱氧、预脱硫剂使用，不仅会产生大量细小夹杂，而且经济上也不合算。要将稀土有效地应用于钢铁中，除充分认识其作用机理外，还必须选用合理的添加工艺，才能充分发挥其有利作用，否则作用不明显，甚至有害。所以在稀土车轮钢的冶炼过程实践方面，主要围绕降低钢中氧含量、硫含量、稳定化学成分、提高钢水洁净度、冶炼和连铸过程避免二次氧化、铸机可浇性、稀土元素收得率稳定控制等进行控制。主要工艺如下。

### 3.1　KR 脱硫

KR 脱硫工序就位铁水硫含量 0.04% ~0.06% 之间，为满足稀土钢冶炼过程钢水低硫控制，KR 工序需采用深脱硫工艺，就位铁水成分 $w([Si]) \geqslant 0.50\%$、$w([Mn]) \geqslant 0.40\%$、$w([P]) \geqslant 0.140\%$、$w([S]) \geqslant 0.40\%$、$T \geqslant 1\,330$ ℃，脱硫剂加入量大于 2 t，搅拌结束镇静后进行扒渣，扒渣次数不低于 2 次，离位铁水表面脱硫渣拔除面积大于 95%。KR 离位铁水要求 $w([S]) \leqslant 0.003\%$，离位铁水成分 $w([Si]) \geqslant 0.50\%$、$w([Mn]) \geqslant 0.40\%$、$w([P]) \geqslant 0.140\%$、$w([S]) \leqslant 0.001\%$、$T \geqslant 1\,300$ ℃。

### 3.2　转炉冶炼

转炉采用深脱至 0.001% 硫含量铁水及低硫自产废钢进行冶炼，严格控制冶炼终点的点吹次数，为降低脱氧产物，采用一拉出钢或点吹一次的出钢操作，控制出钢温度(1 640 ± 20) ℃，终点 $w([C]) \geqslant 0.04\%$，$w([P]) \leqslant 0.014\%$，出钢过程采用滑板出钢前、出钢后剩钢挡渣操作，避免下渣，出钢过程加入顶渣白灰进行造渣，可以充分保证精炼渣系的稳定性，为稳定稀土钢化学成分、降低钢水中全氧含量、提高钢水洁净度奠定较好的基础。

### 3.3　LF 精炼

LF 精炼的主要任务是成分微调、温度控制和造渣操作，采用微正压操作、大渣量、限制加热时间的方式脱硫及控制钢水增氮，保证 LF 离位 $w([S]) \leqslant 0.001\%$。使用白灰 4 ~ 6 kg/t、化渣剂 0.5 ~ 1.0 kg/t进行快速造渣操作，保证炉渣具备好的流动性及低的氧化性，并具备良好的夹杂物吸附能力。控制电极加热时间为不大于 25 min。进行两次成分调整，粗调时加入 0.5 ~1.0 kg/t 铝粒进行炉渣脱氧操作，精调时将钢中 C、Si、Mn、Nb 含量按目标调整，将钢中 $Al_s$ 含量调整至 0.030% ~0.050%，调整氩气流量，保证钢液不裸露的情况下喂入钙线，保证离位钙含量 0.002% ~0.004%，LF 精炼过程渣样成分见表 1。

表1 LF精炼过程炉渣成分

| | 成分(质量分数)/% | | | | | R | (TFe+MnO)/% | $CaO/Al_2O_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | TFe | CaO | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | MnO | | | |
| 就位 | 1.0~1.1 | 52~53 | 10.3~10.5 | 30~35 | 1.3~1.5 | 4.9~5.1 | 2.3~2.6 | 1.4~1.5 |
| 离位 | 0.8~0.9 | 61~63 | 11.0~11.5 | 22~30 | 0.5~0.6 | 5.2~5.6 | 0.6~1.0 | 2.3~2.4 |

### 3.4 RH精炼

RH精炼完成脱氢、脱氮操作,促进夹杂物的上浮排除,并在真空条件下加入稀土铁合金。RH就位炉渣碱度均值为5.52,(FeO+MnO)含量均值为0.9%,$Al_2O_3$含量均值为26%,从RH就位炉渣成分可知,炉渣满足高碱度、低氧化性、良好流动性顶渣条件,炉渣吸附夹杂能力较强,可以保证钢水洁净度及钢中全氧含量控制。RH处理过程参数见表2。

表2 RH真空处理过程参数

| 环流量/($m^3 \cdot h^{-1}$) | 真空时间/min | 最低真空度/MPa | 纯脱气时间/min | 稀土加入量/($kg \cdot t^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| 120~150 | 28~31 | 1.4~1.6 | 3~5 | 0.18~0.20 |

在RH真空处理过程中期加入钛铁合金,保证钢中钛含量控制范围0.04%~0.06%,$Al_s$含量调整至0.03%~0.045%。RH处理结束前3 min加入稀土合金,加入稀土后真空循环3 min复压,保证钢液不裸露软吹7~8 min后上钢。RH离位炉渣成分及碱度见表3。

表3 RH精炼离位炉渣成分及碱度

| 成分(质量分数)/% | | | | | R | (TFe+MnO)/% | $CaO/Al_2O_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TFe | CaO | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | MnO | | | |
| 0.5~0.6 | 54~56 | 11~12 | 25~26 | 0.3~0.4 | 4.6~5.1 | 0.8~1.0 | 2.0~2.2 |

### 3.5 CCM连铸

全程采用保护浇注技术,规范中间包水口密封、中间包覆盖剂的加入、保证中间包液位浇注高度、大包禁止下渣操作等。浇注过热度控制范围15~30 ℃(生产时为避免浇注絮流过热度按上限控制),浇铸过程采用恒拉速,铝损控制在0.002%以下、增氮控制在0.000 7%以下。浇注过程铝损、增氮、过热度控制见表4。

表4 铸机浇注过程控制

| 铝损/% | 增氮/% | 过热度/℃ |
|---|---|---|
| 0.001~0.002 | 0.000 3~0.000 7 | 25~30 |

冶炼过程氮含量均值变化趋势见图1。由图1可以看出,由于RH真空处理过程具有一定的脱氮能力,RH离位至连铸过程氮含量存在一定增幅,浇注过程增氮量均值为0.000 7%,中包样氮含量小于0.004%。

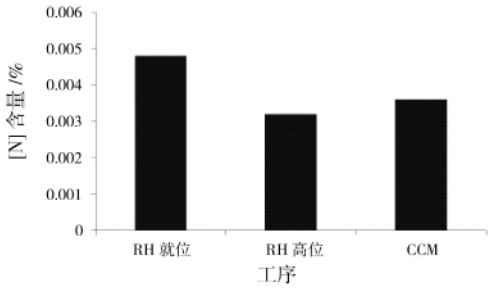



图1 过程氮含量均值变化

由于稀土具有强的脱氧作用,从生产过程RH精炼加入稀土后钢中氧含量均值的变化情况,验证了稀土脱氧能力,空白炉次和添加稀土炉次钢中氧含量均值的实际变化见图2。从脱氧能力可以看出,稀土可以作为强的脱氧剂。但是,稀土氧化物的熔点较高,密度较大,从钢液中上浮排除的难度较大,使用不当会污染钢液。

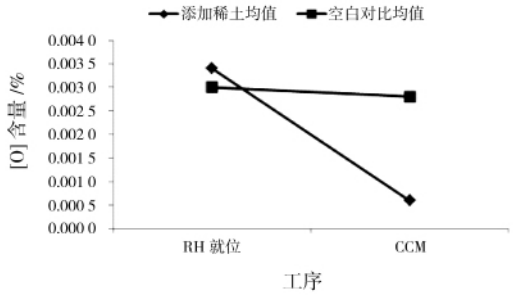



图 2　添加稀土和空白炉次钢中氧含量均值变化对比

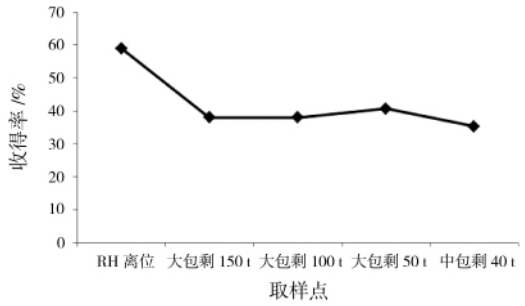



图 3　不同取样点检测稀土收得率

## 4　稀土收得率控制

在选择稀土车轮钢冶炼工艺路线、稀土合金种类、稀土合金加入时间对稀土收得率的影响时，对比了 KR + LD + LF + CCM 工艺路线、添加稀土时机及合金种类的试验。在采用 KR + LD + LF + CCM 冶炼路线时，稀土合金加入时机为 LF 精炼处理结束后加入，软吹 8 min 离站上铸机，该工艺路线虽然精简，但由于软吹的时间和底吹能力有限，钢液的中稀土元素的均匀性略差，稀土元素的收得率不稳定，收得率范围 20% ~40%；而选择 KR + LD + LF + RH + CCM 工艺路线，虽然工艺路线长，但钢中稀土元素均匀性和收得率较稳定，利于工业化生产。因此，稀土车轮钢冶炼选用 KR + LD + LF + RH + CCM 工艺路线。添加的稀土合金为 20% 铈铁合金，加入时机为 RH 真空处理结束前 3 min，加入量为 0.18 ~ 0.20 kg/t，图 3 为采用化学法对加入稀土合金后不同取样点检测稀土含量收得率控制。由图 3 可知，采用 KR + LD + LF + RH + CCM 工艺路线生产稀土车轮钢，铸机浇注过程不同时间段中包样检测稀土均匀较好，稀土收得率稳定控制在 35% ~41%。

## 5　洁净度控制

### 5.1　铸坯低倍评级

铸坯评级结果为中心偏析 C 类 1.0 级，中心疏松 0.5 级；铸坯低倍酸蚀照片见图 4。从铸坯低倍评级结果及低倍照片可以看出铸坯内部质量控制较高。



图 4　稀土钢铸坯低倍酸蚀照片

### 5.2　成品夹杂物检测

稀土车轮钢热轧成品卷厚度为 3.5 ~5.5 mm，试样检测所取样为同规格不同 3 卷，通过成品卷夹杂物检验结果表 5 可以看出，添加稀土后未对钢液造成污染，钢中洁净度控制较高，满足车轮用钢对钢质洁净度的要求。

表 5　稀土车轮钢成品热轧卷夹杂物检验结果

| 样号 | A | Ae | B | Be | C | Ce | D | De | DS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1# | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.0 | 0 | 0 |
| 2# | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.0 | 0 | 0 |
| 3# | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.0 | 0 | 0 |

## 6　结论

(1) 通过对冶炼过程硫含量的控制，在添加稀土合金时钢水中硫含量小于 0.001% 控制，有效地降低因稀土脱硫造成的稀土含量的损失，提高了稀土含量的收得率，改善了稀土硫化物对钢液的污染。

(2) 通过提高转炉终点碳含量、保证 LF 炉白渣

(下转第 26 页)

4.6.2 U76CrRE 夹杂物分析

对同一浇次的钢轨夹杂物检验，对夹杂物超标炉号905608、905611试样进行了夹杂物分析。加稀土试验炉号905615。

炉号905608夹杂物B类3级，夹杂为(Ti、V)NC + MnS。

炉号905611夹杂物D类2.5级，夹杂为Ca、Al、Si球状氧化物。

炉号905615夹杂物B类1.5级，夹杂物形态、尺寸均有所改善。

对试验结果分析可知，通过有效控制钢水的氧、硫含量，在VD后钢包进行加入稀土铈铁合金工艺试验，稀土加入量0.003%，试验结果表明，采取相应的保护浇注措施，未出现水口堵塞现象，生产工艺顺行，操作方便；稀土收得率达40%。成本降低50%。稀土在钢中分布均匀，有改善夹杂物作用，性能检验优于同浇次对比钢轨。

## 5 结论

(1) 试验结果表明在VD前进行钢包加入稀土镧硅钙铁合金试验，采取相应的保护浇注措施，未出现水口堵塞现象，生产工艺顺行，稀土加入量为0.01% ~ 0.012%，钢中稀土存量为0.001 2% ~ 0.001 8%，稀土收得率12% ~ 15%，稀土在钢中分布均匀，实现多炉连续浇注，起到了硫化物夹杂变质作用。

(2) 25CrMoBVRE钢种试制结果表明，采用稀土加入工艺可满足生产工艺的要求，稀土微合金化作用明显，产品完全满足标准及用户使用要求。

### 参 考 文 献

[1] 石富. 稀土冶金技术[M]. 北京：冶金工业出版社，2009.

[2] 余景生. 稀土处理钢手册[M]. 北京：冶金工业出版社，1993.

(上接第13页)

时间等操作，RH就位氧含量控制小于0.004%；虽然在RH精炼加入稀土后，部分稀土参与脱氧，降低了稀土元素的收得率，但是通过对冶炼过程对钢中氧含量控制，降低了钢中氧化物的数量，改善了钢质洁净度。

(3) 依据稀土钢具备强的脱氧、脱硫能力，在加入稀土后钢中氧含量的降幅达到80%，对于钢液的净化效果较好，从成品卷夹杂物的检测验证了钢质具备高的洁净度。

(4) 通过采用KR + LD + LF + RH + CCM冶炼工艺路线，钢中夹杂物控制、稀土收得率及均匀性等得到稳定控制，便于实现稀土车轮钢的稳定化生产。

### 参 考 文 献

[1] 余景生，余宗森. 稀土处理钢手册[M]. 北京：冶金工业出版社，1993.

[2] 郭锋. 碳锰纯净钢中稀土元素镧、铈的行为及合金化作用[D]. 北京：北京科技大学，2004.