

## 150 t RH 精炼终点钢水酸溶铝含量的控制

李双江<sup>1</sup> 胡志刚<sup>1</sup> 杨晓江<sup>2</sup> 张士宪<sup>3</sup> 李杰<sup>1</sup>

(1 河北钢铁技术研究院, 石家庄 050000; 2 河北钢铁集团唐钢第一钢轧厂, 唐山 063016;  
3 河北工业职业技术学院材料工程系, 石家庄 050091)

**摘要** 在参考 80 炉次 SPHD、SPHE 和 IF 钢生产数据的基础上, 采用多元线性回归分析建立了用 Al 脱氧的 RH 精炼终点钢水酸溶铝含量- [Als] 的计算模型, 分析了 RH 脱碳结束时钢水氧活度、脱氧加铝量和钢水净循环时间对终点钢水酸溶铝含量的影响。结果表明, RH 脱碳结束钢水氧活度、脱氧加铝量是影响终点钢水酸溶铝含量的重要因素; 当 RH 脱碳后钢水温度、氧活度、炉渣中 FeO + MnO 含量- (FeO + MnO) 以及钢水的净循环时间分别在 1 600 ℃、 $2 \times 10^{-4}$ 、15% 和 8 min 时, 要控制终点钢水酸溶铝为 0.02% ~ 0.05% 须在 RH 脱氧过程中控制加铝量 0.86 ~ 1.53 kg/t。

**关键词** 150 t RH 精炼 钢中酸溶铝含量 控制 计算模型

## Control of Acid Soluble Aluminium Content in Molten Steel at End of 150 t RH Refining

Li Shuangjiang<sup>1</sup>, Hu Zhigang<sup>1</sup>, Yang Xiaojiang<sup>2</sup>, Zhang Shixian<sup>3</sup> and Li Jie<sup>1</sup>

(1 Hebei Iron and Steel Technology Research Institute, Shijiazhuang 050000;  
2 No1 Steel Rolling Mill, Tangshan Iron and Steel Co, Hebei Iron and Steel Group, Tangshan 063016;  
3 Dept of Material Engineering, Hebei Institute of Vocational Technique, Shijiazhuang 050091)

**Abstract** Based on referential production data of 80 heats of SPHD, SPHE and IF steel, a calculation model for acid soluble aluminium content in molten steel- [Als] at end of RH refining deoxidizing by Al is established by using multiple linear regression analysis and the effect of activity of oxygen in liquid, adding aluminium for deoxidation and net circulation time of liquid at end of RH decarburizing on end [Als] is analyzed. Results show that the RH decarburization end activity of oxygen in liquid and adding aluminium amount for deoxidation are main factors to influence the end [Als]; as after RH decarburization the liquid temperature, activity of oxygen, FeO + MnO content in slag- (FeO + MnO) and liquid net circulation time are respectively 1 600 ℃,  $2 \times 10^{-4}$ , 15% and 8min, in order to control the end [Als] 0.02% ~ 0.05%, the adding aluminium amount in RH deoxidation process should be controlled in 0.86 ~ 1.53 kg/t.

**Material Index** 150 t RH Refining, Acid Soluble Aluminium Content in liquid, Control, Calculation Model

钢水中 Al 含量的波动是影响铝脱氧钢水连铸可浇性和钢产品质量稳定性的重要因素。钢中酸溶铝含量与铸坯的缺陷存在一定的关系<sup>[1]</sup>。许多科研工作者也对钢中合理酸溶铝含量范围进行了研究<sup>[2-5]</sup>。

本研究在参考炉次的基础上, 采用多元线性回归的数学方法, 建立 RH 精炼终点钢水酸溶铝含量的计算模型, 并通过模型计算, 找出影响 RH 终点钢水中酸溶铝含量的工艺条件和技术要求。

### 1 RH 精炼生产工艺

唐钢第一钢轧厂 RH 是 150 t 标准双工位真空装置, 采用 RH-MFB 的顶吹氧工艺技术。对于铝镇静钢, RH 脱碳结束后向真空槽内加入一定量的金属铝进行脱氧合金化。唐钢 RH-MFB 工艺的供氧强度一般控制在 1 200 ~ 1 800 m<sup>3</sup>/h, 吹氧脱碳和抽

真空时间分别控制在 13 min 和 4 min 以下, RH 精炼终点炉渣量基本控制在 20 kg/t-Fe 左右, 不同钢种和工况条件下有所差别。

炉渣的氧化性是 RH 真空精炼过程控制的重要方面, 一般炉渣中 (FeO + MnO) 的含量越大, 终点钢水溶解铝含量越低。唐钢 RH 精炼终点 (FeO + MnO) 一般在 15% 以下, 个别炉次偏高, 可达 20%。

### 2 RH 终点钢水酸溶铝含量计算模型

#### 2.1 计算模型的建立

通过对唐钢现场稳定生产某阶段连续的 86 炉次 RH 精炼生产数据进行整理, 剔除明显异常值, 选取其中的 80 炉次实绩值应用于模型的开发, 80 炉中部分炉次具体实绩值示于表 1。

在参考炉次的基础上, 研究采用多元线性回归的分析方法, 得出 RH 精炼终点钢水酸溶铝含量的计算模型, 见式(1):

表1 部分150 t RH 精炼炉次的生产数据  
Table 1 Production data of partial 150 t RH refining heats

钢号	炉号	[Als]	t	m <sub>Al</sub>	a <sub>O初</sub>	a <sub>O终</sub>	τ	钢号	炉号	[Als]	t	m <sub>Al</sub>	a <sub>O初</sub>	a <sub>O终</sub>	τ
SPHD	2102867	0.053	1 590	1.602 2	147	2	9.3	SPHE	2203659	0.035	1 539	1.172 0	153	1	4.3
	2102868	0.057	1 586	1.641 3	147	2	8.1		2203660	0.036	1 560	1.638 3	299	2	6.7
	2102869	0.056	1 596	1.521 7	96	2	8.5		2203661	0.053	1 584	1.515 8	132	2	8.1
	2202718	0.040	1 561	1.252 6	257	2	1.5		2203662	0.031	1 554	1.000 0	94	2	5.6
	2202736	0.057	1 585	1.652 2	158	2	4.1		2203663	0.037	1 570	1.159 6	145	2	5.0
	2102923	0.055	1 597	1.565 2	134	2	8.3		2203664	0.039	1 594	1.155 6	132	2	4.5
	2102870	0.055	1 599	1.778 9	185	2	9.0		2203665	0.058	1 585	1.455 6	95	2	9.1
	2102871	0.024	1 564	0.877 8	142	2	3.2		2203785	0.058	1 595	1.684 8	165	2	8.1
	2102944	0.055	1 601	1.568 4	141	2	8.2		2203788	0.063	1 584	1.455 4	147	2	3.7
	2102945	0.037	1 560	1.053 2	126	2	4.4		2203789	0.048	1 594	1.788 9	192	2	8.2
	2302679	0.057	1 598	1.677 8	154	2	8.1		2204290	0.038	1 553	1.063 2	108	1	5.6
	2302680	0.050	1 592	1.304 3	91	2	8.1		2204291	0.052	1 556	1.568 4	164	2	4.4
	2302682	0.057	1 593	1.655 6	145	2	8.0		2204295	0.058	1 611	1.602 2	155	2	8.2
	2102949	0.037	1 537	1.287 2	187	1	3.8		2204296	0.026	1 550	1.404 3	367	2	4.2
	2103173	0.048	1 571	1.076 1	139	2	3.1		2103905	0.061	1 636	1.663 2	140	2	8.3
	2103174	0.062	1 610	1.655 6	135	2	9.9		2103907	0.034	1 560	1.063 8	174	2	3.3
	2103901	0.052	1 586	1.631 6	174	2	8.2		2103908	0.042	1 562	1.266 0	177	2	3.2
	2103902	0.031	1 566	1.164 8	149	2	5.2		2102946	0.047	1 588	1.543 5	118	2	8.1
	2202738	0.051	1 601	1.433 3	104	2	8.1		2303658	0.05	1 554	1.266 0	169	2	3.2
	2203362	0.035	1 579	1.641 3	256	2	4.7		2303659	0.064	1 613	1.822 2	195	2	8.2
	2202737	0.043	1 552	1.063 2	165	2	4.1		2303661	0.035	1 559	0.900 0	41	2	3.5
	2103910	0.037	1 540	1.117 0	151	2	3.2	IF	2102947	0.055	1 582	1.677 8	184	2	4.1
	2103911	0.055	1 586	1.641 3	149	2	8.3		2102948	0.035	1 570	1.536 8	207	2	3.7
	2103912	0.041	1 503	1.010 6	96	2	3.3		2303662	0.034	1 564	1.263 2	255	2	1.1
	2103913	0.035	1 551	1.000 0	87	1	4.2		2203657	0.038	1 558	1.585 1	289	2	0.3
	2103916	0.034	1 546	1.010 5	106	2	4.5		2203658	0.066	1 591	1.800 0	218	2	6.1
	2104580	0.032	1 585	0.877 8	129	3	3.3		2303698	0.035	1 537	1.340 4	195	1	7.1
	2104616	0.062	1 596	1.655 6	140	2	8.4		2303699	0.032	1 547	1.637 4	288	2	5.4
	2104617	0.056	1 590	1.478 3	115	2	8.1		2303700	0.033	1 553	1.180 9	147	2	5.7
	2104618	0.058	1 585	1.357 9	95	2	6.3		2303701	0.032	1 543	1.105 3	120	1	5.9
	2203363	0.046	1 586	1.739 1	230	2	5.0								
	2203364	0.044	1 598	1.297 0	182	3	4.9								
	2203365	0.055	1 608	1.782 6	202	2	8.2								
	2104619	0.054	1 587	1.788 9	220	2	6.2								

注:(1)[Als]为RH终点酸溶铝质量分数/%;t为脱碳终点钢水温度/°C;m<sub>Al</sub>为脱氧合金化加Al量/(kg·t<sup>-1</sup>).

(2)a<sub>O初</sub>和a<sub>O终</sub>分别为RH脱碳后和终点钢水氧活度/10<sup>-6</sup>;τ为Al脱氧后钢水的净循环时间/min.

$$\begin{aligned}
 [\text{Als}] = & 7.715\ 24 \times 10^{-5} \cdot t + 0.038\ 86 \cdot m_{\text{Al}} - \\
 & 1.148\ 86 \cdot (a_{\text{O初}} - a_{\text{O终}}) - \\
 & 8.641\ 54 \times 10^{-4} \cdot \tau - 0.106\ 91 \quad (R=0.907)
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

式中:a<sub>O初</sub>、a<sub>O终</sub>分别为RH脱碳结束和终点钢水的氧活度。

该模型的拟合程度R值较高,为0.907。

由表1可知,a<sub>O终</sub>值很小,对终点钢水酸溶铝含量影响不大,因此式(1)可近似表达为:

$$\begin{aligned}
 [\text{Als}] = & 7.715\ 24 \times 10^{-5} \cdot t + 0.038\ 86 \cdot m_{\text{Al}} - \\
 & 1.148\ 86 \cdot a_{\text{O初}} - 8.641\ 54 \times 10^{-4} \cdot \tau - \\
 & 0.106\ 91
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

现场条件下,RH精炼终点钢水中酸溶铝含量可由式(2)计算得出。

## 2.2 模型的验证

任意选取唐钢RH精炼生产过程中其它连续的32炉次(不同于模型建立时所选炉次)数据应用于计算模型的验证,具体结果如图1所示。

从图1中可以看出,除个别数据偏差较大外,研究选取的绝大部分炉次的实测值[Als]基本围绕着模型计算值波动,绝大部分炉次钢水酸溶铝含量的实测值与模型计算值的相对误差在10%以下。在研究选取的验证炉次中87%炉次的实测值与计算值的绝对误差在±0.004%范围。

考虑到RH脱碳结束后钢水氧含量较低,以质量1%为标准态,f<sub>O</sub>≈1,模型在应用过程中,氧活度值可近似由氧浓度代替。此外,不同冶炼钢种有时要求对顶渣进行改制,而改制剂中含有一定量的金属铝。因此,模型在应用过程中应考虑RH顶渣改制剂对终点钢水中酸溶铝含量的影响。

## 3 RH精炼终点钢水酸溶铝含量控制

从图2(a)(b)中可知,在其他条件不变的情况下,随钢水脱氧加Al量的提高,钢水中酸溶铝的含量逐渐增大;RH脱碳结束钢水中的氧活度(a<sub>O初</sub>)越高,终点钢水中的溶解铝含量越低,不同温度条件下,显示了相同的变化规律。钢水的温度越高,Al脱氧后钢水中酸溶铝含量越大,即适当高的钢水温度有

利于 RH 精炼终点钢水中酸溶铝含量的提高。

当 RH 精炼脱碳结束钢水温度以及钢水的净循环时间分别控制在 1 600 ℃ 和 8 min, 要控制终点钢水中酸溶铝的质量分数在 0.02% ~ 0.05%, 当脱碳后钢水氧活度为  $2 \times 10^{-4}$  时,  $m_{Al}$  宜控制在 0.86 ~ 1.53 kg/t; 而当氧活度提高到 0.04%,  $m_{Al}$  应控制在 1.45 ~ 2.22 kg/t。随钢水中酸溶铝含量要求的提高,  $m_{Al}$  值也应相

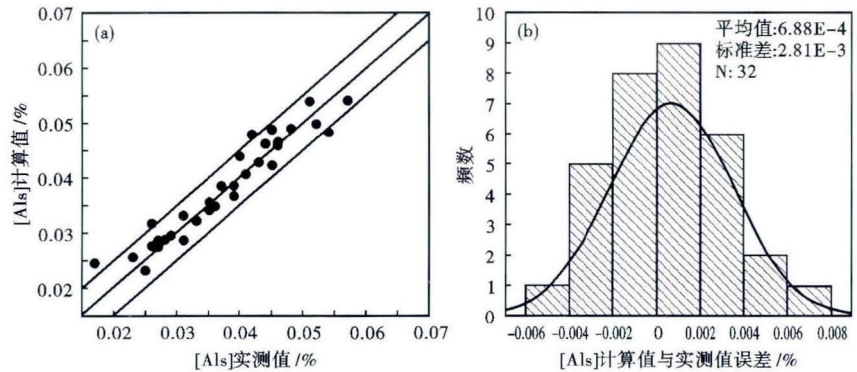


图 1 钢水酸溶铝含量计算值与实测值比较 (a) 和误差分布 (b)

Fig. 1 Comparison between calculated and measured value of [Als] (a) and error distribution (b)

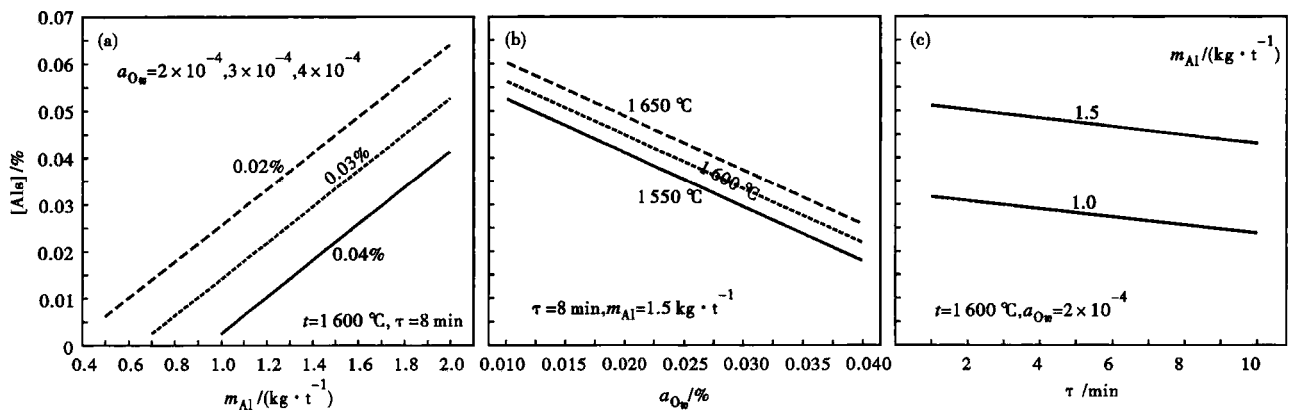


图 2 脱氧加铝量 (a)、钢水氧活度 (b) 和钢水净循环时间 (c) 对钢中酸溶铝含量的影响, 模型计算

Fig. 2 Effect of adding aluminium amount for deoxidation (a), activity of oxygen in liquid (b) and liquid net circulation time (c) on [Als], calculated by model

应增大。

当  $\tau = 8 \text{ min}$ 、 $m_{Al} = 1.5 \text{ kg/t}$ 、 $a_{O_{初}} = 3 \times 10^{-4}$  时, RH 脱碳后钢水的温度从 1 600 ℃ 提高到 1 650 ℃ 时, 终点钢水的酸溶铝含量也相应提高, 从 0.033% 提高到 0.037% 左右, 增幅不大。

从图 2 (c) 中可以看出, 在其他条件不变的情况下, 随钢水净循环时间的延长, 终点钢水酸溶铝含量略有降低, 降幅不大。当  $t = 1 600 \text{ ℃}$ 、 $a_{O_{初}} = 2 \times 10^{-4}$  时, 钢水的净循环时间从 4 min 提高到 8 min, 终点钢水酸溶铝只降低了 0.003 5%。

#### 4 结论

(1) RH 终点钢水酸溶铝含量的实测值基本围绕着模型计算值波动, 且相对误差在 10% 以下的模型精度可达 85%, 计算模型可靠。

(2) 控制 RH 脱碳后钢水氧活度和脱氧加铝量是控制 RH 终点钢水酸溶铝含量的主要手段。RH 脱碳后钢水中氧的活度越高, 终点钢水酸溶铝含量越低; 脱氧加铝量越大, RH 终点钢水酸溶铝含量越

高; 适当高的钢水温度有利于提高 RH 终点钢水酸溶铝含量。

(3) 当 RH 脱碳后钢水温度、氧活度和钢水的净循环时间分别在 1 600 ℃、 $2 \times 10^{-4}$  和 8 min, 要使终点钢水中酸溶铝的质量分数控制在 0.02% ~ 0.05%, 脱氧过程须控制加铝量 0.86 ~ 1.53 kg/t。

#### 参考文献

- [1] 胡文豪, 袁永, 刘 晓, 等. 酸溶铝在钢中行为的探讨 [J]. 钢铁, 2003, 38 (7): 42-44, 69.
- [2] 郑楚光. 温室气体及其控制对策 [M]. 北京: 中国电力工业出版社, 2001: 48-49, 109-116.
- [3] 李太全, 包燕平, 刘建华, 等. 高级别管线钢酸溶铝的控制 [J]. 炼钢, 2009, 25 (6): 9-11, 25.
- [4] 刘志平, 蒋汉华. 钢铁工业提高能效对环境的影响 [J]. 节能与环保, 2001 (3): 11-13.
- [5] 薛正良, 胡会军, 于学斌, 等. 帘线钢 82B 精炼过程中的酸溶铝控制 [J]. 炼钢, 2003, 19 (1): 22-25.

李双江 (1981-), 男, 博士 (东北大学), 工程师, 2011 年东北大学毕业, 洁净钢及电渣冶炼技术研究。

E-mail: two\_river@163.com

收稿日期: 2013-05-20