

弹簧钢 100 t DC EAF-LF-VD 流程无铝脱氧工艺实践

余国松¹ 杜建新²

(1 杭州钢铁集团公司 1 技术中心; 2 昌兴公司, 杭州 310022)

摘要 EAF-LF-VD 冶炼 60Si2MnA 和 55CrSiA 弹簧钢时 EAF 出钢过程加 17~23 kg/t 低铝硅铁 (Al 含量 ≤ 0.50%) 脱氧, LF 补加 3~6 kg/t 硅铁, 并控制精炼渣的碱度 ≤ 2.5, 可控制 [Als] ≤ 60 × 10⁻⁶, 总 [O] (9~20) × 10⁻⁶, A 类夹杂级别 ≤ 0.5, B 类 ≤ 0.5, C 类 ≤ 1.5, D 类 ≤ 0.5。用该脱氧工艺冶炼的钢水可浇注性强, 适合大批量工业性生产。

关键词 60Si2MnA, 55CrSiA 弹簧钢 无铝脱氧 工艺实践

Process Practice of Non-Aluminum Deoxidation for Spring Steel Steelmaking Production by 100 t DC EAF-LF -VD Flow Sheet

Yu Guosong¹ and Du Jianxin²

(1 Technology Center; 2 Changxin Co, Hangzhou Iron and Steel Group Co, Hangzhou 310022)

Abstract In spring steel 60Si2MnA and 55CrSiA steelmaking by EAF-LF-VD, it is available to control [Als] ≤ 60 × 10⁻⁶, the total [O] (9~20) × 10⁻⁶, and get the rating of A series inclusion ≤ 0.5, B series ≤ 0.5, C series ≤ 1.5 and D series ≤ 0.5 by adding 17~23 kg/t low aluminum ferrosilicon (Al content ≤ 0.50%) during EAF tapping, adding more 3~6 kg/t ferrosilicon during LF refining and controlling basicity of refining slag ≤ 2.5. The molten steel produced by this deoxidation process has excellent castability being available for mass production.

Material Index Spring Steel 60Si2MnA, 55CrSiA, Non-Aluminum Deoxidation, Process Practice

随着我国汽车行业高速发展,对 60Si2MnA、55CrSiA 钢(成分如表 1 所示)悬架弹簧、制动弹簧的需求逐年提高,该类弹簧的疲劳寿命一般要求在 20 万次以上,高的要求 40 万次至 100 万次以上。杭钢从 2003 年起,采用 100 t 超高功率直流电弧炉-100 t LF 精炼炉-100 t VD 脱气炉-六机六流 R9 米小方坯合金钢连铸机-150 mm × 150 mm 连铸坯修磨-轧制 ≤ Φ20 mm 盘条一火成材工艺,成功开发了轿车悬架弹簧用 55CrSiA;运用该工艺提升了 60Si2MnA 弹簧钢质量。

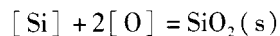
生,该工艺从源头上减少钢中的脆性夹杂物含量,减少夹杂物尺寸,从而提高弹簧的疲劳寿命。据日本神户制钢研究表明^[2],硅镇静钢(超纯净钢)夹杂物尺寸比常规钢小,硅镇静钢比低氧铝镇静钢有更好的疲劳寿命。随着钢中夹杂物熔点的降低,用 SAE9254 钢制成的钢丝旋转弯曲疲劳寿命明显提高。

1 无铝脱氧工艺的理论基础

弹簧钢无铝脱氧工艺脱氧途径主要有:硅/残余铝沉淀脱氧、精炼渣扩散脱氧和真空碳脱氧。

1.1 沉淀脱氧

弹簧钢沉淀脱氧主要通过硅铁中硅脱氧、残余铝脱氧。精炼条件下有反应:



据热力学计算,钢水温度 $T = 1600\text{ }^\circ\text{C}$, 钢中 Si = 1.45% 和 1.65% 时,与硅平衡的活度氧分别为 41×10^{-6} 和 38×10^{-6} ;钢中 Als 为 0.003 0%,与之平衡的活度氧为 16×10^{-6} 。

1.2 精炼渣扩散脱氧

硅铁中残余铝含量很小,精炼过程精炼渣脱氧

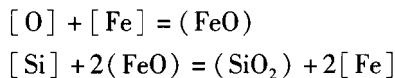
表 1 弹簧钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of Spring Steels / %

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
55CrSiA	0.50 ~ 1.20	0.50 ~ 1.60	0.80	≤ 0.025	≤ 0.025	0.50 ~ 0.80	≤ 0.35	≤ 0.25
	0.60	1.60	0.80	0.025	0.025	0.80	0.35	0.25
60Si2MnA	0.56 ~ 0.64	1.60 ~ 2.00	0.60 ~ 0.90	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.35	≤ 0.35	≤ 0.25
	0.64	2.00	0.90	0.025	0.025	0.35	0.35	0.25

弹簧钢冶炼一般用铝脱氧,由于 Al₂O₃ 脆性夹杂物对弹簧钢疲劳寿命影响大,必须最大限度地去除^[1]。由于实际生产条件的限制,要较彻底地去除 Al₂O₃ 夹杂物存在困难,因此,无铝脱氧工艺应运而

主要反应为:



随着精炼渣中 (FeO) 的降低, 钢中氧向渣中扩散, 从而使钢中氧降低。

1.3 VD 真空碳脱氧

弹簧钢中碳含量较高, 随着真空度的降低, 碳氧反应继续进行, 使钢中氧进一步降低。

2 无铝脱氧工艺的实践

从 2004 年开始, 对弹簧钢实施无铝脱氧工艺, 在冶炼全过程不加铝和铝合金脱氧剂, 主要工艺措施为: EAF 初炼炉出钢过程中加硅铁 (2005 年 9 月开始使用低铝硅铁) 沉淀脱氧与合金化, 其中 60Si2MnA 为 21 ~ 23 kg/t_钢、55CrSiA 为 17 ~ 19

kg/t_钢; LF 补加硅铁 3 ~ 6 kg/t_钢, 加石灰、萤石、电石造精炼渣进行扩散脱氧, 精炼时间 ≥ 40 min, 平均周期为 50 min; VD 进行真空碳脱氧。

2.1 钢中酸溶铝

工艺实践初期, 采用残余铝含量为 1% ~ 2% 的普通硅铁 FeSi75 进行脱氧, 弹簧钢中酸溶铝 Als 为 0.004 0% ~ 0.010%。为进一步降低钢中 Als 含量, 改用铝含量 ≤ 0.50% 的低铝硅铁脱氧, 使钢中 Als 降为 0.000 9% ~ 0.006 0%, 其中 70% 炉次 ≤ 0.003 0%。

如图 1 (a, b) 所示, 钢中 Als 随着精炼渣中 Al₂O₃ 和渣碱度 R 的增加而上升。而脱氧产物的 Al₂O₃ 波动是由硅铁中铝含量的波动引起的。因此, 要稳定控制钢中 Als 须稳定硅铁中铝含量, 控制精炼渣的碱度。

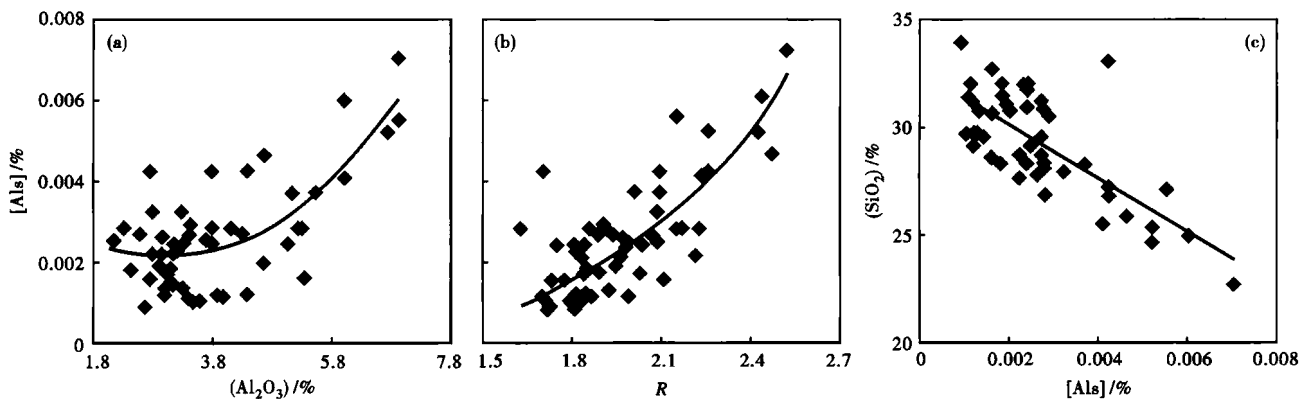


图 1 (a) [Als] 与 (Al₂O₃) 的关系; (b) [Als] 与精炼渣 R 的关系; (c) [Als] 与 (SiO₂) 的关系

Fig. 1 (a) Relation between [Als] and (Al₂O₃); (b) Relation between [Als] and refining slag basicity R; (c) Relation between [Als] and (SiO₂)

2.2 脱氧效果

为了评估无铝脱氧工艺的脱氧效果, 对 33 炉 60Si2MnA、55CrSiA 弹簧钢精炼过程进行跟踪, 在 LF 终点和 VD 终点取精炼渣样, 在运往连铸机浇铸前测定钢中活度氧。连铸坯轧成材后, 从材上取样, 分析钢中全氧, 按 GB/T10561-2005 标准对钢中夹杂物进行评级。

2.2.1 LF 精炼渣成分和碱度

LF 精炼终渣成分和碱度如表 2 所示。吨钢加入石灰 5 ~ 14 kg, 平均加入量为 7.7 kg/t, 精炼终渣碱度 R (CaO/SiO₂) 为 1.69 ~ 2.47, 平均碱度为 2。对渣碱度影响因素研究的结果如图 1(c) 所示, 随着钢中 Als 含量的减小, 铝脱氧反应减弱, 精炼渣中 Al₂O₃ 含量下降; 而硅氧反应增强, 精炼渣中 SiO₂ 含

表 2 LF-VD 精炼终渣成分和碱度
Table 2 Ingredient and basicity of LF-VD refining finish slag

工序		精炼终渣成分/%						碱度 R
		Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SiO ₂	FeO	
LF	范围	2.30 ~ 6.89	52.87 ~ 63.95	3.55 ~ 10.88	0.001 ~ 1.41	25.38 ~ 33.13	0.16 ~ 2.01	1.69 ~ 2.47
	平均	3.90	58.02	6.63	0.12	29.25	0.58	2.00
VD	范围	2.56 ~ 7.61	49.99 ~ 63.35	3.36 ~ 11.84	0.001 ~ 0.16	26.10 ~ 32.82	0.18 ~ 0.83	1.68 ~ 2.31
	平均	4.64	56.66	7.41	0.03	29.60	0.35	1.92

量上升,因此,精炼渣 R 随着钢中 Al_2O_3 的减小而减小。 $Al_2O_3 \leq 60 \times 10^{-6}$ 时,渣中 SiO_2 含量 $\geq 25\%$, Al_2O_3 含量为 $2\% \sim 6\%$ 。与包衬平衡的 MgO 含量为 $4\% \sim 10\%$,因此,精炼终渣碱度 $R \leq 2.5$ 。

2.2.2 LF 精炼渣形态

精炼渣形态随着成分变化而不同。如表 3、图 2 (图片尺寸为 $3.5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$) 所示,随着渣中 FeO 含量的降低,渣由黑变白,由块状变为粉末状,脱氧效果变好。白色粉状渣,渣中 FeO 含量低,扩散脱氧能力强,脱氧效果好。

2.2.3 VD 真空处理后精炼渣变化

表 3 60Si2MnA 弹簧钢部分炉次的 LF/VD 精炼终渣成分和碱度

Table 3 Ingredient and basicity of LF and VD refining finish slag for several heats of spring steel 60Si2MnA

炉号	工序	精炼终渣成分/%					FeO	碱度 R
		Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	SiO_2		
5090	LF	4.28	57.18	5.84	0.094	29.57	1.68	1.93
5094	LF	2.76	60.83	6.01	0.004	26.93	0.96	2.26
5088	LF	6.70	59.87	5.28	0.046	24.70	0.58	2.42
5094	VD	4.91	58.46	6.48	0.025	28.13	0.20	2.08

如表 2 所示,VD 真空处理后,精炼终渣平均 FeO 含量下降了 0.23% ,平均 MnO 含量下降了 0.09% ,钢中活度氧下降,促进了脱硫反应,VD 后

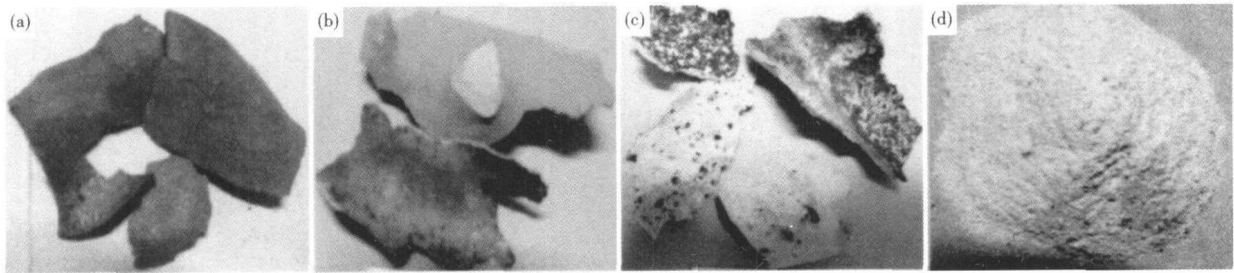


图 2 60Si2MnA 弹簧钢精炼终渣的形态:(a) LF,炉次 5090,1.68% (FeO);(b) LF,炉次 5094,0.96% (FeO);(c) LF,炉次 5088,0.58% (FeO);(d) VD,炉次 5094,0.20% (FeO)

Fig. 2 Morphology of refining finish slag, spring steel 60Si2MnA: (a) LF, heat 5090, 1.68% (FeO); (b) LF, heat 5094, 0.96% (FeO); (c) LF, heat 5088, 0.58% (FeO); (d) VD, heat 5094, 0.20% (FeO)

钢中硫含量从 $0.002\% \sim 0.019\%$ 下降至 $0.001\% \sim 0.008\%$,平均硫含量从 0.007% 下降至 0.003% 。实际定氧结果表明:LF 精炼终点氧为 $(5 \sim 20) \times 10^{-6}$;VD 后钢中活度氧降低为 $(1 \sim 10) \times 10^{-6}$,其中 92% 炉次 $\leq 8 \times 10^{-6}$ 。

如表 3 和图 2(b,d) 所示,VD 真空处理后,5094 炉次,由于 FeO 从 0.96% 下降至 0.20% ,其精炼终渣由浅黄块状变成白色粉状,表明钢中氧显著降低。

如表 2 所示,精炼渣中 Al_2O_3 含量上升 0.74% , MgO 含量上升 0.78% 。因钢包渣线区为镁碳砖,其余部位为铝镁砖,由此可见,真空过程中钢包浸蚀加剧。

2.3 钢的可浇注性

由于钢中 $Al_2O_3 \leq 0.006\%$,连铸时在水口处生成 Al_2O_3 而堵水口的机率很小,生产实践证明无铝脱氧弹簧钢水可浇注性很好,不发生堵水口现象。

2.4 钢中全氧和夹杂物

无铝脱氧弹簧钢连铸坯轧成的盘条,全氧为 $(9 \sim 20) \times 10^{-6}$,其中 90% 炉次分布在 $(9 \sim 18) \times 10^{-6}$ 。夹杂物的级别:A 类 $0 \sim 0.5$,B 类 $0 \sim 0.5$,C 类 $0.5 \sim 1.5$,D 类 $0 \sim 0.5$ 。

3 结语

60Si2MnA,55CrSiA 弹簧钢无铝脱氧工艺经过 5 年多的生产实践表明:

(1) 该工艺可将钢中总氧控制在 $(9 \sim 20) \times 10^{-6}$;夹杂物评级 A 类 $0 \sim 0.5$ 、B 类 $0 \sim 0.5$ 、C 类 $0 \sim 1.5$ 、D 类 $0 \sim 0.5$;钢水可浇注性强,因此,适合大批量工业生产。

(2) 采用低铝硅铁脱氧,可将钢中酸溶铝控制在 60×10^{-6} 以下,此时,精炼渣碱度 $R(CaO/SiO_2) \leq 2.5$ 。

(3) VD 真空碳脱氧可使精炼渣中 FeO 含量降低,渣变白稳定,钢中氧含量进一步降低,硫含量降低。但也使钢包耐火材料浸蚀加剧。

参考文献

- 殷瑞钰. 钢的质量现代进展(特殊钢). 北京:冶金工业出版社, 1995
- 戴宝昌. 重要用途线材制品生产技术. 北京:冶金工业出版社, 2001

余国松(1967-),男,高级工程师,1990 年武汉钢铁学院毕业,冶金工艺和新产品开发。

收稿日期:2009-11-19