硅钢钢水中 Ti 含量影响因素分析[*1]

王忠亮[1,2], 任慧平[1]

(1. 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司生产管理部, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 在冶炼硅钢时, 残余的 Ti 元素会对硅钢最终的磁性能产生不利影响, 因此在冶炼硅钢时要对 Ti 含量进行严格控制, 尽可能降低 Ti 含量。文章共统计了 60 炉分为不同渣层厚度的硅钢中, 在加入硅铁及铝铁后 Ti 含量数据, 分析了有害元素 Ti 含量来源和增量。随着硅钢牌号的提高, 硅钢中硅含量随之增加, 导致硅铁合金加入量增加, Ti 含量因此随之升高; 同时减少渣层厚度, 对于钢水终点 Ti 含量的控制有着至关重要的作用。

关键词: 硅钢; Ti 含量; 影响因素; 渣层厚度
中图分类号: TF703 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009 - 5438(2019)02 - 0033 - 04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.02.011

Analysis on Influencing Factors for Ti Content in Molten Steel of Silicon Steel

Wang Zhong - liang[1,2], *Ren Hui - ping*[1]

(1. *School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Dept. of Production Management of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: There are adverse effects of residual Ti on the final magnetic property of silicon steel, so the Ti content should be strictly controlled to be as low as possible when smelting silicon steel. In the paper, the sources and increment for the content of harmful element Ti are analyzed based on the data of Ti content after adding the ferrosilicon and ferro - aluminium into 60 heats of silicon steel with different thicknesses of slag layer. With the increase of silicon steel grade, the Si contentin in siliconstal is increased and the quantity of the ferrosilicon added is also increased so that the Ti content rises correspondingly; it is crucial for controlling the end - point Ti content of molten steel to reduce the thickness of slag layer simultaneously.

Key words: silicon steel; Ti content; influencing factor; thickness of slag layer

硅钢也被称为电工钢, 它广泛应用在汽车、电讯、电力以及国防科技等领域, 用于制作电机、电器元件和各类变压器铁芯, 因为硅钢在冶炼和轧制上的工艺较为复杂, 制造难度较大, 要求其化学成分控制更加严格, 以获得较大晶粒从而降低铁损, 因此硅钢中希望减少含有抑制晶粒长大的元素, 为了更好地改善硅钢的磁性能, 需要尽可能地减少钢中 Ti 的含量[1]。本文结合工业化生产硅钢, 探讨了冶炼工

* **收稿日期:** 2018 - 12 - 17
作者简介: 王忠亮(1987 -), 男, 内蒙古乌兰浩特市人, 在读硕士, 工程师, 现从事生产管理工作。

艺对硅钢中微量元素 Ti 含量的来源与分析。

1 化学元素对硅钢的影响

电工钢成分组成基本包括三大类元素。第一类为基本合金元素，如 Si、Al、Mn 等；第二类为杂质元素，如 C、S、N、O、Ti、Zr 等；第三类为微量元素如 Sb、Sn 等。

第一类元素的影响：Si、Al、Mn 是有益的合金元素，在实际工业生产中，第一类元素也要按照规定控制合理范围，同时要考虑各元素间的相互协调作用[2]。另外这些元素还可提高电阻率，使 Pe 降低。因此提高第一类元素的含量可以明显降低铁损。但当这些元素含量太高时，材料变得既硬又脆而无法冷加工。

第二类元素的影响：C、S、N、O、Ti、Zr、Ni、V 等为有害元素，其中 Ti 元素等的存在可在钢中形成细小弥散的碳化物 TiC、氮化物 TiN 及氧化物 TiO_2，阻碍成品退火时晶粒长大，对磁性能不利，因此要求钢中这类元素的含量越低越好[3]。

第三类元素的影响：在无取向硅钢中添加少量的 Sb、Sn，Sn 常用作高磁感取向硅钢辅助抑制剂，在脱碳退火后的初次晶粒更加均匀细小[4-5]，可以改善无取向电工钢再结晶退火后的织构，使(100)和(110)有利织构组分明显增加，使(111)不利织构组分明显减弱，从而降低铁损，提高磁感。添加少量的此类元素，还可以抑制内氧化层和氮化层的形成，改善磁性。

2 钢中 Ti 元素的来源分析

本次试验采用的工艺路线：高炉铁水—KR 铁水预处理—260 t 转炉顶底复吹冶炼—RH 真空处理—板坯连铸。

铁水中的 Ti 是比较容易氧化的元素，铁水中游离状态的 Ti 在转炉冶炼条件下氧化后生成 TiO_2 进入转炉渣，本次试验采取对不同渣层厚度的炉次，采用相同工艺及合金化后，在钢包内取样检测钢水中 Ti 含量的变化随着渣层厚度或渣量的变化趋势。

2.1 微碳硅铁合金对 Ti 含量的影响

RH 过程中添加硅铁质量成分，具体化学成分见表 1。

试验采取 60 炉钢水在 RH 炉加入硅铁前后，进行成分检验对比，具体检验钢水中 Ti 含量见表 2。

表 1 微碳硅铁合金化学成分(质量分数) %

种类	C	Si	S	Ti	硅元素收得率
硅铁	≤0.011	79	≤0.009	≤0.017	0.930

表 2 加入硅铁后对比 w[Ti] %

样本编号	样本炉数	平均 w[Si]	加硅铁前	加入硅铁后	平均增 Ti 量
A1	10	3.32	0.000 51	0.001 22	0.000 71
A2	10	3.31	0.000 42	0.001 15	0.000 73
A3	10	3.30	0.000 55	0.001 21	0.000 66
A4	10	3.31	0.000 44	0.001 31	0.000 87
A5	10	3.30	0.000 38	0.001 28	0.000 90
A6	10	3.31	0.000 41	0.001 19	0.000 78

由表 2 可以看出，在加入硅铁前钢水中含 Ti 量几乎相同的情况下(0.000 4% ~0.000 5%)，加入硅铁后钢水中 Ti 含量在 0.001 2% ~0.001 3%，加入硅铁后平均增 Ti 量在 0.000 7% ~0.000 9% 之间，以下通过理论公式计算硅铁增 Ti 量与生产中硅铁增 Ti 量是否相符。

理论计算公式如下：通过表 1 得知硅铁中硅含量为 79%，收得率为 93%，按照 260 t 转炉出钢量，通过表 2 硅钢中平均硅含量在 3.31%，计算得出每炉硅钢需要加入 117 17 kg 硅铁；按照表 1 中硅铁中含 Ti 量 0.017%，计算每增加 0.000 1% Ti 含量需要的硅铁量 = 260 t × 1 000 × 0.000 1% /0.017% = 1 529.4 kg；因此生产每炉硅钢，需要加入117 17 kg 硅铁，同时增加 0.000 77% Ti 含量。

依据生产试验数据与理论计算结果对比，在生产每炉硅钢中，合金硅铁可使钢水中的 Ti 含量增加 $7\times10^{-6}\sim9\times10^{-6}$。

2.2　转炉出钢渣层厚度对 Ti 含量影响

试验继续对上述 6 组样本共 60 炉进行 RH 工序加铝脱氧处理，渣中 TiO_2 又被重新还原成 Ti 元素进入钢液中，现对不同渣层厚度的组次进行跟踪，对比钢水中 Ti 含量变化趋势，见表 3。

表 3　加入铝铁后对比 Ti 含量

样本编号	样本炉数	平均 w [Si] /%	渣层厚度/mm	RH 加铝前 w [Ti] /%	RH 加铝后 w [Ti] /%	平均增 Ti 量/%
A1	10	3.32	≤40	0.001 22	0.002 03	0.000 81
A2	10	3.31	40～60	0.001 15	0.002 17	0.001 02
A3	10	3.30	60～80	0.001 21	0.002 41	0.001 20
A4	10	3.31	80～100	0.001 31	0.002 66	0.001 35
A5	10	3.30	100～120	0.001 28	0.002 81	0.001 53
A6	10	3.31	≥120	0.001 19	0.003 25	0.002 06

从表 3 中看出不同渣层厚度对钢水中平均增 Ti 量范围在 $8.1\times10^{-6}\sim20.6\times10^{-6}$ 之间，试样 A6 对应炉次渣层厚度≥120 mm 平均增 Ti 量在 20.6×10^{-6}，出现了数据波动较大情况，其原因是转炉下渣严重，个别炉次渣层厚度达到了 200 mm 以上，导致了 A6 试样平均增 Ti 量达到了 20.6×10^{-6}。得出渣层厚度与增 Ti 量趋势图如图 1 所示。

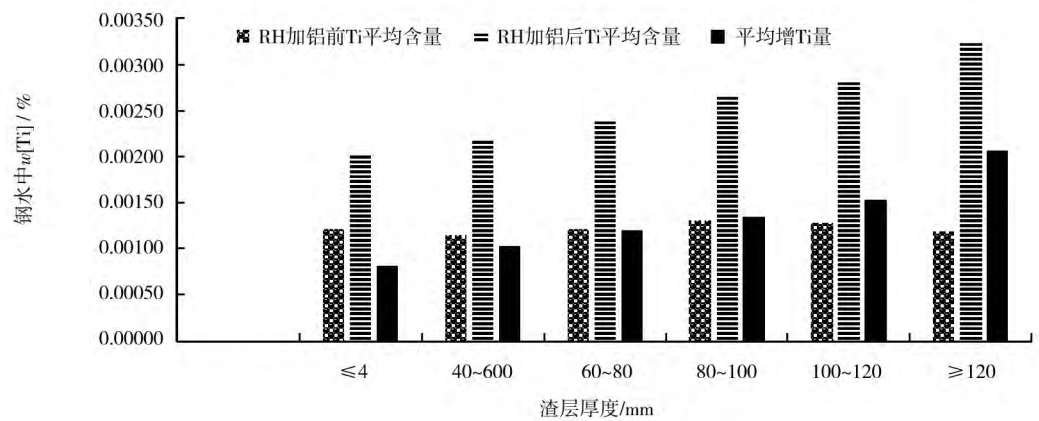


图 1　不同渣层厚度加入铝后 Ti 含量变化趋势

不同渣层厚度 A1～A6 共 60 炉试验结果得出，由于转炉下渣量的不同，渣中的 TiO_2 随着脱氧剂铝铁的加入被还原成游离态的 Ti 元素又重新进入到钢水中，与硅铁合金中含有的 Ti 含量共同形成微量有害元素 Ti 存在于最终的钢水中。

2.3　控制硅钢中 Ti 含量措施

为了控制硅钢中有害元素 Ti 的含量，需要采取以下措施。

(1) 制定硅铁等合金专用标准，选用低 Ti 含量的合金，合理安排组织生产。

(2) 对铁水和废钢入炉前的成分进行检验，保证铁水和废钢中的 Ti 含量在标准范围内。

(3) 转炉出钢前进行终点稠渣操作，并且在出钢结束前，根据装入量以及实际生产操作情况，在下渣检测报警前，采取提前关闭转炉滑板的方式，目的是最大降低转炉出钢的下渣量。

(4) 建议采用转炉滑板挡渣工艺与 AMEPA 红外下渣检测技术相结合，可实现转炉全自动挡渣工艺。

3　结论

(1) 对转炉出钢后钢水中含 Ti 量进行统计表

明，大多数炉次 Ti 含量都在 5×10^{-6} 左右，在硅钢中加入含 Ti 量 0.017% 硅铁合金后，保证硅含量在 3.31% 左右时，钢水平均增 Ti 量为 7.75×10^{-6}；在相同炉次试样的基础上，分别对不同渣层厚度的钢水加入铝铁进行脱氧后，渣中 TiO_2 又还原成游离态的 Ti 元素重新回到钢水中，结果表明随着转炉下渣量的不同导致钢包内渣层厚度的变化，最终会导致钢水中 Ti 的含量产生变化。

(2) 为了降低硅钢中有害元素 Ti 的含量，要严格控制硅铁合金中的 Ti 元素含量，采用含 Ti 量低的硅铁合金；控制 RH 炉加料制度，避免 Ti 含量异常升高，同时建议生产中对钢包耐材、辅助原料及其它合金等方面严格执行硅钢生产制度，同时建议采用硅钢专用钢包进行周转使用，避免 Ti 元素进入到硅钢钢液中。

(3) 随着硅钢牌号的提高，硅钢中硅含量增加，导致硅铁合金加入量升高，因此生产高牌号硅钢对于控制钢水中的 Ti 含量是今后生产中的技术难点。

(4) 生产硅钢中要对转炉下渣量进行严格控制，必要时进行扒渣处理，防止渣层过厚导致最终钢水 Ti 含量异常升高影响产品最终性能。

参 考 文 献

[1] 吴德润，李玉华，唐洪乐，等. 冶炼工艺对硅钢钛含量控制的影响[J]. 电工材料，2015，(4)：25－27.

[2] 花艳侠. 50W470 电工钢生产流程(免常化)组织、织构演变规律研究[D]. 沈阳：辽宁科技大学，2015.

[3] 张乔英，常正，尹国才. 无取向硅钢钢水钛质量分数影响因素分析[J]. 中国冶金，2018，28(5)：42－46.

[4] 凌晨，项利，仇圣桃，等. 取向硅钢中含铜抑制剂的固溶析出行为[J]. 特殊钢，2013，34(3)：30－33.

[5] 朱诚意，陈先红，李光强，等. 高品质取向硅钢成分控制的新进展及其对钢磁性能的影响[J]. 材料报导 A：综述篇，2015，29(1)：6－7.

(上接第3页)

辅助系统的交叉互带现象；针对低压设备跳闸问题，根据负荷性质和容量不同，采用 UPS、防“晃电”交流接触器等技术装备，提高敏感性负载抗晃电能力。这些措施需要系统性、有针对性地选择，从而提高冶金企业供配电系统电能质量，减少事故引起的经济损失。

参 考 文 献

[1] 朱桂萍，王树民. 电能质量控制技术综述[J]. 电力系统自动化，2002，(19)：28－31.

[2] 赵文东，胡玉贵，倪传国. 电压跌落的危害分析及控制措施[J]. 测控技术，2007，(1)：30－32.