

渗硅制备 6.5%Si 硅钢表面 Fe-Si 过渡梯度层的特性

李运刚, 梁精龙, 李 慧, 唐国章, 田 薇

(河北理工大学 冶金与能源学院, 唐山 063009)

摘 要: 在 KCl-NaCl-NaF-(SiO₂)熔盐体系中, 以含硅 3%(质量分数)的硅钢为阴极, 石墨为阳极, 将电沉积硅和在硅钢基体上渗硅同时进行, 制备了 Fe-Si 梯度层, 并对梯度层的特性进行了分析。结果表明: 梯度层中硅含量呈 3 种不同的变化规律, 在靠近试样表面的部分, 硅含量沿深度下降率较大; 在梯度层中间部分, 硅含量基本保持不变; 在梯度层靠近基体一侧, 硅含量的下降率介于前两者之间; 梯度层中, 以 Fe₃Si、FeSi、Fe₅Si₃ 和 Fe 构成的厚度占整个梯度层厚度的比率最大; 梯度层沿基体一侧向表面的物质组成变化规律为 Fe₃Si+FeSi+Fe→Fe₃Si+FeSi+Fe₅Si₃+Fe→FeSi, 且各物质的量随硅含量的变化而变化; 温度对梯度层中各物质含量的变化规律影响不大。

关键词: Fe-Si 梯度材料; 梯度层特性; 物质组成

中图分类号: TG 113.12

文献标识码: A

Character of Fe-Si transition gradient layer generated on surface of 6.5%Si steel sheet by siliconizing

LI Yun-gang, LIANG Jing-long, LI Hui, TANG Guo-zhang, TIAN Wei

(School of Metallurgy and Energy, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China)

Abstract: In KCl-NaCl-NaF-(SiO₂) system, by using 3%Si (mass fraction) silicon sheet as cathode and graphite as anode, Fe-Si gradient layer was prepared on silicon sheet surface by electrodeposition and siliconizing on silicon sheet at the same time. The character of the gradient layer was analyzed. The results show that the silicon contents in the gradient layer appear three kinds of changing rules. The silicon content declines rapidly along the depth toward the gradient layer surface. The silicon content is almost invariable in the middle section of gradient layer. While in the section near the base body, the declining rate of silicon content is slow comparatively. The gradient layer made up of Fe₃Si, FeSi, Fe₅Si₃ and Fe is thicker than that of others. The changing rule of the gradient layer substance composition along the base body to the gradient layer surface is Fe₃Si+FeSi+Fe→Fe₃Si+FeSi+Fe₅Si₃+Fe→FeSi, and the content of each substance changes with the silicon content. The influence of temperature on the content rate of each substance is not obvious.

Key words: Fe-Si gradient material; gradient layer character; substance composition

硅钢是电力和电讯工业领域用以制造电机、电动机、变压器、互感器、继电器以及其它电器仪表的重要磁性材料。目前, 世界范围内大批量生产的硅钢片中硅含量大都控制在 3%(质量分数)以内。当硅钢片中硅含量达到 6.5%时, 与普通硅钢片相比, 其磁导率高 3 倍、铁损率降低 20%~80%、磁致伸缩系数趋于零^[1]。

因此, 6.5%Si 硅钢片具有高频铁损率低、磁致伸缩小、噪音小的特点, 是实现高效化、节能化、轻便化的理想材料^[2]。但当硅含量提高到 6.5%以上时, 材料塑性迅速降低, 以至于无法采用常规的轧制技术生产。多年来, 人们探索出许多生产高硅含量硅钢片的方法, 如特殊轧制法^[3-4]、熔体快淬法^[5-10]、化学气相沉积

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50674039)

收稿日期: 2008-08-21; **修订日期:** 2008-12-10

通讯作者: 李运刚, 教授, 博士; 电话: 0315-2592156; E-mail: lyg@heut.edu.cn

法^[11-15]和熔盐电沉积渗硅法^[16]等。后两种方法的工艺过程都包含以下两个关键步骤: 1) 硅在含硅 3% 的硅钢上沉积, 形成厚度较薄、由表及里硅含量逐渐降低的过渡梯度层(最高硅含量达 33% 以上); 2) 在较高温度下, 过渡层中的硅向基体内部扩散, 最终形成 6.5%Si 的硅钢片。本文作者研究了过渡梯度层及其物质含量变化的特性, 对制备 6.5%Si 硅钢片过程中金属间化合物的控制具有重要的指导意义。

1 实验

1.1 实验原料

实验用 KCl、NaCl、NaF 和 SiO₂ 试剂均为分析纯, 先将各试剂在 200 °C 烘干 8 h, 按 NaCl、KCl 和 NaF 的摩尔比为 1:1:3 称取各组元, 加入占熔盐介质 10%(质量分数)的粉状 SiO₂, 研磨混匀待用。阴极为含 3%Si 的硅钢片, 厚度为 0.4 mm。

1.2 实验方法

实验装置示意图如图 1 所示。外坩埚为一不锈钢密闭容器, 内坩埚由高纯石墨材料制成。

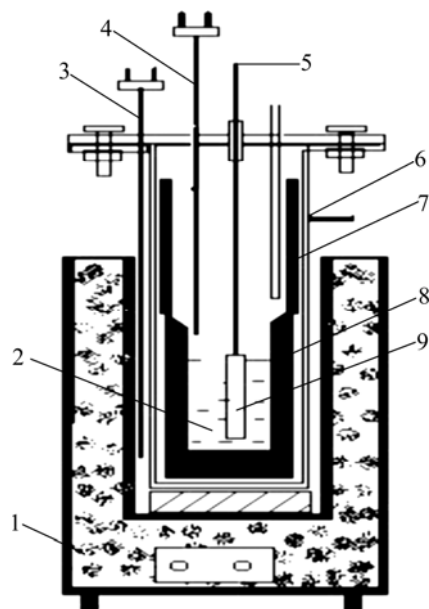


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus: 1—Electrical furnace; 2—Fused salt; 3—Thermocouple for temperature control; 4—Thermocouple for determination temperature; 5—Wire for cathode; 6—Stainless steel crucible; 7—Graphite sleeve; 8—Graphite crucible; 9—Silicon sheet

采用电阻炉加热, 由 DWK 精密温度控制仪控温, 温度波动范围为 ± 3 °C, 铂-铑铂热电偶测温, 坩锅为高纯石墨坩锅。

1.3 Fe-Si 过渡梯度层

1.3.1 试样的制备

将配制好的熔盐试样装入高纯石墨坩埚, 放入炉内, 通入 Ar, 开始升温。当炉温达到 750 °C 时, 恒温 20 min, 放入硅钢片, 接通直流电源, 采用脉冲给电, 控制平均电流密度为 60 mA/cm², 电沉积 30 min 后取出硅钢片。为防止阴极硅钢片在空气中急冷时表面产生裂纹, 取出后以降温速度小于 100 °C/min 降温至室温。然后在蒸馏水中煮沸 5~10 min, 去除试样表面的熔盐, 用去离子水冲洗, 用酒精擦拭吹干待分析。

1.3.2 试样的分析

图 2 所示为试样断面显微组织和采用 GDA750 辉光放电光谱仪对试样表面基体方向上铁和硅含量的分析结果。

由图 2 可以看出, 过渡梯度层表面的硅含量约为 30%(质量分数), 梯度层厚度约为 30 μ m, 硅和铁的含量呈渐变形式, 且呈 3 段不同的变化规律: 1) 靠近试

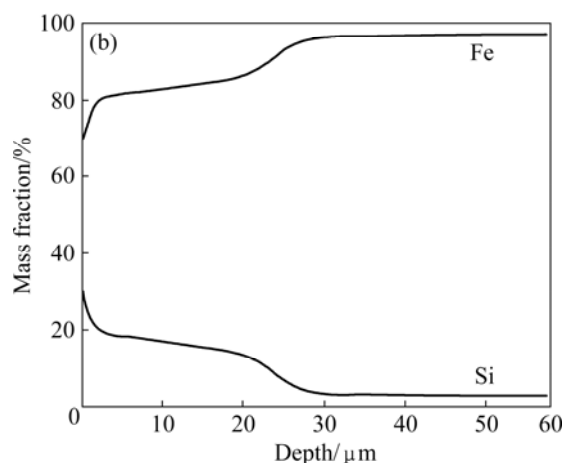
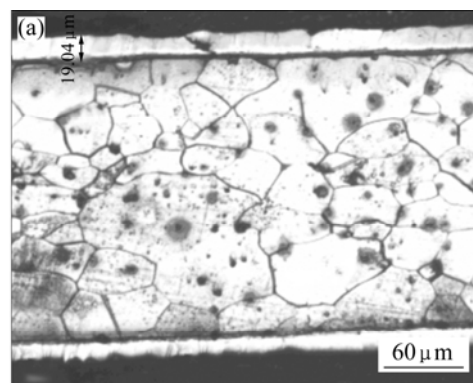


图 2 试样断面的显微组织和硅含量

Fig.2 Microstructure (a) and Si content (b) of sample section

样表面部分,其硅含量沿深度方向下降快,下降率较大;2) 梯度层中间部分,其硅含量基本保持不变;3) 梯度层靠近基体一侧,其硅含量的下降率介于前两者之间。

图 3 所示为试样表面的 XRD 谱和距试样表面约 25 μm 处的 XRD 谱。由图 3 可知,硅含量较高时(梯度层表面),铁与硅形成的金属间化合物较多,主要有 FeSi 、 Fe_5Si_3 和 Fe_3Si ; 当硅含量较低(距试样表面约 25 μm 处,硅含量约 7%)时,铁与硅形成的金属间化合物只有 Fe_3Si 。

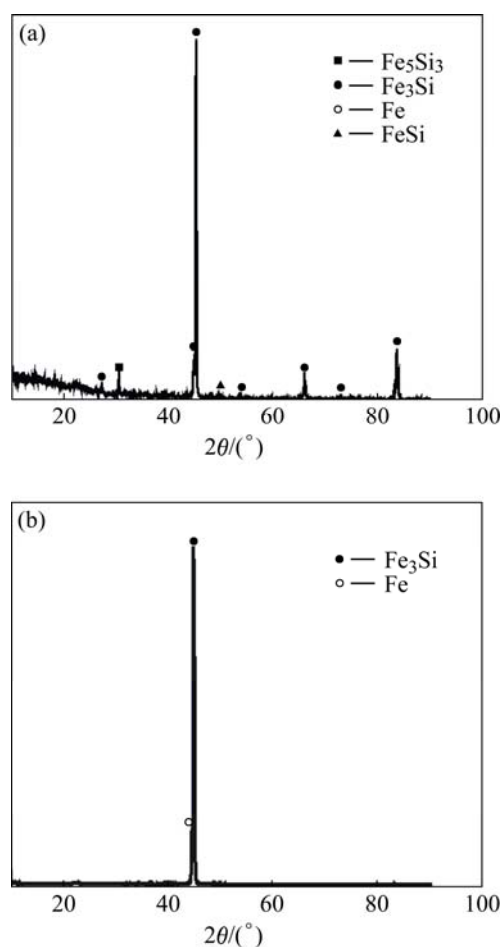


图 3 过渡梯度层表面和距表面约 25 μm 的 XRD 谱

Fig.3 XRD patterns on surface and about 25 μm depth of transition gradient layer

2 Fe-Si 过渡梯度层的热力学分析

2.1 梯度层可能存在的金属间化合物及其生成反应

采用 HSC4.0 热力学软件对 Fe-Si 二元系进行分析,可能存在的物质为 $\text{Fe}(\text{g})$ 、 $\text{Si}(\text{g})$ 、 $\text{Si}_2(\text{g})$ 、 $\text{Si}_3(\text{g})$ 、 Fe 、 FeSi 、 FeSi_2 、 $\text{FeSi}(\text{A})$ 、 $\text{FeSi}_{2.33}$ 、 $\text{FeSi}_{2.43}$ 、 Fe_3Si 、

Fe_5Si_3 和 Si 。考虑到这种制备方法,实际进行温度均小于 1 300 $^{\circ}\text{C}$,在该体系中只可能存在 Fe 、 FeSi 、 FeSi_2 、 $\text{FeSi}(\text{A})$ 、 $\text{FeSi}_{2.33}$ 、 $\text{FeSi}_{2.43}$ 、 Fe_3Si 、 Fe_5Si_3 和 Si ,其各自含量为多少受该体系中所存在的反应平衡制约。体系可能存在的反应及所对应的反应标准吉布斯自由能变化与温度的关系式如表 1 所列。

表 1 Fe-Si 二元体系中可能发生的化学反应式及反应标准吉布斯自由能 $\Delta G^{\ominus}$

Table 1 Chemical reactions of Fe-Si system and corresponding $\Delta G^{\ominus}$

Reaction No.	Chemical reaction	$\Delta G_T^{\ominus}$
1	$\text{Fe} + \text{Si} = \text{FeSi}$	$-18.633\ 44 - 7.0399\ 3 \times 10^{-4}T + 1.234\ 73 \times 10^{-6}$
2	$\text{Fe} + \text{Si} = \text{FeSi}(\text{A})$	$-18.278\ 35 + 0.015\ 01T$
3	$\text{Fe} + 2\text{Si} = \text{FeSi}_2$	$-20.015\ 5 + 0.003\ 6T$
4	$\text{Fe} + 2.33\text{Si} = \text{FeSi}_{2.33}$	$-14.157\ 24 + 4.886\ 36 \times 10^{-4}T$
5	$\text{Fe} + 2.43\text{Si} = \text{FeSi}_{2.43}$	$-15.399\ 18 - 0.002\ 35 \times 10^{-4}T + 3.598\ 95 \times 10^{-6}T^2$
6	$3\text{Fe} + \text{Si} = \text{Fe}_3\text{Si}$	$-22.250\ 87 - 954\ 256 \times 10^{-4}T - 6.756\ 41 \times 10^{-6}T^2$
7	$5\text{Fe} + 3\text{Si} = \text{Fe}_5\text{Si}_3$	$-57.284\ 83 - 0.008\ 41 \times 10^{-6}T + 3.320\ 05 \times 10^{-6}T^2$

2.2 铁和硅含量对梯度层金属间化合物量的影响

从图 2 可以看出,梯度层深度不同,硅含量也不同,而硅含量的多少是直接影响不同金属间化合物含量多少的重要因素之一。

2.1.2 计算条件

1) 温度分别为 750 和 1 000 $^{\circ}\text{C}$; 压力为 101 325 Pa。

2) 铁含量用铁的实际质量分数代替,硅含量用硅的实际质量分数代替。由于渗硅制备 6.5% 高硅钢过程中,所得的过渡梯度层表面硅含量基本不超过 FeSi 的含硅量,基体内部 Fe 含量为 97%。因此,计算时假定 Fe 总量为 3 kmol, Si 量的变化范围为 0~3 kmol。

3) 假定 Fe 、 FeSi 、 $\text{FeSi}(\text{A})$ 、 FeSi_2 、 $\text{FeSi}_{2.33}$ 、 $\text{FeSi}_{2.43}$ 、 Fe_3Si 、 Fe_5Si_3 及 Si 的活度系数均为 1。

2.2.1 计算方法与计算结果

根据计算假定条件与体系存在的反应, Fe 、 Si 、 FeSi 、 $\text{FeSi}(\text{A})$ 、 FeSi_2 、 $\text{FeSi}_{2.33}$ 、 $\text{FeSi}_{2.43}$ 、 Fe_3Si 和 Fe_5Si_3 间达到平衡时存在下述关系:

$$n(\text{Fe}) + n(\text{FeSi}) + n(\text{FeSi}(\text{A})) + n(\text{FeSi}_2) + n(\text{FeSi}_{2.33}) + n(\text{FeSi}_{2.43}) + 3n(\text{Fe}_3\text{Si}) + 5n(\text{Fe}_5\text{Si}_3) = 3\ \text{kmol} \quad (1)$$

$$n(\text{Si}) + n(\text{FeSi}) + n(\text{FeSi(A)}) + 2n(\text{FeSi}_2) + 2.33n(\text{FeSi}_{2.33}) + 2.43n(\text{FeSi}_{2.43}) + n(\text{Fe}_3\text{Si}) + 3n(\text{Fe}_5\text{Si}_3) = N(\text{Si}) \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{x(\text{FeSi})}{x(\text{Fe})x(\text{Si})} \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{x(\text{FeSi(A)})}{x(\text{Fe})x(\text{Si})} \quad (4)$$

$$K_3 = \frac{x(\text{FeSi}_2)}{x(\text{Fe})x^2(\text{Si})} \quad (5)$$

$$K_4 = \frac{x(\text{FeSi}_{2.33})}{x^{2.33}(\text{Si})x(\text{Fe})} \quad (6)$$

$$K_5 = \frac{x(\text{FeSi}_{2.43})}{x^{2.43}(\text{Si})x(\text{Fe})} \quad (7)$$

$$K_6 = \frac{x(\text{Fe}_3\text{Si})}{x^3(\text{Fe})x(\text{Si})} \quad (8)$$

$$K_7 = \frac{x(\text{Fe}_5\text{Si}_3)}{x^5(\text{Fe})x^3(\text{Si})} \quad (9)$$

$$x(\text{Si}) = n(\text{Si}) / [n(\text{Fe}) + n(\text{Si}) + n(\text{FeSi}) + n(\text{FeSi(A)}) + n(\text{FeSi}_2) + n(\text{FeSi}_{2.33}) + n(\text{FeSi}_{2.43}) + n(\text{Fe}_3\text{Si}) + n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)] \quad (10)$$

$$x(\text{Fe}) = n(\text{Fe}) / [n(\text{Fe}) + n(\text{Si}) + n(\text{FeSi}) + n(\text{FeSi(A)}) + n(\text{FeSi}_2) + n(\text{FeSi}_{2.33}) + n(\text{FeSi}_{2.43}) + n(\text{Fe}_3\text{Si}) + n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)] \quad (11)$$

$$x(\text{FeSi}) = n(\text{FeSi}) / [n(\text{Fe}) + n(\text{Si}) + n(\text{FeSi}) + n(\text{FeSi(A)}) + n(\text{FeSi}_2) + n(\text{FeSi}_{2.33}) + n(\text{FeSi}_{2.43}) + n(\text{Fe}_3\text{Si}) + n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)] \quad (12)$$

$$x(\text{FeSi(A)}) = n(\text{FeSi(A)}) / [n(\text{Fe}) + n(\text{Si}) + n(\text{FeSi}) + n(\text{FeSi(A)}) + n(\text{FeSi}_2) + n(\text{FeSi}_{2.33}) + n(\text{FeSi}_{2.43}) + n(\text{Fe}_3\text{Si}) + n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)] \quad (13)$$

$$x(\text{FeSi}_2) = n(\text{FeSi}_2) / [n(\text{Fe}) + n(\text{Si}) + n(\text{FeSi}) + n(\text{FeSi(A)}) + n(\text{FeSi}_2) + n(\text{FeSi}_{2.33}) + n(\text{FeSi}_{2.43}) + n(\text{Fe}_3\text{Si}) + n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)] \quad (14)$$

$$x(\text{FeSi}_{2.33}) = n(\text{FeSi}_{2.33}) / [n(\text{Fe}) + n(\text{Si}) + n(\text{FeSi}) + n(\text{FeSi(A)}) + n(\text{FeSi}_2) + n(\text{FeSi}_{2.33}) + n(\text{FeSi}_{2.43}) + n(\text{Fe}_3\text{Si}) + n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)] \quad (15)$$

$$x(\text{FeSi}_{2.43}) = n(\text{FeSi}_{2.43}) / [n(\text{Fe}) + n(\text{Si}) + n(\text{FeSi}) + n(\text{FeSi(A)}) + n(\text{FeSi}_2) + n(\text{FeSi}_{2.33}) + n(\text{FeSi}_{2.43}) + n(\text{Fe}_3\text{Si}) + n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)] \quad (16)$$

$$x(\text{Fe}_3\text{Si}) = n(\text{Fe}_3\text{Si}) / [n(\text{Fe}) + n(\text{Si}) + n(\text{FeSi}) + n(\text{FeSi(A)}) + n(\text{FeSi}_2) + n(\text{FeSi}_{2.33}) + n(\text{FeSi}_{2.43}) + n(\text{Fe}_3\text{Si}) + n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)] \quad (17)$$

$$x(\text{Fe}_5\text{Si}_3) = n(\text{Fe}_5\text{Si}_3) / [n(\text{Fe}) + n(\text{Si}) + n(\text{FeSi}) + n(\text{FeSi(A)}) + n(\text{FeSi}_2) + n(\text{FeSi}_{2.33}) + n(\text{FeSi}_{2.43}) + n(\text{Fe}_3\text{Si}) + n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)] \quad (18)$$

式中 $n(\text{Si})$ 、 $n(\text{Fe})$ 、 $n(\text{FeSi})$ 、 $n(\text{FeSi(A)})$ 、 $n(\text{FeSi}_2)$ 、 $n(\text{FeSi}_{2.33})$ 、 $n(\text{FeSi}_{2.43})$ 、 $n(\text{Fe}_3\text{Si})$ 、 $n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)$ 和 $x(\text{Si})$ 、 $x(\text{Fe})$ 、 $x(\text{FeSi})$ 、 $x(\text{FeSi(A)})$ 、 $x(\text{FeSi}_2)$ 、 $x(\text{FeSi}_{2.33})$ 、 $x(\text{FeSi}_{2.43})$ 、 $x(\text{Fe}_3\text{Si})$ 、 $x(\text{Fe}_5\text{Si}_3)$ 分别表示体系达平衡时 Si、Fe、FeSi、FeSi(A)、FeSi₂、FeSi_{2.33}、FeSi_{2.43}、Fe₃Si、Fe₅Si₃ 的物质的量和摩尔分数; $N(\text{Si})$ 表示体系中 Si 总的物质的量; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 、 K_6 、 K_7 分别表示 7 个反应的平衡常数, 在 1 023 K 时分别为 7 263、4.455、3 194、836.3、1 010、135 400 和 2.271×10^{13} , 在 1 273 K 时分别为 1 150、0.617、403、206、142、 1.6×10^4 和 5.318×10^{10} 。

当温度为 1 023 K 和 1 273 K 时, 在计算机上求解式(1)~(18), 可分别求出 1 023 和 1 273 K 下 $n(\text{Si})$ 、 $n(\text{Fe})$ 、 $n(\text{FeSi})$ 、 $n(\text{FeSi(A)})$ 、 $n(\text{FeSi}_2)$ 、 $n(\text{FeSi}_{2.33})$ 、 $n(\text{FeSi}_{2.43})$ 、 $n(\text{Fe}_3\text{Si})$ 和 $n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)$, 以 $N(\text{Si})$ 为横坐标, $n(\text{Si})$ 、 $n(\text{Fe})$ 、 $n(\text{FeSi})$ 、 $n(\text{FeSi(A)})$ 、 $n(\text{FeSi}_2)$ 、 $n(\text{FeSi}_{2.33})$ 、 $n(\text{FeSi}_{2.43})$ 、 $n(\text{Fe}_3\text{Si})$ 和 $n(\text{Fe}_5\text{Si}_3)$ 等为纵坐标作图, 结果如图 4 和 5 所示。

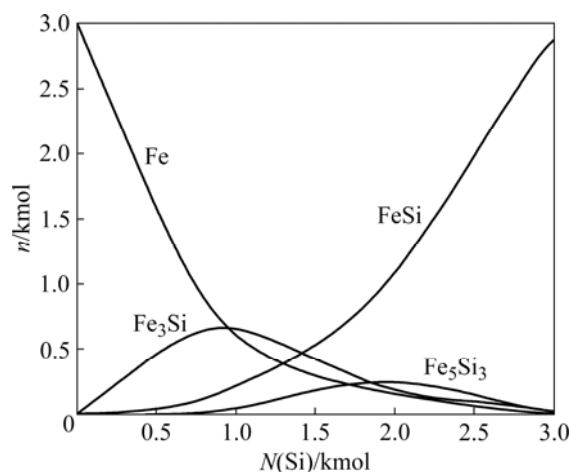


图 4 1 023 K 时 Fe-Si 体系物质平衡图

Fig.4 Equilibrium diagram of substance in Fe-Si system at 1 023 K

图 4 和 5 中左侧硅含量较低, 相当于试样(见图 2)过渡梯度层基体一侧; 其右侧硅含量高(约 33%), 相当于试样 2 过渡梯度层表面。从图 4 和 5 可以看出以下几点: 1) 铁硅体系中随着硅含量的增加首先出现的金属间化合物是 Fe₃Si, 其次是 FeSi, 再次之是 Fe₅Si₃, FeSi(A)、FeSi₂、FeSi_{2.33}、FeSi_{2.43} 的量很少; 2) 含硅

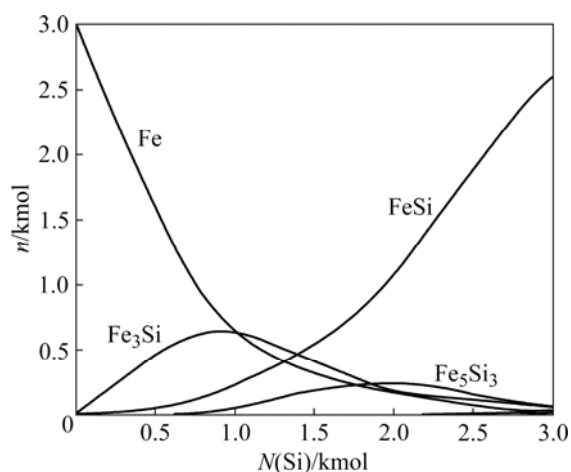


图5 1273 K时Fe-Si体系的物质平衡图

Fig.5 Equilibrium diagram of substance in Fe-Si system at 1273 K

量在小于1.6%(硅量约为0.1 kmol)时,体系中只有 Fe_3Si 和Fe;含硅量约在1.6%~11%(硅量约为0.1~0.75 kmol)之间时,体系中有 Fe_3Si 、 FeSi 和Fe;含硅量约为11%~33%(硅量约为0.75~3 kmol)之间时,体系中有 Fe_3Si 、 FeSi 、 Fe_5Si_3 和Fe; 3) 单质Fe量随Si量的增加而逐渐减少,当硅量增加到超过 FeSi 的含硅量时,单质Fe含量已很少; Fe_3Si 的量随Si量的增加呈抛物线形式变化,约在硅量0.85 kmol(含硅约12.4%)时达最大,之后呈减少趋势,当硅量增加到超过 FeSi 含硅量时已很少; Fe_5Si_3 约在Si量约0.75 kmol(含硅约11%)时出现,且随着硅含量的增加呈抛物线变化,约在硅量2 kmol(含硅约25%)时达最大,之后呈减小趋势,当硅量增加到超过 FeSi 的含硅量时已很少。 FeSi 随着硅含量的增加逐渐增加,当硅量增加到接近 FeSi 含硅量时含量最高,而对应的其他金属间化合物含量已很少; 4) 温度对铁硅体系中各个金属间化合物量的变化规律影响不大。

3 结论

1) 过渡梯度层硅、铁含量呈3段不同的变化规律: 1) 靠近试样表面部分,其硅含量沿深度下降快,下降率较大; 2) 梯度层中间部分,其硅含量基本保持不变; 3) 梯度层靠近基体一侧,其硅含量的下降率介于前两者之间。

2) 梯度层中,以 Fe_3Si 、 FeSi 、 Fe_5Si_3 和Fe 4种物

质构成的厚度占整个梯度层厚度的比率最大。

3) 梯度层沿基体一侧向表面的物质组成变化规律为基体 $\rightarrow \text{Fe}_3\text{Si}+\text{FeSi}+\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{Si}+\text{FeSi}+\text{Fe}_5\text{Si}_3+\text{Fe} \rightarrow \text{FeSi}$,且各物质的量随硅含量的变化而变化。

4) 温度对梯度层中各个金属间化合物量随Si量变化的规律影响不大。

REFERENCES

- [1] 王东. 高硅电工钢的特性及应用[J]. 电工材料, 2001(3): 26-29.
WANG Dong. Character and application of high silicon electrical steel[J]. Electrical Engineering Materials, 2001(3): 26-29.
- [2] 杨劲松, 谢建新, 周成. 6.5%Si高硅钢的制备工艺及发展前景[J]. 功能材料, 2003, 34(3): 244-246.
YANG Jin-song, XIE Jian-xin, ZHOU Cheng. Preparation technology and prospect of 6.5%Si steel[J]. Journal of Functional Materials, 2003, 34(3): 244-246.
- [3] 张联盟, 张涛, 沈强. 一种高硅钢薄板的热处理和多次冷轧加工方法[P]. 中国专利 CN1528921A, 2004-09-15.
ZHANG Lian-meng, ZHANG Tao, SHEN Qiang. A method of heat treatment and cold-rolled several times to high-silicon steel sheet[P]. CN1528921A, 2004-09-15.
- [4] SEIFERT H. Mechanical properties of Fe-4.5-6.5%Si double roller ribbons[J]. Mater Sci Eng A, 1991, 133: 292-296.
- [5] 杨林, 田冲, 陈贵云, 张永昌, 叶恒强. 喷射轧制Fe-4.5%Si硅钢片的组织和性能[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(1): 55-58.
YANG Lin, TIAN Chong, CHEN Gui-yun, ZHANG Yong-chang, YE Heng-qiang. Microstructure and properties of Fe-4.5wt%Si steel produced by spray forming and rolling[J]. Materials Science and Technology, 2002, 10(1): 55-58.
- [6] INOKUTI Y, SUZUKI K, KOBAYASHI Y. Grain oriented silicon steel sheet with new ceramic films characterized by ultra low iron loss[J]. Materials Transactions, JIM, 1992, 33(10): 946-949.
- [7] 刘海明, 彭长平, 李玉国. Fe-6.5%Si快速凝固极薄带[J]. 钢铁, 1993, 28(7): 55-59.
LIU Hai-ming, PENG Chang-ping, LI Yu-guo. Rapidly solidified Fe-6.5%Si ribbon[J]. Iron & Steel, 1993, 28(7): 55-59.
- [8] ONO Y, ICHIRYU T, OHNAKA I. Spinning condition, structure and magnetic properties of Fe-6.5mass% Si alloy fiber produced by the in-rotating-liquid-spinning process[J]. Japan Inst Metals, 1997, 61(7): 650-655. (in Japanese)
- [9] 丁培道, 蒋斌, 杨春楣, 方亮. 薄带连铸技术的发展现状与思考[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(S1): 193-196.

- DING Pei-dao, JIANG Bin, YANG Chun-mei, FANG Liang. The Development and thought of thin-strip continuous casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(S1): 193-196.
- [10] 胡广勇, 左 良, 程力智. 快凝速度对淬态 Fe-6.5%Si 薄带织构的影响[J]. 金属功能材料, 1998, 5(5): 207-209.
- HU Guang-yong, ZUO Liang, CHENG Li-zhi. Influence of quenching velocities on textures of as quenched Fe 6.5%Si ribbons[J]. Metallic Functional Materials, 1998, 5(5): 207-209.
- [11] KLAM C, MILLER J, MAZILLE H. Chemical vapor deposition of silicon onto iron[J]. Journal of Material Science, 1991, 26(26): 4945-4952.
- [12] ZHU De-wei, YOGESH S. Modeling chemical vapor deposition of silicon with local equilibrium consideration at the substrate[J]. Metallurgical Transactions B, 1991, 22B(6): 309-321.
- [13] OSADA K, YAMAJI T, KASAI K. Basic investigation of CVD method for manufacturing 6.5%Si steel sheet[J]. ISIJ International, 1996, 136(6): 706-713.
- [14] YAMAJI T, ABE M, TAKADA Y. Magnetic properties and workability of 6.5% silicon steel sheet manufactured in continuous CVD siliconizing line[J]. Journal of Magnesium Materials, 1994, 133: 187-189.
- [15] 卢凤喜, 王爱华. 6.5%Si 渗硅工艺新进展[J]. 金属功能材料, 2008, 15(1): 42-43.
- LU Feng-xi, WANG Ai-hua. New evolution of 6.5%Si siliconizing treatment processes[J]. Metallic Functional Materials, 2008, 15(1): 42-43.
- [16] 何小凤, 李运刚, 田 薇, 梁精龙. SiO₂在 KCl-NaCl-NaF 体系中的溶解度及溶解机理[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(5): 929-933.
- HE Xiao-feng, LI Yun-gang, TIAN Wei, LIANG Jing-long. Solubility and dissolving mechanism of SiO₂ in KCl-NaCl-NaF molten salt[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(5): 929-932.

(编辑 龙怀中)