

文章编号: 0258-2724(2010)02-0227-05 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2010.02.012

## 双辊连铸硅钢薄带硅含量对组织的影响

易 于, 周泽华, 王泽华, 江少群  
(河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 为对双辊连铸硅钢薄带的后续处理工艺提供理论依据和技术支持, 用光镜、透射电镜和能谱分析等方法研究硅含量变化对薄带组织的影响. 硅钢薄带的质量分数分别为 0.5%, 1.0%, 3.0%, 4.5% 和 6.5%. 结果表明: 硅含量对硅钢薄带组织的晶粒尺寸、晶界形貌和晶内位错等均有显著影响. 当硅的质量分数为 3.0% ~ 4.5% 时, 薄带晶粒较大, 晶界较纯净, 晶内位错量和成分偏析较少.

**关键词:** 双辊连铸; 硅钢; 薄带; 组织; 透射电镜

**中图分类号:** TG113.12 **文献标识码:** A

## Effects of Si Concentration on Microstructure of Si Steel Thin Strips Prepared by Twin Roll Continuous Casting

YI Yu, ZHOU Zehua, WANG Zehua, JIANG Shaoqun  
(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The effects of Si concentration on microstructure of Si steel thin strips prepared by twin roll continuous casting were investigated with optical microscopy, transmission electron microscopy and energy spectrum analysis to provide a theoretical and technological reference for post treatment procedure of the steel. The Si steel under investigation has Si concentration of 0.5%, 1.0%, 3.0%, 4.5% and 6.5% (mass fraction), respectively. The results show that Si concentration strongly affects grain sizes, morphology of grain boundaries and dislocations of the strips. When Si concentration is 3.0% to 4.5% (mass fraction), the strips have large grains, pure grain boundaries, less dislocations and slight segregation.

**Key words:** twin-roll continuous casting; Si steel; thin strip; micro-structure; transmission electron microscopy

双辊连铸技术是最有前途的薄带连铸技术之一, 主要优点是通过简化工序能够大幅度的降低设备投资和能源消耗, 通过快速凝固改善材料的性能<sup>[1-6]</sup>.

硅钢(电工钢)对生产工艺要求很高, 在国民生产中有着广泛的应用, 占有重要的地位. 在生产高性能硅钢片方面, 采用传统的连铸连轧-冷轧生产工艺, 不但生产技术复杂、生产成本低、能耗大, 而且钢种含硅量亦受限制, 如传统的冷轧法硅钢中

硅的质量分数( $w_{Si}$ )不能超过 3.5% 的极限<sup>[7-9]</sup>. 采用双辊连铸薄带法可使  $w_{Si}$  达到 6.0%. 利用双辊连铸法生产硅钢薄带, 可缩短工艺流程, 降低能耗, 降低成本, 并且提高产品质量, 具有巨大的经济效益<sup>[10-15]</sup>. 正是由于双辊法在生产硅钢时具有的独特优势, 许多国家竞相开展这方面的研究. 目前国内对双辊薄带连铸硅钢的组织机理研究的报道不多见.

笔者借助于光镜、透射电镜和能谱分析等测试

收稿日期: 2009-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目子项目(59995440)

作者简介: 易于(1968-), 女, 讲师, 研究方向为金属材料, E-mail: yiyu@hhu.edu.cn

手段,研究不同硅含量的硅钢经双辊连铸工艺后,薄带的组织和成分变化特征和规律.通过上述研究,分析组织成分变化可能导致的材料电磁性能变化,为双辊薄带硅钢后续处理工艺提供理论依据和技术支持.

## 1 实验条件及分析方法

### 1.1 实验条件

采用 10 kg 中频感应炉分别冶炼  $w_{\text{Si}}$  为 0.5%, 1.0%, 3.0%, 4.5% 和 6.5% 的无取向硅钢,其中  $w_{\text{C}} \leq 0.05\%$ ,  $w_{\text{Mn}}$ ,  $w_{\text{P}}$ ,  $w_{\text{S}} \leq 0.02\%$ .

硅钢在冶炼时,钢液在冷水 SLB-1 型双辊薄带连铸装置上进行连铸,浇注初始温度为 1 560 °C. 装置主要技术参数:不锈钢铸辊直径 250 mm;辊宽

150 mm;浇注速度 3 ~ 31 m/min.

### 1.2 分析方法

采用 OLYMPASE M20 金相显微镜对抛光薄带样品进行金相组织观察,腐蚀剂为 4% 硝酸酒精. H-700H 透射电子显微镜(TEM)观察样品晶界和晶内位错,加速电压为 200 kV. EDAX-900 能谱分析仪对样品进行微区成分分析.

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 铸带的微观组织特征

硅钢铸带的光学显微组织如图 1 所示.由图 1 可见,其基体均为单相组织.单相组织具有良好电磁性能材料所必备的条件,所有铸带中均未发现枝晶组织,总体上铸带为等轴晶组织.

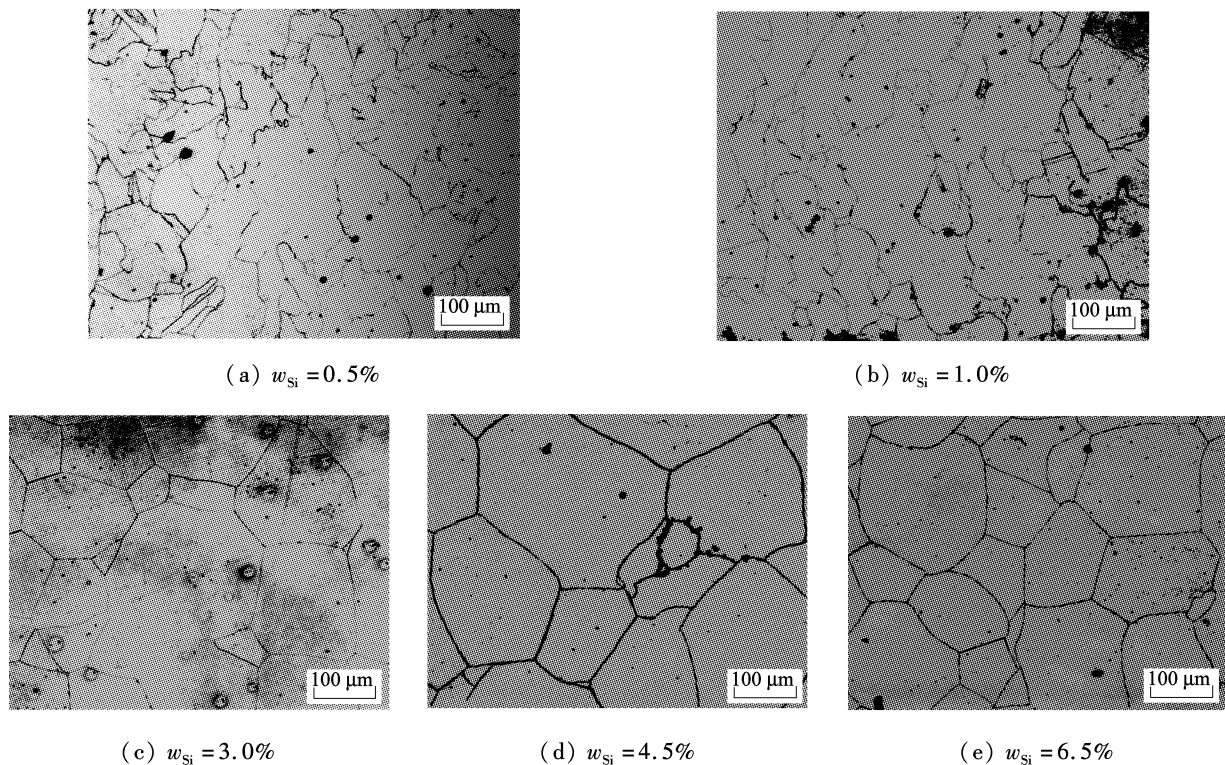


图 1 不同 Si 含量硅钢薄带组织

Fig. 1 Micro-structures of Si steel strips with different Si content

从图 1 还可发现 Si 含量对组织的影响规律.当  $w_{\text{Si}}$  从 0.5% 增加到 4.5% 时,晶粒尺寸逐步增加.当  $w_{\text{Si}}$  为 0.5% 和 1.0% 时,硅钢薄带晶粒很小,并且晶界弯曲、凹凸不平;当  $w_{\text{Si}} = 3.0\%$  时,晶粒开始明显变大,晶界也开始平直,几乎没有凹凸不平的现象;当  $w_{\text{Si}} = 4.5\%$  时,硅钢薄带晶粒最大,晶界平直;当  $w_{\text{Si}} = 6.5\%$  时,晶粒尺寸反而减小,推测可能是 Si 对晶粒尺寸的影响有一个极大值.

Si 可提高  $\alpha\text{-Fe}$  的导磁率,使硅钢在较弱的磁

场下有较高的磁感应强度,同时减少钢片的涡流损失,使总铁芯损耗减少.硅钢片通常以铁芯损耗和磁感应强度作为磁性保证值,要求铁芯损失小、磁感应强度高.

影响硅钢片电磁性能的主要因素有:

- (1) 晶粒尺寸;
- (2) 晶体结构;
- (3) 晶粒取向;
- (4) 夹杂物的影响;

### (5) 合金元素的影响<sup>[7,9]</sup>.

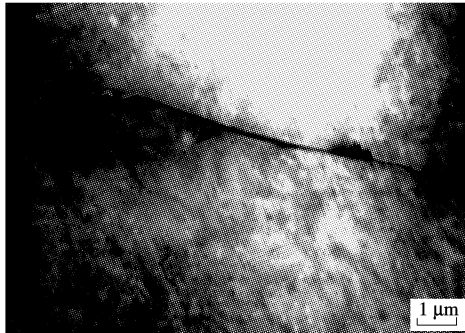
一般认为,硅钢片晶粒越大,磁性越好.这是由于相同面积下晶粒越大,晶界越少,且相对平直,减少了电阻.但粗大晶粒使晶界减少,导致钢的塑性下降.所以相同成分下,晶粒细小、均匀,利于冷加工.当晶界平直时,则塑性会好一些<sup>[7,9]</sup>.综合上述分析可知,当  $w_{\text{Si}} \geq 3.0\%$  时,硅钢片的磁性较好.

## 2.2 硅钢薄带电镜分析

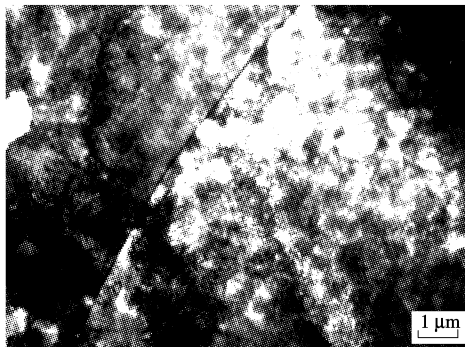
为了进一步了解硅钢的组织结构,分别对  $w_{\text{Si}}$  为 1.0%, 3.0% 和 6.5% 的硅钢薄带作 TEM 分析.

### (1) 晶界形貌

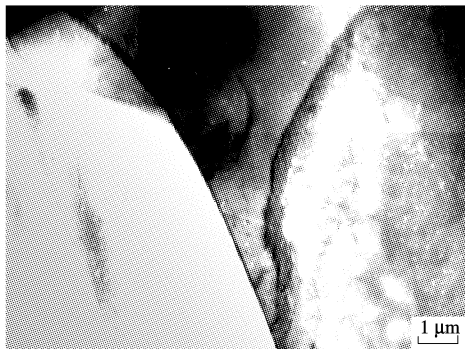
不同 Si 含量硅钢组织的 TEM 晶界形貌如图 2



(a)  $w_{\text{Si}} = 1.0\%$



(b)  $w_{\text{Si}} = 3.0\%$



(c)  $w_{\text{Si}} = 6.5\%$

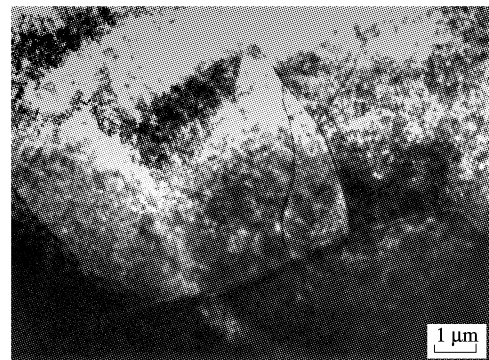
图 2 不同 Si 含量硅钢组织的 TEM 晶界形貌  
Fig. 2 TEM micrograph of grain boundary with different Si content

所示. TEM 观察表明:当  $w_{\text{Si}} = 1.0\%$  时,硅钢薄带晶界较弯曲,有析出物;当  $w_{\text{Si}} = 3.0\%$  时,硅钢薄带晶界平直、干净,晶界上没有发现析出物;当  $w_{\text{Si}} = 6.5\%$  时,硅钢薄带晶界较干净、平直.总体上当  $w_{\text{Si}}$  为 3.0% 和 6.5% 时,硅钢薄带的晶界形貌变化不大.理论上,具有纯净平直晶界的薄带组织,有利于提高硅钢成品的电磁性能.

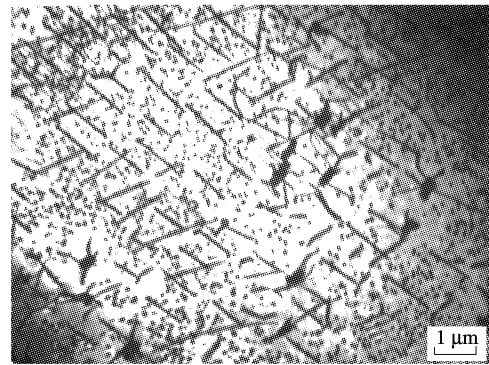
### (2) 位错形态

$w_{\text{Si}}$  为 1.0%, 3.0% 和 6.5% 的硅钢薄带位错形态完全不同,如图 3 所示.

从图(3a)中可以看出,此时硅钢薄带中位错



(a)  $w_{\text{Si}} = 1.0\%$



(b)  $w_{\text{Si}} = 3.0\%$



(c)  $w_{\text{Si}} = 6.5\%$

图 3 不同 Si 含量硅钢组织的 TEM 位错形貌  
Fig. 3 TEM micrograph of dislocation with different Si content

密集,遍布整个基体,且堆积在一起。

图3(b)的位错成线段状,互相缠绕且有位错结.与 $w_{\text{Si}} = 1.0\%$ 的硅钢薄带相比, $w_{\text{Si}} = 3.0\%$ 硅钢薄带内的位错要少。

当 $w_{\text{Si}} = 6.5\%$ 时,硅钢薄带内位错较少,且多为网状,如图3(c)所示。

不同Si含量的硅钢薄带位错存在形态差异.随着Si含量的不同,快速凝固时,晶体在生长及随后的冷却过程中,由于温度梯度、成分不均、晶体结构的变化导致局部产生应力集中。

就电磁性能而言,过多的位错及位错结对电磁流的导通均有阻碍.因此,作为电工钢材料,希望硅钢薄带具有晶粒粗大、晶界平整,且内部缺陷和偏析较少的微观组织<sup>[16]</sup>。

### 2.3 能谱分析

为了分析不同Si含量晶内和晶界的差异,对不同成分的硅钢薄带组织做能谱分析,结果如表1所示.由表1可以发现,晶界的Si含量普遍比晶内高,表明Si在晶界略有偏析,这种偏析可以借助均匀退火消除,不会影响成品硅钢的电磁性能. $w_{\text{Si}}$ 为3.0%和4.5%的硅钢薄带组织中晶界和晶内的Si含量较接近,即相对成分均匀性更好。 $w_{\text{Si}} = 6.5\%$ 的硅钢薄带组织中,晶内Si含量反而偏高,这种反常现象和晶粒大小的反常相吻合。

表1 不同硅质量分数组织的EDS能谱分析结果  
Tab.1 EDS analyses with different Si content %

$w_{\text{Si}}$	晶内 $w_{\text{Si}}$	晶界 $w_{\text{Si}}$
0.50	0.25	0.54
1.00	0.87	1.33
3.00	2.78	3.09
4.50	3.98	4.52
6.50	6.68	5.27

## 3 结论

(1) 显微形貌显示,硅钢薄带基体均为单相组织,这种单相组织对材料良好的电磁性能有利。

(2) 随着Si含量的增加,硅钢的晶粒逐渐长大,且晶界变得平直,晶界析出物减少.但当Si含量达到6.5%时,薄带晶粒反而细化。

(3) 随着Si含量的增加,位错线明显减少,位错结的密集程度也变得稀疏,材料的电磁导通效果将随着位错的减少而得到提高。

(4) 结合薄带表面质量、组织和成分分析,本

研究工艺可获得表面质量良好的硅钢薄带。 $w_{\text{Si}}$ 在3.0%~4.5%之间时,薄带晶粒较大,晶界较纯净,位错量和成分偏析较少,有望获得电磁性能良好的电工钢材料。

### 参考文献:

- [1] RICHARD W. The status of twin roll casting technology [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2003, 32 (1): 58-63.
- [2] HOHENBICHLER N G, TOLVE P, CAPOTOST R, et al. Eurostrip direct strip production of carbon and stainless steels[J]. Iron and Steel, 2003, 38 (6): 15-19.
- [3] KARLHENZ S, FRANK R, VISCOROVA R. Direct strip casting (DSC)-an option for production of new steel grades [J]. Steel Research International, 2003, 74(11): 724-731.
- [4] SEOL D J, WON Y M, OH K Y, et al. Mechanical behavior of carbon steels in the temperature range of mushy zone [J]. ISIJ International, 2000, 40 (4): 356-363.
- [5] XU P, YIN F, KOTOBU N. Plastic anisotropy of strip-cast low-carbon steels [J]. Materials Transactions, 2004, 45(2): 447-456.
- [6] SPINELLI J E, TOSETTI J P. Microstructure and solidification thermal parameters in thin strip continuous casting of a stainless steel [J]. Journal of Material Processing Technology, 2004, 150(3): 255-262.
- [7] 李运刚,梁精龙,李慧,等. 渗硅制备6.5%Si硅钢表面Fe-Si过渡梯度层的特性[J]. 中国有色金属学报,2009, 19(4): 714-717.  
LI Yungang, LIANG Jinlong, LI Hui, et al. Character of Fe-Si transition gradient layer generated on surface of 6.5% Si steel sheet by siliconizing [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(4): 714-717.
- [8] 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.
- [9] 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 Jingsong, XIE Jianxing, ZHOU Cheng. Preparation technology and prospect of 6.5% Si steel [J]. Journal of Functional Materials, 2003, 34(3): 244-246.

(下转第260页)