

冷轧无取向硅钢的磁晶各向异性性能的模拟

徐向棋¹ 金自力²

(1 铜陵学院机械系, 铜陵 244000; 2 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010)

摘要 根据冷轧无取向硅钢的磁晶各向异性性能与织构的关系, 通过织构取向分布函数 ODF 程序的计算, 得到取向分布函数的 C 系数和磁晶各向异性性能分布函数 MDF 的 M 系数, 计算了 0.004% C、0.33% Si 无取向硅钢在宏观各个方向上的磁晶各向异性性能。模拟结果表明, 多晶体材料的织构影响磁晶各向异性性能, 当 {111}⟨112⟩ 织构组分密度较低时, 磁晶各向异性性能较小。

关键词 无取向硅钢 织构 磁晶各向异性性能

Simulation of Magneto-Crystalline Anisotropy Energy of Cold Rolled Non-Oriented Silicon Steel

Xu Xiangqi¹ and Jin Zili²

(1 Department of Machinery, Tongling Institute, Tongling 244000;

2 School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract According to relation of texture - magneto-crystalline anisotropy energy of cold rolled non-oriented silicon steel, the C coefficient of orientation distribution function and M coefficient of magneto-crystalline energy distribution function MDF are obtained by calculation of texture orientation distribution function ODF program to calculate magneto-crystalline anisotropy energy of non-oriented silicon steel (0.004C, 0.33Si) at each macro direction. The simulation results show that the textures of polycrystalline materials influence magneto-crystalline anisotropy energy, and the lower {111}⟨112⟩ texture element density, the weaker magneto-crystalline anisotropy energy.

Material Index Non-Oriented Silicon Steel, Texture, Magneto-Crystalline Anisotropy Energy

冷轧无取向硅钢作为在旋转磁场中工作的电动机和发电机转子铁芯材料, 具有良好的磁性能和工艺性能, 是新一代的软磁材料, 属于钢铁工业的高端产品。利用现代织构分析手段和理论, 研究生产过程中冷轧无取向硅钢织构形成和演变规律的工作尚不充分^[1], 织构分布及各组分强度对冷轧无取向硅钢的磁性能具有显著影响。

1 织构和磁晶各向异性性能定量关系的物理模型

单晶对于磁性晶体, 它具有磁各向异性, 对于立方金属有^[2]:

$$E = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2) + K_2\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + \dots \quad (1)$$

上式中 α 是方向余弦, K_0 、 K_1 、 K_2 是常数。

多晶磁化时, 晶界处有退磁场的存在, 晶粒之间的磁相互作用使得磁化过程非常复杂, 为了简化计算, 计算磁晶各向异性性能时, 这种相互作用一般认为可以不考虑^[3,4]。

硅钢片织构和磁转矩定量关系的物理模型包

含如下假设:

(1) 多晶磁体的磁晶各向异性性能由单晶磁体的磁晶各向异性性能和多晶材料的织构决定。

(2) 计算多晶磁体磁晶各向异性性能时, 不考虑多晶晶粒之间的相互作用, 多晶体磁晶各向异性性能是组成多晶体的各个单晶磁晶各向异性性能的叠加。

2 计算思路

Bunge 指出, 可以由材料单晶体的性能和材料的织构信息综合得到材料的某一宏观性能。设单晶体的磁晶各向异性性能 E 是取向 g 的函数, 故:

$$E = E(g) \quad (2)$$

对应取向 g 的晶粒的 ODF (Orientation Distribution Function) 值是 $f(g)$, 则多晶体的磁晶各向异性性能可表示为:

$$\bar{E}(g_0) = \int E(g)f(g)dg \quad (3)$$

$E(g)$ 展开成广义球函数, 如果 $g_0 = \{\alpha, 0, 0\}$ 得:

$$\bar{E}(a) = \sum_{l=0(2)}^{L_{MAX}} \sum_{m=1}^{M(l)} \sum_{n=0}^{N(l)} \frac{1}{2l+1} m_l^{mn} C_l^{mn} \cos(na) \quad (4)$$

式中： m_l^{mn} - $E(g)$ 的广义球函数展开系数 (M 系数)； C_l^{mn} - 材料织构 ODF 函数的 C 系数。在板平面内和轧向方向夹角 α 的磁晶各向异性能为：

$$E(a) = \sum_{l=0(2)}^{L_{MAX}} \sum_{m=1}^{M(l)} \sum_{n=0}^{N(l)} \frac{1}{2l+1} m_l^{mn} C_l^{mn} \cos(na) \quad (5)$$

目前,对硅钢片的织构和其磁转矩的定量关系所进行的研究^[5],主要是采用磁晶各向异性公式直接解析展开的方法,这种方法比较简便。但是目前织构 ODF 的计算程序有很多种,且各个程序定义的广义球函数不相同,即使对同一个极图输入数据,计算出来的 C 系数不尽相同。对应某一组 m_l^{mn} ,必定对应某一特定格式的 C_l^{mn} ,对于其它 ODF 程序计算出来的 C 系数采用这种方法计算结果可能不正确,不利于推广。

为了克服不同 ODF 程序广义球函数定义的不同,提出了一种计算磁晶各向异性的新方法,可以较好地解决这个问题,并且比较直观、简便。

将磁晶各向异性能随机取向的分布称为磁晶各向异性能分布函数 MDF (Magnetocrystalline anisotropy energy Distribution Function)。由于利用 ODF 可以反算极图,所以利用 MDF 也可以反算极图,此反算出来的极图称为磁晶各向异性能图,利用此反算出来的极图作为 ODF 程序的输入数据,ODF 计算程序就可以计算出磁晶各向异性的广义球函数的展开系数 m_l^{mn} 。同时利用同一个 ODF 计算程序计算材料 ODF 得到 C_l^{mn} ,利用公式 (5) 即可计算材料在宏观各个方向上的磁晶各向异性能。

由于这种方法使用同一 ODF 程序计算得到 m_l^{mn} 和 C_l^{mn} ,所以 m_l^{mn} 和 C_l^{mn} 对应的广义球函数的

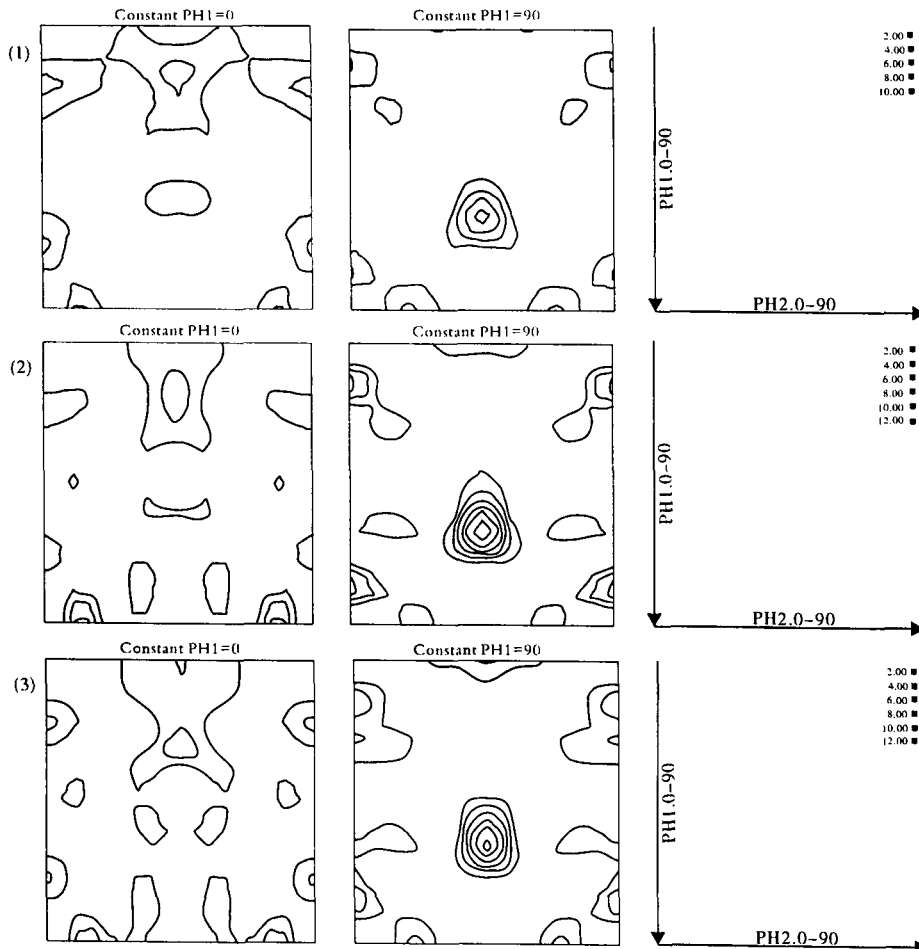


图 1 (1)1 号试样, (2)2 号试样, (3)3 号试样 $\phi_1 = 0^\circ$ 和 $\phi_1 = 90^\circ$ 时的 ODF 截面图
 Fig. 1 ODF section drawing at $\phi_1 = 0^\circ$ and $\phi_1 = 90^\circ$ of sample 1 (1), sample 2 (2) and sample 3 (3)

定义是统一的,这样可以保证计算结果的正确性。

3 结果及分析

本实验采用的实验钢为冷轧无取向硅钢,其化学成分(%)为:0.004C、0.33Si、0.38Mn、0.099P、0.007S、0.32Al。该实验钢在相同的实验环境下进行不同的轧制规程和退火工艺,通过金相分析后选取了其中的3个试样(1号,2号,3号),通过X-射线衍射仪分别检测试样的 $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 、 $\{100\}$ 面的极图,并用其自带程序计算ODF。对应的3个试样的织构图如图1。

图1的3个试样织构图显示,织构类型基本相似,绝大多数晶粒在 $\{111\}\langle 112\rangle$ 周围聚集, α 线上的密度相对比较低。其中2、3号试样的 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构密度为12,而1号样的密度为8。

通过计算ODF时得出的C系数,分别计算 $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 、 $\{100\}$ 面磁晶各向异性性能图,将计算出来的磁晶各向异性性能图作为ODF程序的输入数据,利用已有的ODF计算程序,计算磁晶各向异性性能的球函数展开系数 m_l^m ,利用 m_l^m 和 C_l^m 计算后得出的多晶材料的磁晶各向异性性能,其结果如图2所示。

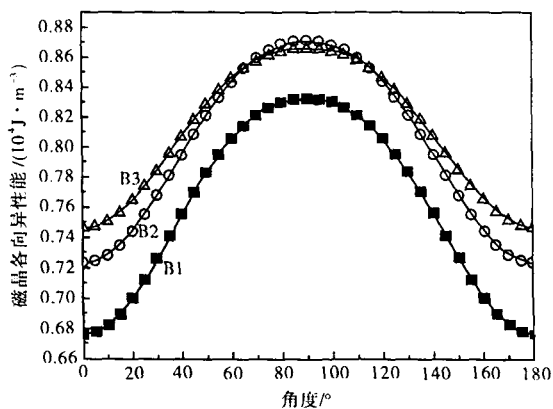


图2 不同轧制和退火工艺生产冷轧无取向硅钢的磁晶各向异性性能曲线

Fig.2 Curves of magneto-crystalline energy of non-oriented silicon steel produced by different rolling annealing process

从图2中3个试样的磁晶各向异性性能模拟曲线分析,由于材料的织构类型基本相似,所以磁晶各向异性曲线的形状基本相同。但由于织构组分的强度不同,它们相应位置的磁晶各向异性性能的值还是有所不同,说明它们的磁化难易程度还是有差别的。在 90° 时附近 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构的组分

密度最高,而且属于 γ 织构,是难磁化方向,所以在 90° 附近,磁晶各向异性性能最大。但在 α 线方向上,磁晶各向异性性能比较小,属易磁化方向。

比较3个试样的织构图,1号样的 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构组分的密度最低;而2、3号样的密度都比较高。比较3个试样在 90° 时的磁晶各向异性性能值如表1,其中1号样的磁晶各向异性性能最小,说明最易磁化。

从以上分析可见,多晶体材料的织构很大程度上决定着材料的磁学性能,提高材料的织构就可以提高材料在某一方向上的磁学性能;并且利用磁晶各向异性性能曲线,可对磁路设计时进行辅助分析,使材料的使用方向尽可能和材料的易磁化方向一致,提高产品的性能。

表1 各试样在 90° 时的磁晶各向异性性能值
Table 1 Magnitude of magneto-crystalline anisotropy energy at 90° for each sample

试样	磁晶各向异性性能值
1	0.835
2	0.871
3	0.866

4 结论

(1)多晶体材料的织构影响磁晶各向异性性能,当 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构组分密度较低时,磁晶各向异性性能较小。

(2)利用多晶材料的磁晶各向异性性能曲线模拟,可以对磁路设计进行辅助分析,提高产品的性能,因而具有一定的现实意义。

参考文献

- 1 Arrott A S. The Past, the Present and Future of Soft Magnetic Materials. Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 215 - 216:6
- 2 Hutchinson W B, Swift J G. Anisotropy in Some Soft Magnetic Materials. Texture, 1972(1):117
- 3 宛德福, 马兴隆. 磁性物理学. 北京: 电子科技大学出版社, 1994
- 4 左良, 王沿东. 广义矢量法预估多晶材料的磁晶各向异性. 金属学报, 1990, 26(4):297
- 5 Bunge H J. Texture Analysis in Materials Science. Butterworths, London, 1952:294

徐向棋(1979-),男,硕士,助教,从事材料成型过程中组织与性能的数值模拟研究。