

取向硅钢薄带单晶磁感系数的计算*

沙玉辉¹⁾ 李松¹⁾ 周世春^{1,2)} 王沿东¹⁾ 高秀华¹⁾ 梁志德¹⁾ 左良¹⁾

1) 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004

2) 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900

摘要 对由取向硅钢薄带的磁感和织构实测数据计算其单晶磁感系数进行了探讨. 提出了一个基于准确评估实测磁性数据可信程度及拟合织构数据的计算方法. 指出多晶 X 射线衍射技术测算的织构系数不宜直接用于取向硅钢磁性计算, 应以拟合织构系数取代.

关键词 取向硅钢, 磁感, 单晶性能系数, 织构

中图分类号 TG113.2

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2004)04-0445-04

CALCULATION OF SINGLE CRYSTAL MAGNETIC INDUCTION COEFFICIENTS IN A GRAIN ORIENTED SILICON STEEL STRIP

SHA Yuhui¹⁾, LI Song¹⁾, ZHOU Shichun^{1,2)}, WANG Yandong¹⁾, GAO Xiuhua¹⁾, LIANG Zhide¹⁾, ZUO Liang¹⁾

1) School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004

2) Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900

Correspondent: SHA Yuhui, associate professor, Tel: (024)83684611, E-mail: yhsha@mail.neu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China and Shanghai Baosteel Group Corporation (No.50130010)

Manuscript received 2003-06-20, in revised form 2003-09-15

ABSTRACT The calculation of single crystal magnetic induction coefficients from measured texture and magnetic induction data in a grain-oriented silicon steel strip has been discussed. A new method, based on an accurate reliability evaluation of measured magnetic property data and the fitting of texture components, was proposed. It was also shown that, instead of the experimental texture data obtained with X-ray diffraction technique, the fitted texture coefficients according to a Gaussian distribution model should be used in calculation.

KEY WORDS grain-oriented silicon steel, magnetic induction, single crystal property coefficient, texture

取向硅钢是电力、电子等领域广泛应用的一种软磁材料. 准确、定量的磁性能计算预估是其生产质量稳定和新产品研发的重要保证. 理论上磁性是典型的由晶体方向决定的单轴性能, 根据单晶体磁性能和织构数据可以比较确切地计算出硅钢的宏观磁性能. 例如, Hutchinson 等^[1] 采用取向分布函数 (ODF) 计算了无取向硅钢的磁转矩曲线, Morris 等^[2] 计算了无取向硅钢的磁转矩曲线、铁

损及磁化率, Szpunar 等^[3] 根据单晶磁化理论计算出了取向硅钢的磁化曲线.

本文针对取向硅钢板材的组织 and 织构特征, 探寻了有效利用实测磁性及织构数据以提高单晶磁感系数计算精度的方法.

1 计算模型和方法

1.1 计算模型

在忽略晶界影响的一级近似条件下, 多晶体的磁性能可以认为是单晶性能的织构加权. 对于具有正交对称的多晶取向硅钢板材, 板面内与轧向成 α 角方向的磁感 $F(\alpha)$ 可表示为^[4]

$$F(\alpha) = B_{00} + 4\pi^2 \left(\frac{2}{9}\right)^{\frac{1}{2}} (1 + 2a_{44}^2) [P_4(0)W_{400} +$$

* 国家自然科学基金和上海宝钢集团联合资助项目 50130010, 高校优秀青年教师教学科研奖励计划基金及辽宁省博士启动基金资助项目

收到初稿日期: 2003-06-20, 收到修改稿日期: 2003-09-15

作者简介: 沙玉辉, 男, 1969 年生, 副教授, 博士

$$2P_4^2(0)\cos 2\alpha W_{420} + 2P_4^4(0)\cos 4\alpha W_{440}]B_{40} + 4\pi^2 \left(\frac{2}{13}\right)^{\frac{1}{2}}(1 + 2a_{64}^2)[P_6(0)W_{660} + 2P_6^2(0)\cos 2\alpha W_{620} + 2P_6^4(0)\cos 4\alpha W_{640} + 2P_6^6(0)\cos 6\alpha W_{660}]B_{60} \quad (1)$$

式中 B_{l0} 为单晶磁感系数, $P_l^m(x)$ 为连带 Legendre 函数, a_{ln} 为织构系数 $W_{lmn}(n \neq 0)$ 与 W_{lm0} 间的关系常数. 式 (1) 可简写为

$$F(\alpha) = B_{00} + B_{40}\Phi_4(\alpha) + B_{60}\Phi_6(\alpha) \quad (2)$$

其中 $\Phi_l(\alpha)$ 仅由板材的低阶织构系数和 α 角确定.

根据式 (1) 或式 (2), 如已知织构系数和单晶磁感系数, 即可计算出板面内任一方向的磁感 $F(\alpha)$; 反之, 从实测的织构系数和若干方向的 $F(\alpha_i)$, 亦能回归出 B_{00} , B_{40} 和 B_{60} . 但后者对磁感和织构数据的测量误差非常敏感, 因而模型的简略、实验设备的精度制约及测试操作的取值误差等因素的存在, 要求在回归处理时对实测数据施以进一步的精练和可信程度评估并据以加权.

1.2 织构数据的利用

使用态取向硅钢板材通常晶粒较大, 在利用 X 射线衍射术测定极图时, 由于被扫描的晶粒数目有限而影响测量结果的统计性, 导致计算的织构系数出现一定误差. 尽管这对 ODF 截面图影响可能不甚明显, 但对于只涉及到低阶织构系数的磁性能定量计算则会有相当大的影响. 考虑到使用态取向硅钢织构强度高的特点且晶粒取向近乎 Gauss 分布, 本文提出采用 Gauss 织构组分拟合法对实测织构数据加以精练, 即通过 Gauss 分布拟合实测 ODF 来计算织构系数, 以更接近实际.

对于具有近似单一 Goss 织构 ($\{110\}(001)$) 的取向硅钢样品, 如设 W_{lmn}^0 为单一理想 Goss 织构的织构系数, W_{lmn} 为具有一定漫散度 (对应半高宽为 ω) 的 Goss 织构的织构系数, 则有^[5]

$$W_{lmn} = \frac{\exp(-l^2\omega^2/4) - \exp[-(l+1)^2\omega^2/4]}{1 - \exp(\omega^2/4)} \cdot W_{lmn}^0 \quad (3)$$

通过式 (3) 计算可获得不同 ω 下的 ODF 分布, 将其峰值强度与实测 ODF 比较, 即可得到计算与实测 ODF 峰值相等时的拟合织构系数 W_{lmn} .

1.3 磁性数据的利用

在硅钢磁性能测试中, 由于多种因素的影响, 不可避免地会导致某些实测数据偏离真值. 因此有必要对实测数据的可信度进行评估, 并在回归处理时赋予相应的权重.

由式 (1) 可知, 如实测有 n 个不同 α 角度的磁性能数据 $F_{(\alpha_i)}^{\text{exp}}$, 则求解 B_{00} , B_{40} 和 B_{60} 的线性方程组可有 $p = C_n^3$ 种组合, 即可以得到 p 组解. 将每一组解代回式 (1), 计算出该组解未用到的其它 $(n-3)$ 个 α 角度的磁性能值, 由此可进一步计算出该组解用到的 3 个实测磁性能

数据所对应的剩余方差 $S_j^2 = \sum_{i=1}^n (F_{(\alpha_i)}^{\text{exp}} - F_{j(\alpha_i)}^{\text{cal}})^2$ ($j = 1, 2, \dots, p$). 然后给每一种组合中的 3 个实测数据均赋予权重 $\frac{1}{S_j^2}$, 这样每一个实测数据可以得到 $q = C_{n-1}^2$ 个权重, 将这 q 个权重求和即得到该数据的权重 ν_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 进而可得归一化权重 $w_i = \nu_i / \sum_{i=1}^n \nu_i$.

将 w_i 引入式 (2) 并按最小二乘法处理

$$\frac{\partial}{\partial B_{l0}} \sum_{i=1}^n w_i [B_{00} + B_{40}\Phi_4(\alpha_i) +$$

$$B_{60}\Phi_6(\alpha_i) - F_{(\alpha_i)}^{\text{exp}}]^2 = 0 \quad (l = 0, 4, 6) \quad (4)$$

即可回归出单晶性能系数 B_{00} , B_{40} 和 B_{60} .

上述计算实测数据权重的方法, 存在使不同准确度数据权重拉近的倾向. 为更准确计算出单晶性能系数, 可以选择 S_j^2 数值较小的若干组实测数据, 然后只对这些组中的数据赋予权重, 经求和及归一化后获得各数据的权重, 这样可保证测试准确的数据得到高权重. 另一方面, 选择的数据组数目不宜过少, 否则也可能得到不甚合理的权重.

2 织构和磁性测试方法

选用 0.3 mm 厚的成品取向硅钢片为原材料, 其化学成分 (质量分数, %) 为: C 0.01, Si 3.10, Mn 0.12, S 0.05, Cu 0.01, N 0.01, P 0.02, Al 0.05. 将成品硅钢片进一步冷轧成 0.08 mm 厚的薄带, 于 840 °C 及氢气气氛下退火 6 h, 退火后平均晶粒尺寸约为 150 μm . 织构测试采用 X 射线 Schulz 背反射法, 通过测量 $\{110\}$, $\{200\}$ 和 $\{211\}$ 3 张不完整极图, 按级数展开法计算 ODF (l 展至 16). 由于平均晶粒尺寸大于薄带厚度, 织构随厚度层变化很小, 本实验以中间层代替通体进行织构测量并将结果用于磁性计算. 磁性能测试采用单片试样, 测量薄带面内与轧向成不同角度的磁感应强度 B_8 (指 800 A/m 磁场下的磁感应强度).

3 计算结果与分析

图 1 为退火取向硅钢薄带的 ODF 恒 ψ 截面图组, 显示薄带中形成了取向集中的 Goss 织构. 图 2 给出薄带轧面内各方向的磁感实测值, 可见磁感各向异性显著.

利用 Gauss 组分法经拟合获得的低阶织构系数 W_{400} 为 -0.2804, W_{420} 为 -0.8865, W_{440} 为 0.5026, W_{600} 为 -0.2425, W_{620} 为 0.0956, W_{640} 为 0.1745, W_{660} 为 0.1418. 据之确定的实测磁感数据的权重因子列于表 1, 其中 “Top5”、“Top10”、“Top15” 及 “All” 列分别表示由剩余方差较小的 5 组、10 组、15 组以及全部 35 组数据确定的权重因子. 可以看出, 对应于同一实测磁感数据, “Top5”、“Top10” 和 “Top15” 权重因子差别较大, 而 “Top15” 与 “All” 权重因子差别则很小, 且接近等权重. 这与 1.3 节的分析一致.

表 2 给出由拟合的织构数据计算的单晶磁感系数,

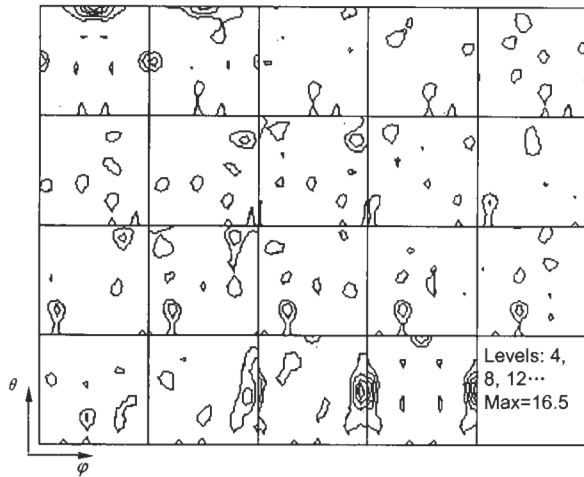


图 1 经 840 °C 氢气退火 6 h 的取向硅钢薄带 ODF 恒 ψ 截面图组

Fig.1 Constant ψ sections of ODF of grain-oriented silicon steel strip annealed at 840 °C for 6 h in hydrogen

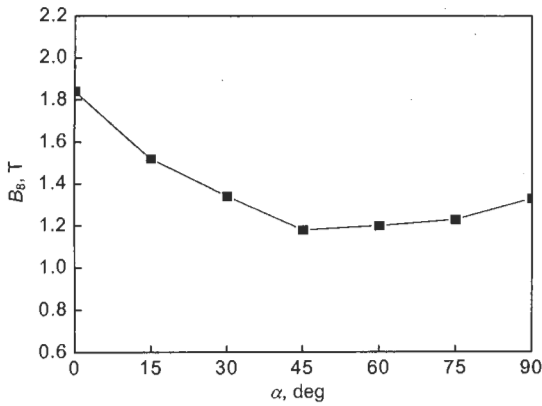


图 2 退火取向硅钢薄带的磁感与测试角度的关系

Fig.2 Variation of magnetic induction B_8 with angle α from rolling direction in annealed grain-oriented silicon steel strip

表 1 根据拟合织构系数计算的实测磁感数据权重因子

Table 1 Weight factors of measured magnetic induction data calculated with fitted texture coefficients

α , deg	Top5	Top10	Top15	All
0	0.2713	0.1822	0.1306	0.1312
15	0	0.0561	0.1346	0.1319
30	0.0621	0.1231	0.1442	0.1579
45	0.2030	0.1420	0.1396	0.1355
60	0.1303	0.1313	0.1142	0.1244
75	0.2071	0.2345	0.2068	0.1695
90	0.1262	0.1308	0.1301	0.1496

Note: Top5, Top10, Top15 and All refer to the calculations of weight factor from 5, 10 and 15 smaller residual variances and all 35 residual variances for measured magnetic induction data, respectively.

其中“Equal weight”和“Unequal weight”分别表示在应用式(4)时,各实测数据以等权重(普通最小二乘法)或不等权重因子代入。可以看出,随权重因子不同,单晶磁感系数显示出差别。

利用表 2 中的单晶性能系数计算出的 3 种 $\langle 001 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 晶向的磁感列于表 3。由表可见,不同权重因子对应的单晶磁感计算值,均符合磁感随晶体学方向变化的一般规律,即 $B_{\langle 001 \rangle} > B_{\langle 110 \rangle} > B_{\langle 111 \rangle}$ 。“Equal weight”与“Top15”和“All”对应的单晶磁感值近乎相同,而“Top5”和“Top10”对应的单晶磁感则与之有较大差别。值得注意的是,利用“Top5”权重因子计算的各晶向磁感值与文献报道的数值最为接近^[6],如图 3 所示。

表 2 由拟合织构数据计算的单晶磁感系数

Table 2 Single crystal magnetic induction coefficients calculated from fitted texture data

Single crystal coefficient, T	Equal weight	Unequal weight			
		Top5	Top10	Top15	All
B_{00}	1.3842	1.3481	1.3674	1.3866	1.3844
B_{40}	0.3692	0.2666	0.3237	0.3681	0.3690
B_{60}	0.0111	-0.0060	0.0042	0.0117	0.0138

表 3 基于拟合织构数据计算的 $\langle 001 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 方向的单晶磁感

Table 3 Single crystal magnetic induction of $\langle 001 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ and $\langle 111 \rangle$ orientations calculated with fitted texture data

Single crystal magnetic induction, T	Equal weight	Unequal weight			
		Top5	Top10	Top15	All
$\langle 001 \rangle$	2.20	1.90	2.06	2.20	2.20
$\langle 110 \rangle$	1.14	1.23	1.18	1.14	1.13
$\langle 111 \rangle$	0.91	0.94	0.93	0.92	0.93

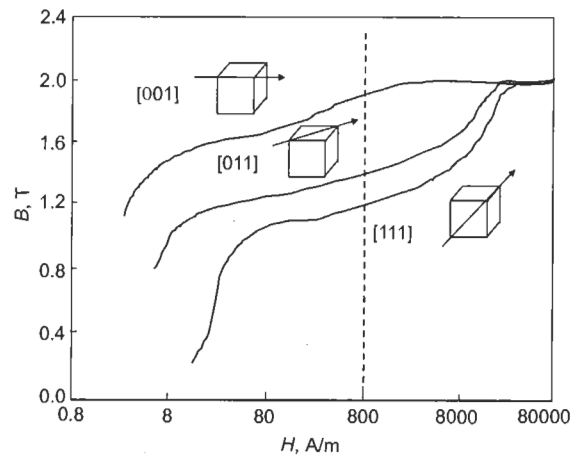


图 3 Fe-3%Si 单晶体 $[001]$ 、 $[011]$ 和 $[111]$ 方向的磁化曲线^[6]

Fig.3 Magnetization curves of $[001]$, $[011]$ and $[111]$ -oriented Fe-3%Si single crystals^[6] (Broken line indicates the magnetic field for magnetic induction measurement in present investigation)

此外还进行了基于实测织构数据的同样计算,其结果与实际的差距远远大于利用拟合织构数据计算的情况.这表明实测织构数据不宜直接用于计算取向硅钢的磁感,应使用拟合织构数据;而将由剩余方差较小的几组实测磁感数据所确定的权重因子引入回归处理,可显著提高单晶磁感系数的计算精度.

4 结论

(1) 提出一个可显著提高取向硅钢单晶磁感系数计算精度的方法,即通过选择剩余方差较小的几组实测磁感数据,准确评估各数据的可信程度,确定合理的权重因子,并将其引入回归处理.

(2) 由于晶粒尺寸较大,基于多晶 X 射线衍射术测定的织构数据不宜直接用于取向硅钢单晶磁感系数的计

算,应以拟合数据取代.

参考文献

- [1] Hutchinson W B, Seft J G. *Texture*, 1973; 1: 117
- [2] Morris P R, Flowers J W. *Texture of Crystalline Solids*, 1981; 4: 129
- [3] Szpunar B, Szpunar J A. *IEEE Trans on Magnetics*, 1984; 5: 1490
- [4] Liang Z D, Xu J Z, Wang F. *ODF Analysis of Textured Materials*. Shenyang: Northeastern University Press, 1986: 123
(梁志德, 徐家桢, 王福. 织构材料的三维取向分析. 沈阳: 东北工学院出版社, 1986: 123)
- [5] Hirsch J, Lücke K. *Textures Microstruct*, 1988; 8-9: 131
- [6] He Z Z. *Electrical Steels*. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1996: 26
(何忠治. 电工钢. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 26)

* * * * *

《金属学报》成立国际顾问委员会

2002年应我刊主编柯俊院士的邀请,十余名国际著名学者接受担任我刊国际顾问委员会成员.在他们的指导和帮助下,金属学报(中、英文版)将进一步提高学术水平和扩大在国内外的影响.

《金属学报》国际顾问委员会 (International Advisory Committee)

Co-Chairmen

Robert W.Cahn Changxu Shi Dongsheng Yan

Members:

Prof. Robert W.Cahn	Cambridge	UK
Prof. D.J.H.Cockayne	Oxford	UK
Prof. Frank de Boer	Amsterdam	Netherlands
Prof. M.C.Flemings	Cambridge, MA	USA
Prof. F.A.Kuznetsov	Novosibirsk	Russia
Prof. Campbell Laird	Philadelphia, PA	USA
Prof. M.H.Lorreto	Birmingham	UK
Prof. N.S.McIntyre	London, ON	Canada
Prof. J.W.Morris, Jr.	Berkeley, CA	USA
Prof. H.Mughrabi	Erlangen	Germany
Prof. Junichi Nishizawa	Sendai	Japan
Prof. G.Petzow	Stuttgart	Germany
Prof. S.Ranganathan	Bongalore	India
Prof. Changxu Shi	Beijing	China
Prof. Dongsheng Yan	Shanghai	China