

含磷深冲钢板的低分辨织构分析 与弹性模量预估*

王沿东 佟伟平 何长树 左良 梁志德

(东北大学材料科学与工程系, 沈阳 110006)

摘要 本文应用改进最大熵法, 对冷轧与退火状态下的含磷深冲钢板进行了低分辨织构分析. 结果表明, 由大约 30 个根据主织构特征确定的优选监测点数据计算出的部分 ODF 系数与完整 ODF 相应系数基本一致; 根据低分辨织构分析结果预估的弹性模量也与实测值符合较好.

关键词 低分辨织构分析, 在线监测, 深冲钢

中图法分类号 TG33

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(1999)06-0627-04

LOW RESOLUTION TEXTURE ANALYSIS AND PREDICTION OF ELASTIC MODULI OF A DEEP-DRAWING PHOSPHORUS STEEL

WANG Yandong, TONG Weiping, HE Changshu, ZUO Liang, LIANG Zhide
Department of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006
Correspondent: TONG Weiping, associate professor, Tel: (024)23893000-7605
Manuscript received 1998-08-11, in revised form 1998-11-16

ABSTRACT By the application of the modified maximum entropy method (MMEM), the low resolution texture analysis has been successfully performed on a deep-drawing phosphorous steel. The partial ODFs of both cold-rolled and annealed steel sheets are determined directly from the pole densities of about 30 points, whose positions are properly selected according to the characteristics of the main texture components. The obtained fourth-order texture coefficients are in good agreement with those determined from three pole figures, and the Young's moduli predicted from the texture coefficients of the partial ODFs are almost the same as the experimental ones.

KEY WORDS low resolution texture analysis, on-line monitor, deep drawing steel

深冲薄钢板、硅钢片和电子铝箔等金属薄板在轧制及后续退火过程中发展的晶粒取向择优分布一织构, 对产品最终性能起关键作用. 通过对不同生产阶段织构的快速在线检测, 并据此对工艺参数进行适时调整, 可以显著改善产品的质量. 80 年代末提出的金属薄板质量与性能在线监测技术, 已被应用于工业生产线上^[1]. 该技术的关键在于以较少监测点所测衍射强度数据, 通过快速的低分辨织构分析 (或称部分织构分析)^[2] 在线预估材料的宏观性能. 然而, 这种建立在传统的级数展开法基础上的低分辨织构分析不能最充分地

利用极有限的监测点数据, 致使性能在线监测一直停留在低档次预估水平.

为了探索基于改进最大熵法 (MMEM)^[3,4] 实现金属薄板性能在线监测的可能性, 本文根据含磷深冲钢板冷轧与退火织构特征, 利用 MMEM 对该钢板施行了低分辨织构分析, 进而定量预估了板面内各方向的弹性模量值.

1 基于 MMEM 的低分辨织构分析原理

织构多晶材料的磁性、弹性及塑性等一般只与其低阶织构系数密切相关, 因此, 通过这些低阶系数的确定即可实现材料宏观性能的定量预估. 基于此考虑, Bunge 等提出采用一个固定角织构分析仪, 通过少量监测点衍射强度的在线测量, 利用适当算式获得近似 ODF (取向分布函数) 或低阶织构系数. 但是, 从较少监测数据有效地进行低分辨织构分析比较困难. 这是由于构建部分 ODF 的低阶织构系数虽只占

* 国家自然科学基金资助项目 59774035 和辽宁省科学技术委员会资助项目 98221005

收到初稿日期: 1998-08-11, 收到修改稿日期: 1998-11-16

作者简介: 王沿东, 男, 1966 年生, 副教授, 博士

完整 ODF 系数的一部分, 但按传统级数展开法计算, 所需实测数据将远远多于在线测量实际所能获得的监测点数.

基于织构分析的最大熵原则, 将取向空间中织构矢量的各分量值用含有待定 Lagrangian 乘子的指数算式表达. 由于低分辨织构分析仅涉及几项低阶织构系数的准确求算, 故部分 ODF 可用只包含有少量与低阶织构系数相关的待定 Lagrangian 乘子的指数表达式给出, 亦即

$$\omega^p(\psi^k, \theta^k, \varphi^k) = \exp(-1 - \lambda_0 - \sum_{l=1}^{l_{\max}} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l \lambda_{lmn} \sigma_{lmn}^k) \quad (1)$$

($k = 1, 2, 3, \dots, K$)

和

$$W_{l'm'n'} = \sum_{k=1}^K \sigma_{l'm'n'}^k \exp(-1 - \lambda_0 - \sum_{l=1}^{l_{\max}} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l \lambda_{lmn} \sigma_{lmn}^k) \quad (2)$$

($k = 1, 2, 3, \dots, K$)

式中 $W_{l'm'n'}$ 为 ODF 系数; λ_0, λ_{lmn} 为待定 Lagrangian 乘子; σ_{lmn}^k 为织构矢量第 k 个分量的独立织构系数值; K 为织构矢量维数; l_{\max} 为低阶织构系数的最大阶数.

按最大熵原则由低阶织构系数确定的部分 ODF 是在低阶条件下对完整 ODF 的最可几近似. 应用织构定量分析的改进最大熵算式, $\omega^p(\psi^k, \theta^k, \varphi^k)$ 与 $W_{l'm'n'}$ 可以由少量

归一化的实测极图数据 $q_M(x_j, \eta_j)$ 求出, 即^[5]

$$\sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} [q_M^i(\chi_j, \eta_j) - \sum_{l'=0}^{l'_{\max}} \sum_{m'=-l'}^{l'} \sum_{n'=l'}^{l'} 2\pi \left(\frac{2}{2l'+1}\right)^{1/2} p_{l'}^{n'}(\cos \theta_i) \exp(n' \phi_i) p_{l'}^{m'}(\cos \chi_j) \exp(-m' \eta_j) \sigma_{l'm'n'}^k \omega^p(\psi^k, \theta^k, \varphi^k)]^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

式中 i_{\max} 为实测极图数目; j_{\max} 为每张极图的测点数目; l'_{\max} 为取向空间在极图空间投影的级数展开项数; $p_{l'}^{m'}(\chi)$ 为连带 Legendre 多项式; θ_i, ϕ_i 为第 i 张极图对应的晶面族在晶体学坐标系下的极角与辐角; χ_j, η_j 为第 j 个测点在试样坐标架下的极角与辐角.

低分辨织构分析的另一关键在于监测点几何位置的选择. 由于每个衍射数据的强度为 ODF 沿一个方向投影的积分值, 故所选衍射点应尽可能包含主织构类型, 这一点将于下节讨论.

2 含磷深冲钢板低分辨织构分析

含磷深冲钢具有高法向塑性各向异性和低平面塑性各向异性. 根据组合试样法测得的冷轧和退火样品的 $\{110\}$, $\{200\}$ 与 $\{112\}$ 三张全极图^[6], 利用 MMEM 可算得这两种状态下的完整 ODF (图 1). 图 1 表明, 冷轧与退火织构主要由 $\{111\} \parallel \text{ND}$ (轧面) 的 γ 纤维与 $\langle 110 \rangle \parallel \text{RD}$ (轧向)

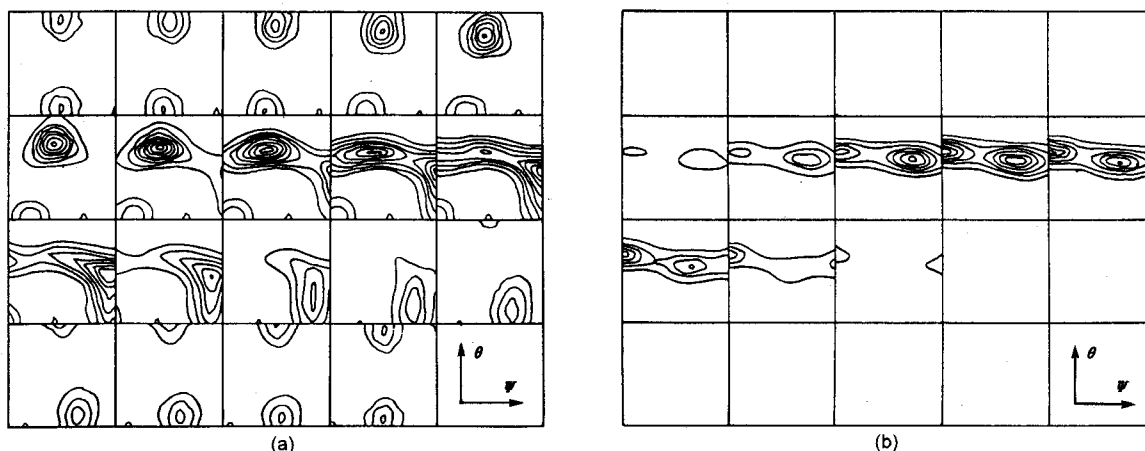


图 1 MMEM 确定的冷轧与退火含磷深冲钢板的完整 ODF

Fig.1 Constant φ sections of complete ODFs of cold-rolled (a) and annealed (b) phosphorous steel sheets determined by the MMEM from three complete pole figures

($\varphi: 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ \dots 90^\circ$; levels: (a) 1,2,3,4,5,6,7,8; (b) 2,4,6,8,10,12,14,16.)

的 α 纤维构成。但以上两种纤维织构的发展是不完整的,且考虑不同工艺条件下各主织构的概貌亦不完全相同,因此不可能简单地用几个组分来表示和据此进行性能预估。

针对含磷钢板冷轧与退火状态下的织构特征,低分辨织构分析时监测点应选在能体现 α 与 γ 纤维织构的位置上,特别是极图上与强的 γ 织构对应的各点。为与 γ 织构的纤维特征一致,选定辐角 $\eta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$; 极角 χ 主要兼具极图上织构强点位置,总计选择大约 30 个点,详见表 1。这种监测点位置对冷轧与退火样品应具有普适性。

图 2 是根据表 1 所选监测点位置及规一化的极密度值应用 MMEM 低分辨织构分析所确定的部分 ODF。表 2 列出了部分 ODF 与完整 ODF 的四阶系数。两相对比,低分辨织构分析所获得的部分 ODF 系数与完整 ODF 的相应系数基本一致。这表明含磷钢板的 MMEM 低分辨织构分析是合宜的。

3 弹性模量预估

织构板材的宏观性质可以通过单晶性质的织构加权来定量计算。事实上,多晶弹性性质作为一种组织不敏感量,在

表 1 含磷钢板低分辨织构分析监测点位置及归一化及密度

Table 1 The data points and normalized pole densities of a phosphorus steel chosen as input for partial ODF analysis

No.	{110}				{200}				{112}			
	χ, deg	η, deg	$q_{\text{cold-rolled}}$	q_{annealed}	χ, deg	η, deg	$q_{\text{cold-rolled}}$	q_{annealed}	χ, deg	η, deg	$q_{\text{cold-rolled}}$	q_{annealed}
1	0	0	0.08	0.44	0	0	2.71	0.27	0	0	1.81	1.20
2	20	0	1.38	1.40	35	60	0.68	1.23	25	30	0.67	1.66
3	20	30	0.72	0.60	35	90	1.96	0.46	25	30	0.85	0.85
4	30	0	4.01	3.77	55	0	1.82	3.70	25	60	1.28	1.03
5	30	30	2.45	2.74	55	30	2.07	1.85	25	90	0.95	1.75
6	30	60	0.99	1.39	55	60	1.76	3.40	35	0	0.77	0.84
7	30	90	0.64	0.45	55	90	1.05	1.88	35	30	0.73	0.51
8	40	0	2.46	1.61	65	0	0.65	3.00	35	60	1.01	0.56
9	40	30	2.00	1.93	65	45	2.96	0.84	35	90	0.55	0.72
10	40	60	1.20	1.87	65	70	0.64	1.36	60	0	2.40	1.39
11	40	90	1.28	0.77	65	90	0.43	0.97	60	30	1.29	1.90
12									60	60	1.00	1.01
13									60	90	1.15	1.08
14									70	60	0.88	0.88

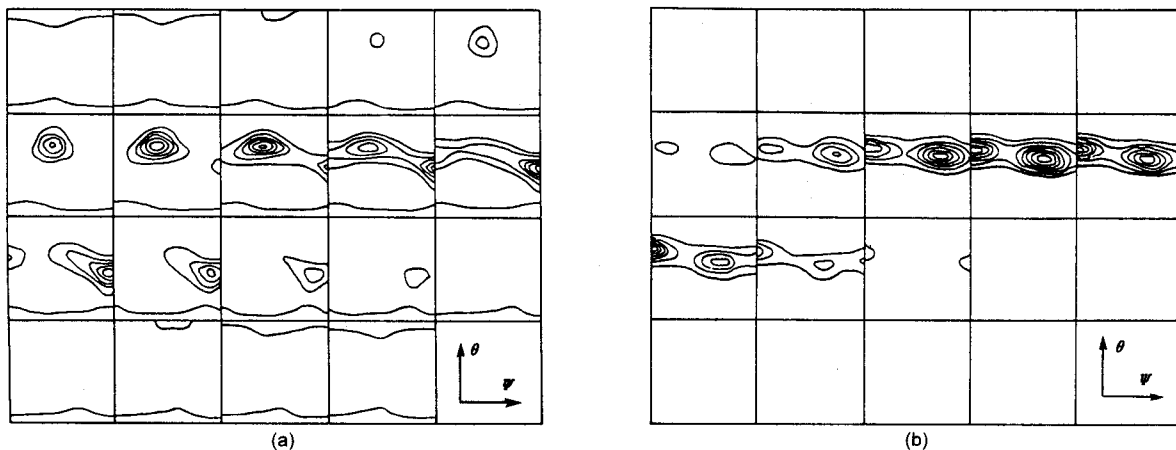


图 2 MMEM 确定的冷轧与退火含磷深冲钢板的部分 ODF

Fig.2 Constant φ sections of partial ODFs of cold-rolled (a) and annealed (b) phosphorous steel sheets determined by the MMEM from about 30 selected data points

($\varphi: 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ \dots 90^\circ$; levels: (a) 2,4,6,8,10,12; (b) 2,4,6,8,10,12,14)

表 2 冷轧与退火含磷钢板完整 ODF 及部分 ODF 的四阶织构系数
Table 2 The fourth-order texture coefficients of cold-rolled and annealed phosphorous steel sheets

	Annealed phosphorous steel sheet			Cold-rolled phosphorous steel sheet		
	W_{400}	W_{420}	W_{440}	W_{400}	W_{420}	W_{440}
Complete ODF	-0.9782863	-0.1761177	0.06594537	-0.2641954	-0.2066056	-0.3573506
Partial ODF	-0.97857485	-0.1909272	0.07919112	-0.2587335	-0.2082480	-0.2767114

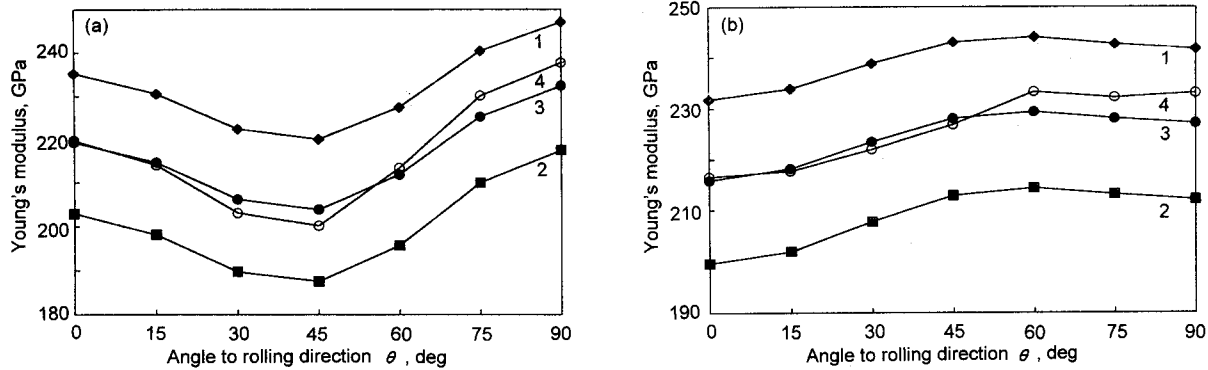


图 3 按 Voigt, Reuss, Hill 模型分别计算及实测的冷轧与退火含磷钢板板面各方向的弹性模量 E

Fig.4 The measured and calculated Young's moduli E (by Voigt, Reuss and Hill approximations) of cold-rolled (a) and annealed (b) phosphorous steel sheets

1 — Voigt moduli 2 — Reuss moduli 3 — Hill moduli 4 — Measured

一级近似下仅与织构四阶系数呈线性关系; 对于具有正交各向异性的立方晶系材料, 若已知 W_{400} 、 W_{420} 、 W_{440} , 即可计算出任一宏观方向的弹性模量^[7,8]. 这种线性关系为板材弹性模量的在线预估提供了方便. 利用表 2 数据, 分别按 Voigt、Reuss 及 Hill 等假设计算出冷轧和退火含磷钢板板面内各方向的弹性模量 (图 3). 为便于比较, 本文还将实际测量结果^[8]一并绘于图中. 由图可见, 基于低分辨织构分析所获部分 ODF 数据按 Hill 假设预估的弹性模量与实际符合很好.

4 分析与讨论

低分辨织构分析是金属薄板质量与性能在线监测技术的理论基础, 而低分辨的实质是如何用尽量少的实测数据较准确地求出低阶织构系数. 按 MMEM, $W_{l'm'n'}$ 由各 λ_{lmn} 值算出, 而各 λ_{lmn} 数值则按式 (2) 通过求极值得到. 做为 ODF 的低阶谐波项的系数对高 l 的各 σ_{lmn}^k 是不太敏感的, 因此, 本工作将 l_{\max} 压低到 10, 只用了 30 多个测量值即得到了与完整 ODF 吻合较好的低阶 $W_{l'm'n'}$.

借助 MMEM 算得的样品冷轧与退火织构的部分 ODF (图 2) 与完整 ODF (图 1) 非常近似, 它们的主要织构组分相同, 但图 2 的 α 纤维漫散稍大一些. 这表明项数较少的部分 ODF 已能表现出样品织构的基本内涵, 但由于缺少高阶谐波项, 必然导致 ODF 漫散. 至于弹性模量, 由于仅决定于四阶织构系数, 所以按 MMEM 预估结果自然

与实测数据相符.

5 结论

- (1) 应用 MMEM 成功地进行了含磷深冲钢板低分辨织构分析;
- (2) 该类材料低分辨织构分析时监测点数目取 30 个左右为宜, 并应体现 γ 与 α 纤维织构的特征;
- (3) 根据低分辨织构分析结果预估的弹性模量与实测值符合.

参考文献

- [1] Kopineck H J, Bunge H J, In: Bunge H J ed, *Directional Properties of Materials*. DGM Informationsgesellschaft, Oberusel, 1988: 251
- [2] Kopineck H J. *Mater Sci Forum*, 1994; 152-162: 1929
- [3] Wang Y D, Xu J Z. *Acta Metall Sin*, 1995; 31: B550 (王沿东, 徐家祯. 金属学报, 1995; 31: B550)
- [4] Wang Y D, Xu J Z, Liang Z D. *Textures Microstruct.* 1996; 26-27: 103
- [5] Wang Y D, Vadon A, Heizmann J J, Xu J Z. *Scr Mater*, 1996; 35: 905
- [6] HU Xun. *Acta Metall Sin*, 1980; 16: 121 (胡 郇. 金属学报, 1980; 16: 121)
- [7] Morris P R. *J Appl Phys.* 1969; 40: 447
- [8] HU Xun. *Acta Metall Sin*, 1981; 17: 595 (胡 郇. 金属学报, 1981; 17: 595)