

低分辨织构分析及其在线监测工业应用^①

王超群

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

摘 要 低分辨织构分析指用有限的织构函数值或少量的织构系数进行织构分析的方法。根据该方法可以由低阶织构函数模型, 通过特征织构信息和相应的换算模型, 计算金属板材的性能, 因而可用于工业在线检测与监控。

关键词 织构 分析 模型 在线

织构是多晶材料中晶粒的取向分布函数即ODF, 它是空间三个变量的连续函数 $f(\varphi_1, \varphi_2)$ 缩写为 $f(g)$, $g = \{\varphi_1, \varphi_2\}$, φ_1, φ_2 为尤拉角, 因此材料织构的完整描述需要测量大量的极图数据, 并通过极图的反演, 由球谐分析测算三维取向分布函数。

根据 Bunge 的级数展开法, 织构函数 $f(g)$ 可表达成

$$f(g) = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{M(\lambda)} \sum_{\nu=1}^{N(\lambda)} C_{\lambda}^{\mu\nu} T_{\lambda}^{\mu\nu}(g) \quad (1)$$

式中 $C_{\lambda}^{\mu\nu}$ 为织构系数, 它包括了全部的织构信息, 是材料织构定量分析的核心, 由它可回算极图及反极图以及进行材料性能的计算。然而有时只采用有限的织构函数值 $f(g)$ 或少量的织构系数也称 C 系数就可以描述织构, 进行织构分析和建立其与性能之间的关系, 这种分析方法称为低分辨织构分析或部分织构分析^[1-3] (Partial Texture Analysis)。

低分辨织构分析法是适应现代化大规模连续生产和高效优质金属板材制备的最佳织构定量分析方法之一, 因为它只需要较少的测量数据, 简化了测量设备, 节省了时间, 能够满足高速、连续大规模工业生产在线检测与监控的需要, 已成为材料织构定量分析最活跃的领域之一。

目前已经在使用以及正在发展中的主要低分辨织构分析方法有^[4]:

(1) 固定角度织构分析器, 主要采用 X 射线衍射分析技术。

(2) 物理性能各向异性法间接测试织构^[5-7], 属物理测试技术。

本文根据 Bunge 的 ODF 物理思想和当前国内外金属板材性能在线检测技术的研究状况, 探讨低分辨织构分析的测试原理及其在线检测与监控的工业应用。

1 数学原理^[1-3]

1.1 固定角度织构分析器

所谓固定角度织构分析器是采用连续 X 射线谱入射, 将能量色散探头按透射几何方式布置在不同角度位置上, 每个探头对应于若干个极图点位置, 可测量若干个衍射峰, 因而可以给出许多极密度值, 每个极密度值对应于一组晶体, 其晶面法向 h 平行于试样方向 y 。因此固定角度分析器只能做部分织构分析。

采用这种装置具有如下的特点:

(1) 连续射线谱可用于测量多个极图;

(2) 能量色散探头可用于同时测量多个晶面的衍射强度;

① 国家自然科学基金资助项目 收稿日期: 1996-09-16; 修回日期: 1997-03-06

王超群, 男, 58 岁, 教授级高工

(3) 与表面条件无关, 无需表面处理;

(4) 通过多个极图点数据的测量, 可以建立其与金属板材性能之间的关系, 因而可供金属板材“在线”性能检测与监控工业应用。

该法已由德国 Hoesch 钢厂首次用于钢板连续退火生产线在线检测与监控。

按照这种衍射几何布置, 实验测量的极密度值 $A(y_j, h_j)$ 可依下式确定:

$$A(y_i, h_j) = I_{ij}/I_{ij}^r = A_{ij} \quad (2)$$

式中 $Y_i = \{\alpha_i, \beta_i\}$ 为试样方向; h_j 是衍射面 $\{hkl\}_j$ 的法向; A_{ij} 为轴密度函数, 表示待测试样中 $h_j \parallel y_i$ 所有晶粒的体积分数, 可以是极图上的数据, 也可以是反极图的极密度值。 I_{ij} 为组织试样 y_i 方向与 h_j 晶面的衍射强度; I_{ij}^r 是同材质无组织试样的衍射强度。

组织用级数展开法, 并考虑晶体与试样的对称性, 由谐分析确定, 如式(1), 因此轴密度函数 $A(y_i, h_j)$ 与晶粒取向分布函数之间的关系如下式

$$A(y_i, h_j) = 1 + 4\pi \sum_{\lambda=4(2)}^{l_{\max}} \frac{1}{(2\lambda+1)} \sum_{\mu=1}^{M(\lambda)N(\lambda)} C_{\lambda}^{\mu\nu} \cdot K_{\lambda}^{*\mu}(h_j) \cdot K_{\lambda}^{\nu}(y_i) \quad (3)$$

式中 $K_{\lambda}^{*\mu}(h_j)$ 和 $K_{\lambda}^{\nu}(y_i)$ 分别表示具有相应晶体对称和试样对称性的球面谐函数。

将实测的 $A(y_i, h_j)$ 代入上式, 并按最小二乘法处理可求出组织系数 $C_{\lambda}^{\mu\nu}$

$$C_{\lambda}^{\mu\nu} = \sum_{i=1}^{l_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} \alpha_{\lambda}^{\mu\nu} \cdot (I_{ij}/I_{ij}^r - 1) \quad (4)$$

$$\alpha_{\lambda}^{\mu\nu} = W_{ij} \cdot \sum_{\lambda=4(2)}^L \sum_{\mu=1}^{M(\lambda)N(\lambda)} \sum_{\nu=1}^{N(\lambda)} K_{\lambda}^{*\mu}(h_j) \cdot K_{\lambda}^{\nu}(y_i) \cdot \beta_{\lambda}^{\mu\nu} \quad (5)$$

它是一个包括 h_j 和 y_i 的球谐函数的纯数学量, W_{ij} 是与所选择的极点的衍射强度有关的权重因子, $\beta_{\lambda}^{\mu\nu}$ 是 $\alpha_{\lambda}^{\mu\nu}$ 的逆阵, 其中 $\alpha_{\lambda}^{\mu\nu}$ 如下式

$$\alpha_{\lambda}^{\mu\nu} = \sum_{i=1}^{l_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} W_{ij} \cdot \frac{4\pi}{2\lambda+1} K_{\lambda}^{*\mu} \cdot K_{\lambda}^{\nu} \cdot K_{\lambda}^{*\mu} \cdot K_{\lambda}^{\nu} \quad (6)$$

由此可见, $\alpha_{\lambda}^{\mu\nu}$ 是一个取决于实验条件, 与所启用的极图, 极图点位置以及入射线与反射线发散度有关的纯数学量, 因而组织系数 $C_{\lambda}^{\mu\nu}$ 的值的精度取决于这些条件。

在低分辨组织分析中, 直接与性能有关的组织系数 $C_{\lambda}^{\mu\nu}$, 一般只取 $\lambda=4$, 也即四阶组织系数 $C_4^{1\nu}$ 已经足够了, 如弹性、磁性以及某些情况下的塑性计算已经相当的近似了, 因此在这种情况下 $\lambda=\lambda'=4$, $\mu=\mu'=1$, 故有

$$C_4^{1\nu} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} \alpha_{\lambda}^{\mu\nu} \cdot (I_{ij}/I_{ij}^r - 1) \quad (7)$$

式中

$$\alpha_{\lambda}^{\mu\nu} = W_{ij} \cdot K_4^{*1}(h_j) \cdot \sum_{\nu=1}^{N(4)} K_4^{\nu}(y_i) \cdot \beta^{\mu\nu} \quad (8)$$

$$\beta^{\mu\nu} = [-\alpha^{\mu\nu}]^{-1} \quad (9)$$

$$\alpha^{\mu\nu} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} W_{ij} \cdot \frac{4\pi}{9} \cdot [K_4^{*1}(h_j)]^2 \cdot K_4^{\nu}(y_i) \cdot K_4^{\nu}(y_i) \quad (10)$$

由式(4)及式(7)可以计算低阶组织系数。

在低分辨组织分析中, 人们最关心的不是计算取向分布函数 ODF 本身, 而是低阶组织系数, 因为对于大多数物理性能的取向平均值的计算只用低阶组织系数已经足够近似了, 除非弱组织, 否则按此法所计算的 ODF 无多大意义。

1.2 用改进的最大熵法进行部分组织分析^[10]

近年来王沿东等^[10]根据信息论的原理和最大熵原则用于 ODF 计算, 提出改进的最大熵原则进行部分组织分析。

运用该法, 对冷轧铜板 ($\varepsilon \geq 90\%$) (111), (200) 和 (220) 极图的部分测量点, 如 30 个或 15 个极图点数据, 模拟测算的部分 ODF 的结果相当一致。由此可见最大熵法用于低分辨组织分析是颇有前景的, 值得大力开发与推广应用。

1.3 用物理方法测试组织

原则上不同特性的部分组织分析可以通过估算任何物理性能的宏观各向异性的方法获得, 其中磁各向异性是最有价值的, 因为它最

容易测量。磁织构分析器就是基于这一原理而提出来的。

除用弹性模量的各向异性测量方法计算低阶织构系数外, 超声法无损测试织构是近年内发展起来的一种低分辨织构分析方法。Spies 和 Schneider^[5] 根据前述的关于弹性模量各向异性计算的 ODF 分析原理, 由一级近似开发了利用超声波速度获取织构系数的方法, 其后 Borsutjki 等人^[6] 研究了超声法在线织构检测设备, 并将该法应用于德国 Thyssen 钢铁公司钢铁生产在线检测上。他们根据超声波(极波)传播速度与低阶织构系数 C_4^{10} 之间的确定关系, 由简单的超声波测量设备将织构系数计算出来。

由上述可见, 与 X 射线在线检测技术的测试路线(低阶织构系数 $\rightarrow$ 性能预测)不同, 超声法无损测试织构, 采用了超声波速 $\rightarrow$ 织构系数 $\rightarrow$ 性能计算的路线, 后者属于间接法。值得注意的是由物理性能测量得到的织构系数是真实织构的正确值, 而由固定角度织构分析器所得到的只是那种近似的模型织构, 两种低分辨织构分析方法可以相互补充, 固定角度织构分析器可以得出正确的极图数据和近似的 C 系数, 而物理方法测试的织构, 则是通过近似的极图数据求得正确的 C 系数^[1]。

除上述两大类测试低阶织构系数外, 在 X 射线定量相分析中的织构校正^[11] 也可以得出一组近似的 C 系数, 在 $L = 12$ 的情况下, 物相的定量相分析已足够准确了。实践表明^[7], 对于具有轴对称织构的 CuZnAl 形状记忆合金, α 相的定量分析可能得到满意的结果, 回算的 ODF, 极图与反极图, 同实验测算的结果相当一致。

2 极图不完整性的影响

在低分辨织构分析中所使用的极图数据存在着不足, 也即极图的不完整性, 因而对材料织构的信息量的变化有很大的影响, 这与所用的极图数量、极图点的位置选择、织构类型以

及级数展开度等都有密切的关系。此外, 低阶织构系数的计算还受所谓极图窗口的影响, 极图窗口是对应于有限极点位置 $\{\alpha_i, \beta_j\}$ 的衍射强度, 它与入射线和反射线束的发散度有关。为了改善低阶织构系数的近似性, 窗口不宜过小, 也不要太大。

为在生产线上快速地获得板材织构信息, 就必须设法减少极图测量中 α 角的取值范围, 减少极图测量数量以及降低展开度等, 然而这将导致材料织构信息的减少。因此探讨极图不完整性的影响, 对确保低分辨织构分析的精度与准确性是至关重要的。

为此, 对于 J08A1 深冲钢板用反射法测量其 $\{110\}$, $\{200\}$ 和 $\{211\}$ 极图, 并在 ODF 计算中分别取用 α 角从 50° 至 $\alpha_{\max}$ 的极图数据以及在相应的计算中对板材的弹性各向异性和成型性参数进行估算。实验结果表明大幅度地减少 α 角的取值范围, J08A1 深冲钢板的 ODF 及极图发生了很大的变化, 对于具有线织构特性的 J08A1 钢板, 极图的不完整性的影响较弱, 在 $\alpha_{\max} = 10^\circ$ 时仍保留一些主要的织构特征。

虽然极图的不完整性对织构的信息量有重要的影响, 但是对于低分辨织构分析中的性能估算的影响还是较弱的, 尤其是弹性各向异性的计算, 如只用一个倾角 α 的极图数据就足以获得相当精确的弹性数据。对于塑性的计算误差较大, 但在 $\alpha_{\max} = 50^\circ$ 时基本上也能满足板材成型性参数的测算要求。正如前述, 在弹性计算中只需启用 3 个低阶织构系数, 而在塑性计算中要用 18($L = 10$) 个低阶织构系数才能得到较精确的结果。例如在 Voigt 近似下, 杨氏模量的轧向角度关系如下

$$\overline{E}_{(\beta)}^v = \overline{E}_r^v + Ca[a_1 C_4^{10} + a_2 C_4^{12} \cos 2\beta + a_3 C_4^{13} \cos 4\beta] \quad (25)$$

式中 $Ca = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}$; $\overline{E}_r^v$ 是无织构材料的弹性模量; a_i 是一些可依据模型计算的纯数学量; β 为轧向的方位角。

在极图数据取值不足时, 增加极图数目有利于缩小 $\alpha_{\max}$ 角的取值范围和保证织构信息

的质量^[8]。单一缩小 $\alpha_{\max}$ 角的取值范围, 只适用于测量线织构特别强的板材, 对于其它类型的织构可考虑同时调整 α 与 β 角的取值范围, 也即合理地选取极图点的位置以提高测算精度。

上述结果也可以由 J08A1 钢板三维取向分布函数计算所得的 C 系数加以说明, 如表 1 所示。

由表可见, 随着 α 角取值范围的增加, 织构系数愈接近真实近似值, 因而低分辨织构分析方法仍是近似方法, 但可满足材料性能计算的精度要求。

3 低分辨织构分析的应用前景

鉴于低分辨织构分析采用了简化的极图或反极图测量数据以及低阶织构系数的计算方法, 并保证了一定的性能测算精度, 从而简化了测量设备, 节省了大量的测试时间, 因此它可用于大规模工业生产的在线检测与监控。德国 Hoesch 钢厂首先将该法用于钢板连续退火生产线, Thyssen 钢铁公司也将超声法用于生产线在线检测。我国自 80 年代中期以东北大学梁志德教授为代表的织构研究室也着手这方面工作, 其后北京科技大学、北京有色金属研究总院、钢铁研究总院也曾对有关问题进行了较深入细致的探讨, 取得了一些可喜的结果。近年来俄罗斯等也在有色金属合金材料如铝、

铜等板材在线检测与监控方面做了大量的工作, 已取得了很大的进展, 说明该法富有生命力, 具有广阔的推广应用前景。

与深冲钢板的在线检测应用技术稍有不同, 以铝、铜为代表的有色金属板材的织构类型更为复杂, 加工程序较多, 冶金因素的影响更为强烈, 因此在进行低分辨织构分析及探讨其在在线性能检测中的应用难度更大。

目前我国已引进了 14 条生产线用于铝制罐, 每年需消耗数万吨铝合金特薄板材, 若加上高压电容器铝箔的在线检测, 其工业意义与经济效益是不言而喻的。为满足高速、大规模连续工业生产的发展需要, 确保有色金属板材高效优质生产, 深入研究与开发低分辨织构分析及其在线检测与监控工业应用, 具有极其重要的实际意义, 它是实现高技术产业化的重要一环。

4 结论

低分辨织构分析是一种简化了的材料织构定量分析方法。目前主要有固定角度织构分析器和超声法无损测试织构, 前者属于 X 射线检测技术, 后者属于物理方法测试织构。采用这些方法, 简化了测试设备, 节省了时间, 因而可以满足高速、连续生产的在线性能检测与监控的要求。

低阶织构系数的计算可采用级数展开法,

表 1 J08A1 钢板在不同 α 取值范围和展开度 λ 下的 C_{λ}^{10}

α	λ	μ	0	2	4	6	8	10
1	4	1	- 0. 047 35	0. 000 54	- 0. 000 11			
	6	1	0. 005 09	- 0. 000 182	0. 000 03	0. 000 02		
	8	1	- 0. 016 687	0. 010 856	- 0. 000 045	0	- 0. 000 02	
	10	1	- 0. 027 560	- 0. 028 260	0. 000 320	0	0	0. 000 04
	4	1	- 1. 307 929	0. 029 588	0. 063 886			
4	6	1	- 2. 377 99	0. 091 862	- 0. 661 074	0. 052 372		
	8	1	0. 028 574	- 0. 010 019	- 0. 100 54	- 0. 114 307	0. 006 754	
	10	1	1. 306 985	- 0. 109 507	- 0. 108 368	- 0. 007 203	- 0. 183 188	0. 018 207
10	4	1	- 1. 392 976	0. 031 658	0. 089 911			
	6	1	- 2. 834 426	0. 089 278	- 0. 665 763	0. 036 46		

也可以采用最大熵法, 在信息量不足的情况下可以得到最佳的结果, 其测算的精度取决于所采用的极图, 织构类型, 极图点位置包括极图窗口的选择以及入射线与反射线束的发散度。

低分辨织构分析方法已在一些先进的工业国家的钢铁生产线上得到应用, 并正在继续发展与完善之中。随着我国有色金属板材及深冲钢板的工业化生产的发展, 使该项新技术产业化, 低分辨织构分析及其在线检测与监控工业应用具有广阔的前景。

参考文献

- 1 Bunge H J. Textures and Microstructures, 1990, 12: 91.
- 2 Bunge H J, Wang F. In: Bunge H J ed. Theoretical Methods of Texture Analysis Oberursel, DGM, 1987: 163.
- 3 Wagner F, Bunge H J. In: Bunge H J ed. Advances and Applications of Quantitative Texture Analysis Oberursel, DGM, 1989: 147.
- 4 Koppelman H J, Otten H. Textures and Microstructures, 1987, 9: 270.
- 5 Spies M, Schneider E. Textures and Microstructures, 1990, 12: 219.
- 6 Borsutzki M. *et al.* Stahl u Eisen 1993, 113: 93.
- 7 王超群等. 物理测试, 1996, (4): 35; (5): 15.
- 8 毛卫民等. 北京科技大学学报, 1996, 18, (1): 136.
- 9 刘毓舒. 材料研究学报, 1995, 9, (2): 486.
- 10 Wang Y D *et al.* In: Proceedings of the 11th ICOTOM. Xi'an: International Academic Publishers, 1996: 473.
- 11 王超群等. 物理学报, 1995, 44, (1): 99.

LOW RESOLUTION TEXTURE ANALYSIS AND APPLICATION IN ON-LINE CONTROL

Wang Chaoqun

General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088

ABSTRACT Using limited values of the texture function or a few of its coefficients to carry out texture analysis is the so-called low resolution texture analysis. Based on this method, the anisotropy of physical properties such as Young's modulus, magnetic properties and others can be determined through low-order texture function model and relative translating model, and hence it can be used in on-line produce control.

Key words texture analysis model on-line

(编辑 黄劲松)