

# 金属材料织构的研究及其发展

张新明 李赛毅

(中南工业大学, 长沙 410083)

**[摘要]** 阐述织构的定义及其在金属材料中存在的普遍性, 金属中常见织构的类型和组分, 以及形变和再结晶织构形成的基本模型; 介绍应用织构的一些实例, 说明材料织构研究的重要意义。最后介绍了多晶材料织构的测建与表示方法, 取向分布函数(ODF)的定义、求补方法、研究现状及其发展等。

**[关键词]** 织构, 取向分布函数, 各向异性, 屈服, 金属材料

通常情况下金属材料是由晶体构成的, 而晶体是各向异性的。若材料由大量称为晶粒的晶体构成, 而这些晶粒的取向随机分布时, 材料呈现伪各向同性; 若晶粒取向偏离随机分布的状态时, 材料呈现各向异性, 人们称材料具有织构。

## 1 金属材料的织构及其形成

工业上材料中常见有铸造织构, 形变织构, 再结晶织构, 晶粒长大织构和相变织构等, 其中对形变织构和再结晶织构研究得较多。按形变方式不同, 形变织构可分为丝织构、挤压织构、锻造织构和轧制织构等, 每种形变织构中含有若干织构组分<sup>[1]</sup>。面心立方金属的轧制织构基本组分有铜织构  $\{112\} \langle 112 \rangle$ , S-织构  $\{123\} \langle 643 \rangle$ , 黄铜织构  $\{011\} \langle 211 \rangle$  以及戈斯织构  $\{011\} \langle 100 \rangle$  等; 主要丝织构有  $\langle 111 \rangle$  和  $\langle 100 \rangle$ 。体心立方金属轧制织构基本组分有  $\{112\} \langle 110 \rangle$ ,  $\{111\} \langle 112 \rangle$ ,  $\{111\} \langle 110 \rangle$  与  $\{100\} \langle 011 \rangle$  等; 主要丝织构有  $\langle 110 \rangle$ 。密排六方金属轧制织构的基本组分主要有  $\{0001\} \langle 1120 \rangle$ ; 主要丝织构有  $\langle 1010 \rangle$ 。以上形变织构各基本组分的相对强弱受合金元素的性质与含量、晶粒大小和形状、晶界与相界特性以及变形程度、变形速度和变形温度等许多内、外因素的影响和控制。金属在塑性变形过程中, 因受到外界热和力学条件的限制, 各晶粒取向会相对外力轴发生转动, 从而形成形变织构。现有许多模型阐述形变织构的形成, 主要的有 Sachs 模型和 Taylor 模型<sup>[2]</sup>, 其它模型基本上是由它们派生出来的。Sachs 模型认为多晶体变形时每个晶粒在同一已知材料宏观应力张量作用下, 各晶粒取向因子最大的滑移系开动, 从而造成晶粒塑性变形时取向的变化。显然, 由于各晶粒的取向不同, 变形后各晶粒的应变张量不一样, 晶界上会出现形变的不连续性。Taylor 模型认为多晶体塑性变形时, 各个晶粒的应变张量与材料的宏观应变张量相同, 为此, 各晶粒通常需要 5 个独立的滑移系进行塑性变形。该模型虽没考虑晶界上应力的不连续性, 但研究表明比较接近实际情况。金属经冷变形后退火若发生再结晶, 往往形成再结晶织构<sup>[3]</sup>。

本文于 1994 年 11 月 28 日收到。

再结晶织构和形变织构可能相同也可能不相同。面心立方纯金属的再结晶织构为  $\{001\} \langle 100 \rangle$  和  $\{124\} \langle 211 \rangle$ ，与轧制织构不同；但含 1% 磷的铜磷合金的主要再结晶织构为  $\{011\} \langle 100 \rangle$ ，与轧制织构相同。研究表明，晶体结构、合金元素、杂质种类及其含量、形变织构种类与材料的组织、晶界与相界特性、晶粒形状、退火温度、时间与气氛等各种内部和环境因素，都对再结晶织构的类型、强弱及漫散程度产生影响。阐述再结晶织构的形成有定向形核和定向长大理论。定向形核理论认为，金属塑性变形时，有许多晶块的取向在形变过程中会流经某些空间取向，因而在这些位置上会“残留”一些细小亚晶，由于退火时的回复作用，这些亚晶会变成再结晶晶核并“吞并”形变基体长大，最终形成再结晶织构。定向形核理论于 30 年代提出概念，现已被许多人所接受。定向长大理论认为，在形变基体内存在的各种取向的晶核在退火过程中都可能长大，只有当晶核与基体之间具有某种确定的取向关系时，它们之间的晶界才具有最大的迁移速度，从而晶核长大最快形成再结晶织构。该理论也是于 30 年代提出概念，之后被许多人所接受。以上两种理论都有一定的实验依据，各自都能解释一些再结晶织构的形成，但都又存在一些解释不了的现象，因而有人提出了“定向成核-选择长大”的综合再结晶织构形成理论。该理论认为再结晶织构是定向成核及其选择性长大的结果，可以比较方便地解释再结晶织构的形成。

## 2 材料织构研究的重要意义

**材料的织构导致材料的各向异性** 挤压材的轴向力学性能与横向的一般相差很大，即所谓的挤压效应；大变形冷轧板材各方向上的力学性能、深冲性能、磁学性能相差也大；材料在服役过程中若晶体取向分布变化，则其性能也随之变化。为了充分挖掘材料的性能潜力，提高材料的高技术含量，工业上往往采取专门的生产技术和工艺，赋予材料一定的织构组态。如 Fe-Si 合金（即硅钢）是应用广泛的一种软磁材料，常用作变压器芯片，采用适当冷轧和二次再结晶退火工艺后可以生产出具有很强戈斯织构  $\{011\} \langle 100 \rangle$  的硅钢。由于易磁化方向  $\langle 001 \rangle$  平行于轧向，故在交变磁场中这个方向上的能耗损失最小。又如采用定向凝固技术控制定向结晶，可以大大提高铸件的综合力学性能和冲击韧性，采用这种技术生产的航空发动机涡轮叶片其寿命可大大提高。因此，定向凝固技术在国内外得到了迅猛发展。再如高压电容器用铝箔需要强的立方织构，否则比电容低，满足不了要求；深冲板材要求具有尽可能小的平面各向异性和强的厚度方向各向异性，否则冲压的制品可能会出现大的制耳和厚向的破裂，从而造成很大浪费；在功能陶瓷、超导材料、高聚物性能研究中也可利用织构的作用，织构在工业应用的例子不胜枚举。应该指出，我国有的工厂由于没有注意到材料织构的作用和没有掌握获得一定织构组态的生产技术和工艺，使得许多产品如高压电容器用的铝箔和易拉罐板材等仍需花大量外汇进口，造成巨大经济损失。

**材料的弹性及塑性同织构密切相关** 弹性范围内单晶体的应力  $[\sigma_{ij}]$  和应变  $[\epsilon_{kl}]$  存在线性关系： $[\sigma_{ij}] = [C_{ijkl}] [\epsilon_{kl}]$ ， $(i, j, k, l = 1, 2, 3)$ 。若已知晶体的取向分布，则可按 Voigt, Reuss 和 Hill 的假定处理多晶材料的弹性问题。沿考虑方向  $\alpha$  上材料的平均物理性质  $\bar{M}(\alpha)$  在略去晶界贡献的条件下，可由晶体学方向决定的单晶性质  $M(g, \alpha)$  以取向分布函数  $f(g)$  加权平均按式

$$\bar{M}(\alpha) = \oint_s M(g, \alpha) f(g) dg$$

计算<sup>[4]</sup>。有织构材料的屈服准则难以用宏观连续介质力学进行预测和计算，而需求助于晶体力学的形变理论。Mises 所确认的各向同性材料的屈服准则

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_y^2$$

和 Hill 导出的各向异性材料的屈服准则

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = 1$$

均难以描述有织构材料的屈服关系；而 Lequeu 从立方织构导出的材料屈服准则<sup>[5]</sup>

$$F_1(S) = \alpha_1 \{ |S_{11} - S_{22}|^n + |S_{11} - S_{33}|^n + |S_{22} - S_{33}|^n + 2\beta_1 \{ |S_{12}|^m + |S_{23}|^m + |S_{31}|^m \} = 1$$

$$\text{和 } F_2(S) = \alpha_2 \{ (S_{11} - S_{22})^2 + (S_{11} - S_{33})^2 + (S_{22} - S_{33})^2 \} + 2\beta_2 \{ S_{12}^2 + S_{23}^2 + S_{31}^2 \} + 2\gamma_2 \{ |S_{12}S_{13}| + |S_{12}S_{23}| + |S_{13}S_{23}| \} = 1$$

(式中  $S_i$  为偏应力,  $\alpha_1, \beta_1, m, n, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2$  为常数) 能比较好地描述具有立方织构的 fcc, bcc 材料的屈服关系。在这里, 宏观连续介质力学与微观晶体力学有机地结合起来了, 并产生了新的概念和理论, 如 Continuum Mechanics of Textured Polycrystals (CMTP)。金属屈服以后的流变也受晶体学结构和特征的控制, 因而流变过程中的本构关系、疲劳、损伤和破坏都与织构有关。

金属在塑性形变过程中晶体取向会不断发生变化, 借助晶体取向变化的信息可研究形变的机理。此外, 材料在再结晶、相变热处理过程中都有晶体取向变化的信息, 借此可研究过程的机理, 建立相应的物理模型, 进而按意图设计、优化生产工艺和参数。借助材料的织构内容与其形成过程的关系, 还可研究地质现象与规律, 开发利用矿产资源等。以上这些研究涉及晶体学、固体物理、物理冶金、力学冶金、数学、计算机等学科领域的知识, 许多新的生产技术和科研成果将可能从这些研究中不断产生。

由于织构对工业生产和学科建设的重要性, 世界上许多国家、特别是工业发达国家投入了大量人力、物力和财力从事这方面的研究。许多材料科学工作者, 物理冶金和力学冶金专家都相继从事织构领域的研究工作。我国从事织构领域研究的人员较少, 总体研究水平不高, 但我们的研究进展较快并有自己的特色。我校在织构的应用方面做了不少工作, 采用二次挤压技术, 弱化挤压  $\langle 111 \rangle$  织构, 提高了材料的塑韧性, 使中强低密度的 Al-Li 合金力学性能指标达国际先进水平<sup>[7]</sup>; 采用角轧工艺改变开坯板材中的原始材料组态, 大大提高了 Al 及 Al 合金板材的综合力学性能, 并且还改变了板材形变过程中的应力应变状态, 从而减少边裂, 提高了成品率, 创造了大的经济和社会效益; 采用高温快速退火工艺, 细化晶粒, 提高了 3004Al 合金的立方织构比例, 使板材深冲制耳率小于 2%, 达世界先进水平; 在理论研究方面有形变织构的模拟, 材料塑性各向异性的预测等工作。

### 3 织构的研究及其发展

目前的研究主要包括确定织构的实验与计算技术, 形变织构、再结晶织构、相变织构、薄膜织构等与成分、组织结构和工艺参数的关系, 织构与性能(力学、电磁学、深冲和腐蚀等)的关系, 织构的工业应用, 织构的计算机模拟等。织构的实验确定有腐蚀坑法、磁转矩

法、电子衍射法、中子衍射法、偏光法及 X 射线衍射法等,以 X 射线衍射法应用最广泛。材料的织构常用 X 射线照片、极图、反极图和取向分布函数的图形表示。由于确定晶体取向需要三个独立参数,因此只有三维取向分布函数才能准确表示、定量描述和分析织构。三维取向分布函数已得到广泛应用并仍在不断发展。其它表示织构的图形都只能是晶体取向的某种投影,一般难以直接表示多晶体材料的取向分布。但极图与反极图简便直观,也经常被采用。衍射照片法古老费时且不能定量,已趋于淘汰。下面重点介绍取向分布函数(Orientation Distribution Function, ODF)法。

1965年, Bunge<sup>[6]</sup>和 Roe各自独立地提出了用取向分布函数描述晶体材料织构的方法并加以不断完善。取向分布密度函数  $f(g)$  定义为  $f(g) = K \frac{dv}{V} / dg$ , 表示某取向元  $dg$  上晶体体积  $dv$  的百分数。式中  $V$  为试样总体积,  $K$  为比例系数,  $g$  为表示取向的变量。描述  $g$  的方法很多, Bunge 计算  $f(g)$  时采用  $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$  三个欧拉角。Bunge 和 Roe 都采用级数展开方法求算 ODF。他们将取向分布密度函数  $f(g)$  展成广义球函数级数, 凭实测的极图数据求解。但各自处理方法的细节存在着差异, 如欧拉角的定义, 广义球函数的相位, 归一化的规定以及对称处理的方式等都不相同。现在 Bunge 的求解方法应用较广泛。

从已知极图中的实测数据求解  $f(g)$  的可能途径有作图法、积分转换法、矢量法和级数展开法等<sup>[5]</sup>。作图法是以一个晶粒取向与极图上一组点相对应为依据, 用作图方式表示晶粒取向的密度分布。该法费时, 难以定量, 且对细小晶粒的材料几乎无能为力, 因而难以发展。积分转换法即反演法尚未达到实用阶段, 但理论上证明是有发展前途的。矢量法的特点是将材料中晶体取向分布的积分改换成累加, 以联立线性方程组的形式求简明易懂, 有发展前途。级数展开法是按谱分析方法将极图中的极密度函数和取向分布函数均展开成级数, 从已知的极密度级数系数求出取向密度分布函数。由于计算机的发展和采用, 级数展开法得到了广泛应用, 其中 Bunge 的计算方法已被广泛采用。

众所周知, 通过透射法或反射法一般只能获得不完整极图, 完整极图的获得并非易事, 因此如何简便有效地从不完整极图求算 ODF 是科学工作者研究的热门课题。Bunge 的最小二乘法和二步法, Morris 的分组解法, Kern 的条件归一法, Van Houtte 的迭代法等都是在某些条件下以不完整极图计算 ODF 的方法, 各有特色。

应该指出, 用级数展开法求算 ODF 受到 Friedel 定律的影响。该定律指出, 不论被测试样的晶体结构是否具有反演中心, 晶面  $(hkl)$  与  $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$  的衍射强度值均相等。据此, 由实测极图数据按级数展开法求算的 ODF 中只含有偶数项, 所有奇数项均为零。只有偶数项的 ODF 称为不全 ODF 或简化 ODF 或实验 ODF, 而包含奇数偶数项之和的 ODF 称为完整 ODF 或真 ODF。由于 ODF 中缺少奇数项, 假织构组分也可能出现, 真织构组分的取向密度也变了, ODF 的这种失真现象被称为鬼峰 (ghost)。

为了添补奇数项, 去掉 ghost, 可采用摆脱 Friedel 定律制约的实验技术测建极图, 或者直接测定试样中各单个晶粒的取向, 以直接算出 ODF, 也可设法给不完整 ODF 补上奇数项。Bunge 采用了反常散射法、零区法与单晶衍射法, Pospiech 和 Lucke 采用了织构组分高斯函数拟合法等。这些方法能在某些情况下比较有效地求算完整的 ODF, 但完整 ODF 的求算仍是目前研究的热点。

实验表明,还有许多其他因素也影响材料织构的变化。例如具有同样原始取向的条状、扁平状、球状晶粒,经同样条件下的塑性变形后,晶粒的最终取向可能大不相同。因此,求算材料的ODF时,还可考虑晶粒大小、形状,第二相的大小、形状以及分布等参数的影响,于是三维取向分布函数就变为四维、五维、…等分布函数了。

取向分布函数除应用在金属材料上外,当代越来越多的材料科学工作者还把它应用于复合材料、陶瓷材料和高分子材料上;织构的理论与应用研究不仅涉及晶体材料,还涉及非晶体材料。无疑,这些研究将进一步推动材料科学与工程的发展和带动一些相关学科的发展,并可望产生巨大的经济效益。

### 参 考 文 献

- [1] 毛卫民,张新明. 晶体材料织构定量分析. 北京:冶金工业出版社,1993:97.
- [2] Hirsch J. Walztexturwicklung in Kubisch-Flächen-Zentrierten Metallen, RWTH Aachen, Germany, 1984; Teil II.
- [3] Gottstein G. Rekristallisation Metallischer Werkstoffe, DGM-Informationsgesellschaft Oberursel 1, 1984; 141.
- [4] Bunge H-J. Texture Analysis in Materials Science, Butterworths, 1982; 302.
- [5] Lequeu PH, Jonas J J. Modeling of the Plastic Anisotropy of Textured Sheet. Metall. Trans., 1988, 19A: 105.
- [6] Bunge H-J. Mathematische Methoden der Texturanalyse, Akademie-Verlag, Berlin, 1969.
- [7] 张新明,石其年,尹志民等. 二次挤压对Al-Li合金挤压织构和力学性能的影响. 中南矿冶学院学报, 1991, 22(2): 174.
- [8] 梁志德、徐家楨,王福. 织构材料的三维取向分析——ODF分析. 东北工学院出版社, 1986: 45.

## RESEARCH OF TEXTURES IN METALLIC MATERIALS AND ITS DEVELOPMENT

Zhang Xinming Li Saiyi

(Central-South University of Technology, Changsha 410083)

**Abstract** The definition of the texture of metallic materials, as well as the existing universality of the textures in metallic materials are stated.

Typical texture types and components are illustrated, which will be encountered in metallic materials. The models for the deformation texture and the recrystallization texture are introduced. The significance of the study of texture is emphasized with some examples of practical and theoretical use. The illustration ways as well as the measurement methods for textures are summarized. The definition of the orientation distribution function (ODF) is given, its determination, calculation methods, current situation and development for study are briefly reviewed.

**Key words** texture, orientation distribution function (ODF), anisotropy, yield criteria, metallic materials.