



材料分析测试方法A

第六章：残余应力的测定

Residual stress measurement using XRD

主讲人：陈祖煌

Email: zuhuang@hit.edu.cn, Office Time: Wed. 15:00~16:00@D409

参考书目：材料分析方法（周玉编著）

材料分析测试技术（周玉、武高辉编著）

材料分析检测技术（古亦杰编著）

总结1 物相分析

- 物相分析工作主要是定性分析。
- 定性分析原理是：至今还没发现有两个物相的衍射谱数据完全相同，因此可以根据衍射谱数据区分物相。
- 定性分析方法：将所有物相的衍射谱数据收集成数据库，定性分析就是将实验数据与数据库的数据比对。
- 定性分析工作主要是将获得的衍射谱数据与PDF卡片对照。其中难点是：1) 如何在索引书中找到可能的物相范围；2) 如何在混合物中逐一区分各个物相。
- 衍射数据中主要是晶面间距，衍射强度只辅助参考
- 定量分析原理是：各个物相的含量与其衍射峰强度成正比关系，各种方法只是确定具体比例关系

总结 2 精确测量晶体的点阵常数

- X射线点阵常数精确测定中的关键是 θ 角，为获得精确的点阵常数要尽量选择高角度的 θ 角。
- 数据处理是必要的。

残余应力的测定

本章主要内容

- ▶ 第一节 物体内应力的产生与分类
- ▶ 第二节 X射线残余应力测定的基本原理
- ▶ 第三节 宏观应力测定方法
- ▶ 第四节 X射线宏观应力测定中的一些问题

第一节 物体内应力的产生与分类

- 残余应力是一种内应力
- 内应力指产生应力的各种因素不复存在时，由于形变、体积变化不均匀而残留在构件内部并自身保持平衡的应力
- 产生应力的各种因素不复存在指外加载荷去除、加工完成、温度已均匀、相变过程中止等
- 目前公认的内应力分类方法是由德国的E. 马克劳赫于1979年提出的，将内应力按其平衡的范围分为三类，即第I类内应力、第II类内应力和第III类内应力

第一节 物体内应力的产生与分类

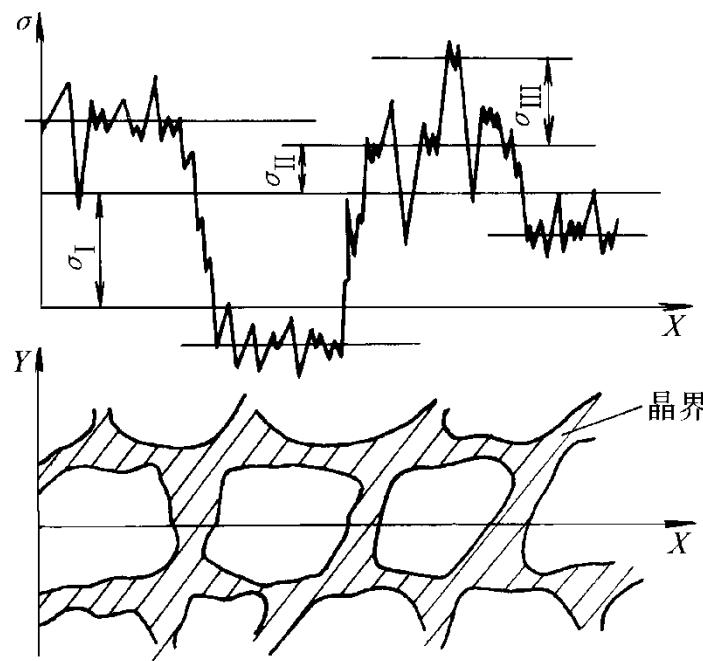
一、内应力的分类

- 1) 第I类内应力(σ_I) 指在物体宏观体积内存在并平衡的内应力。当其被释放后，物体的宏观体积或形状将会变化
- 2) 第II类内应力(σ_{II}) 指在数个晶粒范围内存在并平衡的内应力。这种平衡被破坏时也会出现尺寸变化
- 3) 第III类内应力(σ_{III}) 指在若干个原子范围内存在并平衡的内应力。如各种晶体缺陷(空位、间隙原子、位错等)，这种平衡被破坏时不会产生尺寸的变化

第一节 物体内应力的产生与分类

二、内应力的分布

如图6-1所示，第I类内应力是存在于各个晶粒的内应力在很多晶粒范围内的平均值，是较大体积宏观变形不协调的结果



结果

第II类内应力是晶粒尺度范围内应力的平均值，为各个晶粒或晶粒区域之间变形不协调的结果

第III类内应力是晶粒内局部内应力相对第II类内应力值的波动，它与晶体缺陷形成的应变场有关

图6-1 内应力分布示意图

第一节 物体内应力的产生与分类

三、内应力的衍射效应

- 1) 第I类内应力又称宏观应力或残余应力，其衍射效应使衍射线位移
- 2) 第II类内应力又称微观应力。其衍射效应主要引起衍射线线形变化
- 3) 第III类内应力又称晶格畸变应力或超微观应力等，名称尚未同一，其衍射效应使衍射强度降低
- 4) 第II类内应力是十分重要的中间环节，通过它才能将第I类内应力和第III类内应力联系起来，构成一个完整的内应力系统

第一节 物体内应力的产生与分类

四、内应力的产生

1) 宏观应力

图6-2是产生宏观应力的实例，框架和中间梁在焊接前无

应力；梁的两端焊接在框架上后，中间梁受拉应力，两侧框架受压应力，上下梁受弯曲应力可见，残余应力是材料内部宏观区域内平衡均匀分布的应力

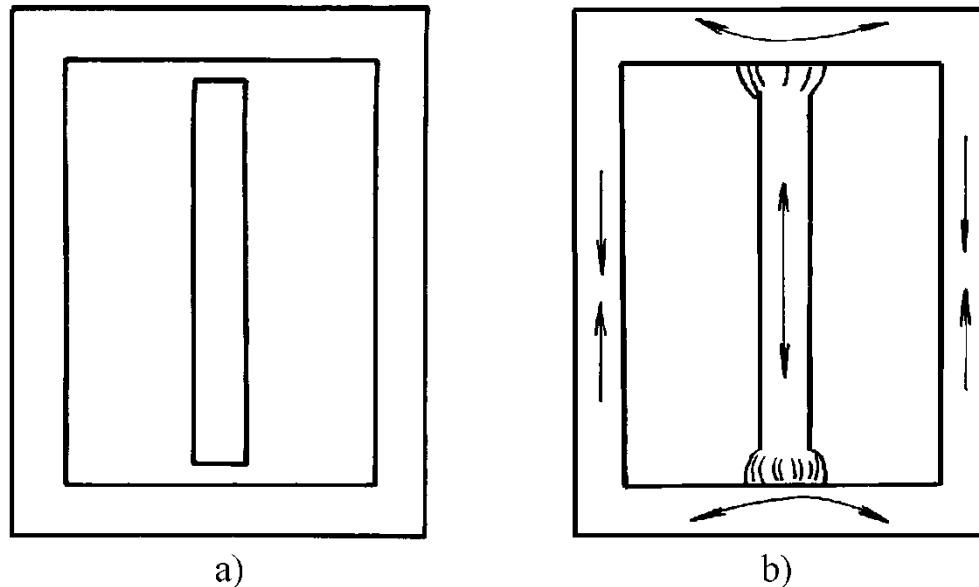


图6-2 宏观应力的产生
a) 焊接前 b) 焊接后

第一节 物体内应力的产生与分类

四、内应力的产生

2) 微观应力

由图6-3可示意说明了第II类内应力的产生。在单向拉伸载荷作用下，由于A晶粒处于易滑移取向，当载荷超过临界切应力时将发生塑性变形；而B晶粒仅发生弹性变形。载荷去除后，B晶粒变形要恢复，而A晶粒仅部分恢复，使B晶粒受拉应力，晶粒A受压应力，而形成晶粒间相互平衡的应力

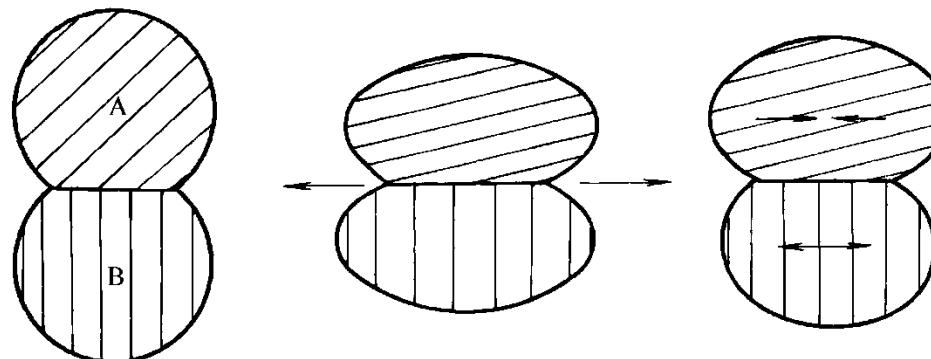


图6-3 第II类内应力的产生

第一节 物体内应力的产生与分类

残余应力的危害

- 宏观残余应力与构件的疲劳强度、抗应力腐蚀能力和尺寸稳定性等密切相关。如焊接引起的残余应力能使构件变形，在特殊介质中工作构件表面张应力会造成应力腐蚀，热处理或磨削产生的残余应力往往是量具尺寸稳定性下降的原因，这些残余应力都是要尽量避免和设法消除的；

第一节 物体内应力的产生与分类

某些情况下残余应力是有利的

如承受往复载荷的曲轴在轴颈表面有适当的压应力可提高其疲劳寿命。

因此测定残余应力对控制各类加工工艺、检查表面强化或消除应力的工艺效果以及进行失效分析等都有重要意义。

第一节 物体内应力的产生与分类

五、内应力的检测

残余应力是一种弹性应力，它与构件的疲劳性能、耐应力腐蚀能力和尺寸稳定性等密切相关，残余应力检测对于工艺控制、失效分析等具有重要意义，主要方法有

- 1) **应力松弛法** 即用钻孔、开槽或薄层等方法使应力松弛，用电阻应变片测量变形以计算残余应力，属于破坏性测试
- 2) **无损法** 即用应力敏感性的方法，如超声、磁性、中子衍射、X射线衍射等。
- 3) **X射线衍射法** 属于无损法，具有快速、准确可靠、测量区域小等优点，且能区分和测定三种不同的类别的内应力



第二节 X射线宏观应力测定的基本原理

一、基本原理

用X射线衍射法测定残余应力，首先测定应变，再借助材料的弹性特征参量确定应力：

1. 通过测定应变量推算应力 ($\sigma=E\varepsilon$)。
2. 通过晶面间距的变化来表征应变
($\sigma=E\varepsilon=E\Delta d/d$ 。)
3. 晶面间距的变化与衍射角 2θ 的变化有关。

根据 $2ds\sin\theta=\lambda \rightarrow \Delta d/d = -\cot\theta \cdot \Delta\theta$

因此，只要知道试样表面上某个衍射方向上某个晶面的衍射线位移量 $\Delta\theta$ ，即可计算出晶面间距的变化量 $\Delta d/d$ ，进一步通过虎克定律计算出该方向上的应力数值。

第二节 X射线宏观应力测定的基本原理

一、基本原理

对于理想的多晶体，在无应力状态下，不同方位的同族晶面间距相等；当承受一定宏观应力 σ_ϕ 时，同族晶面间距随晶面方位及应力大小发生有规律的变化，如图6-4所示，随晶面法线相对于试样表面法线的夹角 ψ 增大，晶面间距 d 增大

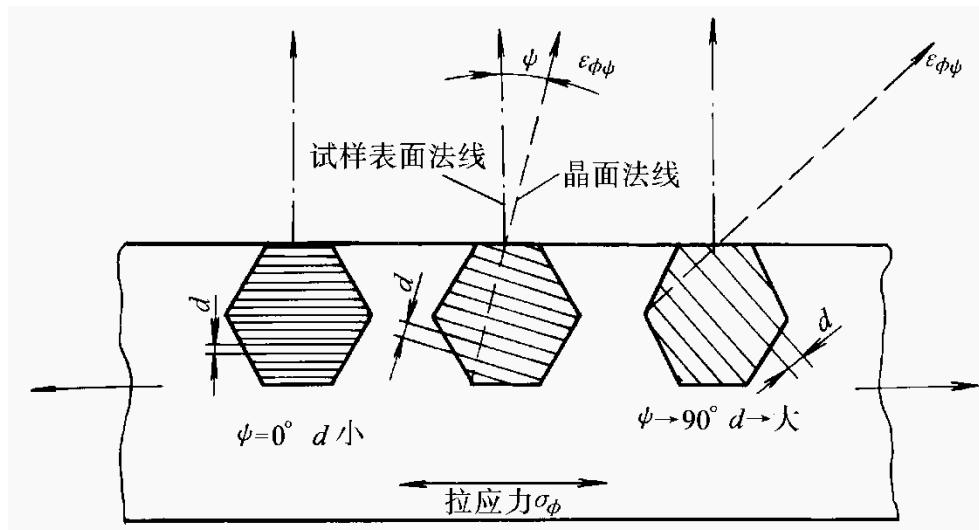


图6-4 应力与不同方位同族晶面间距的关系

第二节 X射线宏观应力测定的基本原理

一、基本原理

沿 $\varepsilon_{\phi\psi}$ 方位，某晶面间距 $d_{\phi\psi}$ 相对于无应力(d_0)时的变化 $(d_{\phi\psi} - d_0)/d_0 = \Delta d / d_0$ ，反映了由应力引起的晶面法线方向的弹性应变 $\varepsilon_{\phi\psi} = \Delta d / d_0$

显然，晶面间距随方位的变化率与作用应力之间存在一定的函数关系

因此，建立待测残余应力 σ_ϕ 与空间某方位上的应变 $\varepsilon_{\phi\psi}$ 之间的关系，是解决应力测量的问题的关键

物体自由表面的法线方向应力为零，当物体内应力沿垂直于表面方向的变化梯度极小，而X射线穿透深度又很小，测量区域近似满足平面应力状态

工程中人们更关心的是某个方向上的应力，如 σ_ϕ 。这就需要经过两次测量应变才能求得如 σ_ϕ 。即除了测定垂直表面的应变 ε_3 外，还要测 σ_3 和 σ_ϕ 构成的平面内某个方向（如 ON' 方向）的应变 $\varepsilon_{\phi\psi}$ 。

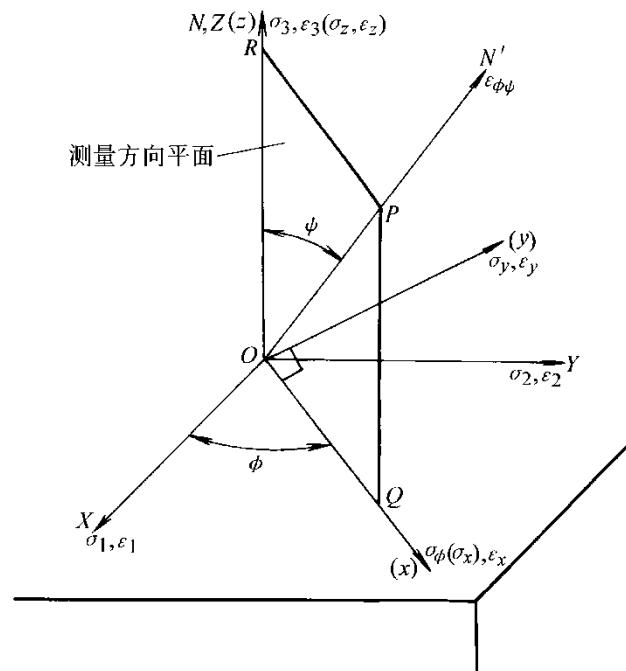
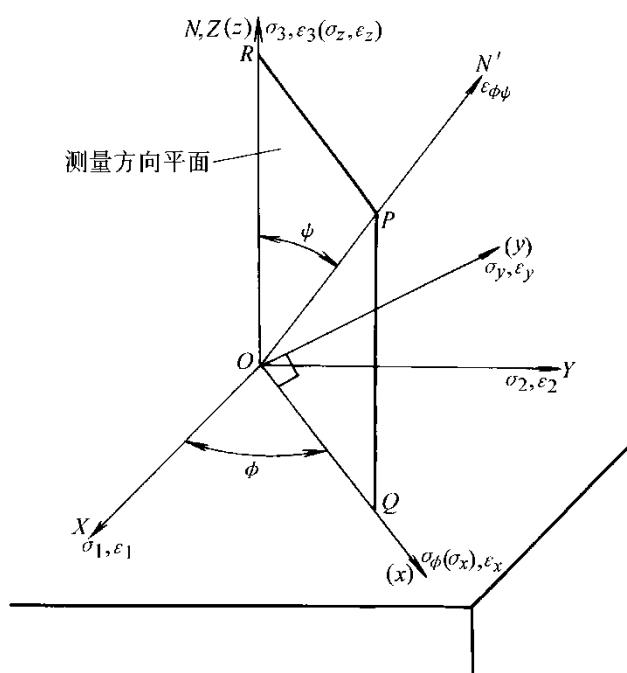


图6-5 测定宏观应力的坐标系

第二节 X射线宏观应力测定的基本原理

二、测定宏观应力的坐标系

在平面应力状态下，建立坐标系如图6-5。图中 $O\text{-}XYZ$ 是主应力坐标系，为主应力($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)和主应变($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$)方向；



$O\text{-}xyz$ 为待测应力 $\sigma_\phi(\sigma_x)$ 及 σ_y 和 σ_z 的方向； σ_3 和 σ_z 与试样法线 ON 平行； ϕ 是 σ_ϕ 与 σ_1 间的夹角

ON 与 σ_ϕ 决定的平面称测量方向平面， $\varepsilon_{\phi\psi}$ 是此平面上某方向的应变，它与 ON 间夹角称为方位角 ψ

即 ψ 是衍射晶面法线 ON' 与试样表面法线 ON 间的夹角

图6-5 测定宏观应力的坐标系

- 目的：推导出待测残余应力 σ_Φ 和 $\varepsilon_{\phi\psi}$ 之间的关系式
- $\varepsilon_{\phi\psi}$ ——为 σ_Φ 和表面法线所决定的平面内任一方向上的应变值。
- $\varepsilon_{\phi\psi}$ 的求法——可通过垂直于 $\varepsilon_{\phi\psi}$ 方向上某一（HKL）晶面间距的变化求出。

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = -ctg\theta \cdot \Delta\theta$$

第二节 X射线宏观应力测定的基本原理

三、应力测定公式

根据弹性力学原理，对于一个连续、均质、各向同性的物体，在平面应力状态下， $\sigma_z=0$ ， $\varepsilon_z=\varepsilon_3$ ，按图6-5所示的坐标系，可以导出任一方向 ON' 的应变为

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_\phi \sin^2 \psi + \varepsilon_3 \quad (6-7)$$

将 $\varepsilon_{\phi\psi}$ 对 $\sin^2 \psi$ 求导

$$\frac{\partial \varepsilon_{\phi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_\phi \quad (6-8)$$

即

$$\sigma_\phi = \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{\partial \varepsilon_{\phi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} \quad (6-9)$$

式(6-9)中，E为弹性模量， ν 为泊松比；表明在平面应力状态下， $\varepsilon_{\phi\psi}$ 与 $\sin^2 \psi$ 呈线性关系

第二节 X射线宏观应力测定的基本原理

四、应力常数K

由布拉格方程的微分式， $\Delta d/d = -\Delta\theta \cot\theta_0$ ， λ 为常数时， $\theta \approx \theta_0$ 为无应力时的掠射角， $\Delta\theta = (2\theta_{\phi\psi} - 2\theta_0)/2$ ，则

$$\varepsilon_{\phi\psi} = -(2\theta_{\phi\psi} - 2\theta_0) \cot\theta_0 / 2,$$

对 $\sin^2\psi$ 求导，并代入式(6-9)可得更实用的公式，式(6-9)中 $\varepsilon_{\phi\psi}$ 变换为衍射角的形式，即

$$\sigma_\phi = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cot\theta_0 \frac{\partial 2\theta_{\phi\psi}}{\partial \sin^2\psi} \quad (6-11)$$

再将 $2\theta_{\phi\psi}$ 的单位由“弧度”换成“度”，则有

$$\sigma_\phi = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cot\theta_0 \frac{\pi}{180^\circ} \frac{\Delta 2\theta_{\phi\psi}}{\Delta \sin^2\psi} \quad (6-12)$$

第二节 X射线宏观应力测定的基本原理

四、应力常数K

式(6-12)表明，在平面应力状态下， $2\theta_{\phi\psi}$ 随 $\sin^2\psi$ 呈线性关系，见图6-6。令式(6-12)中

$$K = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 \frac{\pi}{180^\circ} \quad (6-13a)$$

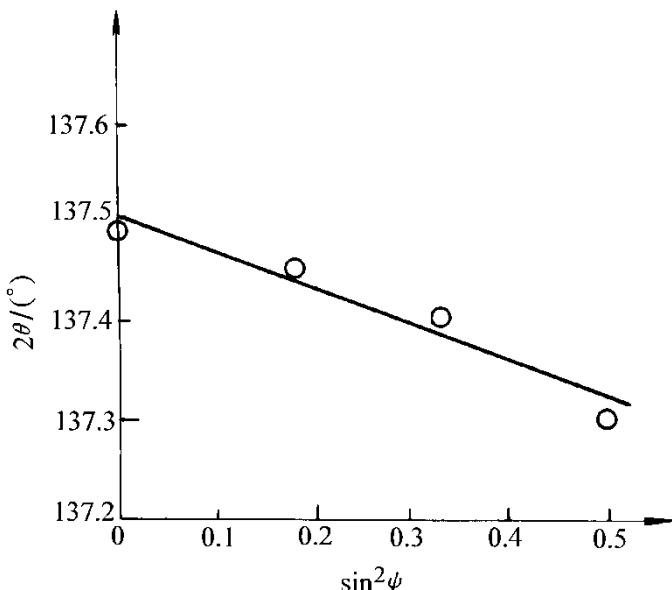


图6-6 $2\theta_{\phi\psi}$ - $\sin^2\psi$ 线性关系

$$M = \frac{\Delta 2\theta_{\phi\psi}}{\Delta \sin^2\psi} \quad (6-13b)$$

则 $\sigma_\phi = KM \quad (6-13c)$

K 称应力常数，它决定于待测材料的弹性性质及所选衍射晶面的衍射角(由晶面间距 d 和波长 λ 决定)

第二节 X射线宏观应力测定的基本原理

四、应力常数K

M 是 $2\theta_{\phi\psi} - \sin^2\psi$ 直线的斜率。由于 K 是负值，若当 $M > 0$ 时，应力为负，即压应力；当 $M < 0$ 时，应力为正，即拉应力

若 $2\theta_{\phi\psi} - \sin^2\psi$ 关系失去线性，说明材料偏离平面应力状态，

三种非平面应力状态
的影响见图6-7

在样品测试范围存在
应力梯度、存在三维
应力状态或存在织构
等情况下，需采用特
殊的方法测算其残余
应力

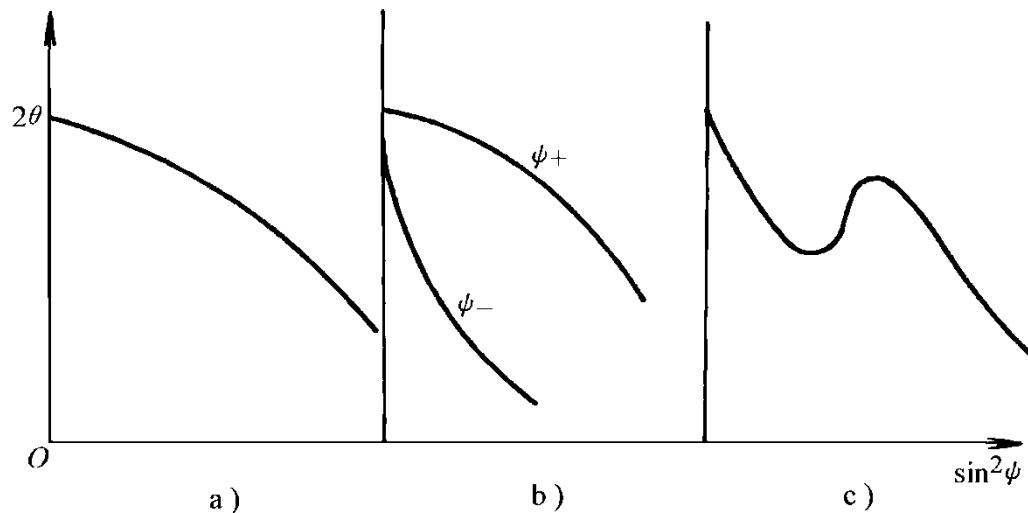


图6-7 非线性 $2\theta_{\phi\psi} - \sin^2\psi$ 关系

a) 存在应力梯度 b) 存在三维应力 c) 存在织构

第二节 X射线宏观应力测定的基本原理

四、应力常数K

几种材料的应力测试数据

材料	点阵类型	点阵常数/ \AA	辐射源	$\{ hkl \}$	$2\theta/(\circ)$	$K/[\text{MPa}/(\circ)]$
α -Fe	BCC	2.8664	$\text{Cr}K_{\alpha}$	211	156.8	-318.1
			$\text{Co}K_{\alpha}$	310	161.4	-230.4
γ -Fe	FCC	3.656	$\text{Cr}K_{\beta}$	311	149.6	-355.35
			$\text{Mn}K_{\alpha}$	311	154.8	-292.73
Al	FCC	4.049	$\text{Cr}K_{\alpha}$	222	156.7	-92.12
			$\text{Co}K_{\alpha}$	420	162.1	-70.36
Cu	FCC	3.6153	$\text{Cr}K_{\beta}$	311	146.5	-245.0
			$\text{Co}K_{\alpha}$	400	163.5	-118.0
Ti	HCP	a 2.9504	$\text{Co}K_{\alpha}$	114	154.2	-171.6
		c 4.6831	$\text{Co}K_{\alpha}$	211	142.2	-256.7
Ni	FCC	3.5238	$\text{Cr}K_{\beta}$	311	157.7	-273.22
			$\text{Cu}K_{\alpha}$	420	155.6	-289.39

表中给出了几种材料的应力测试数据，供参考



第三节 宏观应力测定方法

由前述的测定原理可知，欲测定试样表面某确定方向的残余应力 $\sigma_\phi = KM$ ，需按如下步骤进行

- 1) 在测定方向平面内至少测出两个不同 ψ 方位的衍射角 $2\theta_{\phi\psi}$
- 2) 求出 $2\theta_{\phi\psi} - \sin^2\psi$ 直线的斜率 M
- 3) 根据测试条件取应力常数 K
- 4) 将 M 和 K 代入式(6-13)计算残余应力 σ_ϕ

要确定和改变衍射晶面的方位 ψ ，需利用某种衍射几何方式实现。目前残余应力多在衍射仪或应力仪上测量，常用的衍射几何方式有两种，同倾法和侧倾法

第三节 宏观应力测定方法

一、同倾法

同倾法的衍射几何特点是**测量方向平面和扫描平面相重合**，如图6-8a所示。测量方向平面是 ON 、 σ_x 所在的平面；扫描平面是入射线、衍射晶面法线(ON' 、 $\varepsilon_{\phi\psi}$ 方向)和衍射线所在平面。同倾法确定 ψ 的方式有两种

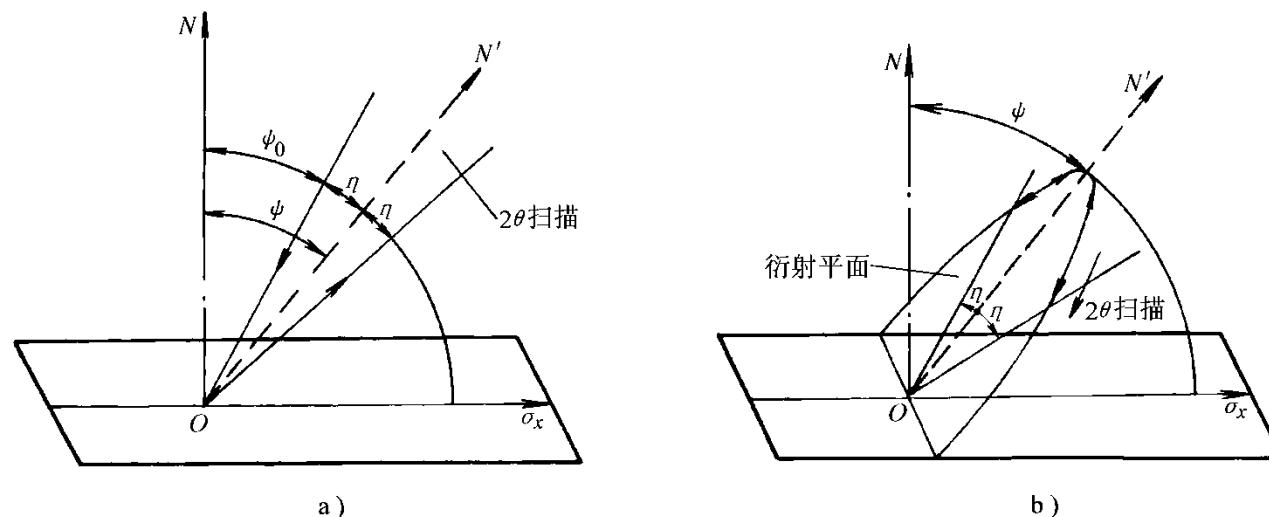


图6-8 同倾法(a)和侧倾法(b)衍射几何特点

第三节 宏观应力测定方法

一、同倾法

1) 固定 ψ 法

当 ON' 与 ON 重合时，即 $\psi=0^\circ$ ，计数管和试样以2:1的角速度转动，此时衍射晶面与试样表面平行，见图6-9a；样品绕衍射仪轴转动 ψ 角， ON' 与 ON 间夹角为 ψ ，见图7-9b

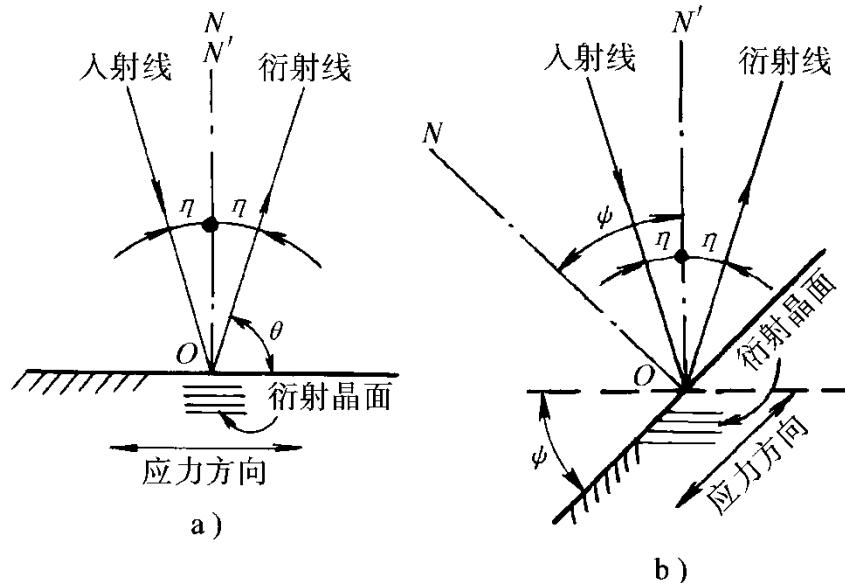


图6-9 固定 ψ 法 a) $\psi=0^\circ$ b) $\psi=45^\circ$

通过衍射几何条件设置直接确定和改变衍射面方位 ψ 的方法称固定 ψ 法

此法适用于较小尺寸的试样在衍射仪上测定其宏观残余应力

第三节 宏观应力测定方法

一、同倾法

2) 固定 ψ_0 法

ψ_0 是入射线与试样表面法线ON间的夹角。固定 ψ_0 法待测试样不动，通过改变X射线的入射方向获得不同的 ψ 方位，如图6-10所示

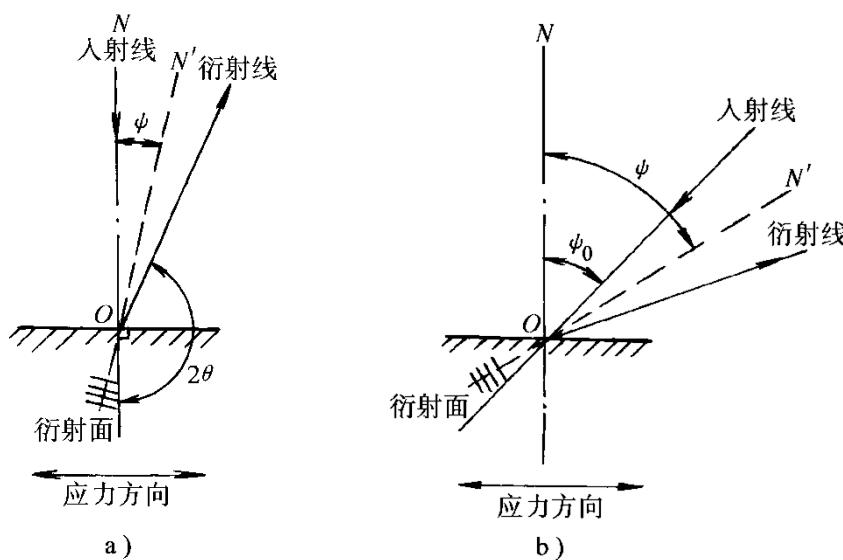


图6-10 固定 ψ_0 法

a) $\psi_0 = 0^\circ$ b) $\psi_0 = 45^\circ$

图6-10所示

按图中所示的衍射几何条件，由 ψ_0 和 θ 计算 ψ

$$\psi = \psi_0 + (90^\circ - \theta)$$

此法适用于机械零件或大型构件，多在专用的应力测定仪上使用

第三节 宏观应力测定方法

一、同倾法

3) 晶面方位角 ψ 的选取

同倾法(固定 ψ 或 ψ_0)选取晶面方位角的方式有两种

a. 0° - 45° 法(两点法) ψ 或 ψ_0 选取 0° 和 45° 进行测定, 由两个数据求 $2\theta_{\phi\psi}$ - $\sin^2 \psi$ 直线的斜率 M

此法适用于已知 $2\theta_{\phi\psi}$ - $\sin^2 \psi$ 具有良好的线性关系或对测量精度要求不高的场合

对于固定 ψ 的 0° - 45° 法, $\Delta \sin^2 \psi = \sin^2 45^\circ - \sin^2 0^\circ = 0.5$, 则应力计算公式简化为

$$\sigma_\phi = 2K \Delta 2\theta_{\phi\psi}$$

第三节 宏观应力测定方法

一、同倾法

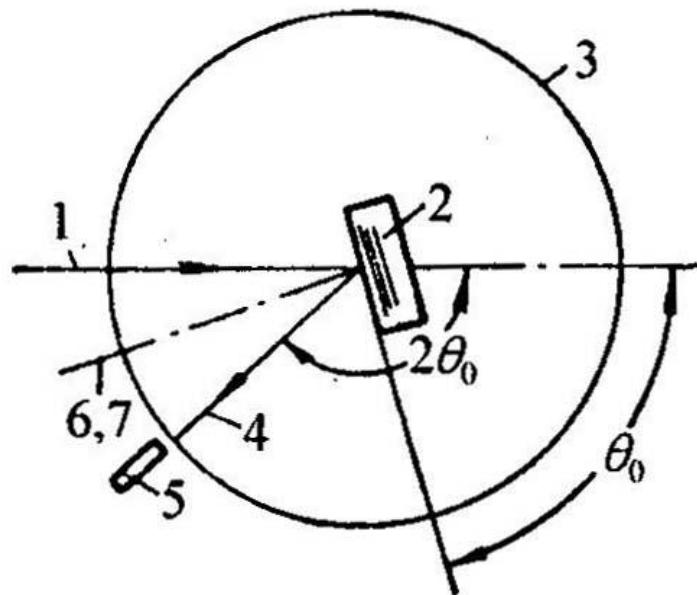
a. 0° - 45° 法(两点法)测定步骤

(1) 选择反射晶面 (hkl) 与入射波长的组合，使产生的衍射线有尽可能大的 θ 角 (**θ角越接近 90° ，系统误差越小**)，计算无应力之衍射角；(以低碳钢为例：选用 CrK_α 测 (211) 线，由布拉格方程 算出 $2\theta_0 = 156.4^\circ$ 则 $\theta_0 = 78.2^\circ$)

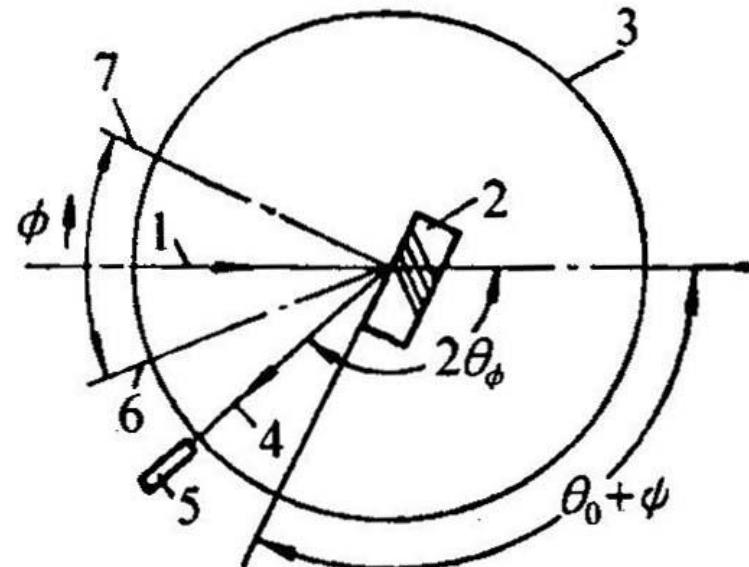
(2) 测定 $\psi = 0^\circ$ 时的应变 ($2\theta_{\psi=0}$)：

令入射线与样品表面呈 $\theta_0 = 78.2^\circ$ ，计数器在 $2\theta_0 \pm 5^\circ$ 附近与样品连动扫描，则记录下与样品表面平行的 (211) 面的衍射线，测得确切的 $2\theta_\psi = 154.92^\circ$ ；(见下图)

衍射仪法残余应力测定时的测量几何关系



(a) $\phi = 0^\circ$



(b) $\phi = \psi$

衍射仪法残余应力测定时的测量几何关系

1. 入射 X 射线；2. 反射晶面；3. 测角仪圆；4. 反射 X 射线；5. 计数器；
6. 反射晶面法线；7. 试样表面法线

第三节 宏观应力测定方法

(3) 测定 $\Psi = 45^\circ$ 时的应变 ($2\theta_{45}$) :

样品连同样品台顺时针转动 45° ，转动时与计数器“脱钩”，即计数器保持不动；计数仍在 2θ 附近（与样品台）连动扫描，此时记录的衍射线是样品中其法线与样品表面法线夹角 Ψ 为 45° 的 (211) 晶面所产生的，测出此时的衍射角

$$2\theta_{45} = 155.96^\circ ;$$

(4) 计算 M 值:

$$M = \frac{\partial(2\theta_\varphi)}{\partial \sin^2 \varphi} = \frac{\Delta 2\theta_\varphi}{\Delta \sin^2 \varphi} = \frac{2\theta_{45} - 2\theta_{\varphi=0}}{\sin^2 45 - \sin^2 0} = \frac{2\theta_{45} - 2\theta_{\varphi=0}}{\sin^2 45}$$

(5) 计算 σ_φ 值:

查出 K ，
 $\sigma_\varphi = KM$

第三节 宏观应力测定方法

一、同倾法

3) 晶面方位角 ψ 的选取

b. $\sin^2\psi$ 法 $2\theta_{\phi\psi}$ 测量必然存在偶然误差，故两点法会影响测量精度。为此取几个($n \geq 4$) ψ 方位测量，再用作图法或最小二乘法求出 $2\theta_{\phi\psi} - \sin^2\psi$ 直线的最佳斜率 M ，根据式(6-13b) 得到直线方程

$$2\theta_{\phi\psi i} = 2\theta_{\psi=0} + M \sin^2 \psi_i \quad (6-15)$$

斜率 M 满足偏差 v_i 最小(见图6-11)，按最小二乘法原则，其 M 值为

$$M = \frac{n \sum (2\theta'_{\phi\psi i} \sin^2 \psi_i) - \sum \sin^2 \psi_i \sum 2\theta'_{\phi\psi i}}{n \sum \sin^4 \psi_i - (\sum \sin^2 \psi_i)^2} \quad (6-17)$$

第三节 宏观应力测定方法

一、同倾法

3) 晶面方位角 ψ 的选取

目前， $\sin^2\psi$ 法中 4 个方位角 ψ_i 和 ψ_{0i} 按如下方法选取，固定 ψ 法 ψ_i 常取 0° 、 25° 、 35° 、 45° ；固定 ψ_0 法可根据 θ_0 值估算合适的 ψ_{0i}

用计算机处理数据，可以取更多的测点，以提高 M 的精度

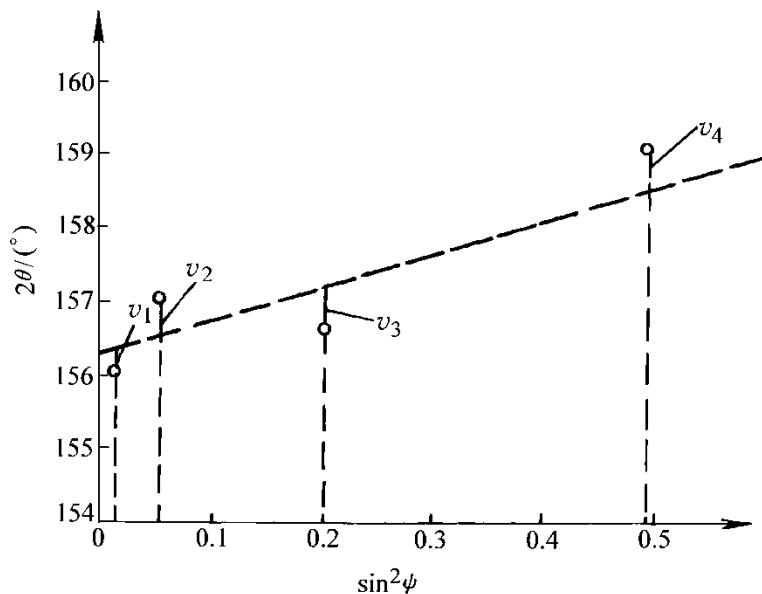


图 6-11 确定 $2\theta_{\phi\psi} - \sin^2\psi$ 直线最佳斜率

第三节 宏观应力测定方法

一、同倾法

4) 0° - 45° 法与 $\sin^2 \psi$ 法的适用性

若在X-ray穿透范围内，样品存在织构、晶粒粗大、偏离非平面应力状态等情况， $2\theta_\psi - \sin^2 \psi$ 将偏离线形关系，此时采用 0° - 45° 法会产生很大误差——此时用 $\sin^2 \psi$ 法（精度较高）。

当晶粒小、织构少、微观应力不严重时，直线斜率也可由首尾两点决定，用 0° - 45° 法即可。

第三节 宏观应力测定方法

二、侧倾法

同倾法中， ψ 或 ψ_0 的变化受 θ 的限制， ψ 的变化范围为 $0^\circ \sim \theta$ (见图6-9)； ψ_0 的变化范围为 $0^\circ \sim (2\theta - 90^\circ)$ (见图6-9)

由于测定衍射峰的全形需一定的扫描范围，且计数管无法接收到平行于试样表面的衍射线。当工件形状复杂，如需测定

转角处的切向应力，方位角的变化将受到工件形状的限制，见图6-12。由此而产生侧倾法

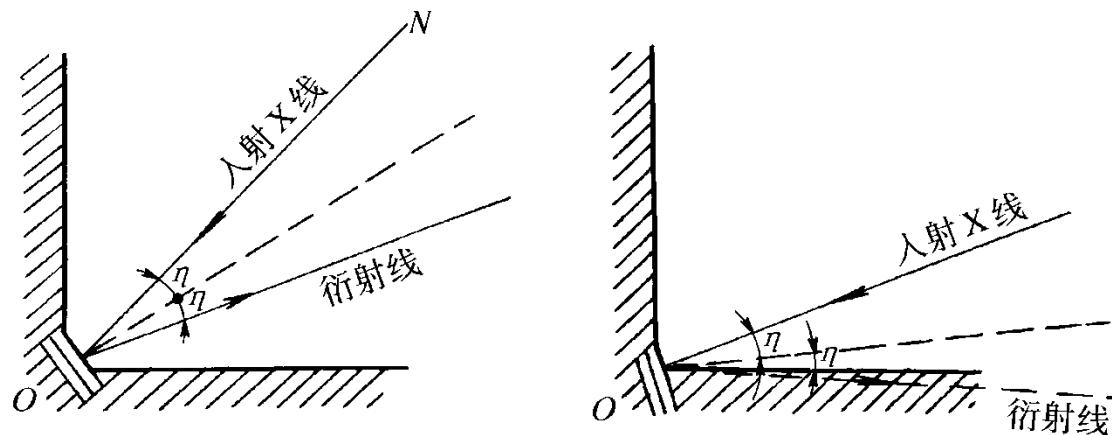


图6-12 工件转角处的应力测定

应力测量时的衍射几何方式

- 测量方向平面——残余应力和试样表面法线所决定的平面
- 扫描平面——入射线、衍射线、衍射面法线所在的平面
- 衍射几何方式有两种：
- 1 同倾法：测量方向平面和扫描平面重合
- 2 侧倾法：测量方向平面和扫描平面垂直

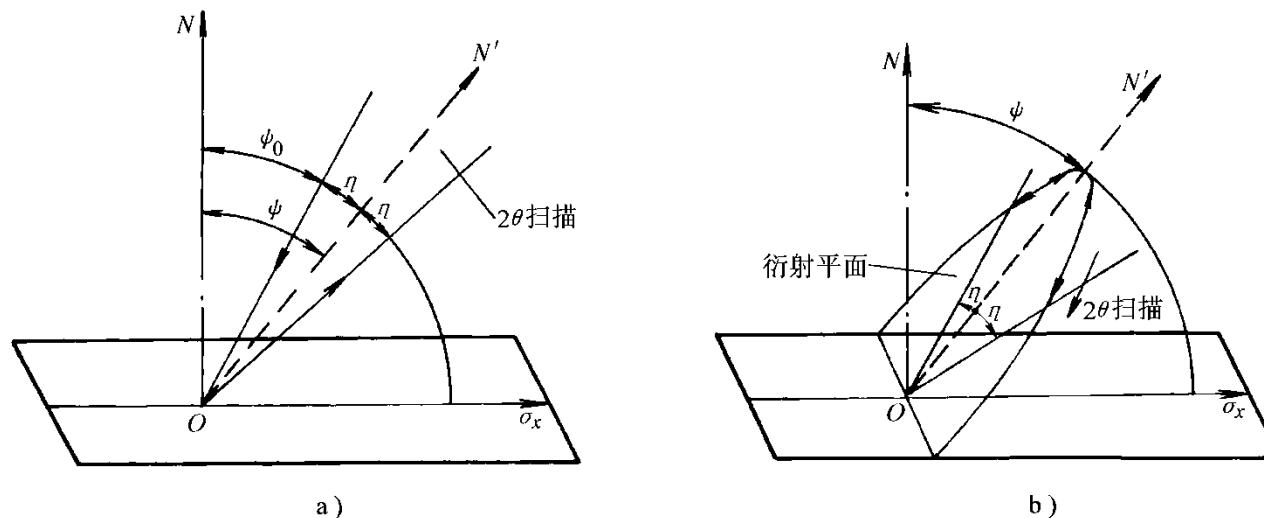


图6-8 同倾法(a)和侧倾法(b)衍射几何特点

第三节 宏观应力测定方法

二、侧倾法

与同倾法相比(比较图6-8a和b)，侧倾法具有如下特点

- 侧倾法的测量方向平面与扫描平面垂直
- ψ 角的变化不受衍射角的限制，只决定于待测试件的空间形状。对于平面试样， ψ 的变化范围理论上接近90°
- 侧倾法确定 ψ 方位的方式属于固定 ψ 法
- 选取方位角的方式仍可采用两点法和 $\sin^2 \psi$

侧倾法具有可测量复杂形状工件表面残余应力、且测量精度高等优点。在专用的X射线应力仪上普遍配备了用于大型复杂工件或构件应力测定的侧倾装置

第三节 宏观应力测定方法

二、侧倾法

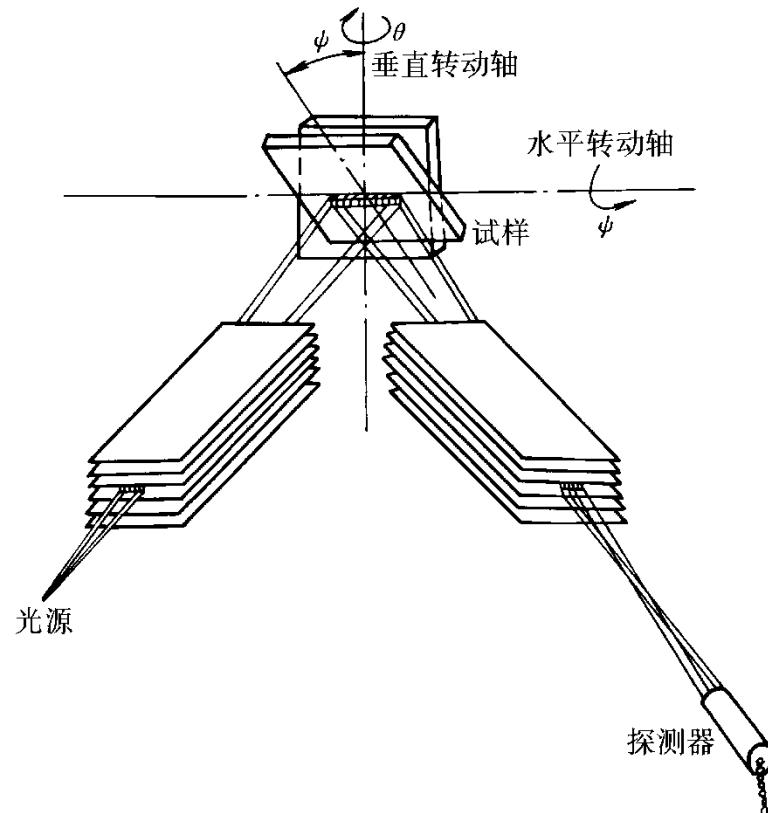


图6-13 侧倾装置示意图

如图6-13所示，侧倾装置有两个轴，试样架可绕水平轴转动，以实现方位角 ψ 改变；试样架与计数管绕垂直轴(衍射仪轴)作 θ - 2θ 联动扫描，以测定衍射角

第三节 宏观应力测定方法

二、侧倾法

例：用侧倾法的 $\sin^2\psi$ 法测定碳/铝复合丝覆铝层轴向应力的数据列于表6-1，用 CuK_α 辐射，测定铝{422}面

表6-1 $\sin^2\psi$ 法应力测定数据

No	$\psi/^\circ$	$\sin^2\psi$	$2\theta/^\circ$	$2\theta \sin^2\psi/^\circ$	$\sin^4\psi$
1	0	0	137.49	0	0
2	25	0.1786	137.45	24.5486	0.0319
3	35	0.3290	137.40	45.2046	0.1082
4	45	0.5	137.30	68.65	0.25
Σ		1.0076	549.64	138.4032	0.3901

将表中数据代入式(6-17)，得 $M = -0.3752^\circ$ ， M 代入式(6-13c)得， $\sigma_\phi = KM = 65.2 \text{ MPa}$ 。 K 的确定将在后面介绍



第四节 X射线宏观应力测定中的一些问题

一、定峰法

宏观应力的测定精度取决于 2θ 角准确测量，相邻 ψ 方位的 2θ 变化仅在 0.1° 甚至是 0.01° 的数量级。峰位的准确测量可采用以下定峰法

(一) 半高宽及 $1/8$ 高宽法

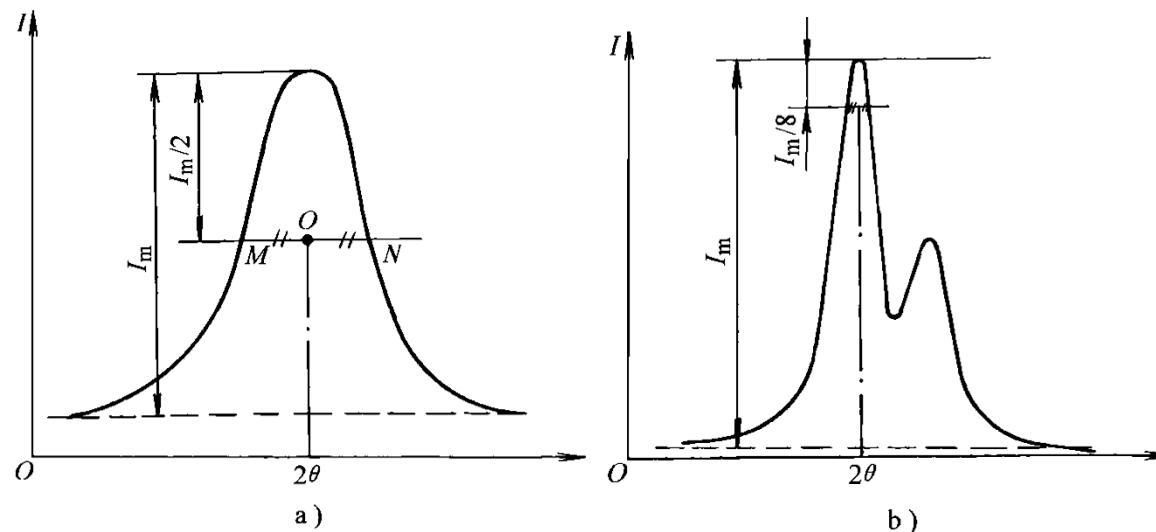


图6-14 峰宽定峰
a) 半高宽法 b) 1/8高宽法

若 $K_{\alpha 1}$ 和 $K_{\alpha 2}$ 线重合，
采用半高法定峰，
图6-14a；若 $K_{\alpha 1}$ 和 $K_{\alpha 2}$
线分离，用 $K_{\alpha 1}$ 线 $1/8$
高宽法定峰，图6-14b

此法适用于峰形较为
明锐的情况

第四节 X射线宏观应力测定中的一些问题

一、定峰法

(二) 抛物线法

当峰形较漫散时，半高宽法容易引起较大误差，可用抛物线法定峰，如图6-15所示。即将峰顶部位假定为抛物线，设抛物线方程为， $I = a_0 + a_1(2\theta) + a_2(2\theta)^2$ (6-18)

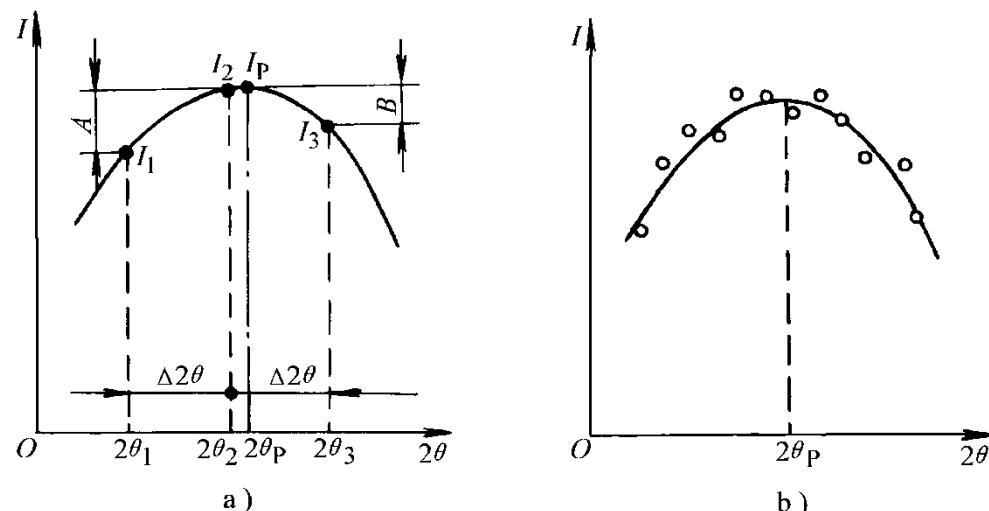


图6-15 抛物线定峰
a) 三点抛物线法 b) 抛物线拟合法

式中 I 为对应 2θ 的强度；
 a_0 、 a_1 、 a_2 为常数。强度最大值 I_P 对应的衍射角 $2\theta_P$ 应满足 $dI/d(2\theta)=0$ ，即 $a_1 + 2a_2(2\theta_P)=0$ ，得

$$2\theta_P = -a_1/2a_2 \quad (6-19)$$

$2\theta_P$ 即为峰位

第四节 X射线宏观应力测定中的一些问题

四、定峰法

(二) 抛物线法

1) 三点抛物线法

如图6-15a，在强度大于 $85\%I_P$ 的峰顶处取三点，且使二个 $\Delta 2\theta$ 相等，将测试值 I_1 、 I_2 、 I_3 及对应 2θ 代入式(6-18)，得

$$\begin{aligned} I_1 &= a_0 + a_1(2\theta_1) + a_2(2\theta_1)^2 \\ I_2 &= a_0 + a_1(2\theta_2) + a_2(2\theta_2)^2 \\ I_3 &= a_0 + a_1(2\theta_3) + a_2(2\theta_3)^2 \end{aligned} \quad (6-20)$$

求解常数 a_1 、 a_2 ，再代入式(6-19)，求得其峰位 $2\theta_P$ 为

$$2\theta_P = 2\theta_1 + \Delta 2\theta \frac{2I_2 - 3I_1 + I_3}{2(I_3 - I_1)} \quad (6-21)$$

第四节 X射线宏观应力测定中的一些问题

一、定峰法

(二) 抛物线法

2) 抛物线拟合法

为提高定峰精度，可取多点($n \geq 5$)，用曲线拟合法确定峰位，如图6-15b。设各点 $2\theta_i$ 处的强度最佳值为 I_i ，满足式(6-18)，若强度实测值为 I'_i ，各点实测值与最佳值只差 v_i 的平

方和为

$$\sum_{i=1}^n v_i = \sum_{i=1}^n [I'_i - a_0 + a_1(2\theta_i) + a_2(2\theta_i)^2]^2$$

按最小二乘法原则， $\frac{\partial \sum v_i^2}{\partial a_0} = 0$ ， $\frac{\partial \sum v_i^2}{\partial a_1} = 0$ ， $\frac{\partial \sum v_i^2}{\partial a_2} = 0$ ，求解常

数 a_1 、 a_2 ，代入式(6-19)，可求得其峰位 $2\theta_P$ 为

第四节 X射线宏观应力测定中的一些问题

一、定峰法

(二) 抛物线法

3) 强度修正

用抛物线法定峰时，需长时间定时计数或大计数定数计数，以获取准确的强度值，且还需用下式进行修正

$$I' = I'' / L_P A \quad (\text{同倾法}) \quad (6-23)$$

$$I' = I'' / L_P \quad (\text{侧倾法})$$

式中， I' 为修正后的强度值； I'' 为实测值； L_P 为角因数； A 为吸收因子($A = 1 - \tan \psi \cos \theta$)

第四节 X射线宏观应力测定中的一些问题

二、应力常数 K 的确定

晶体具有各向异性，用某确定的晶面应变计算弹性应力时，需测定选用晶面的弹性性质。方法如下：

用与被测材料相同的板材制成无残余应力的等强梁，将等强梁在衍射仪或应力仪上施加已知且可改变的单向拉伸应力 σ 。在单向拉伸条件下，根据式(6-8)有

$$\frac{\partial \varepsilon_\psi}{\partial \sin^2 \psi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma \quad (6-24)$$

M 是 ε_ψ 随 $\sin^2 \psi$ 变化的斜率，即

$$M = \frac{1+\nu}{E} \sigma \quad (6-25)$$

式(6-25)表明， M 随 σ 也呈线性变化，见图6-16

第四节 X射线宏观应力测定中的一些问题

二、应力常数 K 的确定

将式(6-25)对 σ 求导

$$\frac{\partial M}{\partial \sigma} = \frac{1+\nu}{E} \quad (6-26)$$

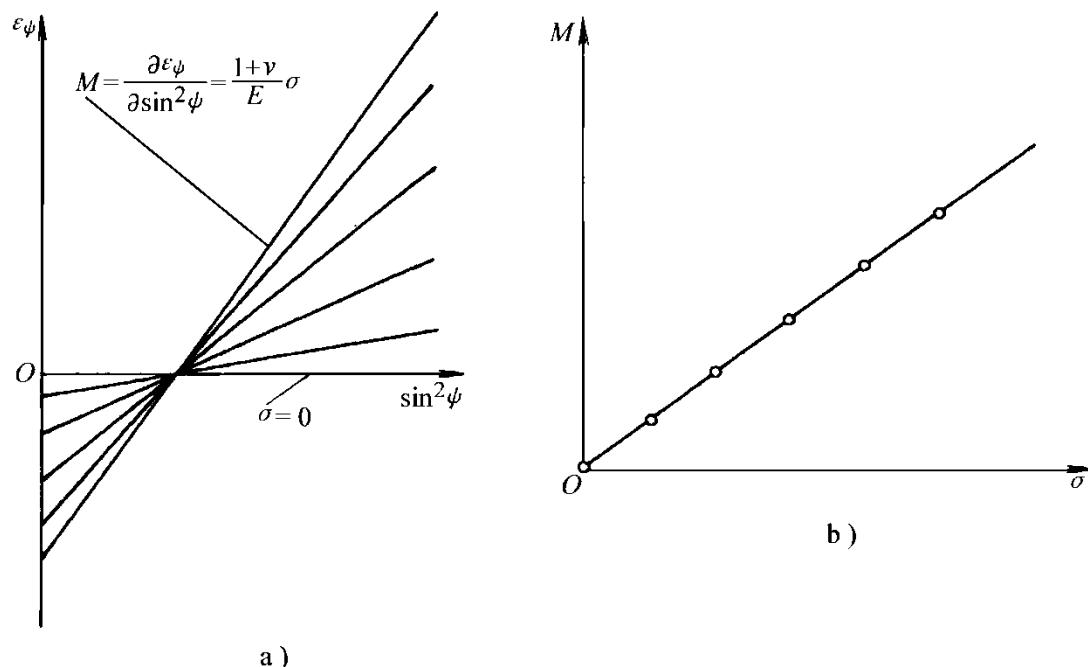


图6-16 X射线弹性常数的测定

a) 不同应力下 $\varepsilon_\psi - \sin^2\psi$ 关系 b) $M-\sigma$ 关系

对等强梁上施加不同应力，在测量方向平面内测定不同方位的应变，代入以上3式，可计算出X射线弹性常数

$$\frac{S_2}{2} = \frac{1+\nu}{E}$$

第四节 X射线宏观应力测定中的一些问题

二、应力常数K的确定

在单向拉伸条件下，根据式(6-7)有

$$\varepsilon_{\psi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} \sigma \quad (6-27)$$

当 $\psi=0$ 时，

$$\varepsilon_{\psi=0} = -\frac{\nu}{E} \sigma \quad (6-28)$$

$\varepsilon_{\psi=0}$ 与 σ 也呈线性关系，见图6-17，
斜率 S_1 称弹性常数

$$\frac{\partial \varepsilon_{\psi=0}}{\partial \sigma} = -\frac{\nu}{E} = S_1 \quad (6-29)$$

由对应 $\{hkl\}$ 晶面的弹性常数，X射线
波长及 $\{hkl\}$ 晶面无应力时的衍射角
 θ_0 ，可计算应力常数 K

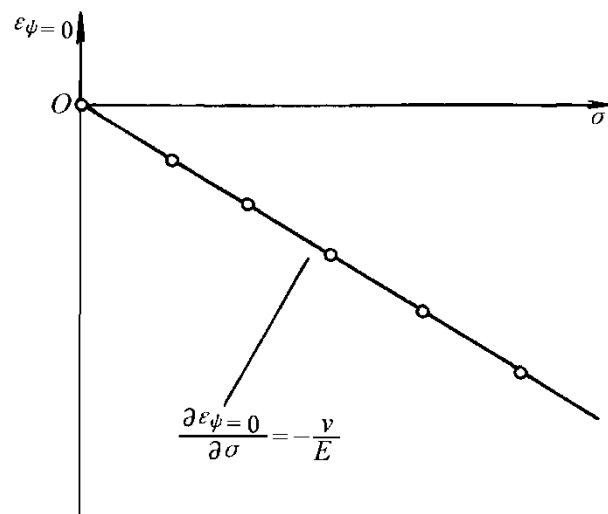


图6-17 $\varepsilon_{\psi=0}$ - σ 直线图

第四节 X射线宏观应力测定中的一些问题

三、影响宏观应力测量精度的因素

(一) 衍射晶面的影响

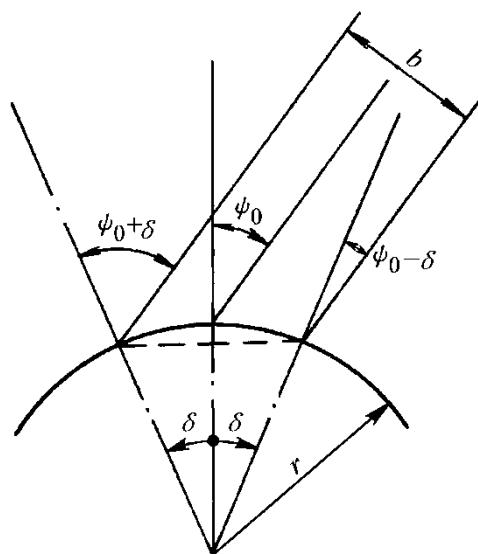
选择原则是高角区的强衍射线，由 2θ 测量精度引起的应力误差将减小， 2θ 的范围为 $143\sim163^\circ$ ，或 $110\sim170^\circ$

(二) 试样状态的影响

表面油污、氧化皮和加工痕迹等对应力测定均有影响。特别是表面曲率(图6-18)表面不同位置 ψ 连续变化，计算应力时， $\sin^2 \psi$ 应取平均值，不考虑吸收时

$$\overline{\sin^2 \psi} = \int_{\psi_0-\delta}^{\psi_0+\delta} \frac{\sin^2 \psi}{2\delta} d\psi = \frac{1}{2} - \frac{1}{4\delta} \cos 2\psi_0 \sin 2\delta \quad (6-27)$$

图6-18 试样表面曲率的影响

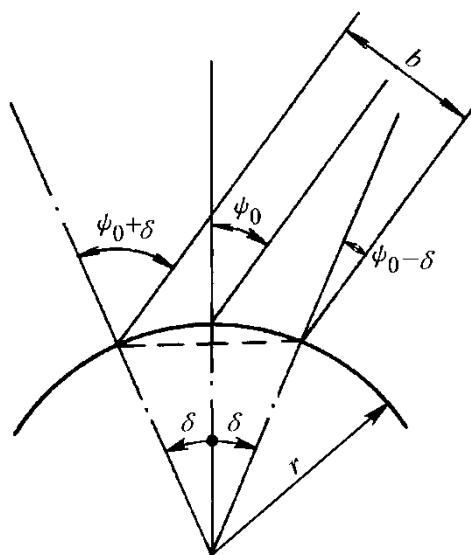


X射线应力测定的注意事项

- 试样的表面状态、形状、晶粒大小和组织等对应力测定都有影响。对多晶金属试样X射线照射深度一般在10微米左右。试样表面的污垢、氧化皮或涂层将使X射线的吸收或散射发生变化，从而影响试样本身的真实应力。测量前必须将它们除去。但是，当研究喷丸、渗碳、渗氮等表面处理产生的应力时，不能进行任何表面处理。对粗糙的试样表面，因凸出部份已释放掉一部份应力，从而测得的应力值一般偏小。故对表面粗糙的试样，应用砂纸将欲测部位磨平，再用电解抛光去除加工层，然后才能测定。

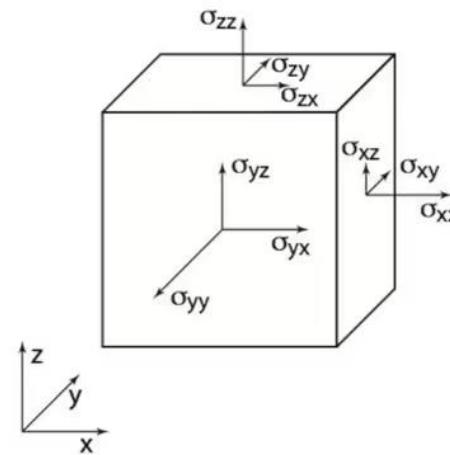
X射线应力测定的注意事项

- 当测试部位为曲面时，应尽量选用狭窄的光束。
- 晶粒过大使参与衍射的晶粒数目减少，衍射线峰形出现异常，测定的应力值可靠性下降，重现性差。如果晶粒过小，将使衍射线宽化，测量精度下降。晶粒大小在 $30 \mu m$ 左右最好
- 为了提高测量精度，通常采用的方法是使入射线摆动，摆动角土 $(1^\circ - 3^\circ)$ ，以增加参加衍射的晶粒数



总结 应力测定

- X射线应力测定本质上是测定晶体材料在应力作用下晶体结构发生的变化。
- 宏观应力测定是测应力作用下晶面间距的变化，晶面间距变化的表现是 θ 角变化。
- Θ 角变化——晶面间距变化——反映的是应变——换算成应力。
- 具体应力测定方法有 $\sin 2\psi$ 法和 $0^\circ-45^\circ$ 法



MSE203b: Stress Tensors

L8a: Strain Measurement

Dr David Dye

Imperial College
London