

Methods for Stress Measurement

Guoli Jiang, Jiangyong Wang*

Department of Physics, Shantou University, Shantou Guangdong
Email: wangjy@stu.edu.cn

Received: Dec. 29th, 2015; accepted: Jan. 15th, 2016; published: Jan. 19th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The methods for stress measurement are reviewed and discussed, focusing on the principles and application of several traditional methods, such as Hole method, X-ray diffraction method, Magnetic method, Ultrasonic method, crack compliance method and so on. A new promising method, quantitative sputter depth profiling, is proposed for characterizing the stress gradient at interface.

Keywords

Traditional Methods for Stress Measurement, Depth Profiling Method

应力测量方法

姜国利, 王江涌*

汕头大学物理系, 广东 汕头
Email: wangjy@stu.edu.cn

收稿日期: 2015年12月29日; 录用日期: 2016年1月15日; 发布日期: 2016年1月19日

摘要

本文对应力测量方法进行了评述和展望。主要介绍了多种传统测量应力的方法及原理, 如小孔法、X射

*通讯作者。

线衍射法、磁测法、超声波法、裂纹柔度等方法。并且提出了潜在可以用来表征薄膜界面间应力的一种新方法——溅射深度剖析定量分析。

关键词

传统的应力测量方法, 深度剖析方法

1. 引言

材料在制备和加工过程中都会产生应力。应力的存在降低了工件的强度, 使工件在制备和应用过程中产生变形和开裂等工艺缺陷。构件断裂、疲劳破坏、应力腐蚀等原因导致材料力学性能下降。因此, 应力的测量及分析对控制工件的质量具有重要意义。

目前, 测量应力的方法主要分为两大类。1) 机械法, 如钻孔法、取条法等。机械法测量残余应力一般将具有残余应力的部分从构件中分离或切割出来, 使应力释放。然后测量其应变的变化求出残余应力, 是一种间接测量手段。机械法会对工件造成一定的损伤和破坏, 但由于其具有理论完善、技术成熟、测量精度较高等优点, 目前在现场测试中应用广泛。2) 物理检测法, 如 X 射线衍射法、超声波法和磁测法等。这些方法均属于无损检测, 对工件不会造成破坏, 但成本较高, 其中 X 射线衍射法发展最为成熟。本文对传统的应力测量方法、适用范围以及优缺点做了总结, 并提出了潜在的可以用来表征薄膜界面间应力的一种新方法-溅射深度剖析定量分析。最后对应力测量方法的发展做了展望。

2. 物理检测法

2.1. X 射线衍射法

X 射线衍射法的依据是弹性力学及 X 射线晶体学理论。对于理想的多晶体, 在无应力时, 不同方位的同族晶面间距是相等的, 当受到一定的表面应力 σ 时, 不同晶粒的同族晶面间距随晶面方位及应力的大小发生有规律的变化, 从而使 X 射线衍射谱线发生位偏移, 根据位偏移的大小则可以计算出应力 [1]。在 X 射线应力测定中, 通常采取的测试方法有常规法、侧倾法、掠射侧倾法。

2.1.1. X 射线衍射法 - 常规法

传统的常规法是 $\sin^2\Psi$ 法, 这种方法只针对主应力状态是弹性各向同性的晶态材料的应力分析, 根据布拉格定律和弹性理论如图 1 可以推导出 $\sin^2\Psi$ 法的应力测定公式[2]表示为:

$$\sigma = K \cdot M \quad (1)$$

$$M = \frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2 \psi} \quad (2)$$

$$K = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\pi}{180^\circ} \cot \theta_0 \quad (3)$$

式中, σ 为应力值; E 为弹性模量; ν 为泊松比; θ_0 为所选晶面在无应力情况下的衍射角; K 为应力常数; M 为 2θ 对 $\sin^2\Psi$ 的变化斜率; 2θ 为样品表面法线与衍射晶面法线为 Ψ 时的衍射角。

实际上很少遇到弹性各向同性的晶体组成的多晶体, 对于弹性各向异性的材料(织构材料、单晶等), 采用常规法无法得到真实应力值, 并且常规法测得的正、负 Ψ 测试曲线不重合, 而且随着 Ψ 角的增大, 负方向测试的偏离更为严重。这种由于正、负 Ψ 转动时的照射面积不对称使测试结果产生误差, 负 Ψ 方向测试时情况更为严重。这就需要对弹性模量、测量方法进行一系列修正, 方能得到准确的应力结果。

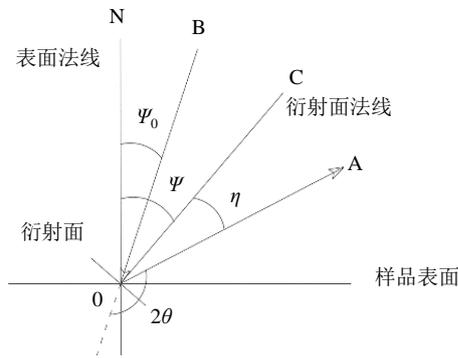


Figure 1. Schematic diagram of X-ray stress measurement

图 1. X 射线应力测量原理示意图

相比于常规法, 侧倾法具有一系列的优点, 如吸收因子与 Ψ 角无关, 不必进行吸收校正, 适合测量某些形状复杂工件及可选用低 θ 角线条进行测量等, 因而在国内外普遍受到重视。侧倾法又分为有倾角侧倾法和无倾角侧倾法[3]。

2.1.2. X 射线衍射法-侧倾法

1) 有倾角侧倾法

有倾角侧倾法中入射线 BO 对 NOX 平面有一个负 η 的倾角, 衍射晶面法线 OC 同常规法一样, 仍落在 NOX 平面上如图 2 所示。因而常规法中所反映的关系式仍然存在, 只需把式中的 Ψ 改作 Ψ_0 即:

$$2\theta = a \sin^2 \psi_0 + C \quad (4)$$

$$\sigma_x = K\alpha = K \frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2 \psi_0} \quad (5)$$

有倾角侧倾法的测量计算步骤与常规法相同。

2) 无倾角侧倾法

无倾角侧倾法中, 入射线 BO 处在 NOX 平面上, 而衍射晶面法线 OC 不再处于 NOX 平面上(两者之间有一个倾角 η , 如图 3)。这就破坏了推导常规法公式的一个重要前提, 不能再像有倾角侧倾法那样简单搬用常规法应力计算公式, 而必须重新建立推导自己的应力计算公式[3]。得出无倾角侧倾法应力的计算公式(具体推导见参考文献[3])。

$$2\theta = a \sin^2 \psi_0 + b \sin \psi_0 + C \quad (6)$$

$$\sigma_x = K \sec^2 \eta_0 \times a \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = -K \csc 2\eta_0 \times b \quad (8)$$

文献[3]也对用无倾角侧倾法测量应力时产生的系统误差、常规法和侧倾法测量中的偶然误差, 应用条件等进行了讨论。

2.1.3. X 射线衍射法-掠射侧倾法

当膜很薄时, 参与衍射的薄膜的体积很小, 使得衍射强度很低, 有时甚至没有衍射峰出现。另外即使在衍射强度满足测试要求的情况下, 薄膜应力测试的 2θ - $\sin^2\Psi$ 曲线常常出现弯曲和震荡的现象。Dolle 和 Hauk 均认为, 晶粒的择优取向对这种弯曲有很大的贡献。于利根、徐可文等人曾提出 Seemann-Bohlin 修正方法[4], 该方法对超薄膜尤为适用, 但要求配以特殊的测角仪装置。因此, 需要一种透射深度浅,

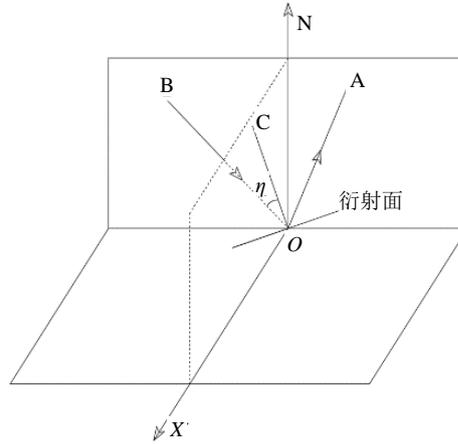


Figure 2. Schematic diagram of inclination angle method

图 2. 有倾角侧倾法原理示意图

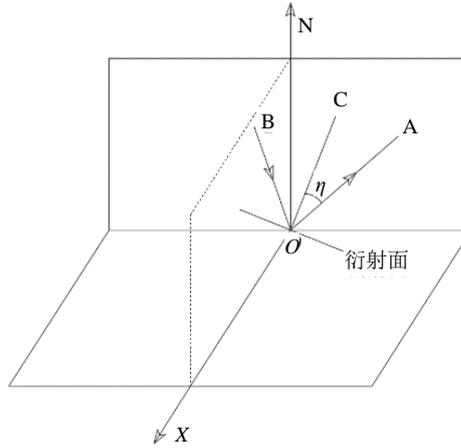


Figure 3. Schematic diagram of no inclination angle method

图 3. 无倾角侧倾法原理示意图

对材料的择优取向不敏感的方法来测试薄膜应力。在传统 Bragg-Brentano 衍射几何条件下结合常规法和侧倾法提出了掠射侧倾法[5]。如图 4 是掠射法衍射几何[5]示意图。掠射侧倾法的几何可以被认为常规法和侧倾法的综合。在操作过程中, 首先使样品按常规法负 ψ 方向转动 ω 角至 $A_1C_1D_1B_1$, 然后绕 ψ' 转至 $A_{11}B_{11}B_{11}A_{11}$ 位置通过改变侧倾角 ψ' 测出(hkl)面的晶格应变。均匀、连续和各向同性条件下掠射侧倾法的应力计算公式为[6]:

$$2\theta = \left(\frac{\sigma_x}{K} \cos^2 \omega \right) \sin^2 \psi' - \left(\frac{\tau_{xy}}{K} \sin 2\omega \right) \sin \psi' + \frac{\sigma_y}{K} \sin^2 \omega + \frac{2\nu}{E} \cot \theta_0 \frac{180}{\pi} (\sigma_x + \sigma_y) + 2\theta_0 \quad (9)$$

式中, 2θ 为衍射角; ω 为掠射预设角; ψ' 是样品预设 ω 后改变测试方向而变化的侧倾角; $2\theta_0$ 为无应力条件下的衍射角; σ_x 和 σ_y 为样品表面的正应力分量, 其方向如图所示; τ_{xy} 为切应力分量; E 和 ν 分别为样品的弹性模量和泊松比; K 为 X 射线应力常数, 其值为

$$\frac{1}{K} = -\frac{1+\nu}{E} 2 \tan \theta_0 \cdot \frac{180}{\pi} \quad (10)$$

人[8]利用能量色散法, 通过探测衍射峰的边缘并进行数据分析, 得到试样的内部应力信息。目前, 国际上在稳态堆上用此方法进行材料内部应力测量, 但并未广泛开展用。

2.3. Stoney 公式法

在薄膜残余应力的作用下, 镀有薄膜的基底会发生挠曲, 这种变形尽管很微小, 但通过激光干涉仪或者面轮廓仪, 能够测量到挠曲的曲率半径。基底挠曲的程度反映了薄膜残余应力的大小, Stoney 给出了二者之间的关系:

$$\delta_f = \left(\frac{E}{1-\nu} \right) \frac{t_s^2}{6rt_f} \quad (14)$$

式中, t_f 和 t_s 分别对应于薄膜和基底的厚度; r 为曲率半径; E 和 ν 分别是基底的弹性模量和泊松比。根据该计算方法, 人们给出了各种薄膜应力的测试方法。

2.3.1. 悬臂梁法

利用如图 5 所示的机械式悬臂梁, 以相同的方法分别测量基底表面在镀膜前后自由端的位置, 然后计算处理得到自由端的位移量, 再通过修正后的 Stoney 公式(15)计算薄膜应力的大小。

$$\delta_f = \frac{E_s t_s^2 \sigma}{3(1-\nu_s) t_f L^2} \quad (15)$$

式中, E_s 为基片的杨氏模量; t_s 和 t_f 分别为基底的厚度和薄膜的厚度; σ 为基底自由端的挠度; ν_s 和 L 分别为基底的泊松比和基底的长度。这种测量方法适用于基片弹性好, 厚度均匀, 薄膜厚度与样品长度比值较小的样品。目前对于基底自由端的位移量的测量有目镜直视法、电容法、光杠杆法。

对于基底是圆形或长方形的材料一般用基片曲率法。

2.3.2. 基片曲率法

基片曲率法也采用 Stoney 公式, 装置如图 6 所示。该方法主要是通过测量基底镀膜前后的曲率变化来计算薄膜的应力。从几何学和力学原理推导出基片曲率变化与薄膜应力的对应关系:

$$\delta_f = \frac{E_s t_s^2}{6(1-\nu_s) t_f} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (16)$$

式中, E_s 为基片的杨氏模量; ν_s 为基片的泊松比; t_s 和 t_f 分别为基底的厚度和薄膜的厚度; R_0 和 R 分别是镀膜前和镀膜后的圆片的曲率半径。这种方法具有数据容易处理和保存、理论上精确度高、操作简便、实验设备体积小、节省空间等优点。基片曲率法只要能精确的测量 R 的值, 就可以计算出应力的大小。测量 R 值主要有轮廓法、干涉法包括牛顿环法和激光干涉法、激光束偏转法、光杠杆法等。

2.4. 磁测法

磁测法是一种新型的无损测量方法, 利用铁磁材料的磁致伸缩效应将应力的变化转化成可以测量的电量(如电压)来测量应力。其变换过程如下[9]:

$$F \rightarrow \Delta \bullet \rightarrow \Delta \mu \rightarrow \Delta R_m \rightarrow \Delta V$$

其中 $\Delta \bullet$ 为应力变化量; $\Delta \mu$ 为铁磁材料磁导率的变化量; ΔR_m 为磁路中磁阻的变化量; ΔV 为传感器输出电压的变化量。目前有巴克豪森效应法、磁应变法、磁性各向异性法等方法。磁测法具有仪器轻便、操作简单、测量速度快, 适应性强等优点。但此法只能应用于铁磁性材料, 且对材料结构等因素也较敏感, 因此限制了磁测法的应用。

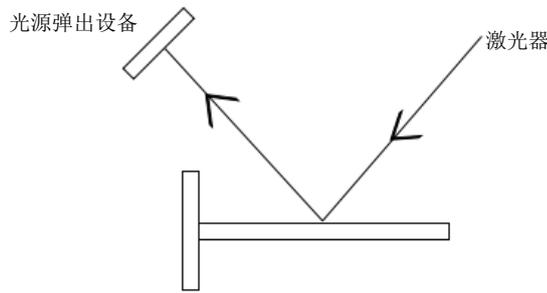


Figure 5. Diagram of micro-cantilever

图 5. 微悬臂梁示意图

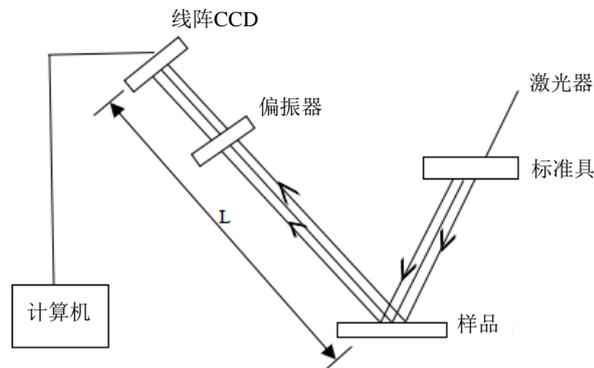


Figure 6. Diagram of substrate curvature method

图 6. 基片曲率法测量应力装置示意图

2.4.1. 巴克豪森效应(BN)法

铁磁材料中有许多以畴壁分开的具有自发磁化方向的磁畴，材料在受到应力和交变磁场作用时，内部应力或应变的变化引起磁导率、磁阻、磁通的变化在探测线圈中产生一系列的 Bakhausen 电脉冲信号。利用磁弹性仪测出输出电量 MP 为

$$MP = k\bar{\mu} \quad (17)$$

式中， $\bar{\mu}$ 传感器中巴克豪森噪声电压的均方值； k 比例系数。

因此，可以用磁弹性仪在构件上测量输出电量，由标定曲线得到残余应力值[10]。磁弹性仪测试构件表面残余应力的原理是当拉应力作用时，平行于拉应力方向的磁畴将增加，因而巴克豪森噪声幅度值增高， MP 值增高，当压应力作用时则相反[11]。

2.4.2. 磁性各向异性法

磁性各向异性法测量钢应力是利用含有残留应力的钢材被磁化时具有磁性各向异性的特点，利用磁性应力测定探头，通过输出线圈提取反映各向异性强弱的信号来判断钢材中的残留应力的大小和方向的方法。由于磁性各向异性，当被测钢材中有残留应力时有输出电压信号，无残留应力时输出电压为零。再利用标定曲线对放大后输出线圈中的输出信号进行残留应力换算，求出主应力差。

输出电压

$$U = K(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\varphi \quad (18)$$

式中 σ_1 ， σ_2 是作用在钢板上的主应力； φ 是 σ_1 和探头方向的夹角； K 是磁应变的常数。实际测量应力时，磁性探头在测量点测出最大输出电压时的方向即为主应力方向[12]。

磁性各向异性的方法测残留应力的方法和理论都是正确的, 该方法不但实现了测量残留主应力的方向和大小, 而且实现了测量各种强磁性材料的载荷主应力值和方向, 以及它们在 Z, Y 轴上的分量。

2.4.3. 磁应变法

在应力的作用下铁磁材料的磁导率在各个方向会发生变化即磁致伸缩。磁致伸缩的极值与应力有较好的对应关系。磁应变法是根据铁磁材料的磁致伸缩效应利用磁测仪来测量残余应力。磁测仪的基本原理如图 7 [12]是通过传感器和电路将磁导率的变化转化为电流的变化, 通过应力和电流量的关系来确定应力, 表达式为[13]。

$$I_2 - I_1 = \alpha(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (19)$$

式中, σ_1 为最大主应力, σ_2 为最小主应力; I_1 为最大主应力方向电流输出值, I_2 为最小主应力输出值; α 为灵敏系数。文献[13]给出了应力的具体算法。

磁测法测量应力的特点是检测速度快、非接触测量、适合现场, 但可靠性和精度差、消耗能源、污染环境且仅能用于铁磁材料。

2.5. 超声波法

超声波是一种机械波, 它能灵敏地反映试件内部的信息, 是一种无损测定残余应力的方法。超声应力测量是建立在声弹性理论上, 利用受应力材料中的声双折射现象测量残余应力。无应力作用时, 超声波在各向同性的弹性体内传播速度与有应力作用时传播速度不同[13]。传播速度的差异与所作用的主应力大小有关。在各向同性材料中, 由纵波声弹性关系可得到主应力和[14], 横波声弹性关系可得到主应力差[15]。在正交异性材料中, 每种波都与主应力和及主应力差有关。利用超声波波速与应力之间的关系来测量残余应力[16]。超声波检查残余应力分两种情况[11]。

2.5.1. 检测试件内部应力的原理

对于垂直平面应力作用面传播的超声偏振横波和垂直平面应力作用面传播的超声纵波, 传播速度 V_{T_1} , V_{T_2} 和 V_L (下标 T 代表横波, 下标 L 代表纵波)和主应力 σ_1 和 σ_2 之间存在如下关系

$$(V_{T_1} - V_{T_2})/V_{T_0} = S_T(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (20)$$

$$(V_L - V_{L_0})/V_{L_0} = S_L(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (21)$$

式中, V_{T_0} 应力为零时, 各向同性固体中超声横波速度; V_{T_1} , V_{T_2} 超声波在各向同性固体中超声横波速度; V_L 超声波在各向同性固体中超声纵波速度; V_{L_0} 应力为零时, 各向同性固体中超声纵波速度;

$S_T = \frac{4(\mu + n)}{8\mu^2}$ 超声横波声弹性常数; $S_L = \frac{\mu l - \lambda(m\lambda + 2\mu)}{\mu(3\lambda + 2\mu)(\lambda + 2\mu)}$ 超声纵波声弹性常数; S_T , S_L 分别为与 μ 和 λ 三阶弹性常数 l 和 m 有关的物理量, 可由试验求得。

2.5.2. 表面波测定试件表面应力的原理

根据半无限体在弹性应力作用下表现出的弹性各向异性, 可求的 X-Z 平面上表面波速度与表面应力的关系。如果无应力时的传播速度为 V_0 , 在 σ_1 方向的速度为 V_1 , σ_2 方向的速度为 V_2 ,

$$\text{则有} \begin{cases} \frac{V_0 - V_1}{V_0} = K_1\sigma_1 + K_1\sigma_2 \\ \frac{V_0 - V_2}{V_0} = K_2\sigma_1 + K_2\sigma_2 \end{cases} \quad [17] \quad (22)$$

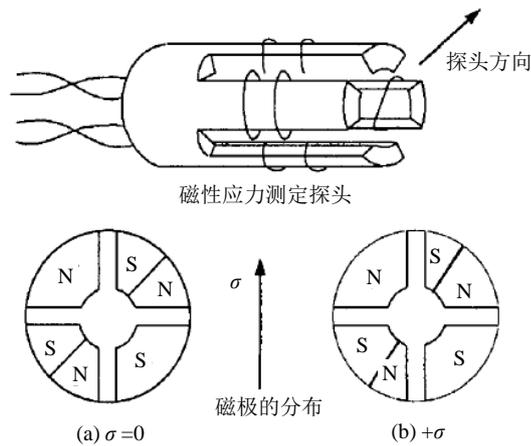


Figure 7. Diagram of magnetic probe [12]

图 7. 磁性探头及原理图[12]

式中, K_1 , K_2 分别为介质的二阶和三阶弹性常数; 由试验求得 V_0 , V_1 , V_2 和 K_1 , K_2 即可求得 X-Z 平面的两个主应力 σ_1 和 σ_2 。

超声波无损检测技术对于大多数介质而言穿透能力比较强, 在一些金属材料中穿透能力可达数米, 并且超声检测仪器方便携带到室外或现场使用, 现在发展已比较成熟。但是, 超声检测只能检测构件的表面应力, 所研究的对象主要是金属材料中的钢铁和铝制品, 其他的材料研究还需要大量的实验基础。目前超声波测试残余应力主要应用在三方面: ① 测量热残余应力; ② 测量螺栓应力; ③ 测量焊接应力。

3. 机械法

3.1. 小孔法

小孔释放法测量焊接残余应力是由德国学者 J. Mathar 于 1934 年提出的, 具有操作简单、测量方便、对构件损伤程度小等特点。小孔法测定的是所钻小孔中释放的平均残余应力, 现已得到广泛应用。根据钻孔是否钻通, 小孔释放法又可分为钻孔法和盲孔法。

3.1.1. 钻孔法

钻孔法测量残余应力的原理如图 8 是采用特制的箔式应变花粘贴在预测工件的表面上, 在应变花中心钻一小孔, 产生局部应力释放, 应变计感受到应力释放产生的应变, 通过测量应变计的应变利用弹性力学公式得到在孔深范围内的平均主应力(σ_1 , σ_2)和主应力方向角(θ)。孔周围应变的测量可采用机械测长法、电阻应变仪和光弹覆膜法等, 计算公式如下[18]:

$$\sigma_1 = (1/4A)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + (1/4B)\sqrt{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)]^2} \quad (23)$$

$$\sigma_2 = (1/4A)(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - (1/4B)\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)]^2} \quad (24)$$

$$\tan 2\theta = [(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - 2\varepsilon_2] / (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (25)$$

式中, ε_1 , ε_2 , ε_3 分别是应变计测得到的应变; A , B 为释放系数; θ 是残余应力 σ_1 方向与应变计 1 轴方向的夹角。

3.1.2. 盲孔法

目前关于盲孔残余应力释放的分析, 大致是在套用钻孔分析方法的基础上做些修正。

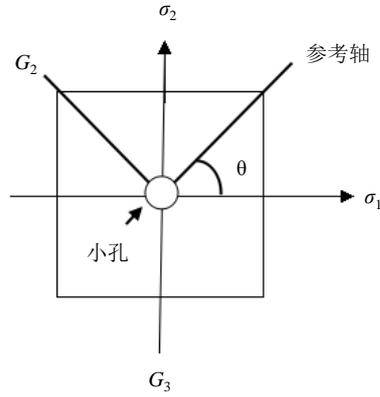


Figure 8. Diagram of drilling hole
图 8. 钻孔法示意图

若构件内存在残余应力场和弹性应变场, 在应力场内任意点处钻一小盲孔(直径为 d , 深为 h), 该处的金属和其中的残余应力即被释放, 原应力场失去平衡, 盲孔周围将产生一定量的释放应变(其大小与释放应力是相对应的), 并使原应力场达到新的平衡, 形成新的应力场和应变场, 测出释放应变 $\Delta\varepsilon$, 即可利用相应公式计算出初始测试点的残余应力。

用小孔释放法测量残余应力的最重要的一点是应变释放系数 A 、 B 的确定, 钻孔法应变释放系数可由 Kirsch 理论解直接计算出[19], 盲孔法应变释放系数则需用实验标定[20]-[22]。

钻孔应变释放系数:

$$\begin{cases} A = -\frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{a^2}{2r_1r_2} \\ B = \frac{2a^2}{Er_1r_2} \left[\frac{(1+\mu)a^2(r_1^2 + r_1r_2 + r_2^2)}{4r_1^2r_2^2} - 1 \right] \end{cases} \quad (26)$$

由于焊接应力场的特点, 在焊缝及其附近区域小孔周围由于应力的集中, 必然会产生一定量的塑性变形而进入塑性状态。应力集中系数对通孔为 3.0, 盲孔为 2.2~3.0。而小孔法计算残余应力的公式是在弹性范围内推导出来的, 在塑性状态下公式已不再适用, 为了减小测试的误差需要对测量结果进行修正。Scara-mangas 等人归纳出由弹性解求得的测量结果进行修正的经验公式[23]。

$$\sigma_c = \frac{\sigma'_c}{0.2(\sigma'_c/\sigma_s) + 0.87} \quad (27)$$

式中, σ'_s 测量应力; σ_c 修正后的应力; σ_s 材料屈服极限; 此公式的应用条件是 $\sigma'_c/\sigma_s \geq 0.65$ 。

目前, 小孔法测量残余应力的孔边塑性修正方法主要有通过拉伸试验, 作出材料应变释放系数的塑性修正曲线[24]; 通过拉伸试验, 作出材料基于孔边形状改变比能参量 S 的应变释放系数塑性修正公式[25]; 以及迭代修正法[26]和应变释放系数分级使用法[27]等。

由于应变片得到的只是长度范围内应变的平均值, 因此不适用于残余应力梯度大的情况。近年来, 基于钻孔法的特点一些光学测量方法, 如全息法, 电子散斑, 电子错位散斑, 云纹法等逐渐与钻孔法结合起来。光学方法具有全场测量且可靠得到靠近孔周围的残余变形信息的优点, 因此提高了钻孔法测量的精度。清华大学戴福隆教授[28]等人提出用云纹干涉测量的位移信息代替应变片的测量信息来确定残余应力, 并开发了一种可现场测量残余应力的云纹干涉钻孔系统, 并用此系统测量了铝合金焊接接头的残余应力。

4. 新型应力的测量方法

4.1. 裂纹柔度法[29] [30]

裂纹柔度法的原理是在被测物体表面引入一条深度逐渐增加的裂纹来释放残余应力, 通过测定相应的应变、位移或转角等量值, 来分析和计算残余应力。在实际测量中, 假设残余应力只沿深度存在较大应力梯度, 则残余应力 $\sigma_{x,y}(z)$ 的分布表示为一个级数展开式[31] [32]

$$\sigma_{x,y}(z) = \sum_{i=0}^n A_i P_i(z) \quad (28)$$

式中, A_i 为待确定的系数; $P_i(z)$ 是插值函数; $A = (C^T C)^{-1} C^T \varepsilon_{\text{measured}}$ [29], C 是柔度系数, 常采用有限法或者其他数值分析方法来求解。

4.2. 剥层曲率半径法[33]

传统的基片弯曲法是依据试样在单面镀膜过程中曲率半径的变化, 利用 Stoney 公式来计算薄膜的平均残余应力。硬质薄膜内部存在较大的生长应力, 过大时会导致基片发生塑性形变, 基片的塑性形变使曲率半径变化, 造成测量不准确。基于此缺点赵升升等人[33]提出了一种新的应力测量方法 - 剥层曲率半径法。对基片采用双层镀膜, 双面薄膜内应力共同作用, 基片不会产生弯曲现象。推导出被剥离薄膜的平均残余应力 σ 的计算公式(表达式与 Stoney 公式基本一致)如下:

$$\sigma = -\frac{E_s \cdot h_s^2}{6(1-\nu_s) \cdot h_f} \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (29)$$

式中, E_s 为基片的杨氏模量; ν_s 为泊松比; h_s 和 h_f 分别为基片和被剥离薄膜的厚度; R 和 R_0 分别为试片在薄膜剥离前、后的曲率半径。

赵升升等人也设计了一套光杠杆测量系统用来测定试片的曲率半径。剥层曲率半径法有效的消除水平放置的试片基材因自重产生的扰度对测量结果的影响, 提高了测量的精度。

4.3. 纳米压痕法

压痕残余应力测定法是采用硬度试验方法、借鉴盲孔法的应变测量思想、根据应力场干涉理论而形成的一种全新的残余应力测量方法。通过测定材料的载荷 - 位移曲线来评估材料硬度、弹性模量、塑性等性能。目前纳米压痕法测量残余应力有 Suresh 模型和 Yun-Hee Lee 两种理论模型, 其中 Yun-Hee Lee 模型又分为三种情况。

4.3.1. Suresh 模型

在 Suresh 模型[34]下拉应力状态时残余应力的计算公式:

$$\sigma^R = H \left[\frac{P_0}{P_T} - 1 \right] \quad (30)$$

压应力状态时残余应力的计算公式:

$$\sigma^R = \frac{H}{\sin \alpha} \left[1 - \frac{P_0}{P_T} \right] \quad (31)$$

式中, P_0 无应力状态的载荷; P_T 拉应力状态的载荷; α 压头边界与材料表面的夹角。

4.3.2. Yun-Hee Lee 模型

Yun-Hee Lee I 模型讨论的是等双轴的平面应力, 前提是假设硬度不变以及加载曲线斜率不变[35]。薄膜内的残余应力:

$$\sigma^R = P_{res} / A_c \quad (32)$$

Yun-Hee Lee II 模型[36]是将平面内的弹性残余应力视为等双轴平面应力($\sigma_x^R = \sigma_y^R = \sigma^R$, $\sigma_z^R = 0$), 把这平面应力张量分解为球形应力张量和应力偏量张量两部分, 得到残余应力

$$\sigma^R = \frac{3}{2} \frac{P_{res}^2}{R_3 P_T^4 + (R_2 - R_3 P_0) P_T^3 + (R_1 - R_2 P_0) P_T^2 + (R_0 - R_1 P_0) P_T - R_0 P_0} \quad (33)$$

Yun-Hee Lee III 是一种测量平面应力的理论模型[37], 将应力分为等双轴应力($\sigma_x^R = \sigma_y^R \neq 0$)、双轴应力($\sigma_x^R \neq \sigma_y^R \neq 0$)等 6 种状态。得到残余应力的计算公式:

$$\sigma_x^R = \frac{2\sigma_{avg}^R}{1+\kappa} = \frac{2}{1+\kappa} \cdot \frac{3(P_0 - P_T)}{2A_c^T} = \frac{3}{(1+\kappa)A_c^T} \cdot (P_0 - P_T) \quad (34)$$

其中, $\kappa = \sigma_y^R / \sigma_x^R$ 。

纳米压痕法具有极高的力分辨率和位移分辨率, 能连续记录加载和卸载期间载荷位移的变化, 特别适合薄膜材料力学性能的测量。

4.4. 溅射深度剖析法

沉积在不同材质上的薄膜均会呈现出一定的应力分布, 薄膜内的原子在应力的作用下, 会发生扩散现象, 极化现象是应力致扩散理论预测的特征现象。对于一个双层膜结构, 如果膜间存在着应力梯度(见图 9 中的插图), 按照 Larche 和 Cahn 非静水压固体扩散模型理论[38] [39], 在考虑双轴应力及非静水压条件下, 该应力梯度诱导的扩散成分分布就如图 9 中的虚线所示[40]。溅射深度剖析定量分析方法已成为表征薄膜中扩散效应的常用方法[41]-[43], 利用这一方法甚至可以确定扩散长度仅为 1 nm 的扩散系数[44]-[46]。依据深度剖析定量分析模型, 应力诱导扩散成分分布(图 9 中的虚线)所对应计算得到的深度剖析谱就如图 9 中的实线所示[47]。因此, 在应力梯度的作用下, 如果界面间元素的成分分布偏离了一般误差函数的成分分布, 就有可能导出应力在这一双层膜结构中的分布。从这个意义上来说, 利用深度剖析定量分析方法精确确定膜间的成分分布, 是可以表征应力在薄膜中的分布。目前, 利用该方法测量应力诱导扩散的现象还没有任何报道, 可能存在两个困难 1) 产生的应力梯度不够大, 应力致扩散效应不明显。2) 应力导致的扩散虽实际存在, 但很可能为深度剖析测量的各种失真因素所掩盖。所以, 从实验角度上来讲, 若使应力诱导扩散现象的测量成为可能需在薄膜内产生更大的应力梯度、并实现高分辨率的深度剖析测量。

5. 展望

根据以上应力测量方法的论述, 表 1 对各种应力测量方法的原理、适用对象及优缺点做了总结, 结果如下。

应力测量技术始于 20 世纪 30 年代, 目前已有十余种测试方法。在这些方法中中子衍射法、曲率法、压痕法主要应用于薄膜应力的测量。在机械检测法中钻孔法技术成熟、理论完善、能有效地测量残余应力, 但其带有破坏性、检测设备不便带到实地进行测量限制了该方法的发展。物理检测方法中超声检测法是一种新型的方法。X 射线衍射法具有代表性, 但由于 X 射线穿透能力有限, 只能测量试样表面应力的平均值, 并且其价格昂贵、测量条件要求严格目前大部分应用于实验室测量, 不方便进行现场测量。

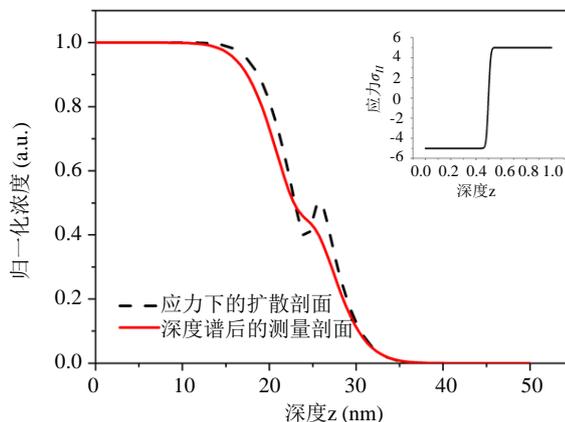


Figure 9. The vignettes said the change of stress in a double membrane system. The dash line is component distribution of diffusion. The solide line is depth spectrum of calculating

图 9. 插图表示双层膜体系中应力的变化, 图中虚线表示扩散的成分分布, 实线表示计算得到的深度谱

Table 1. The methods of stress measurement

表 1. 应力测量方法

方法	原理	适用对象	优缺点
X 射线衍射法	根据布拉格定律 $2d\sin\theta = n\lambda$, 当受力时 d 会发生变化, 通过 X 射线谱位偏移的大小计算应力。	常规法: 弹性各向异性的同性晶态材料。侧倾法: 脆性、不透明材料等。	无损、准确、可靠是确定陶瓷材料残余应力的最好方法, 但成本高、射线穿透能力有限只能测量样品表层的应力。
中子衍射法	与 X 射线衍射法类似, 通过研究衍射束的峰值位置和强度来获得应变和应力。	复合材料、多相材料等。	无损、穿透能力强、空间分辨率可达到毫米量级可以测量材料内部的残余应力。
Stoney 公式法	利用 Stoney 公式通过测量镀膜前后材料曲率半径的变化计算残余应力。	悬臂梁法: 适合基片弹性好、厚度均匀、薄膜厚度与样品长度比值较小的样品; 基片曲率法: 主要应用于基底是圆形或长方形的材料。	无损、可用于现场测量。
磁测法	根据铁磁材料受力后, 磁性的变化来测量内应力。	铁磁材料	仪器轻便、操作简单、测量速度快、适应性强但由于对材料结构等因素较敏感限制了它的应用。
超声波法	基于声弹性理论, 利用受应力材料中的声双折射现象测量残余应力。	主要是金属材料	无损、便于携带、可用于现场测量、穿透能力强、方向性好、可实现定向发射, 但测量精度低, 只能进行纵向或横向应力的单向测量。
剥层曲率半径法	对基片采用双层镀膜, 通过测量曲率的半径变化, 利用 Stoney 公式计算 σ 。	硬质薄膜材料	有效的消除水平放置的试片基材因自重产生的扰度对测量结果的影响, 提高了测量的精度。
小孔法	通过钻孔释放样品应力, 通过测量应变计上的应变利用弹性力学公式计算应力。	各向同性的弹性材料, 对一般金属材料要对公式进行修改。	操作简便、测量方便、测量精度高, 但对构件造成损伤。
裂纹柔度法	释放被测物的残余应力, 通过测定相应的应变、位移或转角等量值, 计算分析残余应力。	各种热(冷)轧板材表层与全厚残余应力分布的理想方法。	应变测量元件的灵敏度大, 具有更好的敏感性和精确性, 但测试误差有待研究。
纳米压痕法	采用硬度试验方法、借鉴盲孔法的应变测量思想、根据应力场干涉理论而形成的一种全新的残余应力测量方法。	薄膜材料	有极高的力分辨率和位移分辨率、能连续记录加载和卸载期间载荷位移的变化。
溅射深度剖析法	应力致扩散使扩散前后的深度剖面发生变化。	薄膜材料	需在薄膜内产生较大的应力, 深度剖析有较高的深度分辨率。目前该方法还没有任何报道。

新型应力测量方法中, 压痕法的物理背景较清晰, 相应理论较成熟, 测试结果与盲孔法测试结果接近, 较为可靠是残余应力测试技术发展值得关注的动向。关于溅射深度剖析定量分析法的测量还存在困难, 目前还没有任何报道。由此可见, 应力测量方法的发展趋势是开发一种无损、高精度、廉价、绿色环保、方便携带可随时进行在线测量的新方法。并且随着科学技术的发展, 出现的新的物理原理也为应力测量方法的发展提供新的方向。

参考文献 (References)

- [1] 刘伟香, 邓朝晖. 工程陶瓷磨削表面残余应力测试[J]. 现代制造工程, 2005(2): 99-102.
- [2] 吕克茂. 残余应力测定的基本知识——第四讲 X 射线应力测定方法(一) [J]. 理化检验-物理分册, 2007, 43(7): 349-354.
- [3] 金属研究所疲劳研究组. 入射线无负 η 倾角侧倾法 X 射线应力测定技术[J]. 金属学报, 1997, 13(Z1): 1-22.
- [4] 于利根, 白辰东, 陈华, 徐可为, 何家文. Seemann-Bohlin 薄膜应力测试方法的修正[J]. 金属学报, 1993(4): B187-B192.
- [5] 徐可为, 高润生, 于利根, 何家文. 薄膜应力测定的 X 射线掠射法[J]. 物理学报, 1994, 43(8): 1295-1300.
- [6] 何家文. 提高淬火钢 X 射线应力测定准确度——兼评平行光束法[R]. 科学技术报告, 西安: 西安交通大学, 1975.
- [7] D.拉达伊, 著. 焊接热效应温度场、残余应力、变形[M]. 熊第京, 郑朝云, 史耀武, 译. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [8] 王姝馥, 刘丽鹃, 陈喜平, 等. 能量色散法在铁单晶应力测量中的应用[J]. 物化检验-物理分册, 2012, 48(7): 425-427.
- [9] 文西芹, 刘成文. 基于逆磁致伸缩效应的残余应力检测方法[J]. 传感器技术, 2002, 21(3): 42-44.
- [10] 徐虹, 滕宏春, 崔波, 等. 残余应力非破坏性测量技术的发展现状简介[J]. 理化检验-物理分册, 2003, 39(11): 595-598.
- [11] 李强, 周则恭. 基于磁弹性仪实测加工残余应力改进曲轴加工工艺[J]. 机械工程与自动化, 1992(2): 4-6.
- [12] 殷春浩, 刘海顺, 张雷. 一种测量钢材残留应力的磁性各向异性方法[J]. 测试技术学报, 2007, 21(1): 28-32.
- [13] 蒋刚, 谭明华, 王伟明, 何闻. 残余应力测量方法的研究现状[J]. 机床与液压, 2007, 35(6): 213-220.
- [14] Kion, G.S., et al. (1978) Acoustoelastic Imaging of Stress Fields. *Journal of Applied Physics*, **50**, 2607-2613. <http://dx.doi.org/10.1063/1.326268>
- [15] Hsu, N.N. (1974) Acoustical Birefringence and the Use of Ultrasonic Wave for Experimental Stress Analysis. *Experimental Mechanics*, **14**, 169-176.
- [16] 亚敏著. 云纹干涉钻孔法测量残余应力的实验研究与应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2003.
- [17] Jassby, K. and Saltone, D. (1982) Use of ultrasonic Rayleigh Waves of the Measurement of Applied Biaxial Surface Stresses in Aluminum 2024-T351 Alloy. *Material Evaluation*, **40**, 198-205.
- [18] 陈惠南, 潘安平, 张如一. 盲孔法测量残余应力的微机处理系统[J]. 机械强度, 1986(3): 37-38.
- [19] 侯海量, 朱锡, 刘瀚泉. 盲孔法测量 921A 钢焊接残余应力的应变释放系数的研究[J]. 船舶工程, 2003, 25(1): 57-60.
- [20] 袁发荣, 伍尚礼. 残余应力测试与计算[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1987.
- [21] 斐怡, 包亚峰, 唐慕尧. 盲孔法测定计算公式中 A、B 值的研究[J]. 机械强度, 1997, 19(1): 18-21.
- [22] 陈惠南. 盲孔法测量残余应力 A、B 系数计算公式讨论[J]. 机械强度, 1989, 11(2): 31-36.
- [23] 陆才善. 残余应力测试——小孔释放法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [24] Nawwar, A.M., Melachlan, K. and Shewchuk, J. (1976) A Modified Hole-Drilling Technique for Determining Residual Stresses in Thin Plate. *Experimental Mechanics*, **16**, 226-232. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02329273>
- [25] 赵海燕, 裴怡, 史耀武, 汪辉. 用小孔释放法测量焊接高残余应力时孔边塑性变形对测量精度的影响及修正方法[J]. 机械强度, 1996, 18(3): 17-20.
- [26] 李广铎, 刘柏梁, 李本远. 孔边塑性变形对测定焊接残余应力精度的影响[J]. 焊接学报, 1986, 7(2): 7-93.
- [27] 陆才善, 侯德门. 高残余应力钻孔法测量[J]. 机械强度, 1988, 10(1): 34-38.

- [28] 戴福隆, 亚敏, 谢惠民, 吕坚. 云纹干涉与钻孔法测量残余应力的实验方法与系统[J]. 实验力学, 2003, 18(3): 313-318.
- [29] 王秋成, 柯映林, 邢鸿燕. 板类构件内部残余应力测试技术研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(3): 381-384.
- [30] 王秋成, 柯映林, 章巧芳. 7075 铝合金板材残余应力深度梯度的评估[J]. 航空学报, 2003, 24(4): 336-338.
- [31] Prime, M.B. (1999) Residual Stress Measurement by Successive Extension of a Slot: The Crack Compliance Method. *Applied Mechanics Reviews*, **52**, 75-96. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3098926>
- [32] Prime, M.B. and Hill, M.R. (2002) Residual Stress, Stress Relief, and in Homogeneity in Aluminum Plate. *Scripta Materialia*, **46**, 77-82. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)01201-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01201-5)
- [33] 赵升升, 华伟刚, 杜昊, 宫骏, 孙超, 李家宝. 一种测量硬质薄膜残余应力的新方法[J]. 金属学报, 2008, 44(1): 125-128.
- [34] Suresh, S. and Giannakopoulos, A.E. (1998) A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation. *Acta Materialia*, **46**, 5755-5767. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00226-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00226-2)
- [35] Lee, Y.-H. and Kwon, D. (2002) Residual Stress in DLC/Si and Au/Si Systems: Application of a Stress-Relaxation Model to the Nanoindentation Technique. *Journal of Materials Research*, **17**, 901-906. <http://dx.doi.org/10.1557/JMR.2002.0131>
- [36] Lee, Y.-H. and Kwon, D. (2003) Measurement of Residual-Stress Effect by Nanoindentation on Elastically Strained (100) W. *Scripta Materialia*, **49**, 459-465. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6462\(03\)00290-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00290-2)
- [37] Lee, Y.-H. and Kwon, D. (2004) Estimation of Biaxial Surface Stress by Instrumented Indentation with Sharp Indenters. *Acta Materialia*, **52**, 1555-1563. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2003.12.006>
- [38] Larché, F. and Cahn, J. (1973) A Linear Theory of Thermochemical Equilibrium of Solids under Stress. *Acta Metallurgica*, **21**, 1051-1063. [http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90021-7](http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160(73)90021-7)
- [39] Cahn, J.W. and Larche, F.C. (1983) An Invariant Formulation of Multicomponent Diffusion in Crystals. *Scripta Metallurgica*, **17**, 927-932. [http://dx.doi.org/10.1016/0036-9748\(83\)90264-8](http://dx.doi.org/10.1016/0036-9748(83)90264-8)
- [40] Chakraborty, J. (2005) Diffusion in Stressed Thin Films. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- [41] Chakraborty, B.R., Dilawar, N., Pal, S. and Bose, D.N. (2002) SIMS Characterization of GaAs MIS Devices at the Interface. *Thin Solid Films*, **411**, 240-246. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00277-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00277-8)
- [42] Bukaluk, A. (2000) Influence of Depth Resolution on Interdiffusion Measurements in Polycrystalline Cu/Pd Multilayers. *Surface and Interface Analysis*, **30**, 597-602. [http://dx.doi.org/10.1002/1096-9918\(200008\)30:1<597::AID-SIA827>3.0.CO;2-K](http://dx.doi.org/10.1002/1096-9918(200008)30:1<597::AID-SIA827>3.0.CO;2-K)
- [43] Balogh, Z., Erdélyi, Z., Beke, D.L., Portavoce, A., Girardeaux, C., Bernardini, J. and Rolland, A. (2009) Determination of Grain Boundary Diffusion Coefficients in C-Regime by Hwang-Balluffi Method: Silver Diffusion in Pd. *Defect and Diffusion Forum*, **289-292**, 763-767. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.289-292.763>
- [44] Wang, J.Y., He, D., Zalar, A. and Mittemeijer, E.J. (2006) Interdiffusion in Microstructurally Different Si/Al Multilayered Structures. *Surface and Interface Analysis*, **38**, 773-776. <http://dx.doi.org/10.1002/sia.2189>
- [45] Bukaluk, A. and Bała, W. (1990) AES Depth Profile Studies of Interdiffusion in Thin Polycrystalline Au-Ag Multilayer Films. *Applied Surface Science*, **45**, 57-64. [http://dx.doi.org/10.1016/0169-4332\(90\)90020-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0169-4332(90)90020-Z)
- [46] Zhang, J., Hu, X.S., Xi, J.H., Kong, Z. and Ji, Z.G. (2013) Depth Profiling of Al Diffusion in Silicon Wafers by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **28**, 1430-1435. <http://dx.doi.org/10.1039/c3ja50115a>
- [47] 刘毅. 溅射深度剖析定量分析及其在薄膜材料中的应用[D]: [硕士学位论文]. 汕头: 汕头大学, 2014.