

文章编号: 1001-4888(2008)06-0539-10

在役设备材料弹塑性力学参数测定方法综述 ——小冲杆实验力学研究进展之一*

丁克勤¹, 寿比南¹, 吴永礼²

(1. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 20 多年以来, 采用小型试件的小冲杆试验技术来测量在役设备材料的各种力学参数已经取得了很大进展, 这个方法已经用来确定材料的弹性模量、屈服强度、塑性能、抗拉强度、韧-脆转变温度、断裂韧度、蠕变性能和黏塑性性能等各种力学性能。由于从小冲杆试验的测量结果来确定材料的力学性能是一个反问题, 因此, 与此有关的反问题分析方法也得到了相应的发展。本文系统综述小冲杆试验的测量技术及从测量数据来确定材料弹塑性参数的各种经验方法和计算方法, 例如有限元分析和参数法、反向有限元法、有限元和反方法、反向识别和人工神经网络、有限元优化和试验变形形状以及杂交反方法等。

关键词: 小冲杆试验; 弹性性能; 塑性能; 材料力学性能

中图分类号: TB302 **文献标识码:** A

0 引言

核电站是高度危险的设施, 所以核电站中的一些结构设计都是按比较保守的原则来设计的。上世纪 70 年代末, 一些国家的核电站运行时间即将到达设计的寿命, 于是, 人们面临停止使用或继续运行的选择。因此, 必须对在役结构的材料力学性能进行测试。由于这些材料长期处于高温或辐照等条件下运行, 在服役一段时间以后, 需要确定材料的性能有没有变化, 以便确定这些结构能否延寿安全运行。用传统的方法来测试材料力学性能, 所需试样的体积较大, 若从在役结构上提取, 必将对结构造成损伤, 因此, 这是不可行的。于是迫切需要有一种新的测量技术。从上世纪 80 年代开始, 一些科技工作者分别提出了一种微型试样试验方法, 即小冲杆试验 (Small Punch Test, 简称为 SPT)。这种测试技术所用的试样为约 0.5mm 厚的薄圆片, 圆片的直径为 3~8mm, 在现役结构上采样几乎对结构不产生损伤, 因此, 二十多年以来, 这种测试技术得到了极大的发展, 现在这个技术已经能测量材料的弹塑性性能、断裂韧度、韧-脆转变温度 (DBTT)、蠕变和损伤等各种力学参数, 应用范围也扩大到各个领域, 如电厂、压力容器和化工设施。此外, 有些材料在实际应用时就是比较薄的, 厚度只有几毫米, 例如涡轮机中的叶片和修复牙齿的聚合材料等, 用 SPT 技术来测量它们的力学性能更接近实际应用条件, 实际上, 世界上有关 SPT 的第一个规范就是美国材料试验协会 (ASTM) 制定的外科植入手术中使用的聚乙烯材料的试件标准 ASTM F1248^[1]。

本文将详细介绍小冲杆试验测量材料弹塑性力学参数的试验技术及数据分析方法。

1 小冲杆试验的测量技术

针对测量力学性能的不同参数, 小冲杆试验方法有不同的加载方法, 主要的有下列三种:

* 收稿日期: 2008-08-22; 修订日期: 2008-10-06

通讯作者: 丁克勤 (1968 -), 男, 中国特种设备检测研究院研发部主任, 博士, 研究员。E-mail: kqding@sina.com

(1) Manahan^[2,3], Huang^[4]和 Baik^[5]等先后应用图1所示的圆片弯曲试验(Disc Bend Test)来测量材料的力学性能,所用的冲压杆是头部为半球形的圆柱形小杆,杆的直径要小于试样的直径,后来的一些工作采用平头形圆柱杆,压力通过它下面的一个球形滚珠作用到试样上。这种情况下,试样在压力作用下产生弯曲变形,所以也称为圆片弯曲试验;

(2) Lucus等^[6]则用图2所示的装置进行剪切冲杆试验(Shear Punch Test),他们将圆柱杆直接压向圆片试样,这时试样的变形近似于纯剪切;

(3) Okada等^[7]用图3所示的装置进行微凸出试验(Micro-bulge test),采用气压从下向上作用在试样上,这种情况可以向试样施加均布载荷,图4为图3凸出试验所用的圆形模具。也有人用椭圆形模具测量材料各向异性参数的情况。

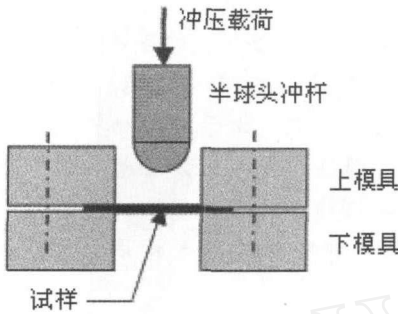


图1 小杆冲压试验
Fig.1 Small punch test

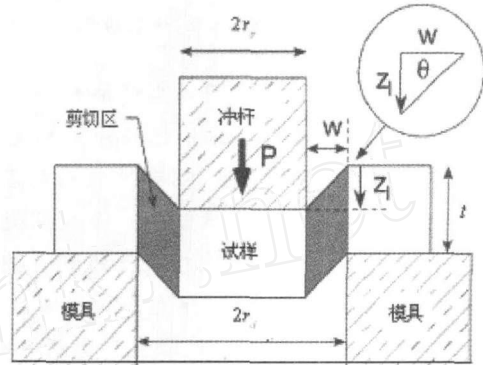


图2 剪切冲压试验
Fig.2 Shear punch test

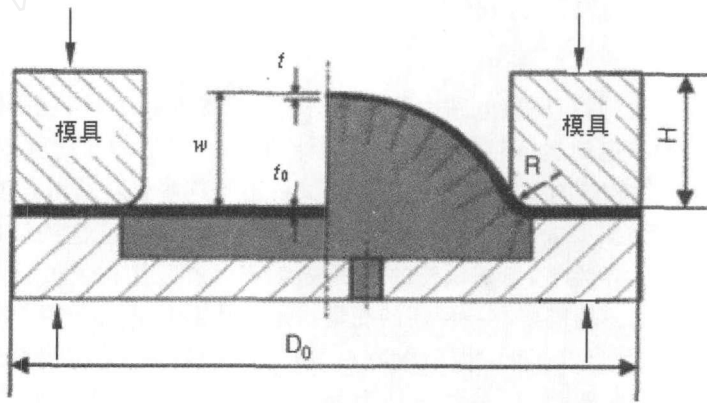


图3 凸出试验
Fig.3 Micro-bulge test

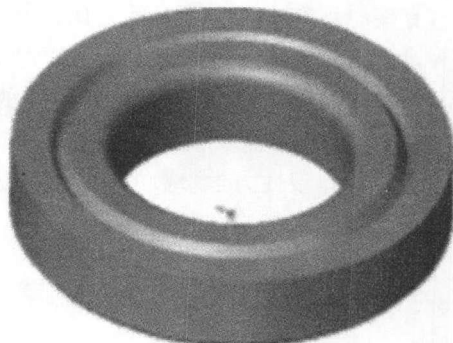


图4 凸出试验的圆形模具
Fig.4 Circular die for the bulge test

小冲杆试验的装置虽有不同,但测量的数据基本是相似的,即载荷-位移曲线,载荷指冲杆的作用力 P ,位移为试样中心点的位移 w 。典型的载荷-位移曲线如图 5 所示。

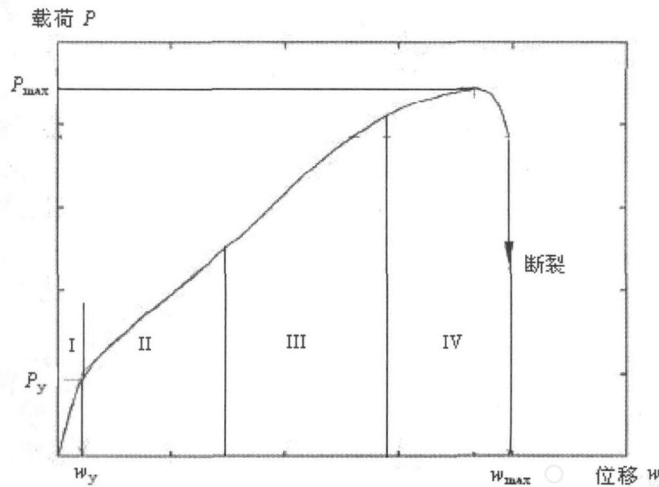


图 5 小杆冲压试验的载荷-位移曲线

Fig. 5 The load-displacement curve from small punch test

曲线可分为四个阶段: I. 弹性(即线性); II. 塑性; III. 塑性大变形(薄膜拉伸); IV. 塑性失稳。图中 P_{\max} , w_{\max} 为试验中记录的最大荷载和最大位移; P_y , w_y 为由线弹性过渡到塑性时的载荷和位移; 小冲杆载荷-位移曲线所包含的面积为断裂能量,用 $E_{SP} [J]$ 表示。

2 弹塑性力学参数的确定

弹塑性力学参数指材料的弹性模量、屈服强度、塑性本构方程中的硬化常数与指数和抗拉强度。下面介绍根据小冲杆试验测量的载荷-位移曲线确定这些力学参数的方法。

2.1 解析计算法和经验公式

2.1.1 弹性模量

如图 1 所示,把试样看作周边固支的薄圆板,半径为 R ,在半径为 R_1 中心圆内受均布载荷 q 的作用,根据弹性薄板理论,这种情况下圆板中心点的位移计算公式为^[8]:

$$W = \frac{qR^2 R_1^2}{16D} \quad (1)$$

其中 D 为板的弯曲刚度,标记 E 和 ν 为板的弹性模量和泊松比, t 为试样厚度,则:

$$D = Et^3 / [12(1 - \nu^2)] \quad (2)$$

因为总压力 P 为:

$$P = R_1^2 q \quad (3)$$

则有

$$w = \frac{PR^2}{16D} = \frac{3PR^2(1 - \nu^2)}{4Et^3} \quad (4)$$

或写为

$$E = \frac{3R^2(1 - \nu^2)}{4t^3} \left(\frac{P}{w} \right) \quad (5)$$

从上式可以看出,根据薄板理论,圆板在中心圆上受均布载荷作用时,中心点的位移与总载荷 P 有关,而与作用圆的半径 R_1 无关。由于实际的试验条件并不完全与理论分析的情况一致,所以,提出了一些与此公式相似的经验公式。

从图 5 的冲压试验载荷-位移可以看出,曲线第一段的线性段的斜率 P/w 应当与弹性模量 E 成正比。Kaneda 和 Mao^[9] 给出如下的经验公式:

$$E = \frac{P}{w} \left[1.2(1 + \nu) \ln \frac{R}{r} + \frac{0.75R^2(1 - \nu^2)}{t^2} \right] \quad (6)$$

其中 r 为冲头和试样的接触半径。这里假设在圆片试样弹性变形时,接触半径为常数,而且接触面之间没有摩擦。实际上在载荷增加时,接触半径也在增加,这使方程所得的值有误差。假设接触圆的半径为 R ,公式(6)与公式(5)相同。

Li 等^[10]通过一些试验对公式(5)加以评价。将黄铜试样的载荷 - 位移曲线的斜率 P/w 代入公式(5)后得到 $E = 89.8 \text{ GPa}$ 。而手册上的值为 115 GPa ,公式计算的值小 20% ,原因是冲压试验时受载荷的半径是随载荷的增加而增加的,也即接触面积增加,因此应力减小,所以计算的弹性模量小于实际的值。从不同厚度的试验可以看出,不同试样厚度的载荷 - 位移曲线有不同的斜率,表明弹性模量与 t^3 成反比是符合公式的。

罗红花等^[11]对公式(5)进行了修正:

$$E = \frac{3R^2(1 - \nu^2)}{4t^3} \left(\frac{P}{w} \right) \quad (7)$$

其中修正系数 则用有限元法来确定,根据 4 种材料的试验和有限元计算得到 $= 1.3284$ 。

Fleury 和 Ha^[12]应用[13]的解析表达式:

$$P = \frac{64Dw}{1.504R_1^2R^4[C_1 + 2C_2(1 - \nu^2) + \nu^4]} \quad (8)$$

其中

$$C_1 = 4\nu^2 - 5\nu^4 + 8\nu^2 \ln \nu + 4\nu^4 \ln \nu$$

$$C_2 = \nu^2(\nu^2 - 4 \ln \nu), \quad R_1 = R_1/R, \quad \nu = r/R$$

其中 R_1 为冲头与试样的接触半径; r 为冲头的半径。

2.1.2 屈服强度

为了确定材料的屈服强度,首先要在冲压试验的载荷 - 位移曲线上确定试样从弹性变形向塑性变形过渡时的载荷 P_y 。Manahan^[3]在分析冲压试验的载荷 - 位移曲线以后,将屈服强度相对应附近的曲线分为三段,如图 6 所示,第一段为直线 L_1 ,相应于试样弹性弯曲变形阶段,随后为曲线段 C ,相应于试样由弹性弯曲变形向塑性变形过渡,最后一段为塑性弯曲变形开始阶段,可近似为直线 L_2 ,对第 1,3 两段用直线方程拟合,对中间段用二次曲线拟合,如图 6 所示,从两条直线可得到一个交点的横坐标,将此代入曲线方程,即可得到较为精确的位移 w_y 和相应的 P_y 值。

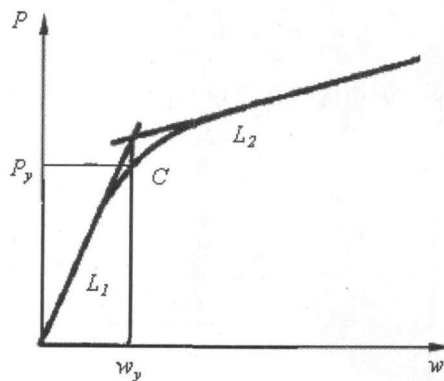


图 6 确定与屈服强度相对应的载荷和位移

Fig. 6 Determination of load and displacement for yield stress

Vorlicek 等^[14]对铁素体钢进行试验所得的一系列试验数据基础上,建议用下列的经验公式来估计屈服强度:

$$\sigma_y = P_y / t^2 \quad (9)$$

对于低合金铁素体钢 $\sigma_y = 0.36$ 。

若引用文献[8]的薄板理论解则有:

$$y = \frac{3 P_y (1 + \nu)}{2 t} \ln \left(\frac{4 R}{R_1} + 0.345 \right) \quad (10)$$

式中 R_1 为冲头和试样的接触半径:

$$R_1 = (1.6 r^2 + t^2)^{1/2} - 0.675 t \quad r < t/2 \quad (11)$$

$$R_1 = r \quad r > t/2$$

这里假设接触面之间没有摩擦。对于下面受约束的试样,上式可简化为:

$$y = \frac{3 P_y}{2 t^2} \quad (13)$$

Mao 等^[15]通过对 HT-60, PCA, HT-9, SUS304, A533B 五种材料的小冲杆试验得到的经验关系式为:

$$y = 0.36 P_y / t^2 \quad (14)$$

韩浩等^[16]对 11 种材料进行了小冲压试验,试样厚度为 0.5mm,得到的结果为:

$$y = 0.5 P_y / t^2 \quad (15)$$

2.1.3 抗拉强度

Vorlicek 等^[14]引用文[8]给出的解析式为:

$$b = \frac{P_{\max}}{2 r t} \quad (16)$$

式中 P_{\max} 为试验达到的最大载荷(参见图 6),这时试样开始破坏。

而 Mao^[15]等给出的经验近似公式为:

$$b = \frac{P_{\max}}{t^2} \quad (17)$$

对于一些铁素体钢 $\nu = 0.13$, $\nu = 0.32$ 。

韩浩等^[16]从 11 种材料试验的结果得出的经验关系式为:

$$b = 0.11 P_{\max} / t^2 - 77 \quad (18)$$

用小型剪切冲压试验来确定材料的力学性能的工作有文献[17 - 24]。在这种试验中,剪切应力根据下式计算:

$$\tau = \frac{P}{2 r_{\text{avg}} t} \quad (19)$$

其中 $r_{\text{avg}} = (r_{\text{punch}} + r_{\text{die}}) / 2$ 为冲压头半径 r_{punch} 和下夹具半径 r_{die} 的平均值; P 为作用的载荷; t 为试样的厚度。把剪切冲压试验曲线上从线性到非线性变形偏离点的切应力定义为剪切冲压试验的剪切屈服应力。在不能很好地确定偏离点时,必须用其他的方法计算剪切屈服应力。有人提出可以将 1% 的切应变偏差作为定义屈服切应力。Guduru 等^[19]等把不同材料的剪切冲压试验曲线改变为切应力和用试样厚度 t 归一化后的冲杆位移曲线,最后得到如下结果:

$$\tau_{\text{ys}} = 1.77 \sigma_{\text{ys}} \quad (20)$$

其中 σ_{ys} 和 τ_{ys} 为单向拉伸试验的屈服强度和剪切冲压试验的剪切屈服强度。按照米赛斯(von Mises)屈服准则, σ_{ys} 和 τ_{ys} 两者的关联系数为 $\sqrt{3} = 1.73$,按照屈雷斯卡(Tresca)屈服准则, σ_{ys} 和 τ_{ys} 两者的关联系数为 2.0。因此,剪切试验的结果相当好。

Guduru, Hankin, Toloczko, Campitelli 等^[25-28]用有限元法计算材料的力学参数。

2.2 数值方法

在塑性变形阶段,载荷 - 位移曲线为非线性,所以,用解析法和经验公式无法确定材料在塑性变形时的应力 - 应变关系中的参数。于是,研究人员的注意力转向有限元法。有限元法已经成为力学中常用的数值计算方法,在一般的有限元计算中,材料的力学性能参数和载荷是作为已知的数据,然后才能计算结构的位移、应变和应力等响应,而在小冲杆试验中,只知道载荷和位移,材料的力学参数是需要确定的量,这一类问题属于反问题。因此,在应用有限元法时,需要做一些改变才能推算材料的力学性能,现在已提出了不少方案。此外,人工神经网络也是分析反问题的一种新方法,此方法也在小冲杆试验的

力学参数识别中得到发展,下面介绍这以上方法在小冲杆试验力学中的进展。

2.2.1 有限元分析和参数法

Manahan 等^[2,3]在进行小冲杆弯曲试验后,首先假设一系列材料力学性能参数,再用 ABAQUS 有限元软件进行计算,得到相应的一系列载荷 - 位移曲线,将这些曲线分别与试验的载荷 - 位移曲线比较,从中选出与试验曲线最接近的曲线,与这条曲线相应的材料力学参数即为所测试材料的力学参数。在有限元计算中,采用塑性大变形理论,并考虑冲杆与试件之间的摩擦接触条件,最后成功地得到试件材料的弹塑性力学参数。

2.2.2 反向有限元法

Husain 等人^[29]采用反向有限元法(Inverse finite element)来确定材料的本构拉伸性能,即真应力 - 塑性真应变曲线。

反向有限元分析算法与直接有限元法的步骤比较如下:

在直接有限元法中,输入数据为:

(a) 材料的弹性模量;

(b) 标准拉伸应力 - 应变曲线上不同位置的真应力 - 真塑性应变数据,从屈服应力点开始,这点的塑性应变为零。

有限元分析的输出为微型试样的载荷 - 变形曲线。

在反向有限元法中,输入数据为:以分段线性的方式将试验的载荷 - 变形曲线输入,这些数据将用来与前面的有限元输入数据相比较。

输出结果为:

(a) 材料的弹性模量;

(b) 从塑性应变为零的屈服应力点开始,输出真应力 - 真塑性应变数据。

反向有限元的算法步骤如下:

(1) 把小冲杆试验的载荷 (P) - 位移 (δ) 曲线分为 n 个线性段,每一个线性段要分别与反向有限元分析的有限元 P - δ 相匹配;

(2) 对第一个线性段,输入数据为冲压载荷 P_1 (直到试验的小冲杆载荷位移曲线的第一个线性段),并假设初始的弹性模量值 E_{∞} ,用增加或减小 E_{∞} 的方法迭代产生有限元法 P - δ 曲线,直到这段曲线与试验的 P - δ 曲线的第一个线性段相一致,在迭代结束后, E_{∞} 的值将等于材料的弹性模量 E ,最大的 von Mises 应力 σ_1 将等于材料的屈服力 σ_y ,因为屈服刚开始,在这一点,的等效塑性应变 ϵ_{p1} 等于零,因此, (σ_1, ϵ_{p1}) 将是单向真应力 - 塑性真应变曲线上的第一个数据点。

(3) 对于第二个线性段,输入数据为:试验的 SP 载荷位移曲线第二段最后的冲压载荷 P_2 ,前一步计算所得的单向真应力 - 塑性真应变的第一个数据点 (σ_1, ϵ_{p1}),假定的第二个数据点 ($\sigma_{1(\infty)}, \epsilon_{p1(\infty)}$)。用增加或减小 $\sigma_{2(\infty)}$ 的方法迭代产生有限元法 P - δ 曲线,曲线要与 SP 试验所得的 P - δ 曲线的第二个线性段一致,迭代最后所得的最大等效 von Mises 应力 σ_2 和等效塑性应变 ϵ_{p2} 将是单向拉伸真应力 - 塑性真应变曲线上所求的第二个数据点。

(4) 依此类推,对于第 n 个线性段,输入数据为:试验的 SP 载荷位移曲线第 n 段最后的冲压载荷 P_n ,前面计算所得的单向真应力 - 塑性真应变的所有数据点,假定的第 n 个数据点 ($\sigma_{n(\infty)}, \epsilon_{pn(\infty)}$)。用增加或减小 $\sigma_{n(\infty)}$ 的方法迭代产生有限元法 P - δ 曲线,曲线要与 SP 试验所得的 P - δ 曲线的第 n 个线性段一致,迭代最后所得的最大等效 von Mises 应力 σ_n 和等效塑性应变 ϵ_{pn} 将是单向拉伸真应力 - 塑性真应变曲线上所求的第 n 个数据点。

这样,材料的弹性模量、屈服应力和单向拉伸的真应力 - 塑性真应变曲线上的数据点均已得到了。

Partheepanl 等^[30]也用反向有限元法来识别材料的本构性能,采用的试验是小型哑铃形平板的拉伸试验,是他们首创的一种试验方法。图 7 给出了这种试样和有限元网格,这种试样的特点是在分析时没有接触问题,并且是平面应力问题,所以计算要简单一些。小冲杆试验则要考虑冲压球与试样的接触问题。他们的反向有限元法与 Husain 等人^[29]算法是相同的。

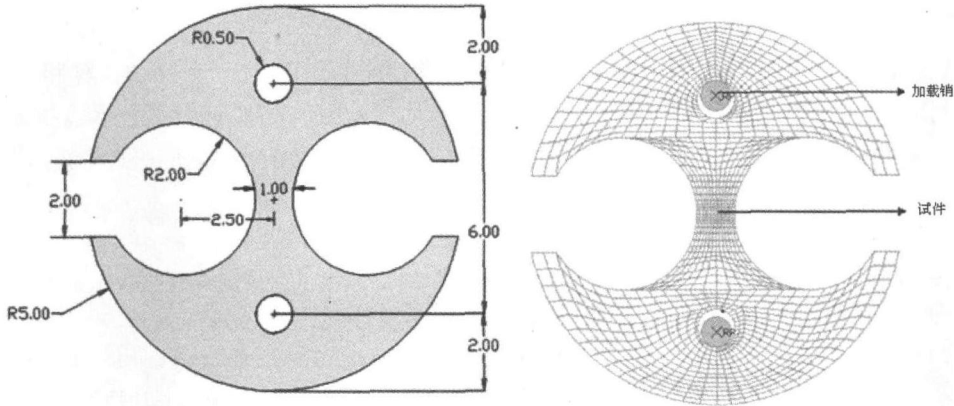


图 7 微形哑铃形试样及有限元网格

Fig. 7 Dumb-bell miniature specimen and Finite element mesh

2.2.3 有限元和反方法

Isselin^[31]等提出用反方法(Inverse methodology)和有限元相结合的方法来评估小球冲压试验所得到的材料本构关系。反方法即应用 Simplex 法,这是求解多维函数极值的一种算法,是 Spendley 等人^[32]首先提出的。Isselin 等先采用材料的塑性本构关系为 Hollomon 方程 $\sigma = k \epsilon^n$,所得到的双参数 k , n 很满意。但在用 Ludwik-Hollomon 的三参数本构关系 $\sigma = K(1 + \epsilon^m)$ 模拟拉伸曲线的均匀塑性区时,没有得到唯一的优化的一组参数值。Isselin 等认为三个塑性系数是相关联的,所以,反向模拟将得到不能重复的值。

Campitelli 等^[33]也进行了拉伸试验和小球冲压试验,用以上相同的有限元和反方法分析材料的力学性能。

2.2.4 反向识别和人工神经网络

Chamekh 等^[34]用凸出试验(Bulge Test)来测量材料在载荷作用下的响应,然后用人工神经网络来识别材料参数。Chamekh 等应用逆向传播的方法训练多层感知机,这是人工神经网络中最通用和多功能的形式,能处理非线性模型,而且有较高的精度。表示被识别图形的输入向量放在输入层,并分布到随后的隐藏层,最后通过加权连接分布到输出层。神经网络中的每一条神经元按照它的加权输入之和进行操作,并通过非线性的激活函数通过结果。

Abendroth^[35], Huber^[36], Yagawa^[37], Sumpter^[38]等也用人工神经网络来识别材料的各种力学参数。

2.2.5 有限元优化和试验变形形状

Egan 等^[39]认为,在以往的一些从小冲杆试验来确定材料性能的研究中,只采用载荷-位移曲线的数据,而忽略了试样变形形状所包含的有用的试验信息,因此提出了一个新的小冲杆试验方法,在试验中使用全场低相干涉(FF-LCI)测量技术对冲压中圆盘试样进行三维测量^[40],得到了试样截面形状的较全面的试验数据,测量试样变形形状的参数,然后用有限元模拟和形态搜索优化来解反问题,从而得到描述真应力-真应变关系 Ludwik-Hollomon 方程中的三个系数。他们认为较完善的试验数据可以使反问题的解有更好的重复性,对材料的性能更灵敏。

2.2.6 杂交反方法

Cheon 等^[41]提出的杂交反方法(Hybrid inverse procedure)实际上就是反方法、有限元模拟、优化和人工神经网络的结合。反方法分析的目标函数是小冲杆试验的试样在变形时测量的载荷-位移曲线和计算的载荷-位移曲线之间的差,通过模拟训练的方法来达到目标函数收敛到总体最小,在优化过程中,用人工神经网络来确定给定的材料参数下计算所得的载荷-位移曲线,最后用数值所得的数据来识别材料参数,取得较精确的结果。

3 结束语

小冲杆试验技术最早是用于核电站在役结构材料力学性能的测定,由于所用的试样相当小,对结构几乎不造成损伤,可以广泛地用于其他领域材料力学性能的测定,所以,这种测量技术有很好的工程应用前景。但是,从测量的数据来确定材料力学性能的数学方法比较复杂,尚待进一步发展。

参考文献:

- [1] ASTM, Standard Test Method for Small Punch Testing of Ultra-High Molecular Weight Polythene Used in Surgical Implants [S]. ASTM F2183-02, 2002.
- [2] Manahan M P, Argon A S, Harling O K. The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties[J]. Journal of Nuclear Materials, 1981, 103 & 104: 1545 - 1550.
- [3] Manahan M P. A new post-irradiation mechanical behavior test—the miniaturized disk bend test [J]. Nuclear Technology, 1983, 63: 295 - 315.
- [4] Huang F H, Hamilton M L, Wire G L. Bend testing for miniature discs [J]. Nuclear Technology, 1982, 57: 234 - 243.
- [5] Baik J M, Kameda J, Buck O. Small punch test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel [J]. Scripta Metallurgica, 1983, 17(1): 1443 - 1447.
- [6] Lucas G E, Sheckhead J W, Odette G R, et al. Shear punch test for mechanical property measurements in TEM Disc-sized Specimens [J]. Journal of Nuclear Materials, 1984, 122 & 123: 492 - 437.
- [7] Okada A, Lucas G E, Kiritani M. Micro-bulge test and its application to neutron-irradiated metals [J]. Transactions of the Japan Institute of Metals, 1988, 29: 99 - 108.
- [8] Young W C, Budynas R G. Roark's Formulas for Stress and Strain [M]. Seventh Edition, McGraw-Hill Companies, Inc. 2002: 492 (Roark 应力应变公式(第 7 版). 影印版, 清华大学出版社, 2003)
- [9] Kameda J, Mao X. Hardening and intergranular embrittlement in neutron-irradiated ferritic alloys [J]. Material Science and Eng. A, 1989, 122: 143 - 149.
- [10] Li H, Chen F C, Ardell A J. A Simple, Versatile Miniaturized Disk-Bend Test Apparatus for Quantitative Yield-Stress Measurements [J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22A: 2061 - 2067.
- [11] 罗红花, 陈刚, 翟鹏程. 材料弹性模量小型冲压实验测试的理论公式 [J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(2): 23 - 26 (Luo Hong-hua, Chen Gang, Zhai Peng-cheng. A New Formula for Elastic Modulus in Small Punch Test. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(2): 23 - 26 (in Chinese))
- [12] Fleury E, Ha J S. Small Punch Tests to Estimate the Mechanical Properties of Steels for Steam Power Plant: I. Mechanical Strength [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75: 699 - 706.
- [13] Pilkey W D. Formulas for Stress, Strain and Structural Materials [M]. New York, Wiley Interscience, 1998.
- [14] Vorlicek V, Exworthy L E, Flewitt P E J. Evaluation of a Miniaturized Disc Test for Establishing the Mechanical Properties of Low-alloy Ferritic Steels [J]. Journal of Material Science, 1995, 30: 2936 - 2943.
- [15] Mao X, Takahashi H. Development of a further-miniaturized specimen of 3mm Diameter for TEM disk small punch test [J]. Journal of Nuclear Materials, 1987, 150(25): 42 - 45.
- [16] 韩浩, 王志文, 关凯书. 小冲杆试验技术测定金属材料强度性能 [J]. 压力容器, 2004, 21(10): 13 - 16 (Han Hao, Wang Zhi-wen, Guan Kai-shu. Toughness Measurement of Metal Material by Small Punch Test Technology. Pressure Vessels, 2004, 21(10): 13 - 16 (in Chinese))
- [17] Toloczko M B, Hamilton M L, Lucas G E. Ductility correlations between shear punch and uniaxial tensile test data [J]. Journal of Nuclear Materials, 2000, 283-287, Part 2, 987 - 991.
- [18] Toloczko M B, Kurtza R J, Hasegawa A, Abe K. Shear punch tests performed using a new low compliance test fixture [J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 307-311, Part 2, 1619 - 1623.
- [19] Guduru R K, et al. Evaluation of mechanical properties using shear-punch testing [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 395, Issues 1-2: 307 - 314.
- [20] Guduru R K, et al. Shear punch tests for a bulk metallic glass [J]. Intermetallics, 2006, 14(12): 1411 - 1416.
- [21] Hamilton M L, Toloczko M B. Effect of low temperature irradiation on the mechanical properties of ternary V-Cr

- Ti alloys as determined by tensile tests and shear punch tests[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2000, 283-287: 488 - 491.
- [22] Hamilton M L, Toloczko M B, Lucas G E. Recent progress in shear-punch testing [M]// H. Ullmaier and P. Jung, Editors, Forschungszentrum Julich GmbH, 1995: 46 - 51.
- [23] Hankin G L, Toloczko M B, Hamilton M L, et al. Shear punch testing of 59Ni isotopically-doped model austenitic alloys after irradiation in FFTF at different He/dpa ratios[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1998, 258-263: 1657 - 1663.
- [24] Nomoto R, Carrick T E, McCabe J F. Suitability of a shear punch test for dental restorative materials[J]. *Dental Materials*, 2001, 17: 415 - 421.
- [25] Guduru R K, Nagasekhar A V, Scattergood R O, et al. Finite Element Analysis of a Shear Punch Test[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37A:1477 - 1482.
- [26] Hankin G L, et al. ASTM STP, 2000, 1366:1018 - 1028.
- [27] Toloczko M B, et al. ASTM STP, 2002, 1418:339 - 349.
- [28] Campitelli E N, Spätig P, Bertsch J, and Hellwig C. Assessment of irradiation-hardening on Eurofer97 and Zircaloy 2 with punch tests and finite-element modeling[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 400-401 (25): 386 - 392.
- [29] Husain A, Sehgal D K, Pandey R K. An inverse finite element procedure for the determination of constitutive tensile behavior of materials using miniature specimen[J]. *Computational Materials Science*, 2004, 31, Issues 1-2: 84 - 92.
- [30] Partheepan G, Sehgal D K, Pandey R K. An inverse finite element algorithm to identify constitutive properties using dumb-bell miniature specimen[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2006, 14:1433 - 1445.
- [31] Isselin J, Iost A, Golek J, Najjar D, Bigerelle M. Assessment of the constitutive law by inverse methodology: Small punch test and hardness[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2006, 352, Issues 1-3: 97 - 106. Proceedings of the E-MRS 2005 Spring Meeting Symposium N on Nuclear Materials (including the 10th Inert Matrix Fuel Workshop).
- [32] Spendley W, Hext G R, Himsforth F R. Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation. *Technometrics*[J]. 1962, 4(4):441 - 461.
- [33] Campitelli E N, Spätig P, Bonad é R, Hoffelner W, Victoria M. Assessment of the constitutive properties from small ball punch test: experiment and modeling[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, 335(3): 366 - 378.
- [34] Chamekh A, et al. Inverse identification using the bulge test and artificial neural networks[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177, Issues 1-3: 307 - 310. Proceedings of the 11th International Conference on Metal Forming 2006.
- [35] Abendroth M, Kuna M. Determination of deformation and failure properties of ductile materials by means of the small punch test and neural networks[J]. *Computational Materials Science*, 2003, 28(3): 633 - 644.
- [36] Huber N, Tsakmakis Ch. A neural network tool for identifying the material parameters of a finite deformation viscoplasticity model with static recovery[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, 191, Issues 3-5:353 - 384.
- [37] Yagawa G, Okuda H. Neural networks in computational mechanics. *Modelling Simulation*[J]. *Mater. Sci. Engrg.* 1996, 3:435 - 512.
- [38] Sumpter B G, Noid D W. On the use of computational neural networks for the prediction of polymer properties [J]. *J. Thermal Anal*, 1996, 46: 833 - 852.
- [39] Egan P, Welan M P, Lakestani F, Connelly M J. Small punch test: An approach to solve the inverse problem by deformation shape and finite element optimization[J]. *Computational Materials Science*, 2007, 40(1): 33 - 39.
- [40] Egan P, Welan M P, Lakestani F, Connelly M J. Random depth access full-field low-coherence interferometry applied to a small punch test[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(4): 523 - 529.
- [41] Cheon Jir-Sik, Joo Cheol-Hong. Small punch test for determining a flow stress by using a hybrid inverse procedure [J]. *Computational Materials Science*, 2008, 43(4):744 - 751

New Method for Measuring Material Elasto-Plastic Properties of in-Service Equipments —Advances in Small Punch Test Mechanics I

DING Ke-qin¹, SHOU Bir-an¹, WU Yong-li²

(1. China Special Equipment Inspection & Research Institute, AQSIQ, Beijing 100013, China;

2. Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract : During overpassed 20 more years, as a kind of new experimental technology, small punch test for measuring small size specimens has been developed to evaluate the material mechanical properties of in-service equipments. It is already used to determinate the elastic modulus, yield stress, plastic properties, endurance strength, ductile-brittle transition temperature, fracture toughness, creep properties, plasto-viscous properties and so on. Because of the constitutive property assessment from the small punch test is an inverse problem, therefore the related analysis methods for the inverse problem have been developed greatly. This paper systematically provides an overview of recent developments in small punch test technology including empirical and computational methods for determining elasto-plastic parameters from the measured data of small punch test. The computational methods involve finite element and parameter method, inverse finite element procedure, finite element and inverse methodology, inverse identification based on artificial neural networks, finite element optimization, shape deformation and hybrid inverse procedure et al.

Keywords : small punch test ;elastic properties ;plastic properties ; mechanical properties of materials