

用逐层钻孔的小孔法测量非均匀残余应力*

郑建毅^{1,2}, 庄明凤¹, 郑高峰¹, 何 闻²

(1. 厦门大学物理与机电工程学院 厦门, 361005) (2. 浙江大学浙江省先进制造技术重点实验室 杭州, 310027)

摘要 针对传统的小孔法只能测量试件内沿深度方向均匀分布的残余应力, 采用逐层钻孔的小孔法测量试件中的非均匀残余应力, 通过有限元法标定计算校准系数矩阵, 构建了一种实用的非均匀应力测试技术。首先, 用 ANSYS 软件构造试件和应变花粘贴的三维有限元模型, 采用分层加载的办法实现各层校准系数的仿真计算, 标定计算出钻孔深度达到 $h=0.5D$ 使应力完全释放时, 用 5 步逐层钻孔法构造 5 层非均匀应力所需的校准系数矩阵; 然后, 利用标定出的校准系数矩阵, 采用 5 步逐层钻孔的实验方法, 测量构建 Cr12MoV 淬火件的 5 层非均匀残余应力, 并与传统的小孔法进行测试比对。结果表明: 用有限元仿真的方法可以模拟试件中的非均匀残余应力场, 用于标定计算测量所需的校准系数矩阵; 通过 5 步逐层钻孔实验测量, 可以构建出 Cr12MoV 淬火件的 5 层非均匀残余应力。

关键词 逐层钻孔法; 非均匀残余应力; 校准系数矩阵; 有限元分析

中图分类号 O348; TG115; TH113

引 言

小孔法^[1-2]测量精度高, 可靠性强, 操作方便, 破坏性较小, 已经被美国材料实验协会 (ASTM)^[3] 确定为标准的残余应力测量方法, 因此, 小孔法广泛应用于测量各向同性的线弹性材料的残余应力。

小孔法测定的是所钻小孔中释放的平均残余应力, 它对于试件表面层下沿深度方向均匀的或变化梯度较小的残余应力测量准确性很高。对于试件表面层下非均匀的残余应力, 如果还用传统的小孔法测量得到均值, 不但误差较大, 而且不能反映出实际的应力分布梯度。逐层钻孔法^[4-6]可以测定沿深度方向非均匀的应力, 但是逐层钻孔法的数据处理比较复杂。Schajer 总结出的积分法较为实用, 且用积分法处理数据使得有限元分析较为方便。有限元法在标定小孔法的校准系数中, 已可以替代繁琐的实验标定^[7]。文献^[8-10]对逐层钻孔法的校准系数进行了仿真研究, 但是他们的模型将钻孔的层数分的很多, 导致每层的厚度太小, 这样在实际钻孔操作中很难控制准确的进给深度, 且处理的数据相差较大, 因而计算出的数据组主要是用于测量的误差分析和精度讨论。

本研究首先通过 ANSYS 软件构造试件和应变花粘贴的三维有限元模型, 对中心圆直径为

5.13 mm 的 A 型应变花的校准系数矩阵进行仿真标定计算; 然后, 采用分层加载的方法实现各层校准系数的有限元仿真计算, 从而构造所需的应变释放矩阵; 最后, 通过标定计算出的校准系数矩阵, 实验逐层钻孔法测量构建 Cr12MoV 淬火件的 5 层非均匀残余应力。

1 逐层钻孔法测量非均匀残余应力

1.1 非均匀残余应力的测量

图 1 是用典型的三向应变花测量非均匀残余应力的原理图。图中用阶梯形表示每一层的实际分布应力分别为 $(\sigma_x)_i$, $(\sigma_y)_i$ 和 $(\tau_{xy})_i$, i 表示从上往下的层序号。粘贴于上表面的应变花包括 3 个应变栅, 其中 1 号和 3 号应变栅分别与 x 轴和 y 轴重合, 2 号应变栅与 y 轴的夹角为 45° 。 D 是应变花的中心圆直径, D_0 为钻孔直径。

对于试件中沿深度方向非均匀分布的残余应力, 可采用分步逐层钻孔的方法进行测量, 如果在厚度方向上分的层数越多, 那么测量出残余应力的分布梯度就越精细。第 n 步钻孔后通过粘贴于上表面的应变花测量到的总应变^[3]可以表示为

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20120121120036); 国家自然科学基金资助项目 (50675200)
收稿日期: 2013-04-22; 修回日期: 2013-07-01

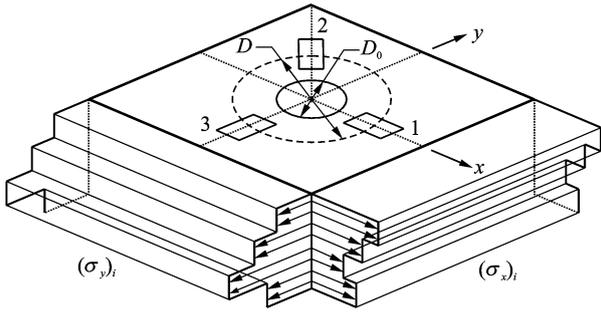


图 1 非均匀残余应力的测量原理

Fig. 1 Measurement principle of non-uniform residual stresses

$$\epsilon_n = \frac{1+\nu}{E} \sum_{i=1}^n \bar{a}_{ni} \frac{(\sigma_x)_i + (\sigma_y)_i}{2} + \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n \bar{b}_{ni} (\tau_{xy})_i \sin 2\theta + \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n \bar{b}_{ni} \frac{(\sigma_x)_i - (\sigma_y)_i}{2} \cos 2\theta \quad (1)$$

其中: n 为当前钻孔的步数; \bar{a}_{ni} 为第 i 层的等二轴向应力对第 n 步钻孔后释放应变影响的校准系数; \bar{b}_{ni} 为第 i 层的剪切应力对第 n 步钻孔后释放应变影响的校准系数。

图 2 是校准系数 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} 的原理图, 图中所示的是分 3 步逐层钻孔时第 1~3 层的分布应力影响各步钻孔释放应变的校准系数。从图中可以看出 $1 \leq i \leq n$, 即第 i 层分布的残余应力只对本层和下面层的校准系数有影响。另外, 这些校准系数都是独立于材料性质的常数, 只与应变花的型号尺寸、试件的几何尺寸、钻孔的直径和深度等相关。假设钻孔

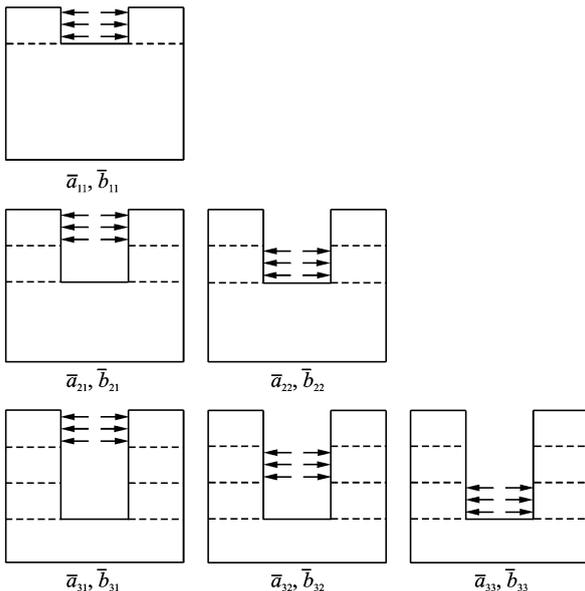


图 2 校准系数 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni}

Fig. 2 Calibration constants \bar{a}_{ni} and \bar{b}_{ni}

的总步数为 m 步, 则这些校准系数可以构成一个 m 维的矩阵 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} , 且它们都是上三角形的矩阵。

在第 n 步钻孔后, 粘贴的顺时针 45° 三向应变花可测得三个方向的应变, 分别用 ϵ_{n1} , ϵ_{n2} 和 ϵ_{n3} (对应 θ 值依次为 $0^\circ, 135^\circ, 270^\circ$) 表示

$$\begin{cases} \epsilon_{n1} = \frac{1+\nu}{E} \sum_{i=1}^n \bar{a}_{ni} \frac{(\sigma_x)_i + (\sigma_y)_i}{2} + \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n \bar{b}_{ni} \frac{(\sigma_x)_i + (\sigma_y)_i}{2} \\ \epsilon_{n2} = \frac{1+\nu}{E} \sum_{i=1}^n \bar{a}_{ni} \frac{(\sigma_x)_i + (\sigma_y)_i}{2} + \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n \bar{b}_{ni} (\tau_{xy})_i \\ \epsilon_{n3} = \frac{1+\nu}{E} \sum_{i=1}^n \bar{a}_{ni} \frac{(\sigma_x)_i + (\sigma_y)_i}{2} - \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n \bar{b}_{ni} \frac{(\sigma_x)_i + (\sigma_y)_i}{2} \end{cases} \quad (2)$$

为了用矩阵表示应力和应变之间的相互关系, 分别引入联合应变和联合应力^[3], 每一步钻孔后释放的联合应变表示为

$$\begin{cases} p_n = \frac{\epsilon_{n3} + \epsilon_{n1}}{2} \\ q_n = \frac{\epsilon_{n3} - \epsilon_{n1}}{2} \\ t_n = \frac{\epsilon_{n3} + \epsilon_{n1} - 2\epsilon_{n2}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

每一层的非均匀联合应力表示成

$$\begin{cases} P_i = \frac{(\sigma_y)_i + (\sigma_x)_i}{2} \\ Q_i = \frac{(\sigma_y)_i - (\sigma_x)_i}{2} \\ T_i = (\tau_{xy})_i \end{cases} \quad (4)$$

用矩阵表示联合应变和联合应力的相互关系为

$$\begin{cases} \bar{a}_{ni} \mathbf{P} = \frac{E}{1+\nu} \mathbf{p} \\ \bar{b}_{ni} \mathbf{Q} = E \mathbf{q} \\ \bar{b}_{ni} \mathbf{T} = E \mathbf{t} \end{cases} \quad (5)$$

其中: \mathbf{P}, \mathbf{Q} 和 \mathbf{T} 分别对应各层 P_i, Q_i 和 T_i 构造出的联合应力矩阵; \mathbf{p}, \mathbf{q} 和 \mathbf{t} 分别对应各步 p_n, q_n 和 t_n 构造出的联合应变矩阵。

因此, 采用这种逐步钻小孔的方法就可以构造出试件中 m 层的非均匀应力, 具体步骤如下: 首先, 记录每一步钻孔后粘贴于试件上的应变花测量到的三个方向的释放应变, 再用式 (3) 表示成联合应变的形式; 然后, 通过式 (5) 计算出联合应力的大小, 这里应变校准系数矩阵 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} 需要预先进行标定; 最后, 通过式 (4) 可以推导出每一层的非均匀残余应力

$$\begin{cases} (\sigma_x)_i = P_i - Q_i \\ (\sigma_y)_i = P_i + Q_i \\ (\tau_{xy})_i = T_i \end{cases} \quad (6)$$

1.2 标定校准系数矩阵的数据处理

矩阵 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} 中的校准系数与材料的性质无关,而与被测试件、应变花和所钻小孔的几何要素相关,对于不同的钻孔步数 m ,这些系数也是不同的。小孔法中的校准系数 \bar{a} 和 \bar{b} 是通过拉伸机加载某个方向的轴向应力进行标定,但是非均匀的残余应力无法在实验中分层加载实现,矩阵 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} 不能通过实验的方法进行标定,只能考虑用数值仿真分析的办法对模型分层加载。

m 维的矩阵 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} 是上三角形的矩阵,它们中都有 $m^2/2$ 个系数,通过分层加载的办法计算这些标定系数,数据处理非常复杂。用矩阵将式(2)表示的第 n 步钻孔后的释放应变展开为

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{n1} \\ \epsilon_{n2} \\ \epsilon_{n3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n1}+\bar{b}_{n1}}{2E} & 0 & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n1}-\bar{b}_{n1}}{2E} \\ \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n1}}{2E} & -\frac{\bar{b}_{n1}}{E} & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n1}}{2E} \\ \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n1}-\bar{b}_{n1}}{2E} & 0 & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n1}+\bar{b}_{n1}}{2E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\sigma_x)_1 \\ (\tau_{xy})_1 \\ (\sigma_y)_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n2}+\bar{b}_{n2}}{2E} & 0 & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n2}-\bar{b}_{n2}}{2E} \\ \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n2}}{2E} & -\frac{\bar{b}_{n2}}{E} & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n2}}{2E} \\ \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n2}-\bar{b}_{n2}}{2E} & 0 & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{n2}+\bar{b}_{n2}}{2E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\sigma_x)_2 \\ (\tau_{xy})_2 \\ (\sigma_y)_2 \end{pmatrix} + \dots + \begin{pmatrix} \frac{(1+\nu)\bar{a}_{ni}+\bar{b}_{ni}}{2E} & 0 & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{ni}-\bar{b}_{ni}}{2E} \\ \frac{(1+\nu)\bar{a}_{ni}}{2E} & -\frac{\bar{b}_{ni}}{E} & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{ni}}{2E} \\ \frac{(1+\nu)\bar{a}_{ni}-\bar{b}_{ni}}{2E} & 0 & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{ni}+\bar{b}_{ni}}{2E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\sigma_x)_i \\ (\tau_{xy})_i \\ (\sigma_y)_i \end{pmatrix} + \dots + \begin{pmatrix} \frac{(1+\nu)\bar{a}_{nm}+\bar{b}_{nm}}{2E} & 0 & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{nm}-\bar{b}_{nm}}{2E} \\ \frac{(1+\nu)\bar{a}_{nm}}{2E} & -\frac{\bar{b}_{nm}}{E} & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{nm}}{2E} \\ \frac{(1+\nu)\bar{a}_{nm}-\bar{b}_{nm}}{2E} & 0 & \frac{(1+\nu)\bar{a}_{nm}+\bar{b}_{nm}}{2E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\sigma_x)_n \\ (\tau_{xy})_n \\ (\sigma_y)_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

第 n 步钻孔后,如果单独施加第 i 层的 x 轴向应力场 $(\sigma_x)_i$ 进行仿真标定计算,此时粘贴于上表面的应变花测量到的释放应变 $(\epsilon_{n1})_i$, $(\epsilon_{n2})_i$ 和 $(\epsilon_{n3})_i$

可以表示为

$$\begin{cases} (\epsilon_{n1})_i = \frac{(1+\nu)\bar{a}_{ni}+\bar{b}_{ni}}{2E}(\sigma_x)_i \\ (\epsilon_{n2})_i = \frac{(1+\nu)\bar{a}_{ni}}{2E}(\sigma_x)_i \\ (\epsilon_{n3})_i = \frac{(1+\nu)\bar{a}_{ni}-\bar{b}_{ni}}{2E}(\sigma_x)_i \end{cases} \quad (8)$$

由于施加的 $(\sigma_x)_i$ 是已知的, E 和 ν 是材料的常数,通过式(8)中的 $(\epsilon_{n1})_i$ 和 $(\epsilon_{n3})_i$ 就可以计算出第 i 层的分布应力对第 n 步钻孔释放应变的影响系数,即校准系数可以通过式(9)算出

$$\begin{cases} \bar{a}_{ni} = \frac{E}{1+\nu} \frac{(\epsilon_{n1} + \epsilon_{n3})_i}{(\sigma_x)_i} \\ \bar{b}_{ni} = E \frac{(\epsilon_{n1} - \epsilon_{n3})_i}{(\sigma_x)_i} \end{cases} \quad (9)$$

这样,通过分层逐步加载的办法就可以由式(9)逐个计算出矩阵 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} 中的每一个校准系数。

2 校准系数矩阵的有限元标定

2.1 三维有限元仿真模型

中心圆直径为 5.13 mm 的 A 型应变花在应力测试中很常用,它是 45° 的顺时针三向应变花,尺寸如图 3 所示。由于实验装置的限制,钻孔深度如果太小,在实际测量时将很难控制,因此本研究将针对 5 步逐层钻孔开展仿真和实验研究。

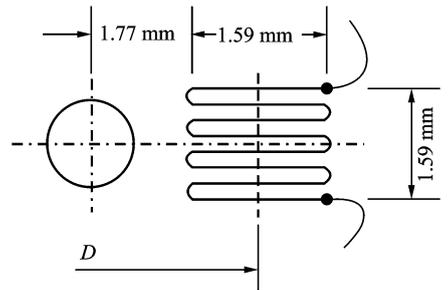


图3 A型应变花的尺寸(中心圆直径为5.13 mm)

Fig. 3 Size of type A rosette (the center circle diameter of 5.13 mm)

采用 ANSYS 软件构建该型号应变花和试件粘贴的三维模型,仿真计算出用 5 步逐层钻孔法测量的校准系数矩阵 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} 。用 20 节点的 SOLID95 单元划分网格,图 4 是网格划分后的模型图。分析时对模型采用 5 步逐层钻孔,分析中钻孔直径取推荐值 $D_0=0.4D$,钻孔深度 $h_0=0.5D$ (或 $1.25D_0$),

每一步的进给深度 $\Delta h=0.1D$ 。其中:图(a)是试件和应变花粘贴的整体三维模型,图中 l 为试件的边长, h 为试件的厚度,在 x 轴方向的侧面分层逐步施加 x 轴向的拉伸应力 $(\sigma_x)_i$; 图(b)和图(c)是图(a)中小孔附近和模型右上角的放大视图,图(b)中表示应变花的粘贴位置和方向,图中显示的孔已经完成 5 步逐层钻孔。由图(c)可以看出,在 $h_0=0.5D$ 的钻孔深度的范围内,模型被分成了 5 层,沿 x 轴方向的两个侧面对应被分成 5 个平面区域①~⑤,仿真标定时就是对这 5 层平面区域逐层沿 x 轴方向施加拉伸应力场 $(\sigma_x)_i$ 。

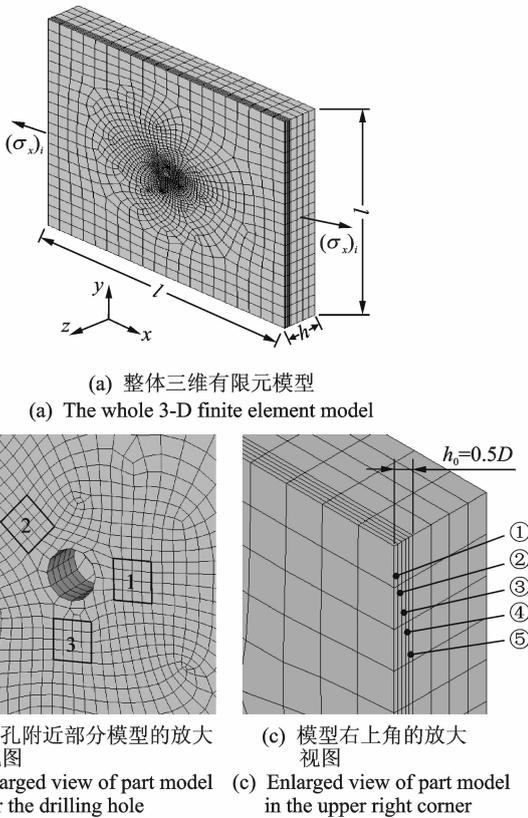


图 4 逐层加载的三维有限元模型

Fig. 4 3-D finite element model of incremental load

为了使数值计算更加准确,对模型的网格划分进行了一些特殊的操作:模型中采用扫掠方式生成网格,这样加载时更加符合平面应力分布的情况;应变花、小孔周围和钻孔深度内的网格划分都较为精细,其余部分网格划分较粗;应变栅部位的网格划分沿着栅的四周是规整的,且选用的 3D 单元 SOL-ID95 具有中间节点。

用 ANSYS 计算应力应变时需要用到材料的弹性模量 E 和泊松比 ν ,本模型中用钢的材料特性进行分析,取 $E=200 \text{ GPa}$, $\nu=0.3$ 。标定时尝试用不

同材料的特性(如硬铝、铜等)对模型进行计算,发现在相同的几何要素下校准得到的数据与钢的数据非常接近,这也验证了校准系数的材料不相关性。

2.2 校准系数矩阵的标定结果

用 ANSYS 对中心圆直径为 5.13 mm 的 A 型应变花测量非均匀残余应力的校准系数矩阵进行标定,分析中试件贴片平面的边长取 $l=16D$,试件厚度取 $h=2.0D$,钻孔直径取推荐值 $D_0=0.4D$,钻孔深度 $h_0=0.5D$,每一步的进给深度 $\Delta h=0.1D$,标定载荷 $(\sigma_x)_i=50 \text{ MPa}$ 。通过分层加载的办法,分析计算出 5 步逐层钻孔的校准系数矩阵如下

$$\bar{a}_{ni} = \begin{pmatrix} 0.103 \\ 0.090 & 0.088 \\ 0.067 & 0.065 & 0.062 \\ 0.050 & 0.048 & 0.045 & 0.044 \\ 0.039 & 0.037 & 0.035 & 0.034 & 0.032 \end{pmatrix}$$

$$\bar{b}_{ni} = \begin{pmatrix} 0.197 \\ 0.185 & 0.182 \\ 0.148 & 0.144 & 0.141 \\ 0.117 & 0.113 & 0.109 & 0.106 \\ 0.097 & 0.093 & 0.088 & 0.084 & 0.080 \end{pmatrix}$$

从标定出的校准系数矩阵 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} 可以看出:矩阵中每一行的系数是递减的,说明在第 n 步钻孔后,距离表面层越近的应力场对于应变花测量到的释放应变的影响系数越大;每一列的系数也是递减的关系,说明当钻孔深度增加时,各层的应力场对于释放应变的影响系数是减小的。

由于 ASTM E837-08 未给出钻孔深度达到 $h_0=0.5D$ 时测量非均匀应力的校准系数,没法进行数据对比分析。但是其对均匀分布应力的测量给出了钻孔深度为 $h_0=0.05D \sim 0.4D$ 时对应的校准数据,因此考虑将矩阵 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} 中每一行的数据求代数,与 ASTM E837-08 中施加均匀应力时对应深度的校准系数进行对比分析,结果见表 1。

表 1 校准系数矩阵的数据分析

Tab. 1 Data analysis of the calibration constants matrix

n	$\sum \bar{a}_{ni}$	ASTM	$\xi_1/\%$	$\sum \bar{b}_{ni}$	ASTM	$\xi_2/\%$
1	0.103	0.108	4.6	0.197	0.206	4.4
2	0.178	0.177	0.6	0.367	0.377	2.7
3	0.194	0.195	0.5	0.433	0.454	4.6
4	0.187	0.192	2.6	0.445	0.482	7.7
5	0.177	—	—	0.442	—	—

表 1 中 $\sum \bar{a}_{ni}$ 和 $\sum \bar{b}_{ni}$ 分别列出了第 n 步钻孔时,矩阵中该行在 $1 \leq i \leq n$ 时校准系数的代数;

ASTM 列出的数值是 ASTM E837-08 给出的对应钻孔深度时,测量均匀分布应力的校准系数; ξ_1 和 ξ_2 分别是 $\sum \bar{a}_{ni}$ 和 $\sum \bar{b}_{ni}$ 与 ASTM 推荐值的误差。由表 1 可见, ξ_1 和 ξ_2 计算出的误差值均在 8% 以内,说明用有限元方法标定出的校准系数矩阵可以适应均匀应力场的测量,也验证了该数值的合理性。这样通过标定的 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} 的数值,结合逐步分层钻孔的方法测量每一步的释放应变,通过式(5)和式(6)就可以构造出试件中的 5 层非均匀应力。

该有限元仿真标定技术也可以做一定的拓展,只要钻孔装置能够控制更小的进给深度,那么就能够用分层加载的有限元分析方法标定出所需的校准系数矩阵,从而构造出更精细的非均匀应力场。

3 5 步逐层钻孔的实验测量

实验材料选用合金工具钢 Cr12MoV 制作试样,该材料是加工伺服阀的滑阀副组件的常用材料,其化学成分的质量分数如表 2 所示(GB/T 1299-2000)。试样的尺寸为 60 mm×20 mm×8 mm,试样经 950~1 000 °C 淬火(油淬)产生残余应力,用相同的加工和热处理工艺制作一批试样进行残余应力测试。

表 2 Cr12MoV 的化学成分

Tab. 2 Chemical composition of Cr12MoV

%						
C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Co
1.45~1.7	≤0.4	≤0.4	≤11.0~12.5	0.4~0.6	0.15~0.3	≤1.0

钻孔采用 ZDL-II 型盲孔法测残余应力钻孔装置, YE2538 型多通道程控静态应变仪用于同时测量 3 个方向的释放应变,钻头选用进口的 PF503 硬质合金钻头,应力测试传感器选用中心圆直径为 5.13 mm 的 A 型应变花,在试样上表面的中心处贴片进行测量。钻孔时采用逐层钻孔法和单步直接钻孔的小孔法进行测试对比。逐层钻孔时钻孔直径取 $D_0 = 0.4D \approx 2$ mm,钻孔深度 $h_0 = 0.5D \approx 2.5$ mm,每一步进给深度 $\Delta h = 0.1D \approx 0.5$ mm,通过 5 步逐层钻孔测量每一步的释放应变,从而构建出 5 层的非均匀应力。单步直接钻孔时钻孔直径取 $D_0 = 2$ mm,钻孔深度 $h_0 = 2.5$ mm。

表 3 为常规的单步直接钻孔的小孔法的测量结果,其构造出的是沿坐标轴方向的应力场 σ_x 和 σ_y , 它们是整个钻孔深度范围内应力释放的均值。表 4 为 5 步逐层钻孔的测量结果, ϵ_{n1} , ϵ_{n2} 和 ϵ_{n3} 分别列出了第 n 步钻孔后应变花测量到的 3 个释放应变,

$(\sigma_x)_i$ 和 $(\sigma_y)_i$ 是通过逐层钻孔法构造出的对应第 i 层的沿坐标轴方向的应力场,对于计算出的每一层应力是在该层的厚度范围内应力释放的均值。由表 3、表 4 可见,通过 5 步逐层钻孔测量构造出的各层应力场的均值与常规的单步直接钻孔的测量结果比较接近,误差在 10% 左右,说明这种 5 步逐层钻孔法是较为实用有效的。

表 3 常规单步钻孔的测量结果

Tab. 3 Measurement results of conventional single-step hole-drilling

释放应变/ $\mu\epsilon$			分布应力/MPa	
ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_x	σ_y
-266	-224	-212	-246.70	-220.86

表 4 5 步逐层钻孔的测量结果

Tab. 4 Measurement results of five-step incremental hole-drilling

n	释放应变/ $\mu\epsilon$			i	分布应力/MPa	
	ϵ_{n1}	ϵ_{n2}	ϵ_{n3}		$(\sigma_x)_i$	$(\sigma_y)_i$
1	-125	-71	-85	1	-182.45	-140.62
2	-216	-153	-161	2	-184.09	-164.35
3	-277	-198	-206	3	-279.85	-240.18
4	-303	-234	-235	4	-356.98	-332.83
5	-318	-248	-245	5	-367.46	-322.14
各层平均值					-274.17	-240.02

将表 3 和表 4 中的测量数据用图 5 和图 6 表示。图 5 和图 6 分别是 x 向和 y 向的轴向应力的数据对比图,图中还画出了这些测量数值的 10% 偏差线,这是用小孔法测量时的系统误差。图中虚线边框、无填充的条状图是单步直接钻孔测量的应力值,它在整个钻孔深度范围内测量到的是一个应力均值;而实线边框、点填充的条状图是用 5 步逐层钻孔法测量的数值,它计算出了每一层的平均分布应力,从而构建出梯度分布应力场。从构建出的 5 层梯度

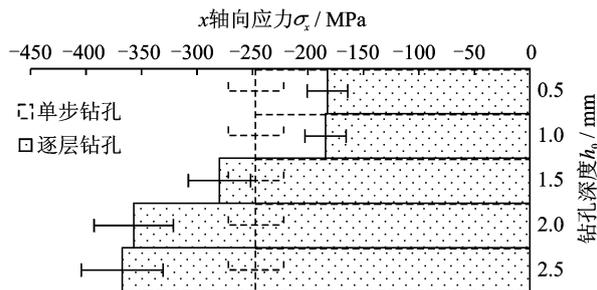


图 5 x 轴向测量应力的对比

Fig. 5 Comparison of the x -axis measurement stresses

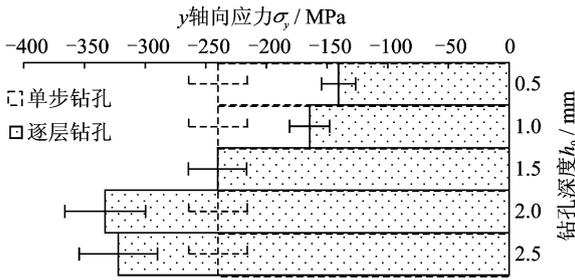


图 6 y 轴向测量应力的对比

Fig. 6 Comparison of the y-axis measurement stresses

分布应力场可见,该试样淬火产生的压应力往试样中部是越来越大的。

4 结 论

1) 用有限元仿真标定的方法可以模拟试件中非均匀的残余应力场用于计算校准系数矩阵。本研究用 ANSYS 软件构造试件和应变花粘贴的三维有限元模型,对中心圆直径为 5.13 mm 的 A 型应变花进行研究。通过分层加载的办法分析标定了钻孔直径为 $D_0 = 0.4D$ 、钻孔深度 $h_0 = 0.5D$ 、每一步的进给深度 $\Delta h = 0.1D$ 时,5 步逐层钻孔的校准系数矩阵 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} ,通过该矩阵可以测试构建出试件中的 5 层非均匀应力场。只要钻孔装置能够精确控制更小的进给深度,那么可用分层加载的有限元分析方法标定出所需的校准系数矩阵,从而构建出更精细的非均匀梯度应力场。

2) 校准系数矩阵 \bar{a}_{ni} 和 \bar{b}_{ni} 中同一行和同一列的系数都是递减的,说明当钻孔达到一定的深度时,距离表面层越近的应力场对于释放应变的影响系数越大。当钻孔深度增加时,从上往下的应力场对于释放应变的影响系数是减小的。

3) 对 Cr12MoV 淬火件试样进行残余应力的实验测试结果表明,通过 5 步逐层钻孔测量构造出的各层应力场的均值与常规单步直接钻孔的测量结果比较接近,说明 5 步逐层钻孔法较为实用有效。

参 考 文 献

[1] Schajer G S. Hole-drilling residual stress measurements at 75: origins, advances, opportunities[J]. *Experimental Mechanics*, 2009,50(2):245-253.
 [2] 张晓宏,赵海燕,蔡志鹏,等.小孔法测量残余应力时孔边塑性应变的有限元分析及修正[J]. *机械工程学报*, 2005,41(3):193-200.
 Zhang Xiaohong, Zhao Haiyan, Cai Zhipeng, et al. Fem analysis and a correction on plasticity effect at the

hole edge when using the centre hole method for measuring residual stress[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005,41(3):193-200. (in Chinese)
 [3] American Society for Testing and Materials. E837-08 standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method[S]. Pennsylvania: ASTM International, 2008.
 [4] Schajer G S. Hole-drilling residual stress profiling with automated smoothing[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2007,129(3):440-445.
 [5] Sicot O, Gong X L, Cherouat A, et al. Influence of experimental parameters on determination of residual stress using the incremental hole-drilling method[J]. *Composites Science and Technology*, 2004,64(2):171-180.
 [6] Stefanescu D, Truman C E, Smith D J, et al. Improvements in residual stress measurement by the incremental centre hole drilling technique[J]. *Experimental Mechanics*, 2006,46(4):417-427.
 [7] 郑建毅,何闻,沈润杰.小孔法中校准系数的有限元数值标定技术研究[J]. *机械工程学报*, 2011,47(14):26-31.
 Zheng Jianyi, He Wen, Shen Runjie. Research on finite element calibration technology of calibration constants in hole-drilling method[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011,47(14):26-31. (in Chinese)
 [8] Schajer G S. Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method: part I—stress calculation procedures[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1988,110(4):338-343.
 [9] Schajer G S. Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method: part II—practical application of the integral method[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1988,110(4):344-349.
 [10] 徐颖强,李剑锋,汪震隆.逐层钻孔法测试多层材料残余应力数值研究[J]. *西北工业大学学报*, 2009,27(1):39-42.
 Xu Yingqiang, Li Jianfeng, Wang Zhenlong. Numerical analysis of incremental-step blind hole drilling method for studying relaxation coefficients A and B of residual stresses in thermal barrier coatings[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2009,27(1):39-42. (in Chinese)



第一作者简介:郑建毅,男,1983年7月生,讲师。主要研究方向为残余应力消除与检测技术、振动计量与信号测试技术。曾发表《小孔法中校准系数的有限元值标定技术研究》(《机械工程学报》2011年第47卷第14期)等论文。
 E-mail: zjy@xmu.edu.cn

