



上海理工大学  
UNIVERSITY OF SHANGHAI FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY

# 有限元软件课程设计说明书

选题：题目 3-02 及 题目 4-02

班    级：2018级机械中德2班  
学    号：1814070213  
设 计 人：苗衍康  
指导教师：张克明  
日    期：2021.11

# 目录

引言	1
第一章 钻孔法问题描述及力学模型分析	2
1.1 问题描述	2
1.2 力学模型分析	2
第二章 题目 3-02 分析及处理	5
2.1 有限元模型建立及后处理	5
2.2 数据分析	6
2.3 标定数据对比分析	7
第三章 题目 4-02 分析及处理	9
3.1 有限元模型建立及后处理	9
3.2 数据分析	10
第四章 难点分析与软件使用体会	11
参考文献	14

## 引言

作为一种测量精度高、破坏性小的残余应力测量方法,小孔法被广泛应用于测量各种各向同性的线弹性材料的残余应力,并被美国材料试验协会认定为标准的残余应力测量方法.同样地,由于其问题的复杂性,它也可以被用来锻炼有限元的使用能力.

在本文中,作者将从课程提供的题目中选取两个,即题目 **3-02: 按非均匀应力场处理, type A 型 [1/16 in. nominal] 面平均 (0.05mm 增量步) 标定系数  $\bar{a}_{ni}$**  和题目 **4-02: 按非均匀立场处理, 单位静水压力情况下 type A 型 [1/16 in. nominal] 面平均 (0.05mm 增量步) 释放应变数据及相关曲线图**, 并对其进行分析.

# 第一章 钻孔法问题描述及力学模型分析

## 1.1 问题描述

图1.1是使用 A 型应变花测量非均匀残余应力的原理图. 图中的阶梯形图形表示的是每一层上受到的应力, 根据位置不同分别为  $(\sigma_x)_i$ ,  $(\sigma_y)_i$  和  $(\tau_{xy})_i$ . 其中,  $i$  表示层数. 钻孔的几何中心与应变花的几何中心重合. 随着钻孔程序的进行, 残余应力被逐步释放. 应变片的具体摆放方法在图1.2中展示. 图中的  $D$  和  $D_0$  分别表示应变花的直径和钻孔的直径.

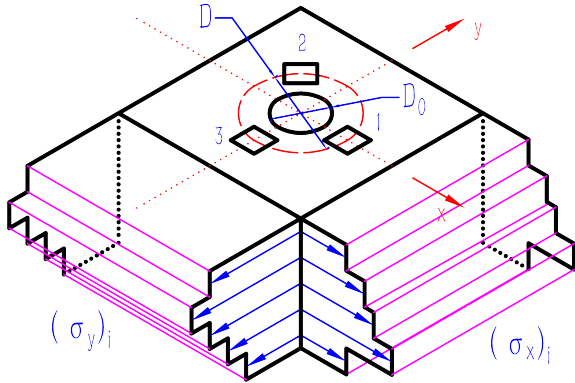


图 1.1: 非均匀残余应力测量原理图

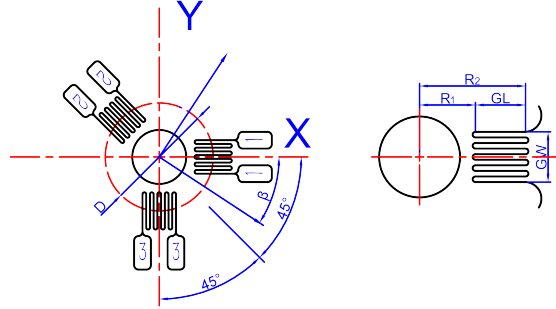


图 1.2: 应变片摆放方法

## 1.2 力学模型分析

对于我们要研究的非均匀应力场问题, 我们通常采用分步钻孔的方法对残余应力进行测量. 在经过  $n$  步钻孔后, 应变花测量到的应变  $\epsilon_n$  应为:

$$\epsilon_n = \frac{1+\nu}{E} \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_x)_i + (\sigma_y)_i}{2} \bar{a}_{ni} + \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_x)_i - \nu(\sigma_y)_i}{2} \bar{b}_{ni} \cos 2\theta + \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n \bar{b}_{ni} (\tau_{xy})_i \sin 2\theta \quad (1.2.1)$$

其中,  $\nu$  为材料的泊松比,  $E$  为材料的杨氏模量,  $\bar{a}_{ni}$  和  $\bar{b}_{ni}$  分别为第  $i$  层的各向同性应力校准矩阵和第  $i$  层的剪应力校准矩阵,  $\theta$  为某组应变片与  $x$  轴间的角度.

$\bar{a}_{ni}$  和  $\bar{b}_{ni}$  描述了经  $n$  步钻孔后的孔内由第  $i$  层内的单元应力引起的释放应变. 图1.3便以一个

$n = 4$  的钻孔的各向同性应力校准矩阵为例, 直观展现了  $\bar{a}_{ni}$  的物理含义. 另外, 如果我们假设钻孔的总步数为  $m$ , 则  $\bar{a}_{ni}$  和  $\bar{b}_{ni}$  可分别构成两个  $m$  维的矩阵  $\bar{\mathbf{a}}_{ni}$  和  $\bar{\mathbf{b}}_{ni}$ .

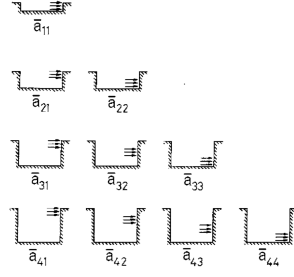


图 1.3:  $\bar{a}_{ni}$  的物理含义 [6]

在经过  $n$  步钻孔后, 待测工件表面上附着的应变花能够测得三个位置上的应变, 我们用  $\varepsilon_{n1}$ ,  $\varepsilon_{n2}$  和  $\varepsilon_{n3}$  表示, 三者分别对应第 1、2 和 3 组应变片测得的数据. 三者与  $(\sigma_x)_i$ ,  $(\sigma_y)_i$  和  $(\tau_{xy})_i$  的关系为:

$$\begin{cases} \varepsilon_{n1} = \frac{1+v}{E} \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_x)_i + (\sigma_y)_i}{2} \bar{a}_{ni} + \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_x)_i - (\sigma_y)_i}{2} \bar{b}_{ni} \\ \varepsilon_{n2} = \frac{1+v}{E} \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_x)_i + (\sigma_y)_i}{2} \bar{a}_{ni} - \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n \bar{b}_{ni} (\tau_{xy})_i \\ \varepsilon_{n3} = \frac{1+v}{E} \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_x)_i + (\sigma_y)_i}{2} \bar{a}_{ni} - \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_x)_i - (\sigma_y)_i}{2} \bar{b}_{ni} \end{cases} \quad (1.2.2)$$

为了能够使用矩阵来表示应力和应变之间的关系, 我们先引入如下三个变量: 经  $n$  次钻孔后的联合各向同性应变  $p_n$ 、经  $n$  次钻孔后的联合  $45^\circ$  剪切应变  $q_n$  和经  $n$  次钻孔后的 x-y 剪切应变  $t_n$ :

$$\begin{cases} p_n = \frac{\varepsilon_{n3} + \varepsilon_{n1}}{2} \\ q_n = \frac{\varepsilon_{n3} - \varepsilon_{n1}}{2} \\ t_n = \frac{\varepsilon_{n3} + \varepsilon_{n1} - 2\varepsilon_{n2}}{2} \end{cases} \quad (1.2.3)$$

每一层内的联合各向同性应变  $P_i$ 、联合  $45^\circ$  剪切应变  $Q_i$  和 x-y 剪切应变  $T_i$  为:

$$\begin{cases} P_i = \frac{(\sigma_y)_i + (\sigma_x)_i}{2} \\ Q_i = \frac{(\sigma_y)_i - (\sigma_x)_i}{2} \\ T_i = (\tau_{xy})_i \end{cases} \quad (1.2.4)$$

则用矩阵表述联合各向同性应变  $\mathbf{P}$ 、联合  $45^\circ$  剪切应变  $\mathbf{Q}$  和 x-y 剪切应变  $\mathbf{T}$  为:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{a}}_{ni} \mathbf{P} = \frac{E}{1+v} \mathbf{p} \\ \bar{\mathbf{b}}_{ni} \mathbf{Q} = E \mathbf{q} \\ \bar{\mathbf{b}}_{ni} \mathbf{T} = E \mathbf{t} \end{cases} \quad (1.2.5)$$

这里,  $\mathbf{p}$ 、 $\mathbf{q}$  和  $\mathbf{t}$  分别代表由各层的  $p_n$ 、 $q_n$  和  $t_n$  构造的矩阵.

于是, 如果我们逐步钻孔, 并记录下每一步钻孔后应变花测得的数据, 再结合式1.2.3和式1.2.5(假定  $\bar{a}_{ni}$  和  $\bar{b}_{ni}$  已知), 再通过式1.2.4即可得到每一层内的非均匀残余应力:

$$\begin{cases} (\sigma_x)_i &= P_i - Q_i \\ (\sigma_y)_i &= P_i + Q_i \\ (\tau_{xy})_i &= T_i \end{cases} \quad (1.2.6)$$

我们还可以在已知每一层内的非均匀残余应力的情况下反推  $\bar{a}_{ni}$  和  $\bar{b}_{ni}$  的大小. 我们将式1.2.2以矩阵的形式展开:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{n1} \\ \varepsilon_{n2} \\ \varepsilon_{n3} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \frac{(1+v)\bar{a}_{n1} + \bar{b}_{n1}}{2E} & 0 & \frac{(1+v)\bar{a}_{n1} - \bar{b}_{n1}}{2E} \\ \frac{(1+v)\bar{a}_{n1}}{2E} & -\frac{\bar{b}_{n1}}{E} & \frac{(1+v)\bar{a}_{n1}}{2E} \\ \frac{(1+v)\bar{a}_{n1} - \bar{b}_{n1}}{2E} & 0 & \frac{(1+v)\bar{a}_{n1} + \bar{b}_{n1}}{2E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\sigma_x)_i \\ (\tau_{xy})_i \\ (\sigma_y)_i \end{bmatrix} \quad (1.2.7)$$

在经  $n$  步钻孔后, 若我们单独对第  $i$  层施加  $(\sigma_x)_i$  和  $(\sigma_y)_i$ , 并进行静应力计算, 则应变花测得的释放应变  $(\varepsilon_{n1})_i$  和  $(\varepsilon_{n3})_i$  为:

$$\begin{cases} (\varepsilon_{n1})_i &= \frac{(1+v)\bar{a}_{ni} + \bar{b}_{ni}}{2E}(\sigma_x)_i + \frac{(1+v)\bar{a}_{ni} - \bar{b}_{ni}}{2E}(\sigma_y)_i \\ (\varepsilon_{n3})_i &= \frac{(1+v)\bar{a}_{ni} - \bar{b}_{ni}}{2E}(\sigma_x)_i + \frac{(1+v)\bar{a}_{ni} + \bar{b}_{ni}}{2E}(\sigma_y)_i \end{cases} \quad (1.2.8)$$

式1.2.8中除  $\bar{a}_{ni}$  和  $\bar{b}_{ni}$  外均为已知数, 故解得:

$$\begin{cases} \bar{a}_{ni} &= \frac{(\varepsilon_{n3})_i + (\varepsilon_{n1})_i}{(\sigma_y)_i + (\sigma_x)_i} \frac{E}{1+v} \\ \bar{b}_{ni} &= \frac{(\varepsilon_{n3})_i - (\varepsilon_{n1})_i}{(\sigma_y)_i - (\sigma_x)_i} E \end{cases} \quad (1.2.9)$$

借此, 我们可以计算出矩阵  $\bar{a}_{ni}$  和  $\bar{b}_{ni}$  中的每一个系数.

以上便是我们本次大作业所需的力学模型的分析, 也是我们完成大作业的思路.

整个建模、计算和后处理过程所用的 APDL 代码均可在[我的 github 仓库](#)中查看.

## 第二章 题目 3-02 分析及处理

### 2.1 有限元模型建立及后处理

根据题目要求, 模型中的各系数如下:

$D$	5.13mm	$D_0$	2.565mm	$R_1$	1.77mm
$R_2$	3.36mm	GL	1.59mm	GW	1.59mm
$H$	6.17mm	$h$	1mm	$\Delta h$	0.05mm
$l$	102.6mm	$(\sigma_x)_i$	100MPa	$(\sigma_y)_i$	100MPa
$\nu$	0.3			$E$	$2.1 \times 10^5 \text{MPa}$

图 2.1: 题目 3-02 中模型的系数

其中,  $H$  为工件厚度;  $h$  为钻孔深度;  $\Delta h$  为每步钻孔的深度;  $l$  为工件的边长.

为了更好地进行计算, 我们使用映射网格划分, 并利用 vdrag 命令建立整个的有限元模型. 使用单元类型为 SOLID186.[8]. 为了模拟钻孔的过程, 我们为钻孔深度内的模型单独划分单元, 最终结果如图2.2所示. 为了展示清晰, 在图2.3中, 我们将孔和周边区域放大展示.

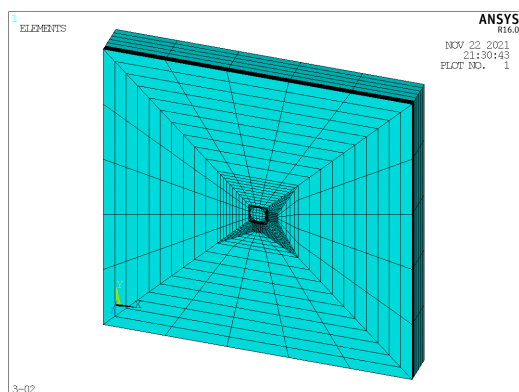


图 2.2: 建立的有限元模型

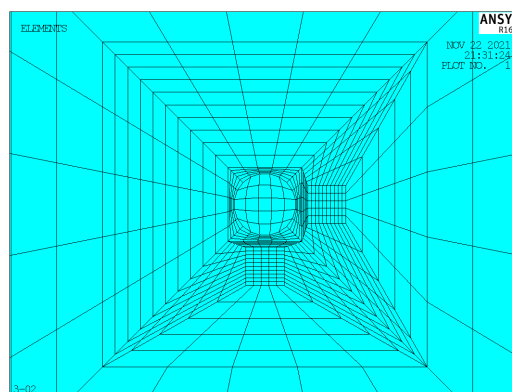


图 2.3: 局部放大

之后, 我们在工件中心处建立柱坐标系, 其  $\rho$  轴和  $z$  轴分别与原坐标系的  $x$  轴和  $z$  轴平行. 这样的柱坐标系有利于我们选择钻孔区域内的单元. 在选取需要的单元后, 我们根据“优先选择  $z$  轴坐标大的单元, 其次选择  $x$  轴坐标小的, 再选择  $y$  轴坐标小的”的原则对单元进行排序, 以便更好地模拟钻孔时

的情况. 由于利用 APDL 编写的排序程序运行过慢, 所以我们将排序用的数组输出为.dat 文件, 并将其导入 Matlab 中进行排序. 待排序完成后, 我们再将结果导出, 并用 APDL 读取即可.

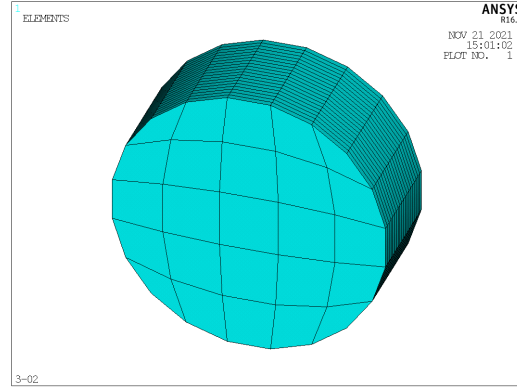


图 2.4: 钻孔区域内的单元

随后是施加载荷以及检测应变的环节. 本文的仿真过程所采用的原理如图2.5<sup>[5]</sup>所示: 图 (a) 表示构件钻孔前的构件应力状态, 图 (b) 表示在孔壁上施加与图 (a) 中孔壁上的应力相平衡的应力, 而图 (c) 表示钻孔后构件的应力状态. 从图中可以看出, 图 (b) 对应图 (c) 与图 (a) 的差值, 故以图 (b) 的状态加载所测得的应变便是钻孔前后的释放应变.

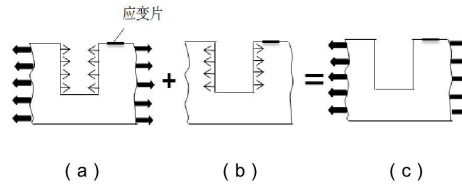


图 2.5: 模拟原理图

为了简化计算过程, 本文选择在双向等值应力场中, 即在  $(\sigma_x)_i = (\sigma_y)_i$  的情况下, 对校准矩阵的系数进行计算. 为了确定将要施加在孔壁上的载荷的大小, 我们需要将直角坐标系中的应力分量转化到极坐标系中. 极坐标转换公式如下:

$$\begin{cases} \sigma_\rho &= \sigma_x \cos^2 \phi + \sigma_y \sin^2 \phi + \tau_{xy} \sin 2\phi \\ \sigma_\phi &= \sigma_x \sin^2 \phi + \sigma_y \cos^2 \phi - \tau_{xy} \sin 2\phi \\ \tau_{\rho\phi} &= (\sigma_x - \sigma_y) \sin \phi \cos \phi + \tau_{xy} \cos 2\phi \end{cases} \quad (2.1.1)$$

由上式可知, 当  $(\sigma_x)_i = (\sigma_y)_i = 100\text{MPa}$  时, 我们需要在孔径上施加沿孔径方向的、大小为 100MPa 的应力. 在给工件底面四个顶点施加约束后, 便可进行计算.

## 2.2 数据分析

在得到各应变片的数据后, 我们再利用式1.2.9便可解得校准系数矩阵  $\bar{\mathbf{a}}_{ni}$ . 出于运行速度的考虑, 我们在处理数据时将采用与排序类似的方法, 即将结果导出为.dat 文件, 用 Matlab 读取并计算, 最后导



出结果如下所示:

孔深/mm	载荷步/mm									
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.05	-0.01221	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.10	-0.01474	-0.01296	0	0	0	0	0	0	0	0
0.15	-0.01694	-0.01545	-0.01307	0	0	0	0	0	0	0
0.20	-0.01894	-0.01742	-0.01554	-0.01273	0	0	0	0	0	0
0.25	-0.02072	-0.01918	-0.01736	-0.01516	-0.01209	0	0	0	0	0
0.30	-0.02231	-0.02073	-0.01893	-0.01684	-0.01444	-0.01124	0	0	0	0
0.35	-0.02371	-0.02208	-0.02028	-0.01825	-0.01599	-0.01349	-0.01029	0	0	0
0.40	-0.02492	-0.02326	-0.02144	-0.01943	-0.01725	-0.01491	-0.0124	-0.00928	0	0
0.45	-0.02597	-0.02429	-0.02245	-0.02044	-0.01829	-0.01604	-0.01369	-0.01126	-0.00828	0
0.50	-0.02687	-0.02517	-0.02331	-0.0213	-0.01917	-0.01695	-0.01471	-0.01243	-0.01011	-0.00731
0.55	-0.02704	-0.02559	-0.0239	-0.02203	-0.02002	-0.01793	-0.01581	-0.01368	-0.01154	-0.00913
0.60	-0.02733	-0.02589	-0.02423	-0.02238	-0.02039	-0.01834	-0.01627	-0.01421	-0.01217	-0.00997
0.65	-0.02759	-0.02616	-0.02451	-0.02267	-0.0207	-0.01867	-0.01663	-0.01461	-0.01263	-0.01055
0.70	-0.02781	-0.02639	-0.02475	-0.02291	-0.02095	-0.01894	-0.01691	-0.01492	-0.01298	-0.01097
0.75	-0.02799	-0.02658	-0.02494	-0.02311	-0.02116	-0.01916	-0.01715	-0.01517	-0.01326	-0.01129
0.80	-0.02815	-0.02674	-0.0251	-0.02328	-0.02134	-0.01934	-0.01734	-0.01537	-0.01348	-0.01154
0.85	-0.02828	-0.02687	-0.02524	-0.02342	-0.02148	-0.01948	-0.01749	-0.01553	-0.01365	-0.01174
0.90	-0.02838	-0.02698	-0.02535	-0.02353	-0.02159	-0.0196	-0.01761	-0.01566	-0.01379	-0.01189
0.95	-0.02846	-0.02706	-0.02543	-0.02361	-0.02168	-0.01969	-0.0177	-0.01576	-0.01389	-0.0120
1.00	-0.02852	-0.02712	-0.02549	-0.02367	-0.02173	-0.01974	-0.01776	-0.01582	-0.01395	-0.01207
孔深/mm	载荷步/mm									
	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.55	-0.00647	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.60	-0.0076	-0.00556	0	0	0	0	0	0	0	0
0.65	-0.00863	-0.00659	-0.00478	0	0	0	0	0	0	0
0.70	-0.00912	-0.00741	-0.00561	-0.00401	0	0	0	0	0	0
0.75	-0.00966	-0.00808	-0.00647	-0.00473	-0.00332	0	0	0	0	0
0.80	-0.00986	-0.00829	-0.00684	-0.00546	-0.00405	-0.00274	0	0	0	0
0.85	-0.00998	-0.00847	-0.00695	-0.0059	-0.00476	-0.00328	-0.00223	0	0	0
0.90	-0.01004	-0.00836	-0.00739	-0.00609	-0.00498	-0.00389	-0.00278	-0.00179	0	0
0.95	-0.01043	-0.00885	-0.00753	-0.00623	-0.00517	-0.00413	-0.00313	-0.00221	-0.00139	0
1.00	-0.01038	-0.00894	-0.008	-0.00671	-0.00563	-0.00459	-0.00356	-0.00262	-0.00181	-0.00105

图 2.6: 校准系数矩阵  $\bar{a}_{ni}$

## 2.3 标定数据对比分析

由于本文在仿真时使用的孔径  $D_0 = 2.565\text{mm}$ , 与标准文件中的孔径并不一致, 故需要在标准所提供的校准系数矩阵的基础上乘以  $(\frac{D_0}{2})^2 = (\frac{2.565}{2})^2 = 1.64480625$ . 实际用于对比分析的校准系数矩阵见附件: [标准校准矩阵](#), 在此不列出.

计算得到的校准系数与标准提供的校准系数之间的误差如下:

孔深/mm	载荷步/mm									
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.05	9.30%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.10	9.94%	10.38%	0	0	0	0	0	0	0	0
0.15	9.90%	11.26%	8.25%	0	0	0	0	0	0	0
0.20	10.06%	10.35%	10.11%	4.74%	0	0	0	0	0	0
0.25	10.43%	9.71%	9.05%	7.68%	0.95%	0	0	0	0	0
0.30	10.92%	9.38%	8.16%	6.67%	4.63%	-2.48%	0	0	0	0
0.35	11.64%	9.42%	7.48%	5.66%	3.85%	1.74%	-5.09%	0	0	0
0.40	11.40%	9.90%	8.01%	4.36%	3.32%	1.48%	-0.65%	-8.23%	0	0
0.45	11.50%	9.86%	7.98%	4.96%	2.77%	0.51%	-1.59%	-3.87%	-11.23%	0
0.50	11.66%	9.92%	8.04%	5.90%	2.76%	-0.03%	-2.50%	-4.71%	-6.47%	-13.06%
0.55	9.01%	8.48%	7.33%	5.45%	3.75%	1.69%	-1.60%	-2.59%	-3.85%	-7.49%
0.60	7.54%	7.02%	5.91%	4.17%	2.38%	0.18%	-2.36%	-4.66%	-6.46%	-9.49%
0.65	6.29%	5.84%	4.80%	2.85%	1.25%	-0.95%	-3.63%	-5.33%	-8.82%	-11.16%
0.70	5.27%	4.81%	3.76%	1.97%	0.23%	-2.01%	-4.60%	-6.48%	-9.19%	-12.81%
0.75	4.47%	4.00%	2.95%	1.10%	-0.57%	-2.86%	-5.40%	-7.40%	-9.65%	-13.65%
0.80	3.78%	3.30%	2.23%	0.38%	-1.21%	-3.41%	-6.15%	-8.20%	-10.85%	-13.91%
0.85	3.25%	2.76%	1.62%	-0.16%	-1.83%	-4.02%	-6.58%	-8.85%	-11.53%	-14.65%
0.90	2.77%	2.27%	1.19%	-0.74%	-2.34%	-4.54%	-7.00%	-9.24%	-12.24%	-15.18%
0.95	2.27%	1.76%	0.66%	-1.13%	-2.89%	-5.09%	-7.55%	-9.88%	-12.68%	-15.76%
1.00	1.74%	1.27%	0.09%	-1.78%	-3.43%	-5.65%	-8.20%	-10.47%	-13.28%	-16.34%
孔深/mm	载荷步/mm									
	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.55	-15.17%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.60	-14.85%	-17.70%	0	0	0	0	0	0	0	0
0.65	-13.13%	-17.37%	-20.23%	0	0	0	0	0	0	0
0.70	-15.31%	-17.19%	-20.87%	-22.75%	0	0	0	0	0	0
0.75	-15.25%	-16.60%	-18.77%	-23.95%	-25.28%	0	0	0	0	0
0.80	-16.26%	-19.26%	-20.61%	-21.89%	-24.96%	-27.81%	0	0	0	0
0.85	-17.75%	-20.01%	-23.92%	-22.67%	-22.38%	-29.49%	-30.34%	0	0	0
0.90	-19.14%	-23.54%	-21.71%	-24.75%	-25.35%	-26.76%	-29.80%	-32.86%	0	0
0.95	-17.67%	-20.76%	-22.72%	-25.45%	-27.17%	-28.95%	-31.34%	-33.95%	-35.39%	0
1.00	-19.19%	-21.20%	-19.62%	-21.65%	-23.58%	-25.40%	-28.67%	-31.83%	-34.03%	-37.92%

图 2.7: 误差

我们可以看到, 误差大致按照从上到下、从左到右的顺序逐渐减小, 在载荷步  $i > 0.50$  时甚至出现了  $-37.92\%$  的误差, 这可能是由于网格划分得不够合理导致的.

## 第三章 题目 4-02 分析及处理

### 3.1 有限元模型建立及后处理

根据题目要求, 我们使用 T700 碳纤维作为我们使用的正交各向异性材料, 另根据题目调整工件厚度. 更改后的各系数如下:

$D$	5.13mm	$D_0$	2.565mm	$R_1$	1.77mm
$R_2$	3.36mm	GL	1.59mm	GW	1.59mm
$H$	7.00mm	$h$	1.00mm	$\Delta h$	0.05mm
$l$	102.6mm	$(\sigma_x)_i$	100MPa	$(\sigma_y)_i$	100MPa
$E_x$	230GPa	$E_y$	15GPa	$E_z$	15GPa
$G_{xy}$	24GPa	$G_{yz}$	5.03GPa	$G_{xz}$	24GPa
$\nu_{xy}$	0.2	$\nu_{yz}$	0.25	$\nu_{xz}$	0.2

图 3.1: 题目 4-02 中模型的系数

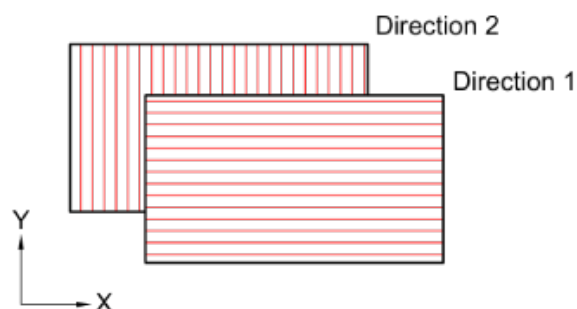


图 3.2: 各层材料方向

在定义完材料属性后, 我们根据图3.2中所展示的方式进行材料的铺设. 具体实现方法是选中指定高度内的单元, 再利用 **EMODIF** 命令更改单元的材料. 加载方式也由题目 3-02 中的逐层加载变为在整个孔壁上加载.

在计算完毕后, 我们将结果导出为 **.dat** 文件, 并将其导入 Matlab 绘制曲线. 绘图代码如下:

```
clear
clc

x = 0.05:0.05:1;

fid_EP1 = fopen('EP1.dat','r');
EP1 = fscanf(fid_EP1,'%f');
fid_EP3 = fopen('EP3.dat','r');
EP3 = fscanf(fid_EP3,'%f');
fclose('all'); % 关闭所有文件

p = plot(x,EP1,"r-o",x,EP3,"b--o");
p(1).LineWidth = 1;
p(2).LineWidth = 1;
xlim([0 1.05]);
xticks(0.05:0.05:1);
xlabel('Hole Depth / mm');
ylabel('Relieved Strain');
txt = legend({'$\varepsilon_1$', '$\varepsilon_3$'});
set(txt, 'Interpreter', 'latex');
legend('boxoff');
```

## 3.2 数据分析

解得应变数据如表3.3所示:

孔深/mm					
应变	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
$\varepsilon_1$	-6.4056E-09	-3.0312E-09	2.6945E-09	4.7314E-09	9.6589E-09
$\varepsilon_3$	4.6852E-09	7.6839E-09	8.3739E-09	1.3283E-08	1.3522E-08
孔深/mm					
应变	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
$\varepsilon_1$	1.1377E-08	1.4949E-08	1.6453E-08	1.8824E-08	2.0128E-08
$\varepsilon_3$	1.7140E-08	1.6721E-08	1.9057E-08	1.8079E-08	1.9496E-08
孔深/mm					
应变	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
$\varepsilon_1$	2.1597E-08	2.2719E-08	2.3572E-08	2.4552E-08	2.5012E-08
$\varepsilon_3$	1.8176E-08	1.8978E-08	1.7501E-08	1.7914E-08	1.6404E-08
孔深/mm					
应变	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
$\varepsilon_1$	2.5872E-08	2.6096E-08	2.6853E-08	2.6941E-08	2.7607E-08
$\varepsilon_3$	1.6562E-08	1.5097E-08	1.5094E-08	1.3721E-08	1.3619E-08

图 3.3: 各应变片测得释放应变

应变曲线如3.4所示:

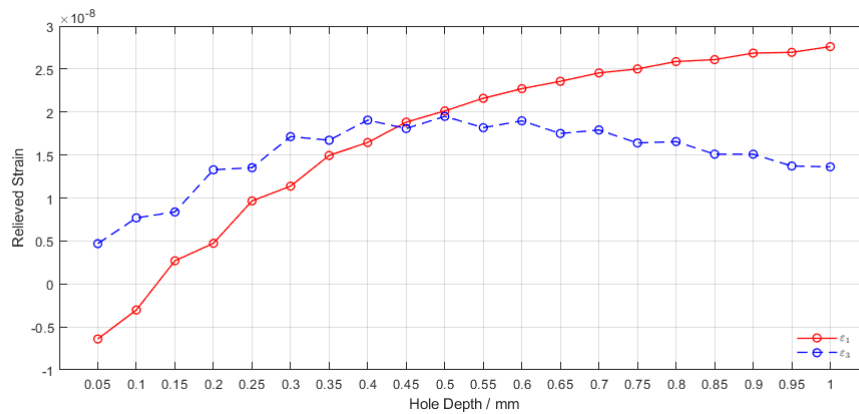


图 3.4: 释放应变曲线

## 第四章 难点分析与软件使用体会

在完成本次大作业后,我认为,本次大作业的难点有如下几点:

1. 对原标准文件的理解;
2. 相关资料的查询;
3. 为曲面施加载荷的方法;
4. 生死单元法的使用;
5. 多载荷步的设置.

通过完成本次大作业,我得以意识到自己有限元软件使用水平的欠缺,认识到学习之路是永无止境的.但我也同样认识到了查询资料的重要性.在完成本次大作业的过程中,ANSYS 自带的 HELP 文件就帮了大忙.此外,各类工具书也为我解决了很多问题,不论是理论上的还是实践上的.



# 附件

## 标准校准矩阵

载荷步/mm										
孔深/mm	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.05	-0.01117	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.10	-0.01341	-0.01174	0	0	0	0	0	0	0	0
0.15	-0.01541	-0.01388	-0.01207	0	0	0	0	0	0	0
0.20	-0.0172	-0.01579	-0.01411	-0.01216	0	0	0	0	0	0
0.25	-0.01877	-0.01748	-0.01592	-0.01408	-0.01197	0	0	0	0	0
0.30	-0.02012	-0.01895	-0.0175	-0.01579	-0.0138	-0.01153	0	0	0	0
0.35	-0.02123	-0.02018	-0.01887	-0.01727	-0.0154	-0.01326	-0.01084	0	0	0
0.40	-0.02237	-0.02117	-0.01985	-0.01862	-0.01669	-0.01469	-0.01248	-0.01012	0	0
0.45	-0.02329	-0.02211	-0.02079	-0.01947	-0.0178	-0.01595	-0.01392	-0.01171	-0.00933	0
0.50	-0.02406	-0.0229	-0.02158	-0.02012	-0.01865	-0.01696	-0.01508	-0.01304	-0.01081	-0.0084
0.55	-0.0248	-0.02359	-0.02227	-0.02089	-0.01929	-0.01763	-0.01607	-0.01405	-0.01201	-0.00987
0.60	-0.02541	-0.0242	-0.02288	-0.02148	-0.01992	-0.01831	-0.01666	-0.0149	-0.01301	-0.01102
0.65	-0.02596	-0.02472	-0.02339	-0.02204	-0.02044	-0.01885	-0.01725	-0.01543	-0.01385	-0.01188
0.70	-0.02642	-0.02518	-0.02385	-0.02247	-0.02091	-0.01933	-0.01773	-0.01595	-0.01429	-0.01258
0.75	-0.02679	-0.02556	-0.02423	-0.02286	-0.02128	-0.01972	-0.01813	-0.01638	-0.01467	-0.01308
0.80	-0.02712	-0.02589	-0.02456	-0.02319	-0.0216	-0.02002	-0.01847	-0.01674	-0.01512	-0.01341
0.85	-0.02739	-0.02615	-0.02484	-0.02345	-0.02188	-0.0203	-0.01872	-0.01704	-0.01543	-0.01375
0.90	-0.02762	-0.02638	-0.02505	-0.0237	-0.02211	-0.02053	-0.01893	-0.01725	-0.01571	-0.01401
0.95	-0.02783	-0.0266	-0.02526	-0.02388	-0.02232	-0.02074	-0.01915	-0.01748	-0.01591	-0.01424
1.00	-0.02803	-0.02678	-0.02546	-0.0241	-0.0225	-0.02092	-0.01934	-0.01767	-0.01609	-0.01442
载荷步/mm										
孔深/mm	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.55	-0.00763	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.60	-0.00893	-0.00676	0	0	0	0	0	0	0	0
0.65	-0.00993	-0.00798	-0.00599	0	0	0	0	0	0	0
0.70	-0.01077	-0.00895	-0.00709	-0.0052	0	0	0	0	0	0
0.75	-0.0114	-0.00969	-0.00796	-0.00622	-0.00444	0	0	0	0	0
0.80	-0.01178	-0.01026	-0.00862	-0.00699	-0.00539	-0.0038	0	0	0	0
0.85	-0.01214	-0.01059	-0.00913	-0.00763	-0.00614	-0.00465	-0.00321	0	0	0
0.90	-0.01242	-0.01094	-0.00944	-0.00809	-0.00668	-0.00531	-0.00396	-0.00266	0	0
0.95	-0.01267	-0.01117	-0.00974	-0.00836	-0.00711	-0.00581	-0.00456	-0.00334	-0.00215	0
1.00	-0.01285	-0.01135	-0.00995	-0.00857	-0.00737	-0.00615	-0.00498	-0.00385	-0.00275	-0.00169

## 参考文献

- [1] 郑建毅, 庄明凤, 郑高峰, 等. 用逐层钻孔的小孔法测量非均匀残余应力[J]. 振动. 测试与诊断, 2014, 34(3):6.
- [2] ZHANG K, YUAN M, CHEN J. General calibration formulas for incremental hole drilling optical measurement[J]. Experimental Techniques, 2017, 41(1):1-8.
- [3] SCHAJER G S. Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements [J/OL]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1981, 103(2):157-163. <https://doi.org/10.1115/1.3224988>.
- [4] 贺赞晖. 盲孔法中弹性阶段释放系数的数值计算方法研究[J]. 合肥工业大学报, 2006(5):23-25.
- [5] 薛满泉, 梁校. 非均匀残余应力释放系数矩阵的模拟标定法及误差分析[J]. 中国水运: 下半月, 2017 (7):97-100.
- [6] 美国材料实验协会. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling strain-Gage Method: ASTM E837-20[S/OL]. 2013. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E837-20>.
- [7] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料 残余应力测定 钻孔应变法: GB/T 31310-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [8] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [9] 龚曙光, 谢桂兰, 黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [10] 曹渊. ANSYS18.0 有限元分析从入门到精通: 升级版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.