

# 盲孔法中释放系数的数值计算方法<sup>\*</sup>

## NUMERICAL METHOD FOR CALCULATION OF RELEASE COEFFICIENTS IN BLIND HOLE METHOD

刘一华<sup>\*\*</sup> 贺赞晖 詹春晓 李昊

(合肥工业大学 土木建筑工程学院, 合肥 230009)

LIU YiHua He YunHui ZHAN ChunXiao LI Hao

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**摘要** 盲孔法测量残余应力时, 钻孔会在盲孔附近产生加工硬化。由于硬度与弹性模量的平方有关, 在进行释放系数  $A$ 、 $B$  的数值计算时, 通过增大盲孔周围材料的弹性模量来反映该加工硬化。应用有限元软件 ANSYS, 对 304 不锈钢的释放系数  $A$ 、 $B$  进行三维有限元数值计算, 得到释放系数随加工硬化程度增大而增大的变化规律, 同时给出考虑加工硬化后释放系数随盲孔深度的变化规律。通过与实验测定结果的比较, 发现在对 304 不锈钢进行释放系数的有限元数值计算时, 当取盲孔附近的加工硬化层为 0.2 mm 厚、弹性模量增大 37% 时, 有限元的数值计算值与实验测定值最接近, 释放系数  $A$ 、 $B$  的数值计算误差分别为 -1.8% 和 2.4%。

**关键词** 盲孔法 释放系数 有限元法 数值计算 加工硬化 弹性模量

**中图分类号** O348.2

**Abstract** Work-hardening near the blind hole is caused by hole drilling when residual stresses are measured by the blind hole method. As hardening is related to the square of elastic modulus, the work-hardening is considered by increasing the elastic modulus of the material near the hole when release coefficients  $A$  and  $B$  are numerically analyzed. The release coefficients  $A$  and  $B$  of stainless steel 304 are numerically calculated by the three dimensional finite element method program ANSYS. The relationship that the release coefficients  $A$  and  $B$  are increasing with the increasing of degree of work-hardening is obtained. Meanwhile, their changes with the depth of hole are given. Comparing the calculating results to the experimental ones, it can be found that the calculating values is proximal to the experimental ones while the thickness of work-hardening layer is 0.2 mm and the elastic modulus is 37% higher than the original one. On this condition, the calculating errors of the release coefficients  $A$  and  $B$  are only -1.8% and 2.4%, respectively.

**Key words** Blind hole method; Release coefficient; Finite element method; Numerical calculation; Work hardening; Elastic modulus

Corresponding author: LIU YiHua, E-mail: liuyihua@mail.hf.ah.cn, Tel: +86-551-2902547; Fax: +86-551-2902066

The project supported by the Natural Science Key Foundation of Education Department of Anhui Province (No. 2003kj045zd), and the Research Program for Young Teachers of Higher Education of Anhui Province (No. 2006jgl005) and the Research Foundation of Hefei University of Technology (No. 060803F).

Manuscript received 20060406, in revised form 20060717.

## 1 引言

盲孔法是由德国学者 Mathar<sup>[1]</sup> 于 1934 年提出的, 后经 Soete 和 Vancombrugge<sup>[2]</sup> 等学者发展起来的一种测量残余应力的半无损方法, 它具有对工件损伤小、不影响工件的性能、简单易行、测量精度高等特点。为此, 1981 年美国材料试验协会将其制定为 ASTM 标准 E 837—81<sup>[3]</sup>, 1992 年我国船舶工业总公司也将其制定为我国船舶行业标准 CB 3395—92<sup>[4]</sup>, 使盲孔法在工程

中得到广泛应用。

在用盲孔法测量残余应力时, 确定释放系数  $A$ 、 $B$  至关重要, 它直接影响残余应力的测量精度。释放系数  $A$ 、 $B$  通常采用实验测定<sup>[5-6]</sup>, 因实验测定颇费人力物力, 有人提出基于通孔理论的近似计算公式<sup>[7-8]</sup>; 为提高确定释放系数的精度和效率, 近年有人提出数值计算方法<sup>[9]632-636</sup>。由于在用实验方法测定释放系数时需要钻孔, 钻孔后会在孔边附近产生加工硬化<sup>[10]139</sup>, 从而降低应变的释放。为了真实模拟释

\* 20060406 收到初稿, 20060717 收到修改稿。安徽省教育厅自然科学基金重点科研项目(2003kj045zd)、安徽省高校青年教师科研资助计划项目(2006jgl005)和合肥工业大学科研发展基金(060803F)资助。

\*\* 刘一华, 男, 1959 年 8 月生, 湖南桃源人, 汉族。合肥工业大学土木建筑工程学院教授, 博士生导师, 博士。研究方向为残余应力和断裂力学等。

放系数的测定实验, 本文提出一种考虑钻孔后在孔边附近产生的加工硬化、应用有限元法确定释放系数的数值计算方法。

## 2 盲孔法的基本原理

若构件中一点  $O$  的主残余应力分别为  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ , 在  $O$  点粘贴一残余应变计, 如图 1 所示, 当在  $O$  点钻一直径为  $d$  的盲孔后, 由敏感栅  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  所测得的释放应变分别为  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\varepsilon_3$ , 则  $O$  点的主残余应力及其方向分别为

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{matrix} \right\} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} \quad (1)$$

$$\frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (1)$$

$$\tan(2\theta) = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (2)$$

式中,  $A$  和  $B$  称为释放系数, 由实验测定。

释放系数  $A$ 、 $B$  通常在均匀单向拉伸应力场  $\sigma_1 = \sigma$ 、 $\sigma_2 = 0$  中测定, 在此情况下释放系数  $A$ 、 $B$  分别为

$$A = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2\sigma} \quad B = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2\sigma} \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_3$  分别为沿  $\sigma_1$  方向和垂直于  $\sigma_1$  方向的线应变。

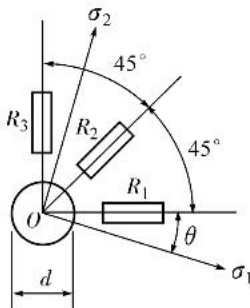


图 1 残余应变计的布置

Fig. 1 Arrangement of residual strain gauge

## 3 释放系数的实验测定结果

用 304 不锈钢板加工成图 2 所示的试样, 在试样的中间粘贴 2 个残余应变计(应变计 1、2), 用于测定释放

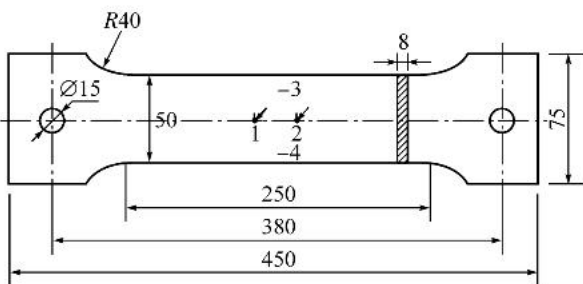


图 2 测定释放系数的试样

Fig. 2 Sample for measuring release coefficients

系数  $A$  和  $B$ , 为监控实验加载, 在试样的两侧粘贴 2 个单向应变计(应变计 3、4)。残余应变计的敏感栅尺寸为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。用钻孔前由 2 个残余应变计测得的应变值可得到材料的弹性模量  $E$  和泊松比  $\nu$ 。钻孔时先用  $\cong 1$  的钻头快速钻孔, 再用  $\cong 1.5$  的钻头慢速扩孔, 钻孔深度  $h = 2 \text{ mm}$ 。弹性常数和释放系数的实验测定结果如表 1 所示。

表 1 弹性常数  $E$ 、 $\nu$  和释放系数  $A$ 、 $B$  的实验测定值

Tab. 1 Experimental values of elastic constants  $E$ 、 $\nu$  and release coefficients  $A$ 、 $B$

测定点 Measured point	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$A \times 10^6/\text{MPa}^{-1}$	$B \times 10^6/\text{MPa}^{-1}$
1	210	0.275	-0.3649	-0.8353
2	213	0.280	-0.3937	-0.8257
平均值 Average value	212	0.278	-0.3793	-0.8305

## 4 释放系数的数值计算

### 4.1 计算模型及其网格划分

为了模拟上述释放系数的测定实验, 取有限元分析模型如图 3 所示, 在模型的中间有一盲孔, 孔的直径  $d = 1.5 \text{ mm}$ , 孔深  $h = 2 \text{ mm}$ , 应用 ANSYS 有限元软件进行三维数值模拟。由于对称性, 取 1/4 进行计算, 有限元网格划分如图 4 所示。为了模拟真实情况, 在粘贴应变计的位置处, 按照敏感栅的形状和大小划分网格(图 4b 中的  $A$ 、 $B$  矩形区域), 矩形区域尺寸为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ , 其靠近孔口一侧到孔中心的距离为  $1.6 \text{ mm}$ 。由于钻孔后在孔边附近会产生加工硬化, 在钢材上钻孔及扩孔时的平均加工硬化深度为  $0.18 \text{ mm} \sim 0.2 \text{ mm}$ <sup>[10][19]</sup>, 为此, 在盲孔边缘取  $0.2 \text{ mm}$  厚作为加工硬化层, 划分环形单元(图 4b 中的  $C$  区域)。

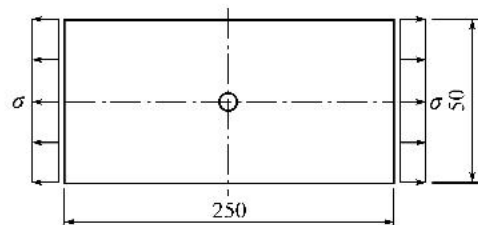


图 3 有限元分析模型

Fig. 3 Finite element analysis model

### 4.2 释放系数随硬化程度的变化情况

研究表明, 硬度  $H$  与弹性模量  $E$  有如下关系<sup>[11]</sup>

$$H = KE^2 \quad (4)$$

式中,  $K$  为常数。

根据式(4), 加工硬化程度  $N$  (即加工后的表面显微硬度与原始显微硬度之比  $\times 100\%$ )<sup>[10][19]</sup> 和弹性模量增大程度  $M$  (即加工后的表面弹性模量与原始弹性模

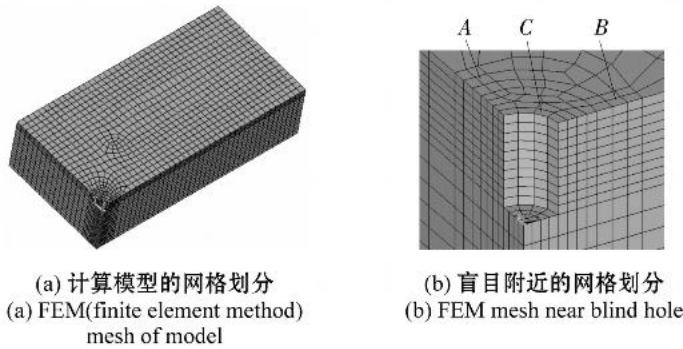


图 4 有限元网格划分

Fig. 4 FEM mesh

量之比  $\times 100\%$ ) 之间有下列关系

$$N = M^2 \quad (5)$$

为此, 在取加工硬化层厚度为 0.2 mm 的情况下, 通过增大硬化层的弹性模量, 计算出不同弹性模量增大程度  $M$  (即不同加工硬化程度  $N$ ) 下释放系数  $A$ 、 $B$  的数值计算值, 并与表 1 所示的实验测定值进行比较, 如表 2 所示, 图 5 给出不同弹性模量增大程度  $M$  下释放系数的数值计算值与实验测定值的误差关系。由图 5 可见, 数值计算误差与  $M$  成线性关系, 用最小二乘法进行线性拟合, 可以得到释放系数  $A$ 、 $B$  的数值计算值的计算误差  $\delta_A$ 、 $\delta_B$  随  $M$  的线性变化关系为

$$\begin{aligned} \delta_A &= 0.5205 - 0.3934M \\ \delta_B &= 0.3941 - 0.2704M \end{aligned} \quad (6)$$

表 2 不同加工硬化程度时释放系数的计算值及其误差

Tab. 2 Calculating values of release coefficients and their errors in different degree of work-hardening

$M(\%)$	$N(\%)$	$A \times 10^6 / \text{MPa}^{-1}$		$B \times 10^6 / \text{MPa}^{-1}$	
		计算值 Calculating value	误差 Error (%)	计算值 Calculating value	误差 Error (%)
100	100	-0.4300	13.4	-0.9370	12.8
120	144	-0.3967	4.6	-0.8859	6.7
130	169	-0.3813	0.5	-0.8629	3.9
140	196	-0.3668	-3.3	-0.8414	1.3
150	225	-0.3529	-7.0	-0.8211	-1.1
160	256	-0.3397	-10.4	-0.8021	-3.4

由式(6)可得, 当  $M = 137\%$  时, 释放系数的数值计算值  $A = -0.3710 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ 、 $B = -0.8469 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$  的误差最小, 分别为  $\delta_A = -1.8\%$ 、 $\delta_B = 2.4\%$ 。

### 4.3 释放系数随孔深的变化情况

除了孔口表面的加工硬化对释放系数会产生影响外, 孔的深度对释放系数的影响也很明显<sup>[9]634</sup>。为此, 取加工硬化层厚度为 0.2 mm、弹性模量增大程度  $M = 137\%$  (即硬化程度  $N = 188\%$ ) 时, 对不同孔深情况下的释放系数  $A$ 、 $B$  进行数值计算, 计算结果如图 6 所示。

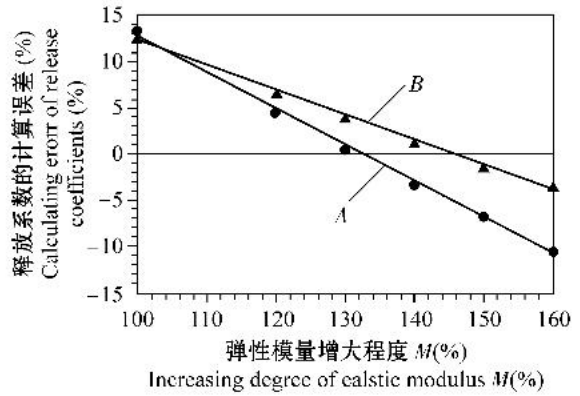


图 5 不同弹性模量增大程度下释放系数的计算误差

Fig. 5 Calculating errors of release coefficients in different increasing degree of elastic modulus

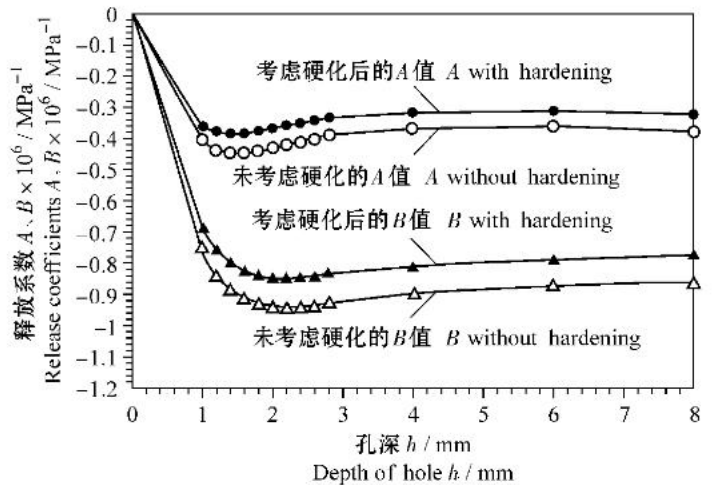


图 6 释放系数随孔深的变化趋势

Fig. 6 Trend to release coefficients with depth of hole

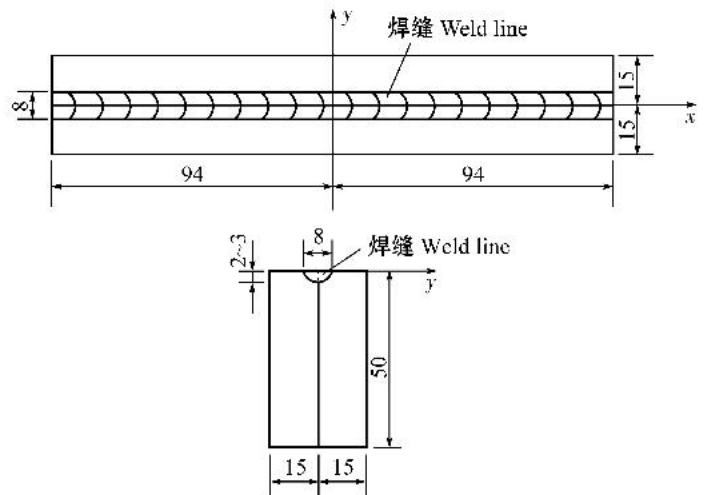


图 7 表面自熔焊试件

Fig. 7 Sample for surface self-fusible welding

图 6 中还给出未考虑加工硬化时的释放系数  $A$ 、 $B$  的数值计算值。由图 6 可见, 当考虑钻孔产生的加工硬化后, 释放系数随孔深的变化趋势与未考虑加工硬化时的变化趋势基本相同, 但释放系数的数值增大 (绝对值减小)。

## 5 实验检验

为了检验上述释放系数  $A$ 、 $B$  的数值计算方法的

有效性,用盲孔法对图7所示的304不锈钢表面自熔焊试件焊缝表面附近沿焊缝方向的焊接残余应力 $\sigma_x$ 的分布情况进行测量,焊缝宽8 mm,深2 mm~3 mm,采用两根试件,共布置7个测点。分别用实验测定的释放系数和上述数值计算的释放系数计算出的焊接残余应力如表3所示,由表3可见,用数值计算的释放系数计算出的残余应力与用实验测定的释放系数计算出的残余应力很接近,最大误差0.72%。

表3 残余应力 $\sigma_x$ 随坐标 $y$ 的变化情况

Tab. 3 Varying of residual stress  $\sigma_x$  with coordinate  $y$

$x/\text{mm}$	$y/\text{mm}$	$\sigma_x/\text{MPa}$		误差 Error(%)
		实验测定 A、B Experimental A, B	数值计算 A、B Numerical A, B	
22	-11	152	153	0.58
22	-8	382	383	0.33
-44	-5	412	413	0.36
-22	-3	479	480	0.16
0	0	442	443	0.20
-44	1	434	435	0.13
-22	6	319	321	0.72

## 6 结论

本文通过增大盲孔周围区域材料的弹性模量 $E$ 来考虑因钻孔引起的加工硬化,应用有限元软件ANSYS对304不锈钢的释放系数 $A$ 、 $B$ 的测定实验进行三维有限元数值模拟,并与实验测定结果进行比较,得出以下结论:

1) 在释放系数的有限元数值计算中,必须考虑钻孔引起的加工硬化。对304不锈钢进行释放系数的有限元数值计算时,与实验测定值相比,当不考虑盲孔周围的加工硬化时,释放系数 $A$ 、 $B$ 的有限元计算值的误差分别高达13.4%和12.8%;当取盲孔附近的加工硬化层厚为0.2 mm、弹性模量增大程度为 $M = 137\%$ 时,释放系数 $A$ 、 $B$ 的有限元计算值的误差仅分别为-1.8%和2.4%。

2) 释放系数随加工硬化程度的增大而增大。

3) 考虑加工硬化后释放系数随孔深的变化规律与未考虑加工硬化时释放系数随孔深的变化规律相同。

## 参考文献(References)

- [1] Mathar J. Determination of initial stresses by measuring the deformations around drilled holes[J]. Trans. ASME, 1934, 4: 249-254.
- [2] Soete W, Vancombrugge R. An industrial method for the determination of residual stresses[J]. Proc. SESA, 1950, 8(1): 17-26.
- [3] ASTM Committee E28 on Mechanical Testing. ASTM E 837-81. Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method. Philadelphia: American Society for Testing Materials (ASTM), 1981: 1-10.
- [4] 中国船舶总公司. CB 3395-92 残余应力测试方法钻孔应变释放法[S]. 北京: 中国船舶工业总公司, 1992. 1-10.  
China ship Industry Corporation. CB 3395-92. Method for measuring residual stresses by the hole-drilling strain release method[S]. Beijing: General Ship Company of China, 1992: 1-10(In Chinese).
- [5] 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: 55-64.  
YUAN FaRong, WU ShangLi. The measurement and calculation of residual stress[M]. Changsha: Hunan University Press, 1987: 55-64(In Chinese).
- [6] 裴 怡, 包亚峰, 唐慕尧. 盲孔法测定时计算公式中 $A$ 、 $B$ 值的研究[J]. 机械强度, 1997, 19(1): 18-21.  
PEI Yi, BAO YaFeng, TANG MuYao. Study on the  $A$ 、 $B$  values in calculating fomula of blind-hole technique[J]. Journal of Mechanical Strength, 1997, 19(1): 18-21(In Chinese).
- [7] Kabiri M. Toward more accurate residual stress measurement by the hole drilling method: analysis of relieved-strain coefficients[J]. Experimental Mechanics, 1986, 25(1): 14-21.
- [8] 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.  
CHEN HuiNan. A discussion of calculation of coefficients  $A$  and  $B$  by blind-hole-drilling method[J]. Journal of Mechanical Strength, 1989, 11(2): 31-36(In Chinese).
- [9] 侯海量, 朱 锡, 刘润泉. 盲孔法测量焊接残余应力应变释放系数的有限元分析[J]. 机械强度, 2003, 25(6): 632-636.  
HOU HaiLiang, ZHU Xi, LIU RunQuan. FEM analysis on the strain release factors for measuring welding residual stresses using blind hole method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(6): 632-636(In Chinese).
- [10] 上海市金属切削技术协会. 金属切削手册[M]. 3版. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 170-174.  
Shanghai Society of Metal Cutting Technology. Handbook of metal cutting [M]. 3th ed. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000. 170-174(In Chinese).
- [11] Bao Y W, Wang W, Zhou Y C. Investigation of the relationship between elastic modulus and hardness based on depth-sensing indentation measurements[J]. Acta Materialia, 2004, 52: 5397-5404.