

计算机应用

## 常刚度法和切线刚度法在金属材料数值仿真中的应用

许 成<sup>1,2,3</sup>, 李 贵<sup>1,2,3</sup>, 方学彬<sup>1,2,3</sup>

(1. 武汉科技大学 冶金装备与控制技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉科技大学 机械传动与制造工程  
湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081; 3. 武汉科技大学 精密制造研究所, 湖北 武汉 430081)

**摘要:** 对常刚度法和切线刚度法两种非线性有限元计算方法进行对比研究。通过 FORTRAN 语言编写 UMAT 子程序将两种算法嵌入至 ABAQUS 软件中, 再结合 AA7075-T6 铝合金试样的单轴拉伸实验及其数值模拟结果, 分析单元尺寸、增量步对这两种算法的计算效率、精度及稳定性的影响。结果表明: 在不同增量步和单元尺寸下, 常刚度法的计算效率更高, 但若以计算的精度作为标准, 则切线刚度法的计算效率更高。在相同单元尺寸下, 增量步越小, 算法精度越高, 但常刚度法的波动更大。由于增量步影响占主导, 若增量步非常小, 则单元尺寸对常刚度法精度的影响甚微, 反之影响较大, 而切线刚度法的精度受单元尺寸的影响很小。综合分析可知, 切线刚度法的计算稳定性更高, 为相关 UMAT 子程序开发人员提供了依据和参考。

**关键词:** 常刚度法; 切线刚度法; UMAT 子程序; FORTRAN 语言; 增量步

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.033

**中图分类号:** TG389      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 02-0257-07

## Application of constant stiffness method and tangent stiffness method in numerical simulation for metal materials

Xu Cheng<sup>1,2,3</sup>, Li Gui<sup>1,2,3</sup>, Fang Xuebin<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 3. Precision Manufacturing Institute, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** Two nonlinear finite element calculation methods of constant stiffness method and tangent stiffness method were compared and studied, and two algorithms were embedded into ABAQUS software by writing UMAT subroutine in FORTRAN language. Then, the influences of element size and incremental step on the calculation efficiency, accuracy and stability of the two algorithms were analyzed by the uniaxial tensile test and numerical simulation results of AA7075-T6 aluminum alloy samples. The results show that the calculation efficiency of the constant stiffness method is higher at different incremental steps and element sizes. However, if the calculation precision is taken as the standard, the calculation efficiency of the tangent stiffness method is higher. With the same element size, the smaller the incremental step is, the higher the precision of the algorithm is, but the greater the fluctuation of the constant stiffness method is. Since the influence of the incremental step is dominant, if the incremental step is very small, the element size has little effect on the precision of the constant stiffness method, otherwise, the effect is greater. However, the calculation precision of the tangent stiffness method is slightly affected by the element size. Thus, the comprehensive analysis shows that the stability of the tangent stiffness method is higher, which provides a basis and reference for developers of relevant UMAT subroutine.

**Key words:** constant stiffness method; tangent stiffness method; UMAT subroutine; FORTRAN language; incremental step

随着计算机技术的迅速发展, 计算机辅助工程

(Computer Aided Engineering, CAE) 被广泛用于模拟各种材料的加工成形工艺。其中, ABAQUS 作为一种功能强大的通用非线性有限元软件之一, 被广泛应用于机械制造、航空航天、汽车交通等诸多领域<sup>[1-2]</sup>。而且, ABAQUS 软件为用户提供了大量的求解模型, 通过这些模型可以求解绝大多数问题<sup>[3]</sup>。但对于实际的加工成形, 其前后处理模块提供的功能并不完善, 有些功能需要通过二次开发来

收稿日期: 2022-04-08; 修订日期: 2022-07-06

基金项目: 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室  
开放基金资助项目 (P2020-019)

作者简介: 许 成 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: xuchengmode@163.com

通信作者: 李 贵 (1983-), 男, 博士, 副教授

E-mail: leegui2030@wust.edu.cn

实现。因此, ABAQUS 软件为用户提供了强大且易用的二次开发工具和子程序接口, 以解决特定的工程问题<sup>[4-6]</sup>。其中 UMAT 子程序<sup>[7-8]</sup>作为 FORTRAN 语言接口可用于定义 ABAQUS 软件中未包含的材料本构模型, 从而提高软件的应用范围和灵活性, 被各领域的研究人员广泛应用。

在编写子程序时, 算法选择至关重要。例如: Zhang S L 等<sup>[9]</sup>利用 Newton-Raphson 迭代法编写了 UMAT 子程序以求解非线性问题, 研究了 Tresca 屈服准则在模拟预测管道爆破方面的应用。Liu W C 和 Chen B K 等<sup>[10]</sup>通过采用反欧拉应力积分算法, 将各向异性本构模型写入 UMAT 子程序, 以预测 AA3104-H19 铝合金的深拉凸耳现象。

上述研究只是运用这些算法对非线性问题进行求解, 而目前对于各种算法的特性却缺乏深入研究。因此, 本文对迭代法中的常刚度法和切线刚度法在数值仿真中的应用进行了对比研究, 这对于在求解非线性有限元问题时, 如何选取这两种算法具有重要意义。

## 1 非线性问题的求解方法

对于材料的非线性特性, 一般使用迭代的方法求解非线性方程组。非线性代数方程组  $\varphi(\mathbf{a})$  如式 (1) 所示。

$$\varphi(\mathbf{a}) = \mathbf{R}(\mathbf{a}) - \mathbf{G} = \mathbf{0} \quad \text{或} \quad \mathbf{R}(\mathbf{a}) = \mathbf{G} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{a}$  为待求解的未知向量;  $\mathbf{R}(\mathbf{a})$  为  $\mathbf{a}$  的非线性函数向量;  $\mathbf{G}$  为独立于  $\mathbf{a}$  的已知向量。

在以位移为基本未知量的有限元分析中,  $\mathbf{a}$  为节点位移向量,  $\mathbf{G}$  为节点载荷向量。至于如何进行求解, 分别研究了以下两种算法。

### 1.1 常刚度法

常刚度法是求解非线性方程组最为简单的一种算法。上述非线性方程组式 (1) 可以改写为式 (2) 形式:

$$\mathbf{H}(\mathbf{a})\mathbf{a} = \mathbf{G} \quad \text{或} \quad \mathbf{H}(\mathbf{a})\mathbf{a} = \mathbf{R}(\mathbf{a}) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{H}(\mathbf{a})$  为  $n \times n$  的矩阵, 其元素为  $\mathbf{a}$  的函数。

其详细求解过程如下:

(1) 首先假定 1 个初始值。

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}^{(0)} \quad (3)$$

(2) 将该初始值带入非线性方程组式 (2) 中, 即可得到一个改进的第 1 次近似解。

$$\mathbf{a}^{(1)} = [\mathbf{H}(\mathbf{a}^{(0)})]^{-1}\mathbf{G} \quad (4)$$

(3) 重复步骤 (2), 经过多次循环计算即可得到第  $n$  次近似解。

$$\mathbf{a}^{(n)} = [\mathbf{H}(\mathbf{a}^{(n-1)})]^{-1}\mathbf{G} \quad (5)$$

(4) 将  $\|\mathbf{a}^{(n)} - \mathbf{a}^{(n-1)}\|$  与要求的精度误差比较。若满足要求, 则退出迭代; 若不满足要求, 则继续迭代。从上述过程中可以清楚地看到, 在每次计算时需要第  $(n-1)$  次近似系数矩阵  $\mathbf{H}(\mathbf{a}^{(n-1)})$  求逆。因此, 为了避免这一问题, 采用常系数矩阵进行下一次迭代, 即求出  $\mathbf{a}^{(1)}$  之后利用式 (6) 求解  $\mathbf{a}^{(1)}$  的修正量  $\Delta\mathbf{a}^{(1)}$ :

$$\Delta\mathbf{a}^{(1)} = [\mathbf{H}(\mathbf{a}^{(0)})]^{-1}[\mathbf{G} - \mathbf{H}(\mathbf{a}^{(1)})\mathbf{G}^{(1)}] \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{G}^{(1)}$  为 1 次迭代的近似节点载荷向量。

由此可得:

$$\mathbf{a}^{(2)} = \mathbf{a}^{(1)} + \Delta\mathbf{a}^{(1)} \quad (7)$$

继续迭代即可得到第  $n$  次的节点位移向量, 如式 (8) 所示:

$$\Delta\mathbf{a}^{(n-1)} = [\mathbf{H}(\mathbf{a}^{(0)})]^{-1}[\mathbf{G} - \mathbf{H}(\mathbf{a}^{(n-1)})\mathbf{G}^{(n-1)}] \quad (8)$$

$$\mathbf{a}^{(n)} = \mathbf{a}^{(n-1)} + \Delta\mathbf{a}^{(n-1)} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{G}^{(n-1)}$  为  $(n-1)$  次迭代的近似节点载荷向量,  $n \geq 2$ 。

直到满足步骤 (4) 要求的精度误差条件为止。

### 1.2 切线刚度法

通过切线刚度法求解非线性方程组时, 其与常刚度法的区别在于: 它每步均要形成切线刚度矩阵, 计算量较大。其具体求解过程如下:

若得到了第  $n$  次近似解  $\mathbf{a}^{(n)}$ , 且通常  $\varphi(\mathbf{a}^{(n)}) \neq \mathbf{0}$ , 因此, 为了得到进一步的近似解  $\mathbf{a}^{(n+1)}$ , 可将  $\varphi(\mathbf{a}^{(n+1)})$  表示为  $\mathbf{a}^{(n)}$  附近仅保留线性项的泰勒展开式, 即:

$$\varphi(\mathbf{a}^{(n+1)}) = \varphi(\mathbf{a}^{(n)}) + \left(\frac{d\varphi}{d\mathbf{a}}\right)^{(n)} \Delta\mathbf{a}^{(n)} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{a}^{(n+1)} = \mathbf{a}^{(n)} + \Delta\mathbf{a}^{(n)}$ ;  $\left(\frac{d\varphi}{d\mathbf{a}}\right)^{(n)}$  为第  $n$  次迭代的切线刚度矩阵,  $\left(\frac{d\varphi}{d\mathbf{a}}\right)^{(n)} = \left(\frac{d\mathbf{R}}{d\mathbf{a}}\right)^{(n)} = \mathbf{H}_T(\mathbf{a}^{(n)})$ 。

由式 (10) 可知:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}^{(n)} &= -[\mathbf{H}_T(\mathbf{a}^{(n)})]^{-1}\varphi(\mathbf{a}^{(n)}) = \\ &= -[\mathbf{H}_T(\mathbf{a}^{(n)})]^{-1}[\mathbf{R}(\mathbf{a}^{(n)}) - \mathbf{G}] = \\ &= [\mathbf{H}_T(\mathbf{a}^{(n)})]^{-1}[\mathbf{G} - \mathbf{R}(\mathbf{a}^{(n)})] \end{aligned} \quad (11)$$

由于式 (7) 仅取泰勒展开式的近似解, 因此,  $\mathbf{a}^{(n+1)}$  仍为近似解, 即需要重复上述迭代过程, 直至满足精度误差要求为止。

2 实验材料及其单轴拉伸性能

本次研究使用的 AA7075-T6 铝合金拉伸试样的尺寸取自文献 [11]。如图 1 所示，试样标距长度为 50 mm、宽度为 20 mm、厚度为 2 mm。Yang Z Y 等 [11] 对 AA7075-T6 铝合金试样进行了不同方向的拉伸实验，得到的工程应力-工程应变曲线如图 2 所示。

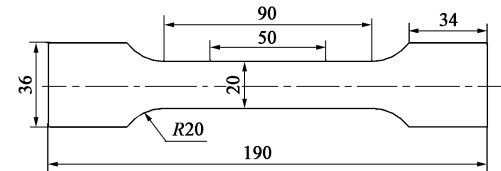


图 1 单轴拉伸实验的试样尺寸  
Fig. 1 Specimen sizes for uniaxial tensile test

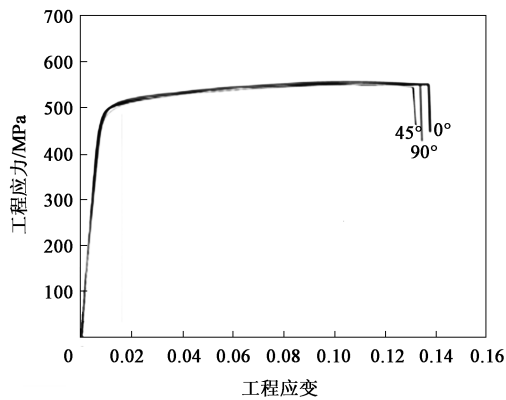


图 2 不同方向下的工程应力-工程应变曲线  
Fig. 2 Engineering stress-engineering strain curves in different directions

3 数值仿真

3.1 设计方案

依据增量步和标距区域内单元尺寸这两个影

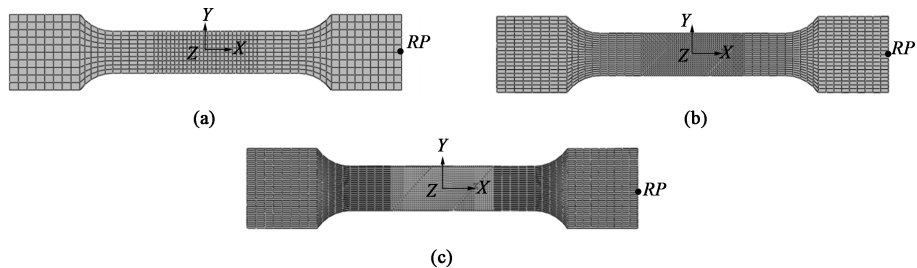


图 3 有限元网格模型  
(a) 标距区域内单元尺寸为 2.0 mm (b) 标距区域内单元尺寸为 1.0 mm (c) 标距区域内单元尺寸为 0.5 mm

Fig. 3 Finite element mesh models

(a) Element size in scale region of 2.0 mm (b) Element size in scale region of 1.0 mm (c) Element size in scale region of 0.5 mm

响因素分别设置了 3 组仿真对比实验，具体设计方案如表 1 所示。试样中标距区域以外的单元尺寸为 4 mm，所有单元的类型均为全积分单元 C3D8，每单元有 8 个高斯积分点。

表 1 仿真实验设计方案  
Table 1 Design schemes of simulation text

影响因素	编号	标距区域内单元尺寸/mm	增量步
增量步	1	2.0	0.01~0.10
	2	2.0	0.0055~0.0550
	3	2.0	0.001~0.010
标距区域内单元尺寸	a	2.0	0.01~0.10
	b	1.0	0.01~0.10
	c	0.5	0.01~0.10

3.2 本构模型

本文中所使用的描述材料应力、应变关系的模型如式 (12) 所示。

$$\sigma = A \times (\varepsilon_p)^B + C \quad (12)$$

式中： $\sigma$  为流动应力； $C$  为准静态屈服应力； $\varepsilon_p$  为等效塑性应变； $A$  和  $B$  为应变硬化参数。

对于 AA7075-T6 铝合金的本构模型材料参数的标定，通过辅助软件 Origin 来进行拟合求解。其中材料的应力、应变数据取自图 2 中与轧制方向成 0° 方向拉伸所得的工程应力-工程应变曲线。拟合结果如表 2 所示。

表 2 AA7075-T6 铝合金本构模型中的材料参数  
Table 2 Material parameters of AA7075-T6 aluminum alloy in constitutive model

参数	A	B	C/MPa
数值	178.11213	0.45967	493.4

3.3 有限元网格模型

根据设计方案，3 种单元尺寸的有限元网格模型如图 3 所示。

3.4 加载方式和边界条件

首先,对模型的其中一端面施加完全约束,并将模型的另一端面与参考点  $RP$  进行耦合,在参考点上施加  $X$  方向的  $5\text{ mm}$  位移载荷,且保证应变率为  $0.5\text{ s}^{-1}$ ,如图 4 所示。

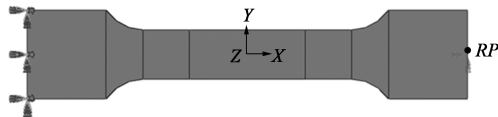


图 4 加载方式和边界条件  
Fig. 4 Loading pattern and boundary condition

3.5 模型求解

将编写好的 UMAT 子程序嵌入 ABAQUS 软件通过与 ABAQUS 主求解程序的接口实现与 ABAQUS 的数据交流。其前提为子程序在 ABAQUS 中运行模拟时必须保证 ABAQUS 求解器链接至 FORTRAN 编译器<sup>[12]</sup>。用户材料自定义参数如表 3 所示。

表 3 用户自定义 AA7075-T6 铝合金材料参数

Table 3 User-defined material parameters of AA7075-T6

aluminum alloy			
参数	弹性模量/MPa	泊松比 $\mu$	屈服应力/MPa
数值	72800	0.33	493.4

4 结果分析

通常进行有限元分析时,增量步和单元尺寸会影响算法的计算效率和精度。因此,本文研究这两种因素对两种算法的影响,并进行对比。

4.1 增量步对算法的影响

在对非线性问题进行分析求解时,一个分析步中施加的载荷会被分解为很多小的增量,即可以按照非线性求解步骤进行计算。对此,在设计方案中设置了 3 种增量步,分别为  $0.01 \sim 0.10$ 、 $0.0055 \sim 0.0550$ 、 $0.001 \sim 0.010$ 。选择增量步为  $0.0055 \sim 0.0550$  时的等效应力云图作为本次云图参考,如图 5 所示。

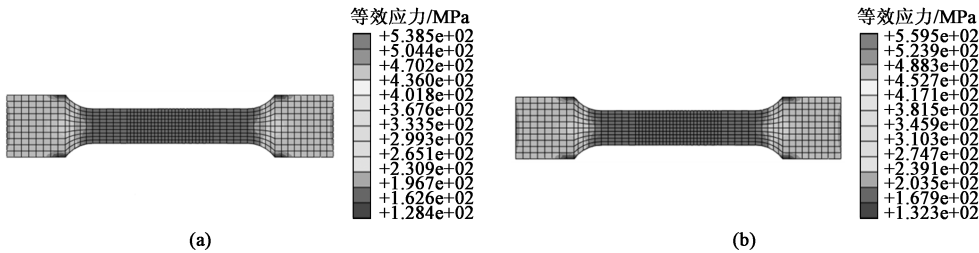


图 5 增量步为  $0.0055 \sim 0.0550$  时的等效应力云图

(a) 切线刚度法 (b) 常刚度法

Fig. 5 Equivalent stress cloud maps at incremental step of  $0.0055 \sim 0.0550$

(a) Tangent stiffness method (b) Constant stiffness method

两种算法在 3 种增量步下所计算出的工程应力-工程应变曲线图分别如图 6、图 7 和图 8 所示。

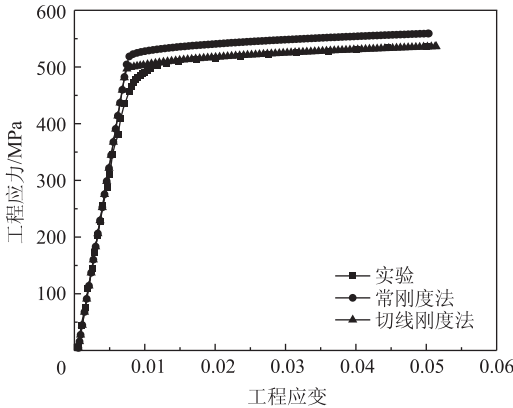


图 6 增量步为  $0.01 \sim 0.10$  时的工程应力-工程应变曲线

Fig. 6 Engineering stress-engineering strain curves at incremental step of  $0.01 \sim 0.10$

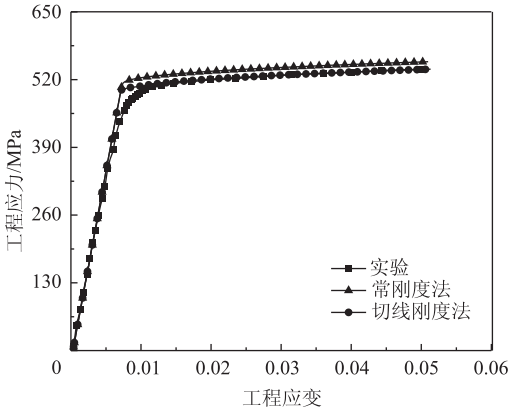


图 7 增量步为  $0.0055 \sim 0.0550$  时的工程应力-工程应变曲线

Fig. 7 Engineering stress-engineering strain curves at incremental step of  $0.0055 \sim 0.0550$

如表 4 所示,随着增量步的减小,常刚度法计算所得的最大等效应力也随之减小,且计算出的屈



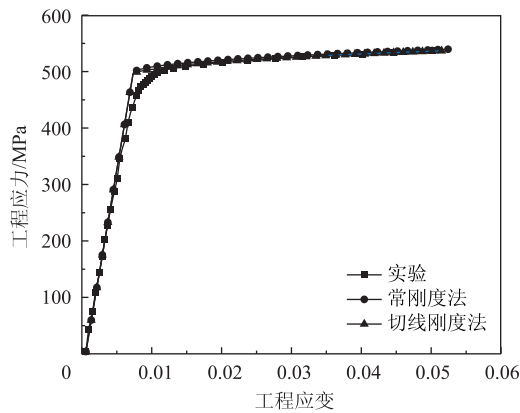


图 8 增量步为 0.001~0.010 时的工程应力-工程应变曲线  
Fig. 8 Engineering stress-engineering strain curves at incremental step of 0.001-0.010

表 4 两种算法在不同增量步下的计算结果  
Table 4 Calculated results of two algorithms under different increment steps

增量步	求解算法	计算时间/s	迭代次数	屈服应力/MPa	最大等效应力/MPa
0.01~0.10	常刚度法	37	166	503.35	564.7
	切线刚度法	44	184	480.19	538.6
0.0055~0.0550	常刚度法	48	238	500.70	559.5
	切线刚度法	59	264	487.85	538.5
0.001~0.010	常刚度法	147	2028	494.41	541.8
	切线刚度法	169	1030	493.70	538.5

服应力也逐渐接近实验所得的 AA7075-T6 铝合金在单轴拉伸下的屈服应力，其中当增量步减小至 0.001~0.010 时，其计算出的屈服应力与实验所得的 493.4 MPa 仅相差 1.01 MPa；但在 3 种增量步下，常刚度法所得屈服应力较铝合金在单轴拉伸下的屈服应力高。此外，如图 6、图 7 和图 8 所示，仅当增量步很小时，常刚度法计算所得的工程应力-工程应变曲线与实验所得的曲线一致。对于切线刚度法，在不同的增量步下，其计算出的工程应力-工程应变曲线均与实验所得的曲线吻合良好，所计算出的屈服应力也是随着增量步的减小逐渐接近实验所得的屈服应力，而计算出的最大等效应力几乎不变。因此，增量步对切线刚度法精度的影响小于常刚度法，而在 3 种增量步下，常刚度法的计算效率高于切线刚度法。

通过综合比较两种算法在 3 种不同增量步下的计算结果，切线刚度法可以以较小的计算成本和较高的效率得出较精确的结果，但常刚度法与之相反。

虽然常刚度法在这 3 种不同的增量步下所展现出的计算效率均高于切线刚度法，但仅有当增量步很小时，才能保证其计算精度。

4.2 网格单元尺寸对算法的影响

在有限元分析中，网格单元尺寸是影响计算精度和效率的因素之一。通常网格单元越小，计算结果就越接近真实值。在本文中，如表 1 所示，分别建立了 3 种不同的网格单元尺寸来分析其对常刚度法和切线刚度法的影响。

两种算法计算出的不同网格单元尺寸下的 AA7075-T6 铝合金试样在单轴拉伸下的工程应力-工程应变曲线分别如图 9 和图 10 所示。切线刚度法计算出的结果与实验结果吻合良好，而对于网格细化后的模型，常刚度法计算出的结果略微偏大。如表 5 所示，随着网格单元尺寸的减小，切线刚度法计算出的屈服应力逐渐接近实验所得的屈服应力，而常刚度法反而越来越偏离实验所得的屈服应力。其中，对于网格 b 和网格 c，常刚度法计算出的屈服应力几乎无变化，而且在屈服点处的应变也趋于一致。这说明随着网格密度的增加，数值模拟结果会趋向一个定值，此时网格也随之收敛。因此，若再细化网格，只会增加计算时间，而对计算精度影响甚微。对于网格 c，切线刚度法在计算时出现了错误，正是由于单元尺寸太小，导致计算量太大，从而使得程序无法正常运行。

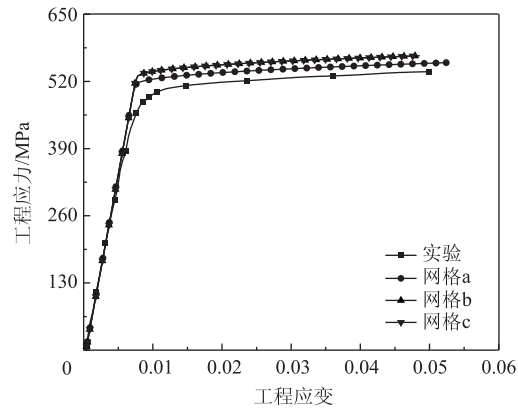


图 9 常刚度法计算出的工程应力-工程应变曲线  
Fig. 9 Engineering stress-engineering strain curves calculated by constant stiffness method

如表 5 所示，随着单元尺寸的减小，两种算法的计算效率均降低。但常刚度法的计算效率依然较切线刚度法的更高。另外，针对不同的网格单元尺寸，常刚度法计算的最大等效应力误差较大，而切线刚度法的几乎不受影响。为了更加直观地比较，提取

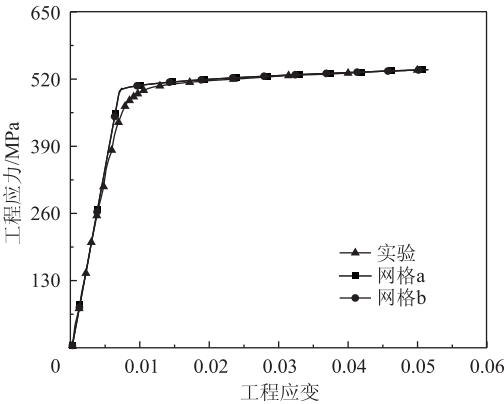


图 10 切线刚度法计算出的工程应力-工程应变曲线

Fig. 10 Engineering stress-engineering strain curves calculated by tangential stiffness method

表 5 两种算法在不同网格单元尺寸下的计算结果  
Table 5 Calculated results of two algorithms under different mesh element sizes

算法	网格模型	屈服应力/MPa	屈服应变	计算时间/s	迭代次数	最大等效应力/MPa
常刚度法	a	503.35	0.007224	26	166	569.9
	b	512.58	0.007044	104	214	579.4
	c	512.57	0.007043	799	271	575.1
切线刚度法	a	480.19	0.006782	54	184	539.1
	b	489.31	0.006724	353	200	539.4
	c	—	—	—	—	—

了应力云图上的较大应力所在路径上的等效应力值。路径选取位置如图 11 所示，两种算法计算出的等效应力分布分别如图 12 和图 13 所示。对于 3 种不同网格单元尺寸，切线刚度法计算的该路径上的等效应力分布吻合较好，且等效应力最大相差仅为 0.273 MPa。而常刚度法对于网格未细化的模型和细化后的模型计算出的等效应力偏差很大。对此现象，可能的原因为：增量步越小，常刚度法的精度越高。因此，将增量步调为 0.001~0.010，并对此进行了验证。

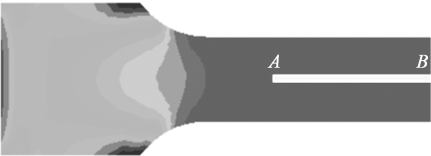


图 11 选取的路径位置

Fig. 11 Selected path location

增量步调为 0.001~0.010 之后，常刚度法计算所得的工程应力-工程应变曲线和等效应力分布分别如图 14 和图 15 所示。对于 3 种不同网格单元尺

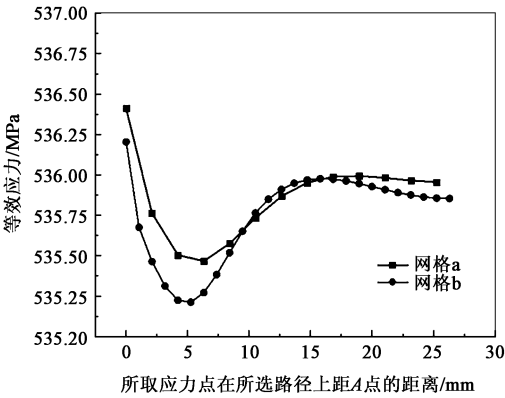


图 12 切线刚度法下所选路径上的等效应力分布

Fig. 12 Equivalent stress distributions along selected path with tangent stiffness method

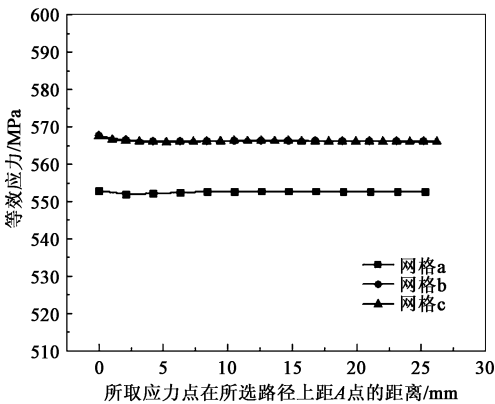


图 13 常刚度法下所选路径上的等效应力分布

Fig. 13 Equivalent stress distributions along selected path with constant stiffness method

寸的模型，将增量步调小后，常刚度法计算出的工程应力-工程应变曲线与实验结果高度吻合。此时，常刚度法计算出的所选路径上的等效应力值偏差也随之变小。因此，切线刚度法的稳定性高于常刚度法，而这也证明了增量步的影响占据主导。

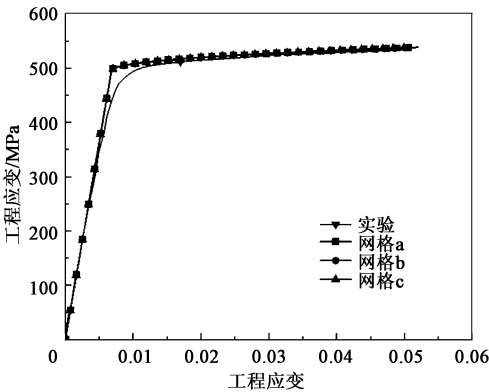


图 14 增量步为 0.001~0.010 时常刚度法计算出的工程应力-工程应变曲线

Fig. 14 Engineering stress-engineering strain curves calculated by constant stiffness method at incremental step of 0.001~0.010

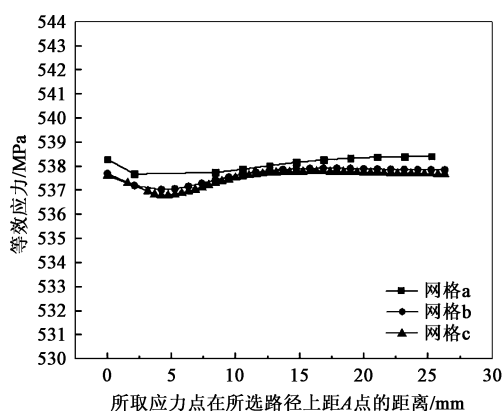


图 15 增量步为 0.001~0.010 时常刚度法下所选路径上的等效应力分布

Fig. 15 Distributions of equivalent stress along selected path with constant stiffness method at incremental step of 0.001-0.010

## 5 结论

(1) 常刚度法和切线刚度法在计算精度上均会随着增量步的减小而提高。但从两种算法所计算出的工程应力-工程应变曲线来看,切线刚度法较常刚度法在精度上受增量步的影响很小。

(2) 切线刚度法在计算精度上会随着单元尺寸的减小而提高,但这种影响对于切线刚度法而言较小,而常刚度法的计算精度会随着单元尺寸的减小而降低。但由于增量步的影响占据主导作用,则当增量步很小时,单元尺寸对常刚度法的计算精度无太大的影响。

(3) 切线刚度法和常刚度法的计算效率均会随着增量步和单元尺寸的减小而降低,但常刚度法的计算效率会更高,而其计算精度无法保证。因此,若以计算精度为标准,则切线刚度法的计算效率更高。其中,增量步和单元尺寸均不宜太小,否则会给算法徒增计算负担。

(4) 通过上述大量的分析对比可知,切线刚度法受增量步和单元尺寸的影响较小,因此,切线刚度法比常刚度法更加稳定。

### 参考文献:

[1] 陈飞,王成雨,李伟刚,等. Abaqus 二次开发在航空弓形结构件喷丸强化模拟中的应用 [J]. 计算机辅助工程, 2020, 29 (2): 55-60.  
Chen F, Wang C Y, Li W G, et al. Application of Abaqus secondary development in shot peening strengthening of aerospace arc-shaped frame [J]. Computer Aided Engineering, 2020, 29 (2): 55-60.

[2] 冯嵩,郑颖人,孔亮,等. 广义塑性力学多重屈服面模型隐式积分算法及其 ABAQUS 二次开发 [J]. 岩石力学与工程学

报, 2011, 30 (10): 2019-2025.

Feng S, Zheng Y R, Kong L, et al. Implicit algorithm of multi-yield-surface model based on generalized plasticity and its redevelopment in ABAQUS [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (10): 2019-2025.

- [3] 乔顺成,吴建军,展学鹏. 各向异性屈服准则的 UMAT 子程序二次开发研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2018, 53 (4): 89-97.  
Qiao S C, Wu J J, Zhan X P. Study on secondary development of UMAT subroutines with anisotropic yield criterion [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2018, 53 (4): 89-97.
- [4] Eslami H, Jayasinghe L B, Waldmann D. Nonlinear three-dimensional anisotropic material model for failure analysis of timber [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 130: 105764.
- [5] 张梦梦,陈泽中,朱欢欢,等. 基于 ABAQUS 二次开发的参数化型材拉弯前处理模块研究 [J]. 制造业自动化, 2022, 44 (5): 82-85.  
Zhang M M, Chen Z Z, Zhu H H, et al. Development of the parametric pre-process module of stretch bending for profile based on ABAQUS with python [J]. Manufacturing Automation, 2022, 44 (5): 82-85.
- [6] 霍永强,李言,崔莅沐,等. ABAQUS 二次开发在冷滚打成形参数化建模与仿真研究中的应用 [J/OL]. 机械科学与技术: 1-12 [2022-04-12]. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20220100.  
Huo Y Q, Li Y, Cui L M, et al. Application of ABAQUS secondary development in parametric modeling and simulation of cold roll-beating forming [J/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering: 1-12 [2022-04-12]. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20220100.
- [7] Zhang J P, Zhu C Z, Li X Q, et al. Characterizing the three-stage rutting behavior of asphalt pavement with semi-rigid base by using UMAT in ABAQUS [J]. Construction and Building Materials, 2017, 140: 496-507.
- [8] 曹鹏,冯德成,沈新普,等. 基于 ABAQUS 平台的塑性损伤子程序开发及其稳定性研究 [J]. 工程力学, 2012, 29 (S2): 101-106.  
Cao P, Feng D C, Shen X P, et al. Development of plasticity-damage model based on ABAQUS and algorithm stability analysis [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (S2): 101-106.
- [9] Zhang S L, Wang Q G, Zhou W X. Implementation of the Tresca yield criterion in finite element analysis of burst capacity of pipelines [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, 172: 180-187.
- [10] Liu W C, Chen B K. Sheet metal anisotropy and optimal non-round blank design in high-speed multi-step forming of AA3104-H19 aluminium alloy can body [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95 (9-12): 4265-4277.
- [11] Yang Z Y, Zhao C C, Dong G J, et al. Experimental calibration of ductile fracture parameters and forming limit of AA7075-T6 sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 291: 117044.
- [12] Castillo-Méndez C, Ortiz A. Numerical simulation data and FORTRAN code to compare the stress response of two transversely isotropic hyperelastic models in ABAQUS [J]. Data in Brief, 2022, 41: 107853.

## 《锻压技术》杂志征稿简则

### 1 征稿范围

《锻压技术》(月刊)于1958年创刊,由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会共同主办,是学会会刊。《锻压技术》是全国中文核心期刊,被以下检索系统收录:中文核心期刊要目总览(北京大学)、中国科学引文数据库(核心版, CSCD)、中国科技期刊引证报告(核心版, CJKR)、中国学术期刊文摘数据库(核心版, CSAD-C)、中国学术期刊文摘数据库(英文版)、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊(光盘版)、中国知网、万方数字化期刊群、RCCSE中国核心学术期刊、美国剑桥科学文摘(CSA)、美国化学文摘(CA)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)、俄罗斯文摘杂志(AJ)等。

《锻压技术》主要报道金属塑性成形理论、工艺与装备,模具设计与制造技术、材料与成形性能、工业加热技术及设备、摩擦与润滑、测试技术、计算机应用、标准等方面的科研成果、实验研究、现场经验、技术革新等,同时,还辟有综合评述、专题讲座及行业信息等栏目。

### 2 来稿格式及要求

(1) 摘要选用小5号字,正文选用5号字,单倍行距;页面设置选用A4纸,上下左右页边距均选用2 cm。

(2) 格式(按下列顺序排列,要求内容齐全)

● 论文的中文题目(不超过30字)、作者姓名、单位的全称(应包括院、系、科室等二级单位)、省名、城市名、邮政编码。

● 中文摘要:约300字,主要表达文章中有创新意义的内容,应含有研究目的、过程和方法、结果、结论4个层次;摘要中不要重复题目中已经表述过的信息,也不使用评论性语言。

● 中文关键词(5个以上),中图分类号1~2个(参见《中国图书馆分类法(第四版)》一书)。

● 论文的英文题目、作者姓名(如Zhang Yahong)、单位的全称(不得用缩写,应包括院、系、科室等二级单位)、城市名、邮政编码、国家名。

● 英文摘要:务必与中文摘要完全对应;摘要中涉及文章研究、阐述、设计、试验等内容时宜选用过去时、被动语态撰写(例如:A die was designed……),结果、结论宜选用一般现在时撰写(例如:The results show that……),不要使用“The paper studies……”或“The author studies……”这类语句。

● 英文关键词(5个以上),要求与中文关键词完全对应。

● 首页页脚需注明以下内容:

收稿日期:年-月-日(例如:2007-01-01);修订日期:此项可空缺,由编辑部填写

基金项目:省部以上基金资助项目及批准号(此项非常重要,请勿遗漏)

作者简介:第一作者姓名(出生年—),性别,学位,职称

E-mail: xx@xx

通讯作者:姓名(出生年—),性别,学位,职称(第一作者不是通讯作者时,请增加此项。)

E-mail: xx@xx

● 正文的“引言”部分不编号,亦不列出“引言”二字,直接陈述即可;一级标题用“1, 2, ……”排序;二级标题用“1.1, 1.2, ……”, 2.1, 2.2, ……排序;三级标题用“1.1.1, 1.1.2, ……”排序。

● 图片、表格、公式、定理等的序号均要按其在正文中引用、的顺序,分别用阿拉伯数字顺序编码,例如:图1、图2……,表1、表2……。

● 图片、表格应随文给出,先见文后见图、表。

● 图题(包括(a)、(b)等分图题)、表题要求同时用中、英文标注。

● 照片或灰度图应反差适当,鲜明可见;金相照片放大倍数均用比例尺表示,如 $5\mu\text{m}$ 。

● 双栏排图片的宽度应控制在7.8 cm左右;通栏排图片宽度应控制在16 cm左右。

● 表格使用三线表,必要时可加横线,但一般不得有竖线;表格的宽度最好设计成25个汉字(相当于48个字符)以内;表中所有文字一律左齐。

● 公式后应当注明公式中各符号的含义。

● 计量单位一律采用法定计量单位(国际单位制)。

● 参考文献应按其在正文中被引用的顺序依次列出(在正文中引用处务必用“[序号]”标注);列出的参考文献应是重要的、近期的、已正式发表的文献资料,每篇论文应列出12篇以上参考文献;作者不多于3个的姓名全部写出,多于3个的,余者用“等”, (et al)”表示;无论中外署名、一律姓(首字大写)先名后(例如:Zhang Y H)。

原文为非英文的参考文献,需要同时用英文著录。

格式如下:

[1] 期刊 文章作者. 论文题目[J]. 刊名, 出版年, 卷号(期号): 起页码-终页码.

[2] 专著 作者. 书名(英文实词首字大写)[M]. 版本. 出版地: 出版社, 出版年.

[3] 译著 作者. 书名(英文实词首字大写)[M]. 译者, 译版本. 出版地: 出版社, 出版年.

[4] 论文集 论文作者. 论文题目[A]. 论文集编者. 论文集名(英文实词首字大写)[C]. 出版地: 出版者, 出版年.

[5] 技术报告 作者. 论文题目(英文实词首字大写)[R]. 地名: 责任单位, 出版年.

[6] 学位论文 作者. 论文题目(英文实词首字大写)[D]. 所在城市: 保存单位, 年份.

[7] 专利文献 专利申请者或所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 公告日期或公开日期(如, 2008-02-03).

[8] 技术标准 标准号, 标准名称[S].

[9] 在线文献 作者. 论文题目[EB/OL]. 获取和访问路径http://..., 发表或更新日期(如, 2008-02-03).

[10] 光盘文献(数据库) 作者. 论文题目[DB/CD]. 出版地: 出版者, 出版年.

原文为非英文的参考文献著录举例:

[1] 王博, 张凯锋, 赖小明, 等.  $\text{SiC}_p/\text{2024Al}$  复合材料板材脉冲电流辅助拉深成形[J]. 锻压技术, 2012, 37(5): 22-26.

Wang B, Zhang K F, Lai X M, et al. Pulse current auxiliary deep drawing of  $\text{SiC}_p/\text{2024Al}$  composites sheet[J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37(5): 22-26.

### 3 投稿方式及要求

(1) 请通过本刊网站的“作者投稿”系统投稿。

(2) 来稿文责自负, 请勿抄袭他人论文, 请勿一稿多投。对抄袭者和一稿多投者, 一经发现, 本刊将无条件退稿, 并作不良作者记录; 同时, 本刊将保留追索抄袭者浪费本刊资源和其他纷争的权利。

(3) 编辑部对来稿拥有修改权, 遇重大删改时将与作者协商; 排版后的清样将通过E-mail发给作者进行核对。

### 4 编辑部联系方式

地址: 北京市海淀区学清路18号《锻压技术》编辑部

邮编: 100083 电话: 010-62920652, 010-82415085

E-mail: fst@263.net

网址: http://www.fstjournal.net/

《锻压技术》编辑部