

## 圆柱体压缩过程不同有限元软件求解与影响因素分析

包立<sup>1,2</sup>, 王连刚<sup>2</sup>, 梅瑞斌<sup>1,2</sup>, 王楷<sup>2</sup>, 庞洪轩<sup>3</sup>

(1. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁沈阳 110819; 2. 东北大学秦皇岛分校资源与材料学院, 河北秦皇岛 066004; 3. 河北普阳钢铁集团技术部, 河北邯郸 056305)

**摘要:** 利用 ANSYS、MARC、ABAQUS 和 DEFORM 有限元软件及主应力法求解了 Fe-6.5%Si 钢圆柱体等温压缩过程的力学特征和变形规律。结果表明: DEFORM 的计算速度较快, 而 ANSYS 较慢; 软件求解的圆柱体压缩变形显著分为难变形区、自由变形区和易变形区; 易变形区中心等效应塑性应变值最大约为 1.4, 难变形区中心等效应塑性应变值最小, 变形区基本为三向压应力状态。4 款有限元软件求解的接触面上的压缩方向应力在难变形区相近, 在侧面翻平区域略有差异, 载荷计算结果的相对误差小于 3%, 与实测值相比, 平均误差小于 10%, 计算精度较高; 主应力法求解接触应力的误差较大, 所得载荷相比软件预测值略大 10%。网格划分方式和参数设置对计算结果有重要影响, 应结合实验结果调整参数设置以提高其求解精度和可靠性。

**关键词:** 圆柱体等温压缩; 等效塑性应变; 主应力法; 有限元软件; 网格划分

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.037

中图分类号: TG301 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940(2022)03-0227-10

## Analysis on different finite element software solutions and influencing factors in cylinder compression process

Bao Li<sup>1,2</sup>, Wang Lian'gang<sup>2</sup>, Mei Ruibin<sup>1,2</sup>, Wang Kai<sup>2</sup>, Pang Hongxuan<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;

3. Technical Department of Hebei Puyang Iron and Steel Co., Ltd., Handan 056305, China)

**Abstract:** The mechanical characteristics and deformation laws of Fe-6.5%Si steel cylinder during isothermal compression process were solved by FE softwares including ANSYS, MARC, ABAQUS, DEFORM and principal stress method. The results show that the calculation speed of DEFORM is faster, while that of ANSYS is slower. The compressive deformation of cylinder solved by softwares is significantly divided into difficult deformation area, free deformation area and easy deformation area, the maximum equivalent plastic strain value in the center of the easy deformation area is about 1.4, the equivalent plastic strain value in the center of the difficult deformation area is the smallest, and the deformation area is basically in three-dimensional compressive stress state. Moreover, the compressive direction stresses on the contact surface solved by four kinds of different FE softwares are similar in the difficult deformation area and slightly different in the lateral flattening area. The relative error of load calculation result is less than 3%, the average error compared with measured value is less than 10%, and the calculation accuracy is relatively high. However, the error of compressive stress solved by principal stress method is larger, and the obtained load is slightly larger than the software predicted value by 10%. Thus, the meshing method and parameters setting have an important influence on the calculation results, and the parameters setting should be adjusted in combination with the experimental results to improve the accuracy and reliability of the solution.

**Key words:** cylinder isothermal compression; equivalent plastic strain; principle stress method; FE softwares; meshing

有限元数值模拟技术具有可以求解强耦合非

线性问题、计算精度高、数据信息详细等特点, ANSYS、MARC、ABAQUS、DEFORM 等商用软件被广泛应用于金属塑性加工过程的缺陷分析和工艺设计优化等方面<sup>[1-4]</sup>。Hu Z 等<sup>[5]</sup>研究了有限元变理论, 并基于 ANSYS 软件开发了局部感应加热管道弯曲模型, 实现了热变形过程的耦合分析, 有效提高了弯管产品的生产质量。Bao L 等<sup>[6]</sup>利用 ANSYS 软件的电磁-热分析方法研究了板材轧制用轧辊表面的感应加热过程的温度分布与变化规律,

收稿日期: 2021-10-15; 修订日期: 2022-01-20

基金项目: 河北省自然科学基金钢铁联合基金项目 (E2018501016); 河北省教育厅精品课程建设项目 (2020JPKC061); 东北大学秦皇岛分校教改重点项目 (2021JG-A03)

作者简介: 包立 (1979-), 女, 博士, 高级实验师

E-mail: baoli1979@126.com

通信作者: 梅瑞斌 (1979-), 男, 博士, 副教授

E-mail: meiruibin@neuq.edu.cn

构建了感应加热温度与感应电流、工作频率、线圈以及轧辊间隙等之间的数学模型,为热辊轧制工艺的开展奠定了理论基础。Mei R B 等<sup>[7]</sup>利用 ANSYS 软件对 6063 复杂断面铝型材挤压后的在线淬火过程进行了温度及变形分析,研究了铝型材在线淬火过程中缺陷产生的原因,并提出了抑制缺陷产生的措施。Simsir C 等<sup>[8]</sup>基于 MARC 软件平台,通过用户子程序二次开发实现了金属、合金热处理过程中的热-力-相变耦合分析,实现了热处理过程变形与组织的预测、调控与优化。Mohamed M S 等<sup>[9]</sup>构建了 AA6082 铝合金板件热冲压和冷模淬火变形及损伤的耦合粘塑性本构方程,并以 ABAQUS 为平台进行二次开发,成功预测了热成形条件下 AA6082 铝合金的粘塑性流动和塑性诱导损伤。Singh B K 等<sup>[10]</sup>利用 ABAQUS 进行压力及热管组件的耦合传热和结构分析并得到了其温度变化及变形结果,预测结果与实验值吻合良好。Kang G P 等<sup>[11]</sup>提出了一种粘塑性自连续多晶体与刚塑性有限元法相结合的金属成形多尺度模拟方法,并在此基础上开发了晶体塑性变形优化程序,将该程序嵌入到 DEFORM 软件中,实现了对镁合金拉伸过程成形性能的预测。

尽管近二十年来,商用有限元软件在各种金属塑性加工过程的工艺分析与优化中得到了广泛应用,然而由于开发商、研发团队、界面设定等方面的差异使软件的学习、应用和计算结果评判有所差异,鲜有报道关注有限元软件求解金属塑性变形的结果对比分析。为此,本文以 Fe-6.5%Si 高硅钢为研究对象,分别利用主流商用有限元软件 ANSYS (ANSYS Multiphysics 模块)、MARC、DEFORM 和 ABAQUS 求解该钢种等温压缩变形过程,结合金属塑性流动理论分析压缩过程中应力、应变的分布规律。该研究对塑性变形过程有限元数值模拟方法的教学、学习、运用和计算结果评估具有重要的理论和实际意义。

## 1 材料模型与模拟参数

本文分析用原材料为真空熔炼的 Fe-6.5%Si 钢铸锭,主要化学成分为 (% , 质量分数): C0.021, Si6.5, Mn0.037, P0.017, S0.005, Al0.02, Fe 余量。铸态高硅钢热塑性变形过程中峰值应力的本构方程见文献 [12] 描述。本文主要分析变形温度为 800 °C、变形速率为 1 s<sup>-1</sup> 的等温变形过程。实验条

件为:将铸锭加热至 1080 °C,保温 48 h,进行均匀化处理,均匀化处理后将铸锭切割为  $\Phi 10$  mm  $\times$  12 mm 的圆柱试样,利用 Gleeble-3500 热模拟实验机进行单道次等温热压缩实验,变形温度为 800 °C,应变速率为 1 s<sup>-1</sup>。该变形条件下的真应力-真应变曲线与简化的本构模型如图 1 所示。由图 1 可知,变形初始阶段由于加工硬化主导作用使真应力迅速增加,在极小的变形范围内达到峰值。达到峰值后,动态软化机制和加工硬化基本保持平衡,随着应变继续增加,真应力保持一定的稳定状态。根据真应力-真应变曲线的特点,可将该钢种的物理方程简化为理想弹塑性材料模型。该变形条件下试样的弹性模量约为 10 GPa,屈服强度  $R_{eL}$  约为 200 MPa,峰值应变  $\varepsilon_p$  约为 0.02,峰值应力  $\sigma_p$  为 200 MPa。计算中设定的平砧材料为 H13 钢,其弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3。

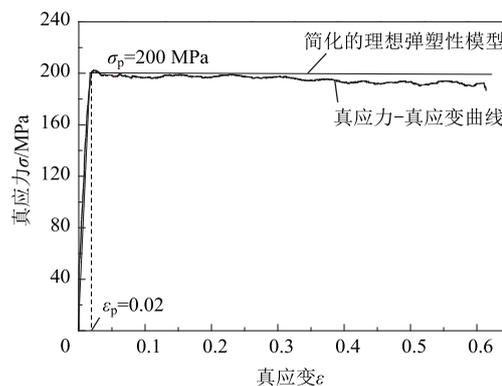


图 1 真应力-真应变曲线与简化本构模型  
Fig. 1 True stress-true strain curve and simplified constitutive model

为了通过热模拟实验验证数值模拟的准确性,计算采用的模型尺寸与实验试样相同,直径为  $\Phi 10$  mm,高度为 12 mm,压缩过程中上模下行位移为 5 mm。其他参数设定为:泊松比为 0.3,密度为 7700 kg  $\cdot$  m<sup>-3</sup>。采用库伦摩擦形式,摩擦因数设定为 0.3。压缩变形过程的求解中忽略塑性变形做功和摩擦生热。所有软件的计算结果对比中前处理和求解设置均采用软件默认值,平砧设定为刚性体,试样材料模型设置为弹塑性体。由于几何形状为对称圆柱体,为提高计算效率,将几何模型简化为轴对称问题进行求解。采用的商用有限元软件分别为 ANSYS、MARC、ABAQUS 和 DEFORM,圆柱体径向划分为 10 层单元,轴向划分为 24 层单元,划分四边形单元数共计 240 个,节点数为 275 个。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同有限元软件计算结果对比

图 2 为 4 款有限元软件求解的圆柱体等温压缩后的等效塑性应变分布。其中，图 2d 中接触面中心点 A、接触面边界点 B、轴向中心与径向中心的交点 C 和轴向中心与径向边缘的交点 D 为 4 个后续用于力能参数分析的典型节点。由图 2 可以看出，4 款有限元软件求解的圆柱体等温压缩后的等效塑性应变分布规律基本类似，可分为难变形区（I）（图 2 中 A 点附近）、自由变形区（II）（图 2 中 D 点附近）和易变形区（III）（图 2 中 C 点附近），其计算结果与金属塑性变形理论及物理实验结果吻合<sup>[13]</sup>。心部的等效塑性应变值最大，为易变形区，压缩方向为负应变，半径和圆周方向为正应变；受摩擦的影响，接触表面靠近中心部位的等效塑性应变值最小，该区域为难变形区，应变基本为 0；外

侧表面为自由变形区，应变为一向压缩、两向延伸。从易变形区沿半径方向向外有 1 个“羊角”形状的扩展区域，该区域为剪切变形区，等效塑性应变值介于易变形区和自由变形区之间。从变形后的网格可以看出，网格分布质量较好，没有重叠和严重的畸变区域。由图 2 中圆圈所示部分网格可以看出，压缩过程中随着变形量增加，侧面近端部的金属发生“侧面翻平”现象，因而该区域的单元网格角度存在大于 90°的情况，ANSYS 和 MARC 软件计算的变形后网格的形状比较接近，而 ABAQUS 和 DEFORM 软件计算的变形后网格的形状接近，从侧面流动到端部接触面的区域更多。根据软件后台的输出信息来看，仅考虑迭代求解过程，ANSYS 求解等温压缩过程中金属塑性变形问题耗费 CPU 的时间约为 12 s；MARC 耗费 CPU 的时间约为 8.92 s，DEFORM 耗费 CPU 的时间约为 5 s，ABAQUS 耗费 CPU 的时间约为 8 s，所以，DEFORM 的计算速度最快，ANSYS 的计算速度最慢。

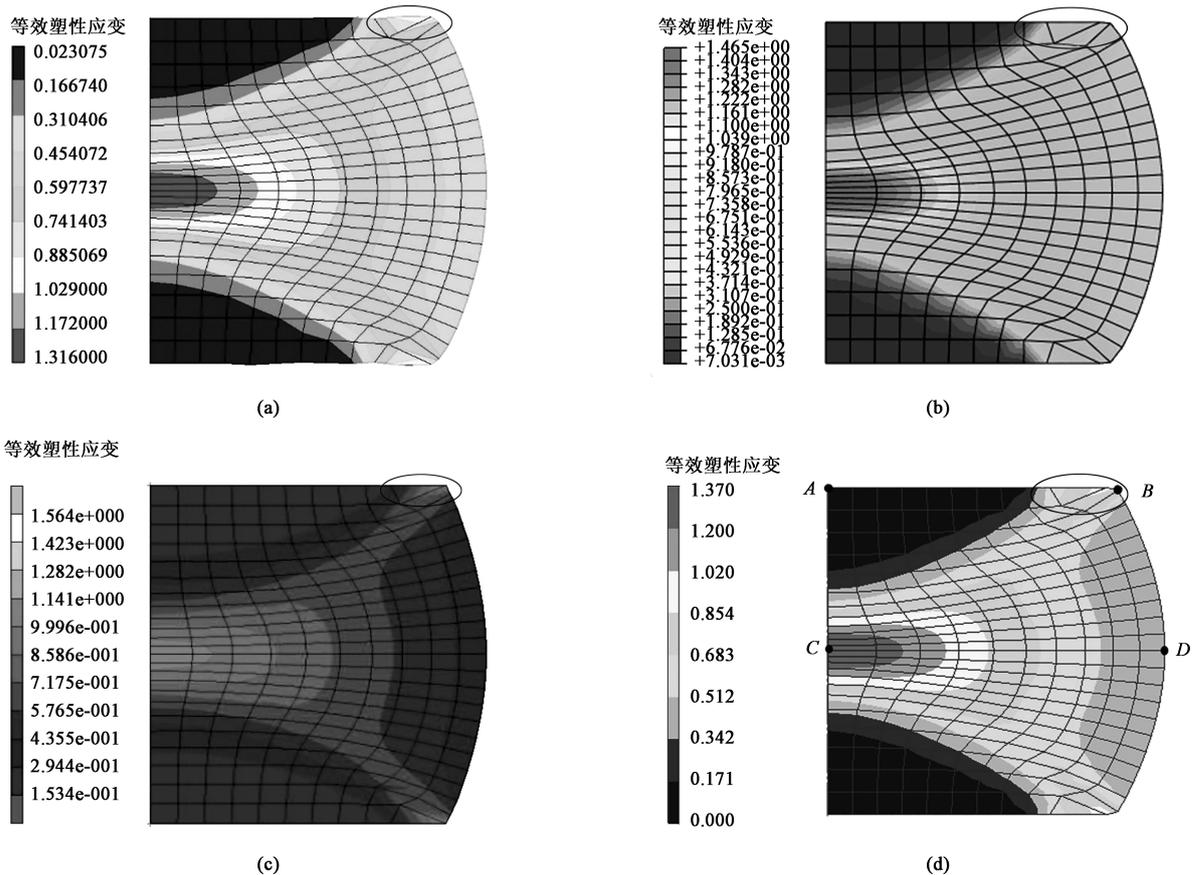


图 2 4 款有限元软件计算的等效塑性应变结果

(a) ANSYS (b) ABAQUS (c) MARC (d) DEFORM

Fig. 2 Results of equivalent plastic strain calculated by four kinds of finite element software

图 3 为 4 款有限元软件求解的圆柱体等温压缩后的第一主应力分布。从图 3 中可以看出，4 款有

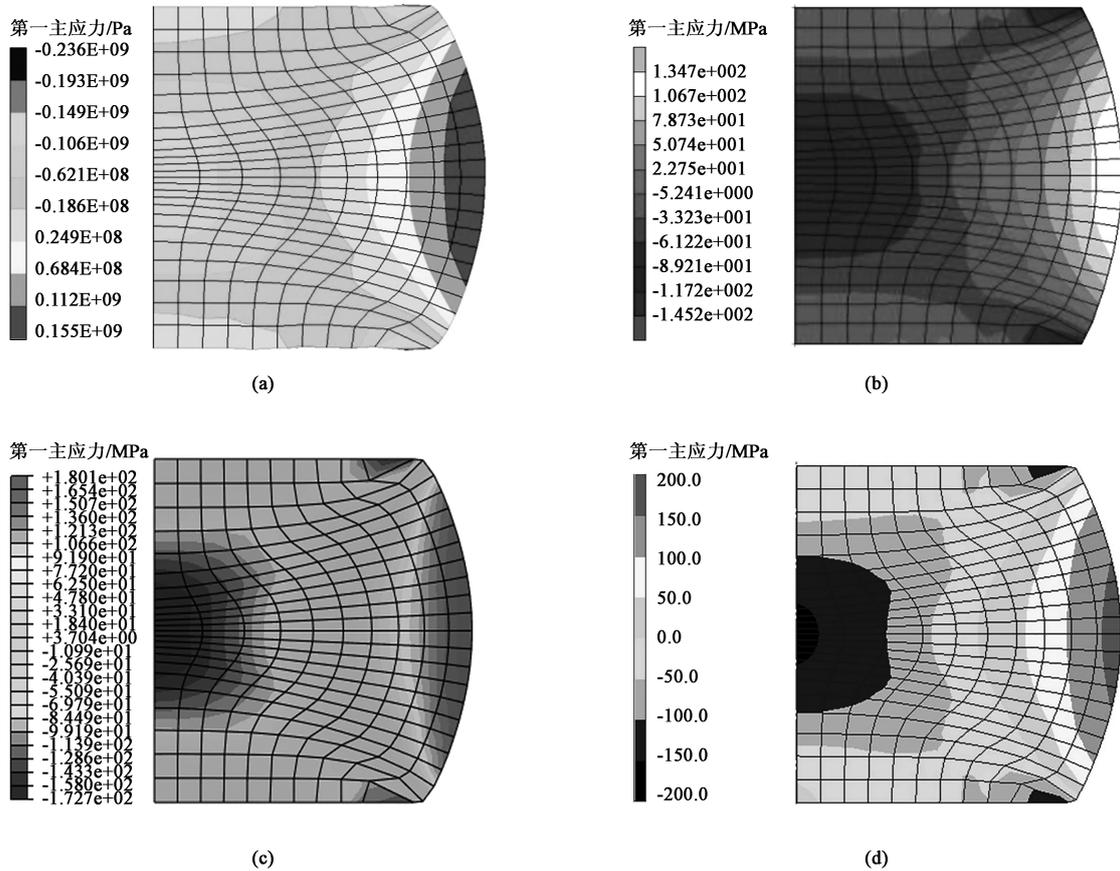


图 3 4款有限元软件计算的第一主应力的结果

(a) ANSYS (b) MARC (c) ABAQUS (d) DEFORM

Fig. 3 Results of the first principal stress calculated by four kinds of finite element software

有限元软件的第一主应力的分布规律基本相同，整个变形区的第一主应力大部分为压应力，所以，压缩过程的基本应力状态以3向压应力为主；受到产生鼓形时轴向弯曲张力的影响，由易变形区中心（图2d中C点）到自由变形区边缘（图2d中D点）第一主应力逐渐由压应力变为拉应力，这些拉应力是压缩过程中表面产生周向裂纹的主要原因；易变形区的第一主应力数值相对较小，呈现“苹果”形，由于发生侧面翻平现象，在强剪切和挤压作用下位于“羊角”区域的第一主应力数值也相对较小。第一主应力的最大数值主要位于自由表面，该区域的应力状态主要是两向压缩、一向拉伸，如图3所示。

为了分析有限元预测结果与主应力法求解结果的差异，引入主应力法求解圆柱体压缩过程中接触面应力的计算方法。当接触摩擦边界的条件为库伦摩擦条件 $\tau=f\sigma$ （其中， $\tau$ 为剪切摩擦力， $f$ 为摩擦因数， $\sigma$ 为接触面压缩方向应力）时，利用主应力法（又称工程法）求解圆柱体压缩过程中 $\sigma$ 沿半径方向的表达式为<sup>[14]</sup>：

$$\sigma = -\sigma_s \exp\left[\frac{2f}{h}(R-r)\right] \quad (1)$$

式中： $\sigma_s$ 为屈服应力； $R$ 为压缩过程中圆柱体的外圆半径； $r$ 为半径方向上任一点的半径值； $h$ 为压缩过程中圆柱体的瞬时高度。

此时，圆柱体压缩过程中载荷 $p$ 的表达式为：

$$p = \pi R^2 \sigma_s \left(1 + \frac{2fR}{3h}\right) \quad (2)$$

根据塑性变形过程体积不变理论，理想条件下任一变形过程中圆柱体的半径和高度满足：

$$R_0^2 h_0 = R^2 h \quad (3)$$

式中： $R_0$ 为圆柱体的外圆原始半径； $h_0$ 为圆柱体原始高度。

将式(3)代入式(2)，得到载荷 $p$ 与圆柱体瞬时高度 $h$ 的关系式：

$$p = \pi \frac{R_0^2 h_0}{h} \sigma_s \left(1 + \frac{2fR_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}}}{3h}\right) \quad (4)$$

图4为4款有限元软件及不同方法求解的接触

面压缩方向应力沿  $AB$  路径 (图 2d 中所示  $A$ 、 $B$  节点) 的变化和载荷变化。由图 4a 可知, 在本文计算条件下, 主应力法求解属于理想状态, 压应力值分布由中心  $A$  点到边界  $B$  点呈线性逐渐减小, 计算误差较大; 在距离中心 4.5 mm 内, 4 款有限元软件的计算值相差不大, 沿接触面压缩方向的压应力值的分布从中心到自由表面逐渐增大。在黏着区 (图 2 中应变接近 0, 又称难变形区) 中心区域, MARC 计算的压应力值最大, ABAQUS 计算的压应力值最小; 在沿着半径方向逐渐远离中心区的过程中, ABAQUS 计算的压应力值逐渐增加; MARC 计算的应力值变化比较平稳, 在距离中心 2~4.5 mm 范围内, MARC 计算的压应力值最小, ABAQUS 计算的压应力值最大。在距离  $A$  点大于 4.5 mm 后, 进入“侧面翻平”区域, 受到金属流动过程中强剪切和压缩的影响, 压缩方向的压应力值均有一个快速增加过程; ANSYS 计算的压应力值的增加明显高于其他软件, 这可能是 ANSYS 软件中平砧没有设置刚性体的缘故。由图 4 和图 5 均可以看出, ANSYS 计算后的坯料接触面不是平直线, 这和接触摩擦算法设定也有关系; 在接近自由表面区域, 除了 MARC 软件, 其他 3 款有限元软件的接触面压缩方向应力均有一个减小过程。由图 4b 可知, 圆柱体压缩过程中变形载荷在弹性阶段线性快速增加至 16 kN, 然后进入塑性变形阶段, 尽管材料为理想塑性材料, 但由于接触面面积增加引起载荷进一步缓慢增加, 变形结束时约为 27 kN; 虽然 4 款有限元软件计算的接触面在  $AB$  路径上沿压缩方向的应力有所差别, 但计算的整体压缩载荷的差别不大, 塑性阶段载荷计算值的相对误差小于 3%。由于单次实际热模拟压缩实验中试样端部的摩擦较小, 故 4 款有限元软件的载荷计算结果均略高于实测值, 平均误差小于 10%, 计算精度基本满足要求。主应力法求解的圆柱体压缩过程塑性阶段的变形载荷, 与有限元法计算结果的变化趋势接近, 但计算值高于有限元法计算值约 10%, 与实测值相差较大。主要原因是: 主应力法假定圆周上自由表面为直线, 不产生鼓形, 而数值模拟计算后产生鼓形 (图 4c), 因此, 塑性变形过程中坯料与上、下砧接触面的面积利用塑性不变条件计算后的结果显著大于数值模拟计算的结果 (主应力法计算变形后轮廓半径  $R_1$  > 数值模拟计算变形后轮廓半径  $R_2$ ), 导致载荷积分后的计算值较大。

图 5 为 4 款有限元软件求解的等效塑性应变沿  $CD$  路径 (图 2d 中所示  $C$ 、 $D$  节点) 的变化规律。

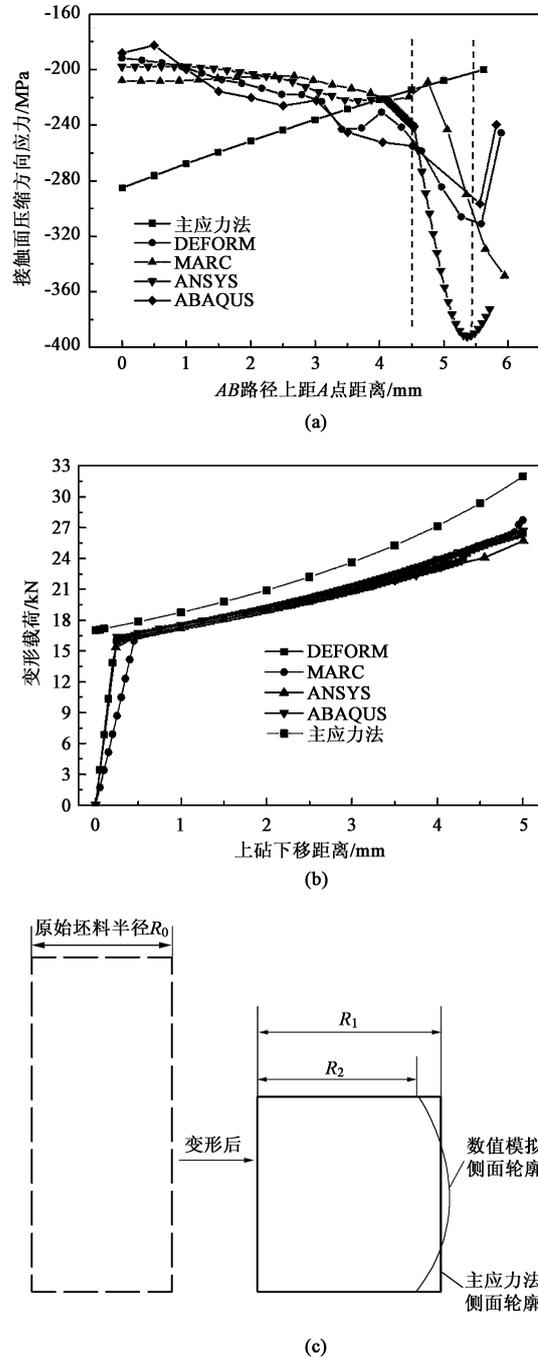


图 4 不同有限元软件及方法求解的接触面压缩方向应力 (a)、变形载荷 (b) 和变形轮廓 (c)

Fig. 4 Compressive directional stresses on contact surface (a), deformation loads (b) and deformation profiles (c) calculated by different finite element softwares and methods

由图 5 可以看出, 从中心到自由表面, 4 款有限元软件求解的等效塑性应变值逐渐降低, 符合金属塑性流动理论。中心易变形区的等效塑性应变计算结果从大到小依次为 ABAQUS、DEFORM、ANSYS 和 MARC 软件, ABAQUS 计算的等效塑性应变值最大, 约为 1.5, 而 MARC 与其他 3 款有限元软件的计算

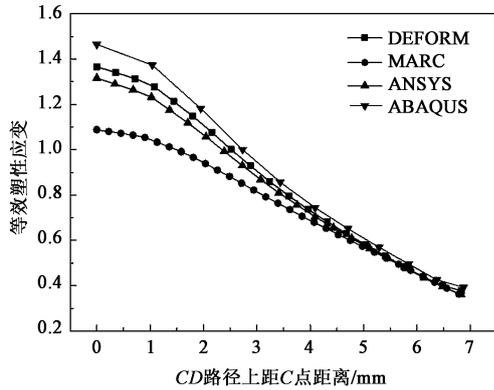


图 5 沿 CD 路径上等效塑性应变分布

Fig. 5 Distribution of equivalent plastic strain along CD path

结果相比略小, 约为 1.1, 相对误差达 26.7%; 靠近自由变形区, 4 款有限元软件的计算结果基本相近, 约为 0.3。

## 2.2 影响因素分析

不同有限元数值模拟软件的算法差异以及前处理及求解模块中的参数设置对计算结果有一定影响, 同时, 实际变形问题的人工处理同样影响有限元求解结果。为此, 基于前述各软件在相同变形参数设置和处理条件下的对比分析结果, 本文进一步分析了参数设定、网格划分、摩擦条件、材料模型和几何模型处理对计算结果的影响规律。

### 2.2.1 参数设定的影响

前述分析结果均为各有限元软件在默认设置条件下的计算值, MARC 软件计算的等效塑性应变值与其他 3 款有限元软件的计算结果的相对误差较大, ANSYS 与 ABAQUS 计算结果的相对误差也超过了 10%, 这些计算结果的差异不足以说明某一款软件的计算精度高, 因为每款软件在前处理和求解模块中有很多与算法有关的参数, 而这些参数的设定会对计算结果产生较大影响。图 6 为 ANSYS 软件和 MARC 软件在不同设定值下所得等效塑性应变计算结果的比较。其中, ANSYS 中的接触算法由默认的增广拉格朗日算法 (AUGMENTED METHOD) 改为拉格朗日 & 罚函数法 (LAGRANGE & PENALTY), MARC 中接触设定中的数值模型 (NUMERICAL MODEL) 由默认的反切速度模型 (ARCTANGENT VELOCITY) 改为黏着-滑动模型 (STICK-SLIP)。由图 6 可以看出, 改变设定参数后, MARC 和 ANSYS 计算的心部易变形区的等效塑性应变值相比默认设置条件下的计算结果显著增大, 最大值约为 1.4, 与 ABAQUS 和 DEFORM 软件在默认设定条

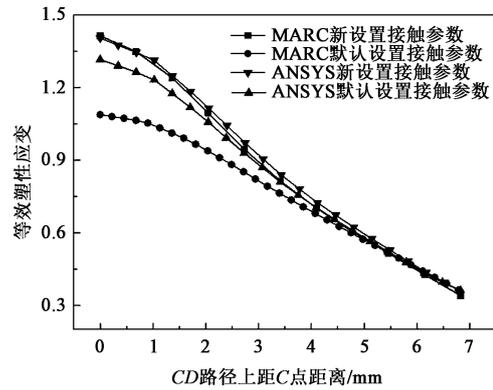


图 6 ANSYS 和 MARC 软件不同设定参数的等效塑性应变沿 CD 路径变化

Fig. 6 Changes of equivalent plastic strain along CD path under different parameters set by ANSYS and MARC software

件下的计算结果的相对误差约为 6.7%, 而自由变形区的计算值几乎未发生变化, 且两款软件的计算值几乎相等。可见, 软件自带的参数设置对计算结果的影响较大, 工程分析时应有针对性地调整和修正这些参数, 以保证计算精度的可靠性。

### 2.2.2 网格划分影响

图 7 为不同单元划分方式下的有限元网格模型。其中, 图 7a 为四边形单元网格划分, 四边形映射网格划分和自由划分的结果相同, 单元数目为 240 个, 节点数为 275 个; 图 7b 为三角形映射网格划分, 单元数目为 480 个, 节点数为 275 个; 图 7c 为三角形单元自由网格划分, 单元数为 530 个, 节点数为 300 个。采用三角形单元映射网格划分后, 网格取向基本一致, 单元中 1 个角的角度为  $90^\circ$ , 而采用三角形单元自由网格划分后, 单元取向性减弱, 每个单元的 3 个角的角度基本均为  $60^\circ$ 。

图 8 为不同网格划分条件下塑性等效应变的计算结果。由图 8a 可以看出, 采用三角形单元映射网格划分格式计算的等效塑性应变分布不符合轴对称压缩过程的变形规律, 虽然三角形单元映射网格划分的单元的均匀性和质量均高于自由划分方式, 但单元内角度差别过大, 导致单元在大变形下的畸变严重, 降低了计算精度, 所以, 技巧性的网格划分方法未必一定获得更为理想的求解精度。采用自由网格划分方式求解的等效塑性应变分布规律 (图 8b) 和采用四边形单元网格划分方式求解的计算结果 (图 7a) 相近, 黏着区、自由变形区及剪切带上的网格质量仍然较好, 而心部和侧面翻平区域的网格畸变较为严重。相比四边形单元网格划分方式, 采用三角形单元网格划分求解的最大等效塑性应变

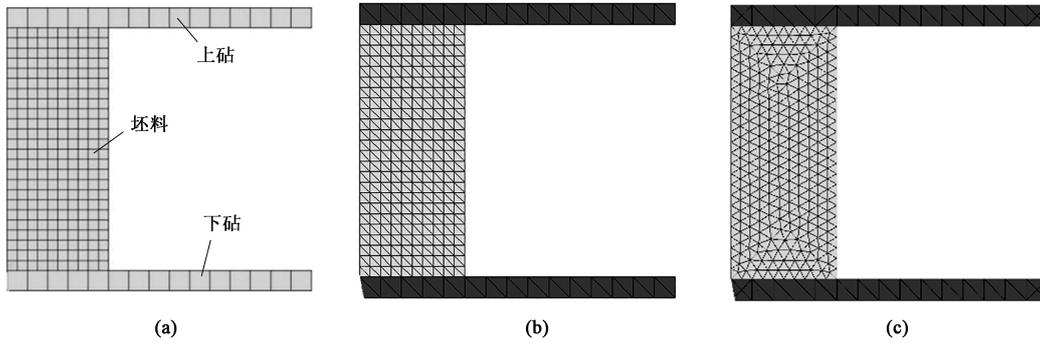


图 7 不同单元划分方式下的有限元网格模型  
 (a) 四边形单元网格划分 (b) 三角形单元映射网格划分 (c) 三角形单元自由网格划分

Fig. 7 Finite element mesh models with different meshing methods

(a) Meshing of quadrilateral element (b) Mapped meshing of triangular element (c) Free meshing of triangular element

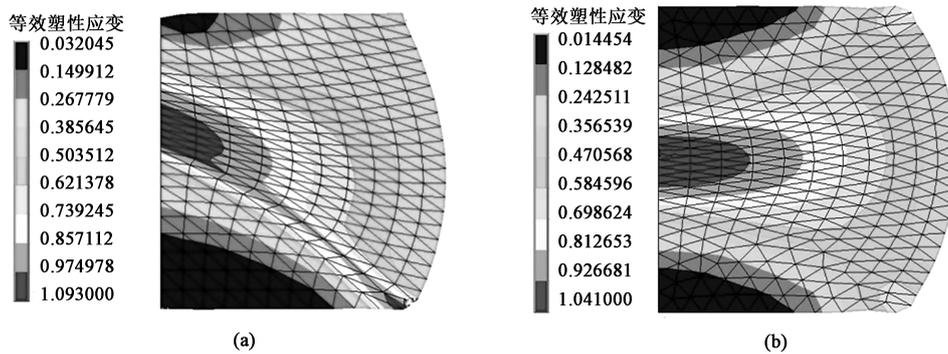


图 8 不同网格划分方法下的塑性等效应变分布

(a) 三角形单元映射网格划分 (b) 三角形单元自由网格划分

Fig. 8 Distributions of equivalent plastic strain with different meshing methods

(a) Mapped meshing of triangular element (b) Free meshing of triangular element

值显著减小，而最小等效塑性应变值明显升高，如果以其他 3 款有限元软件的计算结果为标准，三角形单元网格划分比四边形单元网格划分的计算精度低。

有限元求解塑性变形过程中，塑性变形较大时，网格发生畸变，导致网格质量下降和迭代求解不收敛，网格重划分是解决网格畸变引起的迭代发散问题的主要手段。4 款有限元软件在默认设置条件下设定网格自动重划分后，只有 MARC 软件计算过程的网格进行了重划分。设置网格重划分和不设置网格重划分下，MARC 软件计算的应力、应变结果如图 9 所示。由图 9a 和图 9b 可以看出：网格重划分对整体等效塑性应变分布规律的影响不大，采用网格重划分后，接触面靠近自由表面的网格形状明显变好，而中心的网格形状质量有所降低。由图 9c 和图 9d 可以看出：沿 AB 路径，在两种不同的网格划分设定条件下，压缩方向的应力在难变形区的计算结果基本相近，由于网格畸变区域主要在难变形区与自由变形区的交界区域，越靠近“侧面翻平”区

域，网格畸变越严重，使得网格重划分和不重划分下的应力分布和变形规律的计算结果有一定差别，而网格是否重划分对易变形区计算结果的影响不大。由于网格重划分前后，单元和节点的场变量初始值是根据重划分前的计算结果进行插值得到的，对网格畸变区域的场分布量计算结果的精度有一定影响，但对其他非网格畸变区域计算结果的影响较小，所以，网格畸变不严重或者区域不大的情况下，可以适当放宽网格重划分要求，反之应考虑网格重划分，进而避免迭代收敛性和计算精度。

### 2.2.3 模型简化与摩擦条件的影响

在有限元求解过程中，通常可选用常摩擦因数  $f$  的库伦摩擦类型  $\tau = f\sigma$  或常摩擦因子  $m$  的剪切摩擦类型  $\tau = mk$ ，库伦摩擦与接触面接触压力  $\sigma$  有关，剪切摩擦与剪切屈服强度  $k$  有关，采用 Mises 屈服准则时， $k = 0.577R_{eL}$ （其中  $R_{eL}$  为屈服强度），故一般情况下摩擦因数和摩擦因子取值相同时，剪切摩擦类型下的摩擦力小于库伦摩擦类型的摩擦力，不

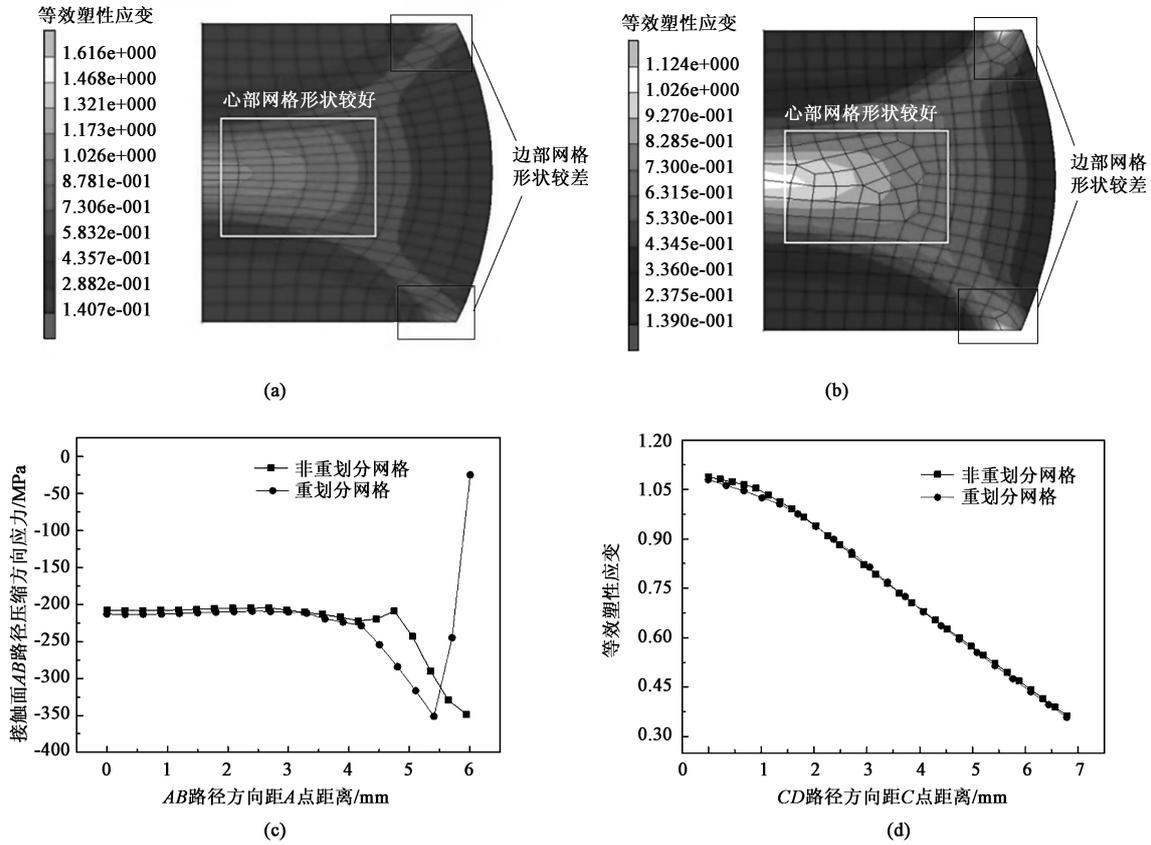


图 9 不同网格重划分设置下等效塑性应变分布及沿不同路径的变化

(a) 非重划分网格等效塑性应变分布 (b) 重划分网格等效塑性应变分布 (c) AB 路径压缩方向应力变化 (d) CD 路径等效塑性应变分布

Fig. 9 Equivalent plastic strain distribution and its variation along different paths under different meshing settings

(a) Distribution of equivalent plastic strain without remeshing (b) Distribution of equivalent plastic strain with remeshing

(c) Change of stress in compressive direction along AB path (d) Change of equivalent plastic strain along CD path

同摩擦类型导致不同的应力边界条件。另外，为简化工程问题的力学求解，通常可将三维几何模型简化为二维平面问题或者轴对称问题。当热变形过程的弹性变形量不能忽略时，材料模型可简化为弹塑性 (Elastic Plasticity, EP)；而在大塑性热变形过程中，弹性变形量可以忽略，此时材料模型可以简化为理想刚塑性 (Rigid Plasticity, RP)。图 10 为不同模型简化及摩擦类型下沿 AB 路径的压缩方向应力以及沿 CD 路径的等效塑性应变分布结果。由图 10 可以看出，二维 (2D) 轴对称简化几何模型与三维 (3D) 模型求解的应力和应变分布规律相同，计算值吻合良好，相对误差不超过 5%，二维简化模型不仅可以极大地提升求解效率且完全可以满足实际工程问题求解。不同摩擦类型对沿 AB 路径的压缩方向应力和沿 CD 路径的等效塑性应变分布规律的影响不大，但摩擦因子和摩擦因数相同时，库伦摩擦类型的摩擦力大，难变形区域大，易变形区域小，因此，剪切摩擦类型时接触面压缩方向的应力在心

部和侧面翻平区域的计算结果小于库伦摩擦类型的计算结果，而在过渡区的计算结果大于库伦摩擦类型计算结果。剪切摩擦时，中心区域的等效塑性应变值较库伦摩擦类型的计算结果小，沿 AB 路径的压缩方向应力和沿 CD 路径的等效塑性应变的计算结果在相同摩擦因子和摩擦因数下的相对平均误差分别为 7% 和 6.6%。针对材料模型简化，由于本文用材料的峰值应变较小且塑性变形量较大，尽管在接触面上靠近侧面翻平区域的压缩方向的应力有所波动和变化，但整体计算结果相差较小，而弹塑性有限元的应变值并未考虑在总应变中，使得刚塑性材料模型计算的等效塑性应变值略大于弹塑性材料模型。

### 3 结论

(1) ANSYS、MARC、ABAQUS 和 DEFORM 这 4 款有限元软件求解的 Fe-6.5%Si 钢圆柱体在等温

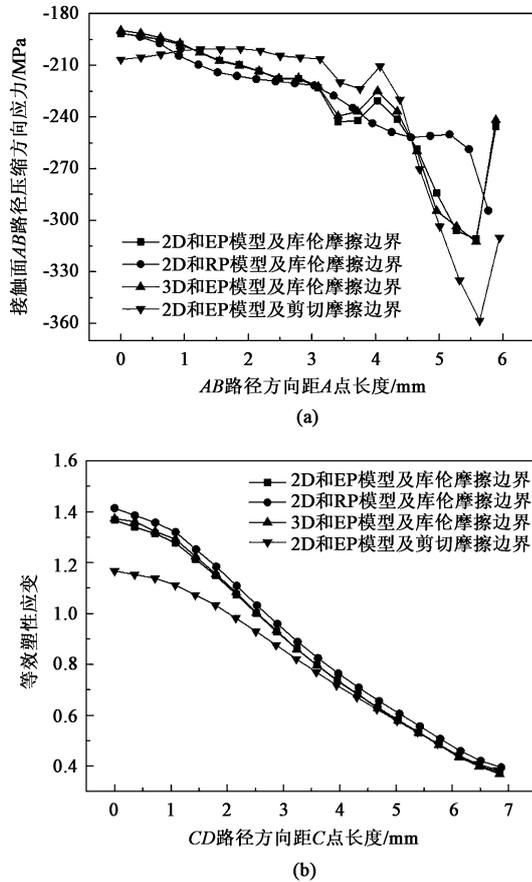


图 10 不同模型简化与摩擦类型对计算结果的影响  
(a) 沿 AB 路径的压缩方向应力  
(b) 沿 CD 路径的等效塑性应变

Fig. 10 Effects of different model simplifications and friction types on calculation results  
(a) Stress in compressive direction along AB path  
(b) Equivalent plastic strain along CD path

压缩过程的等效塑性应变分布主要包括易变形区、自由变形区和难变形区，大部分区域的第一主应力均为压应力，应力状态为三向压应力。4款有限元软件计算的应变状态和应力状态相近，且均符合金属塑性变形理论。默认设置条件下，ANSYS 和 MARC 计算的变形后的网格相近，DEFORM 和 ABAQUS 计算的变形后的网格形状相近。DEFORM 的计算速度较快，约为 5 s，ANSYS 的计算速度较慢，约为 12 s。

(2) 4款有限元软件计算的接触面沿 AB 路径上的压缩方向应力在距离中心 4.5 mm 内相差不大，数值由中心到自由表面逐渐减小，而主应力法求解的应力数值由中心到侧表面呈线性减小；在接近侧面翻平区域，由于网格畸变较为严重和接触算法设定不同，4款有限元软件计算的接触面上的压缩方

向的应力略有差异。默认条件下 4 款有限元软件计算的等效塑性应变的分布规律相近而数值有一定差别，改变 MARC 和 ANSYS 软件的默认接触算法参数后，4 款有限元软件的计算结果基本相同，等效塑性应变从易变形区的 1.4 沿 CD 路径逐渐降低至自由变形区的 0.3，难变形区中心的等效塑性应变值最小。

(3) 圆柱体压缩变形过程中载荷在弹性阶段呈线性快速增加；进入塑性变形阶段后，载荷基本保持稳定，缓慢增加至载荷最大值（约为 27 kN），塑性阶段中 4 款有限元软件的载荷计算值的相对误差小于 3%，且计算值略高于实测值，误差小于 10%，计算精度均满足要求。主应力法求解的塑性阶段的变形载荷与有限元法计算结果的变化趋势接近，计算结果高于有限元预测值约 10%。几何模型简化能够保证计算精度且提高计算效率，而网格划分方式、畸变网格处理、接触参数设定和边界摩擦条件对计算结果有一定影响，需要在实际应用中优化参数设置，以进一步提高软件求解的精度和可靠性。

#### 参考文献：

- [1] 张宇翔, 汤泽军, 许爱军, 等. Ti55 钛合金管电辅助加热气压胀形圆角填充成形规律及多场耦合数值模拟 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 112-120.  
Zhang Y X, Tang Z J, Xu A J, et al. Fillet filling law and multi-field coupling numerical simulation of Ti55 titanium alloy pipe in electric assisted heating bulging [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 112-120.
- [2] 于华民, 董方, 吴运新, 等. 大型铝合金 C 形截面环轧制过程数值模拟和轧制区成形规律分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 197-206.  
Yu H M, Dong F, Wu Y X, et al. Numerical simulation on rolling process and analysis on rolling zone forming law for large aluminum alloy C-shaped cross-section ring [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 197-206.
- [3] Ablat M A, Qattawi A. Numerical simulation of sheet metal forming: A review [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89 (1-4): 1-16.
- [4] 王忠堂, 张宏亮, 杨君宝, 等. 镁合金网格壁板压弯成形数值模拟及实验研究 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (3): 14-19.  
Wang Z T, Zhang H L, Yang J B, et al. Numerical simulation and experimental study on bending of magnesium alloy grid panel [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (3): 14-19.
- [5] Hu Z, Li J Q. Computer simulation of pipe-bending processes with small bending radius using local induction heating [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 91 (1-3): 75-79.
- [6] Bao L, Qi X W, Mei R B, et al. Investigation and modeling of

- work roll temperature in induction heating by finite element method [J]. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2018, 118: 735-743.
- [7] Mei R B, Bao L, Li C S, et al. FE analysis of 6063 aluminium profiles with complex cross-section during online quenching processes [J]. Mechanika, 2015, 21 (2): 99-106.
- [8] Şimşir C, Gür C H. A FEM based framework for simulation of thermal treatments; Application to steel quenching [J]. Computational Materials Science, 2009, 44 (2): 588-600.
- [9] Mohamed M S, Foster A D, Lin J G, et al. Investigation of deformation and failure features of AA6082; Experimentation and modeling [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacturing, 2012, 53 (1): 27-38.
- [10] Singh B K, Singh R J, Kumar R, et al. 3D-thermo-structural simulation of pressure tube-calandria tube behaviour under accident conditions in PHWR using ABAQUS [J]. Nuclear Engineering & Design, 2018, 328: 188-196.
- [11] Kang G P, Lee K, Yong H K, et al. Implementation of VPSC polycrystal model into rigid plastic finite element method and its application to Erichsen test of Mg alloy [J]. Metals & Materials International, 2017, 23 (5): 930-939.
- [12] 梅瑞斌, 包立, 杜永霞, 等. Fe-6.5%Si 钢高温变形过程本构方程 [J]. 钢铁, 2018, 53 (6): 98-102.
- Mei R B, Bao L, Du Y X, et al. Constitutive equations of Fe-6.5%Si steel at high deformation temperature [J]. Iron and Steel, 2018, 53 (6): 98-102.
- [13] 彭大暑. 金属塑性加工原理 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004.
- Peng D S. Principle of Metal Plastic Processing [M]. Changsha: Central South University Press, 2004.
- [14] 王平, 崔建忠. 金属塑性成形力学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- Wang P, Cui J Z. Mechanics of Metal Plastic Forming [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.

### “2022 上海锻压技术与装备展” 将于 2022 年 6 月 15-18 日在上海虹桥国家会展中心盛大开幕

由中国机械工程学会塑性工程分会、北京机电研究所有限公司精心筹备的“2022 上海锻压技术与装备展”将于 2022 年 6 月 15-18 日在上海虹桥国家会展中心盛大开幕。现热忱邀请国内外锻压技术与装备供应商参展, 展示新产品、新技术、新形象; 同时, 邀请国内外同行和朋友届时光临, 共谋行业发展大计!

同期举办: 先进塑性成形技术与装备前沿论坛、全国锻压技术与装备高级研修班、第 22 届中国国际模具技术和设备展览会、2022 上海热处理装备与技术展览会。

“2022 上海锻压技术与装备展”致力于打造锻压行业一站式展览平台, 不仅涵盖下料、加热、设备、模具、检测、新技术、产品、模拟等锻造生产全产业链, 而且聚焦推动锻压领域产学研进程, 为国内科研机构、团体提供集中展示科研成果、技术推广、人才培养等成果的便利平台, 通过 24×365×360°式多方位宣传, 为企业开拓市场、扩大贸易往来搭建更畅通的合作桥梁, 同时促进锻压领域的产学研用学术交流与合作, 实现优势互补、互惠共赢。“2022 上海锻压技术与装备展”期待您的到来! 2022, 相约上海, 见证发展!

#### 展品范围:

(1) 成形零部件: 锻件、挤压件、轧制件及特种成形件(旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧、楔横轧、充液成形、增量成形及各种新技术等);

(2) 锻压设备及附件: 锻造、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备, 锻造生产用工业炉、窑和节能技术, 自动化控制, 锻压辅助设备, 锻压防护产品等;

(3) 锻压智能制造技术及装备: 自动化生产线、智能工厂、工业机器人、智能机床、智能物流管理、增材制造、机器视觉技术、工业物联网及系统集成、自动化生产解决方案及各种软件等;

(4) 锻压检测设备及仪器仪表;

(5) 工艺设计和 CAD、CAM, 材料成形模拟软件等。

#### 展位分类:

(1) 标准展台: 3 m×3 m, 3 m×4 m, 3 m×6 m。注: 每个标准展位包括: 三面隔板、帽板、地毯、一张展桌、两把椅子、两支照明灯、一个 220 V/5 A 电源插座。

(2) 光地展区: 36 平方米起租。

(3) “科创中国”新技术、新成果集中展示区: 宣传板(单张宣传板标准尺寸约 3 m×2 m); 宣传板由主办方统一制作和布展。

参观者: 来自国外及全国各地的专业人士前来参观和洽谈, 其他相关行业的参观者有机械、模具、热处理、工业炉、航空航天、石油、兵器、家电、电子、纺织机械等。

#### 联系方式:

地 址: 北京市海淀区学清路 18 号中国机械工程学会塑性工程分会秘书处 网 址: <http://www.cstp-cmes.org.cn>

联系人: 林玉彤 18811346037、秦思晓 15201461873、周 林

联系电话: 010-62920652

E-mail: [fst\\_linyutong@163.com](mailto:fst_linyutong@163.com); [duanya@cmes.org](mailto:duanya@cmes.org)