

引用格式: 孙凌燕, 程亮, 郭海晶, 等. 基于 CPB06 准则的 TA2 三通液压成形数值模拟研究[J]. 中国材料进展, 2025, 44(8): 778-784.

SUN L Y, CHENG L, GUO H J, *et al.* Numerical Simulation of Hydraulic Forming Process for TA2 Titanium T-Junction Based on CPB06 Criterion [J]. Materials China, 2025, 44(8): 778-784.

基于 CPB06 准则的 TA2 三通液压成形数值模拟研究

孙凌燕¹, 程亮^{1,2}, 郭海晶¹, 李若琳¹, 张志远³, 杨超⁴, 孙峰²

(1. 江苏理工学院材料工程学院, 江苏 常州 213001)

(2. 西北工业大学 重庆科创中心, 重庆 401135)

(3. 洛阳船舶材料研究所(中国船舶集团有限公司第七二五研究所), 河南 洛阳 471000)

(4. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 针对 TA2 纯钛三通液压成形过程进行有限元数值模拟, 分别采用米塞斯各向同性屈服准则和 CPB06 屈服准则, 对结果进行了对比分析。组织分析结果表明, 纯钛管材存在明显的倾转基面织构, 同时由于本征滑移系数数量过少, 因此出现拉压不对称、各向异性强烈、扭曲强化效应显著等力学行为特征, 导致常规的米塞斯屈服准则难以适用, 模拟结果与实际成形过程相差过大, 尤其是出现了不符合工程实际的支管崩溃现象。而 CPB06 屈服准则由于考虑了拉压不对称和各向异性硬化, 因此能够准确描述纯钛在三通成形过程中的材料流动行为, 模拟结果与实验结果吻合良好。采用所建立的基于 CPB06 屈服准则的有限元数值模型, 能够对纯钛三通成形过程的物理场演变行为及成形缺陷进行分析预测, 为工艺优化和失效分析提供理论支撑。

关键词: 纯钛; 三通; 液压成形; 屈服准则; 各向异性; 数值模拟

中图分类号: TG306 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2025)08-0778-07

Numerical Simulation of Hydraulic Forming Process for TA2 Titanium T-Junction Based on CPB06 Criterion

SUN Lingyan¹, CHENG Liang^{1,2}, GUO Haijing¹, LI Ruolin¹,
ZHANG Zhiyuan³, YANG Chao⁴, SUN Feng²

(1. School of Materials and Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

(2. Chongqing Innovation Center, Northwestern Polytechnical University, Chongqing 401135, China)

(3. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, China)

(4. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: In this study, numerical simulations on the hydraulic forming process of TA2 pure titanium T-junction were conducted, using the commonly used Mises yield criterion and the CPB06 yield criterion respectively, and the simulated results were compared and analyzed. The microstructure results indicate that pure titanium tubes have obvious tilted basal texture. At the same time, due to the limited number of intrinsic slip systems, there are mechanical characteristics such as tension-compression asymmetry, strong anisotropy, and significant distortion strengthening effect. This makes the Mises yield criterion difficult to apply, and the simulation results deviate significantly from the actual forming process, especially with the occurrence of branch collapse that does not conform to engineering practice. The CPB06 yield criterion, however, can correctly describe the material flow behavior of pure titanium during the T-junction forming process due to the consideration of tension-compression asymmetry and anisotropic hardening. The simulation results are in good agreement with experimental

results. By employing the established finite element model based on CPB06 yield criterion, it is possible to analyze and predict the evolution of the physical fields and forming defects in the pure titanium T-junction forming process, providing theoretical support for process optimization and failure analysis.

Key words: pure titanium; T-junction; hydraulic forming; yield criterion; anisotropy; numerical simulation

收稿日期: 2024-04-23 修回日期: 2024-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905233); 国防基础科研项目(JCKY2020607B003)

第一作者: 孙凌燕, 女, 1974年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: linsun@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202404032

1 前言

管件液压成形是适应结构轻量化发展起来的一种先进成形工艺^[1]。以三通液压成形为例，其成形过程如图 1 所示，首先将一定尺寸的管坯置于模具中，通过主缸对管材两端施加一定压力使其密封，然后向管坯内注入高压液体介质，再按照一定的加压曲线和主缸位移速率使管材流入模具的支管腔体中，达到目标支管高度或目标主缸位移后完成三通的成形^[1,2]。与其他的管件成形方法相比，液压成形具有材料致密度高、废料少、尺寸精度高、力学性能好等优点，因此广泛应用于航空航天、轨道交通、船舶、化工等领域^[3]。液压成形质量取决于多种因素，如材料力学特性、主缸进给速度、加压曲线等。当所采用工艺参数不合理时，很容易出现开裂、崩口、起皱、叠料等缺陷^[2,4]。运用有限元数值仿真技术对管件液压成形过程进行分析模拟，已成为优化工艺参数、提高成品率的一种行之有效且被广泛接受的方法。然而，目前的数值仿真主要针对铝合金、钢等材料，关于钛及钛合金管件液压成形的模拟仿真鲜见报道^[3]。随着航空航天、船舶、化工等领域对轻质、高强、耐蚀零部件的需求不断提升，对钛及钛合金管件的液压成形的技术提升与工艺优化提出了新要求，进而对高精度有限元数值模型提出迫切需求。

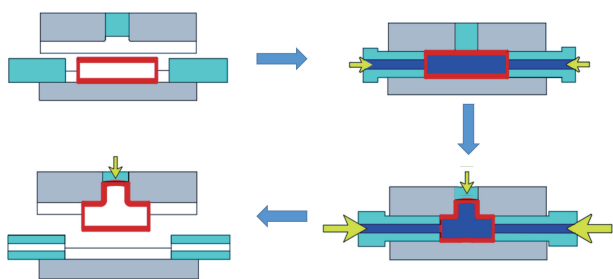


图 1 三通液压成形的过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the T-junction hydraulic forming process

不同于常规的铝合金、钢等材料，钛及钛合金在室温下主要由密排六方结构(HCP)的 α 相构成，变形机制主要为柱面滑移^[5]。由于滑移系较少，在变形过程中还会出现明显的压缩孪生和拉伸孪生^[6]，因此钛及钛合金的各向异性非常显著且表现出强烈的拉压不对称现象，即由于孪生作用，拉伸强度低于压缩强度。然而随着变形量的提高，孪生导致压缩硬化率急剧提高，从而使大应变下的压缩强度超过拉伸强度^[7]。此外，在多轴应力状态下，钛及钛合金表现出明显的扭曲强化效应^[8,9]，从而需要更大的载荷才能持续变形。由此可见，钛及钛合金的塑性变形力学特性非常复杂，当采用常规的米塞

斯各向同性屈服准则进行成形模拟时可能无法准确预测、描述成形过程中的材料变形与流动行为，甚至成形结果与实际偏差很大。因此为了建立准确的钛合金三通成形有限元数值模型，需要构建能够准确描述钛及钛合金复杂力学特性的屈服准则并采用合理高效的积分方法将其嵌入有限元模型中。

为此，本研究针对 TA2 纯钛管材的三通液压成形过程，分别构建了米塞斯屈服准则和 CPB06 屈服准则，通过有限元数值仿真揭示了米塞斯各向同性屈服准则在三通成形模拟中的缺陷和局限性，阐明了 CPB06 屈服准则在描述纯钛各向异性和拉压不对称的有效性，并以此建立了能够准确描述纯钛三通液压成形过程的有限元数值模型，为工艺优化和失效分析奠定了理论基础。

2 实验与建模方法

2.1 原材料分析表征

本研究所用成形材料为退火态的 TA2 纯钛轧管，其外径为 89 mm，壁厚为 2.5 mm。采用电子背散射衍射(EBSD)进行样品组织分析，扫描步长为 1 μm ，加速电压为 20 kV。观察前，对经过标准金相工艺制备的试样利用 OPS 抛光液进行了 20 min 磨抛，以去除表面残余应力。获取的 EBSD 数据采用 ATEX 软件进行处理^[10]。TA2 退火管材的显微组织如图 2a 所示，可以看到，材料由完全等轴的 α 晶粒构成，组织均匀细小，平均晶粒尺寸为 17.3 μm ，说明合金已经发生完全的再结晶。图 2b 为相应的极图，其中 AD 代表轴向，RD 代表径向，TD 代表切向。可以看到管材表现出非常显著的倾转径向织构，最大极密度强度达到 4.22。实际上，假设将管材展平，则轴向对应轧制板材的轧向，径向对应法向，切向对应横向，可见管材中的织构为典型的倾转基面织构，与文献报道的纯钛板织构类型和强度均非常接近^[7,11]，意味着本研究所采用的管材与纯钛退火板材相比，在力学特性的各向异性方面具有相同的特征。

由于 TA2 退火管材中存在显著的织构，可以预见其力学性能将表现出明显的各向异性；同时在液压成形过程中，织构将发生进一步的演变，从而对成形过程造成影响。为了揭示纯钛管材的力学特性，采用线切割在管材上切取拉伸试样，试样与管材轴线平行，标距段尺寸为 50 mm \times 20 mm \times 2.5 mm。拉伸实验在 MTS 电子万能力学试验机上进行，拉伸速度为 5 mm/min。为了获取真实的载荷位移曲线，采用视频引伸计实时追踪标距段的伸长量，直至试样断裂。实验得到的工程应力-应变曲线如图 3 所示，可以看到，纯钛管材的屈服强度约为 300 MPa，随着拉伸的进行，在很小的延伸率($\sim 13\%$)下即达到了

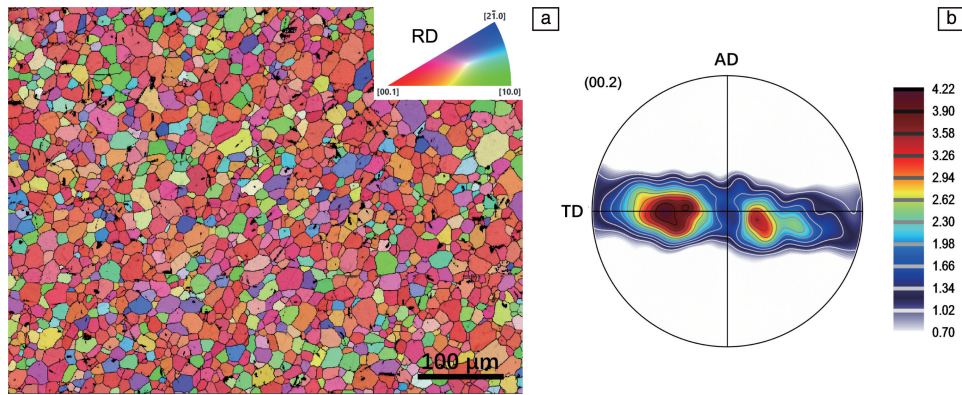


图2 TA2退火管材 EBSD 结果

Fig. 2 EBSD results of TA2 annealed tube

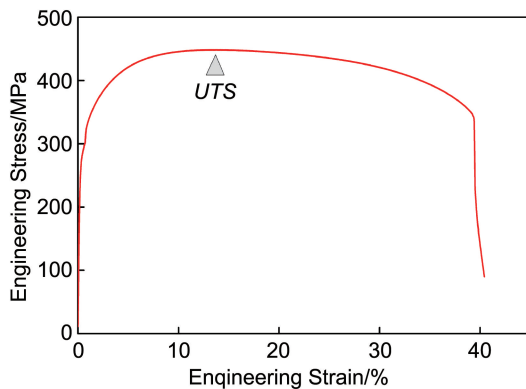


图3 TA2退火管材的拉伸应力-应变曲线

Fig. 3 Tensile stress-strain curve of TA2 annealed tube

抗拉强度点 UTS，随后因发生颈缩而导致载荷逐渐降低，但最终延伸率达到了~40%。显然，这是由于当颈缩发生后，材料处于三向拉应力状态，而纯钛具有扭曲强化效应，从而导致颈缩部位产生了额外硬化，抑制了颈缩的快速发展^[8]。

2.2 三通液压胀形实验

液压胀形实验所采用的管坯长度为 316 mm，主缸给速度恒定为 1.5 mm/s。采用 3 种不同的加压曲线(如图 4 所示)进行成形实验。首先在管坯内快速加注液压油至 15 或 20 MPa，然后以一定的加压斜率分别加压至 36, 58 和 70 MPa，保持目标压力不变直至成形结束。按照目标成形压力从高到低的顺序，将 3 个试样分别命名为 1#、2#和 3#。在此过程中，左右主缸的位移速度恒为 1.5 mm/s，当主管剩余长度为 244 mm 时则成形结束。将三通件取出后用直尺测量记录支管部分的总高度。成形后的三通件如图 5 所示。

2.3 材料本构模型

2.3.1 米塞斯屈服准则

迄今为止，米塞斯各向同性屈服准则是金属成形领

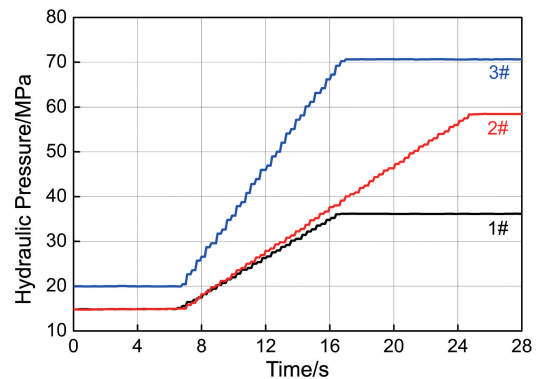


图4 1#~3#试样的液压成形加载曲线

Fig. 4 Loading curves for the T-junction hydraulic forming of 1#~3# specimens



图5 1#~3#三通成形件

Fig. 5 1#~3# processed T-junctions

域应用最为广泛的屈服准则。在塑性力学中，屈服函数的表达式为：

$$f = \bar{\sigma} - \sigma_Y \quad (1)$$

其中 $\bar{\sigma}$ 为等效应力， σ_Y 为单轴变形下的屈服流动强度。对于米塞斯屈服准则，等效应力的表达式为：

$$\bar{\sigma}_M = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}} \quad (2)$$

其中 \mathbf{S} 为柯西应力张量的偏张量。可以看到，米塞斯屈服准则不考虑材料的各向异性，且为各向同性硬化；方

程中不涉及任何其它材料参数，屈服行为仅与应力状态有关。对于式(1)中的 σ_Y ，由于通过单轴拉伸实验仅 UTS 点前的数据可用，应变范围很小，因此需要采用合适的硬化方程将其外推至大变形。研究表明，修正 K-T 硬化模型能够很好地描述纯钛复杂的应变硬化行为^[8]：

$$\sigma_Y = S + K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^h \left(1 + \frac{a}{1 + \exp[-t(\varepsilon_p - \varepsilon_s)]} \right) \quad (3)$$

其中 $S, K, h, \varepsilon_0, \varepsilon_s, a, t$ 为待拟合的材料常数， ε_p 为等效塑性应变。采用修正 K-T 模型对拉伸真应力-真应变曲线进行拟合和外推，结果如图 6 所示。可以看到该模型能够精确描述实验数据。同时，在外推曲线上产生一个明显的凸起，这一点与大变形实验现象非常相似^[8]，从而在一定程度上说明了外推结果的合理性和有效性。

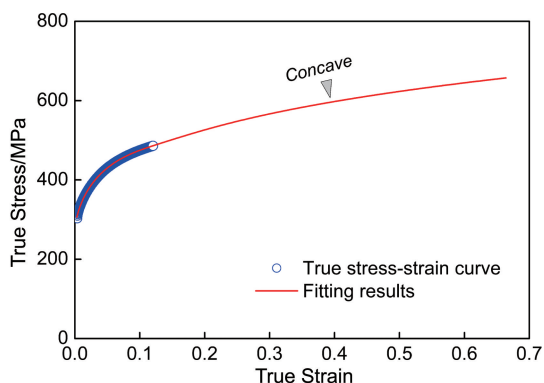


图 6 TA2 真应力-真应变曲线的拟合和外推结果

Fig. 6 Fitting and extrapolation results of TA2 true stress-strain curve

2.3.2 CPB06 屈服准则

CPB06 是 Cazacu 等提出的针对密排六方结构的金属材料的各向异性屈服准则^[12]。该模型是在 Barlat 等^[13]提出的 Yld 系列各向异性屈服准则的基础上，通过引入拉压不对称系数 k ，从而能同时描述密排六方结构的金属材料的拉压不对称以及各向异性，从而能够准确预测密排六方结构的金属在多轴应力状态下的力学响应。其等效拉伸应力($\bar{\sigma}_{CPB}$)的表达式为：

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\sigma}_{CPB} &= \left(\frac{F}{\varphi} \right)^{1/a} \\ F &= \sum_{i=1}^3 (|\Sigma_i| - k\Sigma_i)^a \\ \varphi &= \sum_{i=1}^3 (|\varphi_i| - k\varphi_i)^a \end{aligned} \right. \quad (4)$$

其中 a 和 k 为材料常数， Σ_i 为对应应力偏张量进行线性变换后所得张量 Σ 的 3 个特征值：

$$\Sigma = C : S \quad (5)$$

其中 C 为由 9 个材料常数构成的四阶线性变换张量，用 Voigt 标记法可表示为：

$$C = \left\{ \begin{array}{ccc} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \\ & & & C_{44} \\ & & & & C_{55} \\ & & & & & C_{66} \end{array} \right\} \quad (6)$$

该张量为对称张量。相应地，方程(4)中 φ_i 的表达式为：

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{3}(2C_{11} - C_{12} - C_{13}) \\ \varphi_2 &= \frac{1}{3}(2C_{12} - C_{22} - C_{23}) \\ \varphi_3 &= \frac{1}{3}(2C_{13} - C_{23} - C_{33}) \end{aligned} \right. \quad (7)$$

在 CPB06 屈服准则中，需要确定的参数有 $C_{11} \sim C_{66}, k, a$ 等共计 11 个参数。由于本研究为薄壁管成形，因此可简化为平面应力状态，忽略 C_{44} 和 C_{55} 两个参数。与米塞斯屈服准则不同，CPB06 需要利用大量不同加载方式下的力学实验数据进行回归拟合，这对于管材而言非常困难。Baral 等^[7]针对纯钛板材的各向异性屈服和拉压不对称行为进行了迄今为止最为系统的研究。通过比较拉伸曲线以及织构特征可以看出，本研究中的纯钛管材与 Baral 等的研究非常接近，因此本研究拟采用后者所获得的 CPB06 模型参数。

2.4 有限元数值模型

为了建立 TA2 三通成形过程的有限元数值模型，本研究基于 Fortran 语言对 CPB06 准则进行了二次开发，将准则嵌入有限元模型，并采用前向欧拉法进行数值积分。在此基础上，对几何模型和边界条件进行了适度简化处理，在确保计算精度的同时提高计算效率。

2.4.1 数值积分方法

为了将屈服准则嵌入有限元模型，必须采用合理的积分方法对每个增量步内的应力和应变进行更新。为了稳定计算过程，本研究采用前向欧拉积分方法。在前向欧拉积分方法中，当前时刻的状态仅取决于上一时刻的状态，因此无需数值迭代，不存在收敛性问题，因此被广泛应用于塑性成形等高度非线性问题的求解中。其过程如下。

根据塑性流动理论，增量步结束时的塑性应变增量 $\Delta\varepsilon_p$ 和应力增量 $\Delta\sigma$ 分别为：

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta\varepsilon_p &= d\lambda \cdot F \\ \Delta\sigma &= C^e : (\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_p) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

其中 F 为塑性流动张量, 为屈服方程对应力张量的导数; C^e 为弹性张量, $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 为该增量步下的总应变; $d\lambda$ 为塑性乘子。根据不同的积分方法, 塑性乘子的计算方法也不同。对于前向欧拉积分, 本研究采用如下计算方法:

$$d\lambda = \frac{\mathbf{F} : \mathbf{C}^e : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}}{\mathbf{F} : \mathbf{C}^e : \mathbf{F} - H(2/3 \mathbf{F} : \mathbf{F})^{1/2}} \quad (9)$$

其中 H 为屈服函数(方程(1))对等效塑性应变的导数, 即硬化率的相反数。

前向欧拉积分虽然避免了数值迭代过程, 然而却存在误差累积, 因此需要对增量步长进行严格限制以防止误差累积过大。通过对比分析, 本研究发现当采用 $1e-5s$ 的增量步长时, 能够在保证计算效率的同时, 使计算结果和隐式算法相同。

2.4.2 模型离散及边界处理

基于 ABAQUS 有限元数值仿真平台, 本研究所建立的三通成形几何模型如图 7 所示。为了在保证计算精度的基础上提高计算效率、缩减计算时间, 本研究对几何模型进行以下简化和处理。

(1) 考虑到管坯两端同步变形, 因此将模型简化为 $1/4$ 对称模型; 考虑到成形速度较慢, 且管坯能够与液压油进行充分的热交换, 因此忽略变形温升效应以及模具与管坯之间的换热。

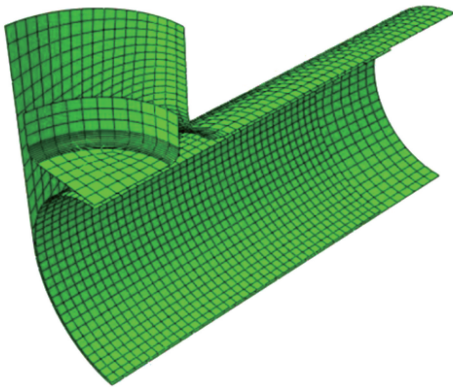


图 7 纯钛三通液压成形的几何模型

Fig. 7 Geometric model for pure titanium T-junction hydraulic forming

(2) 由于该管件可视为薄壁管, 可采用平面应力进行简化, 因此采用四节点缩减积分壳单元对管件进行离散; 模具则设置为离散刚体。

(3) 实际成形时管件与模具之间采用二硫化钼粉末进行充分润滑, 因此在建模时采用库伦摩擦条件, 摩擦系数设置为 $0.1^{[14]}$ 。

(4) 主缸的进给简化为管件端部的位移边界条件。

3 结果与讨论

3.1 屈服准则对比验证

利用所建立的米塞斯模型及 CPB06 模型对 TA2 纯钛在主应力坐标系下的初始屈服轨迹进行了对比, 如图 8 所示。由图可以明显看出, CPB06 预测的屈服轨迹发生了明显的扭曲, 表明了显著的各向异性。在单向拉伸时, 两者的屈服轨迹相切, 这是由于在建模时均把单向拉伸强度作为等效应力所致; 在单向压缩条件下, CPB06 预测的屈服应力低于米塞斯应力, 显然这是由于压缩有利于纯钛的孪生变形, 从而导致压缩屈服强度较低所致^[6]; 在大部分双向应力条件下, CPB06 模型所预测的屈服应力远大于米塞斯应力, 说明在复杂应力状态下, CPB06 模型更不容易发生屈服, 从而直观表明了纯钛的扭曲强化效应。

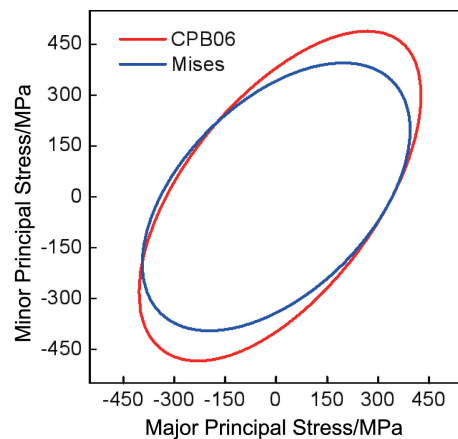


图 8 基于米塞斯模型及 CPB06 模型的屈服轨迹

Fig. 8 Yield locus comparison between the Mises and the CPB06 model

为了对比验证两个屈服准则的有效性, 对管材单向拉伸实验进行了模拟仿真, 将获得的载荷位移曲线与实验结果进行了对比, 如图 9 所示。可以看到, 当采用米塞斯各向同性屈服准则时, 预测曲线与 UTS 点之前的实验数据吻合良好。但在颈缩产生后则发生急剧软化, 严重偏离实际载荷位移曲线。而采用 CPB06 准则时, 预测结果与实际曲线非常吻合。由此可见, 所建立的 CPB06 模型正确反映了颈缩发展缓慢的特点, 能够准确描述纯钛的力学响应。

3.2 三通成形模拟结果对比

利用两个屈服准则对第 2.2 节中的三通成形实验进行了模拟仿真, 并将预测得到的支管高度与实测结果进行对比。如图 10 所示, 3 个成形工艺下成形结束后支管的实测高度分别为 117.0, 123.1 和 129.6 mm, 可以明显

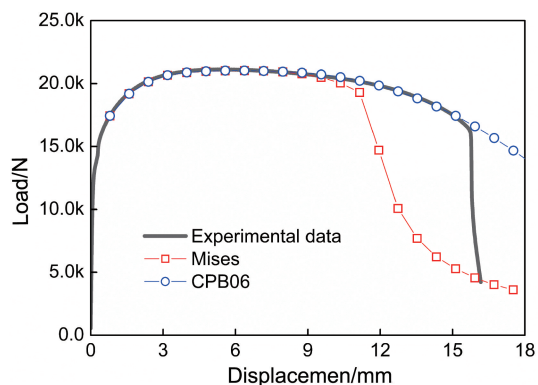


图 9 位移的计算结果与实验结果对比

Fig. 9 Displacement comparison between the simulated results and the experimental result

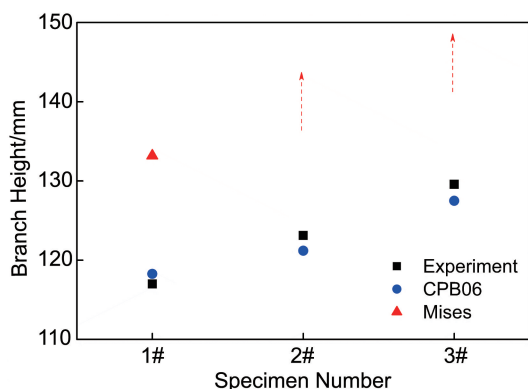


图 10 支管高度的数值仿真结果与实验结果对比

Fig. 10 Branch height comparison between the simulated results and the experimental result

看出管坯内部充压速度越快、压力越大，则支管高度越大。当采用米塞斯屈服准则仿真模拟后，1#三通试样的支管预测高度达到 133.18 mm，远远大于实测值 117.0 mm；而其它两个试样的支管顶端甚至分别在第 15.5 s 和第 6 s 时发生了崩溃。显然，这是由于米塞斯准则忽略了纯钛的扭曲强化效应，从而低估了多轴应力下的应变硬化，导致材料过“柔”、内压承受能力严重不足。而当采用 CPB06 准则后，3 个试样均顺利完成了成形模拟，且预测的支管高度分别为 118.3、121.2 和 127.5 mm，相比实验值仅差 1.1%、1.6% 和 1.6%，表明所建立的 CPB06 模型能够准确描述纯钛三通成形过程中的材料流动特征和力学特性。

3.3 三通成形过程分析

由上述结果可知，相对于米塞斯屈服准则，CPB06 准则可以准确地预测纯钛三通的成形过程。为了阐明两个屈服准则对成形过程中物理场的影响，以 1# 试样为例，将等效应力、等效应变和壁厚分布的预测结果进行了对比，如图 11 所示。可以看到，两者存在显著差异。对于米塞斯模型，最大应力范围几乎覆盖整个成形区域，等效应变极值区域恰好位于成形区的边缘呈蝶状。而 CPB06 模型的最大等效应力和应变范围远小于米塞斯模型，仅位于三通主管与支管的相交处。从厚度分布来看，米塞斯模型预测的最薄处位于支管顶端且非常集中，最厚处位于管件底部中心；而 CPB06 模型预测的管件最薄处位于整个成形区，且底部中心处的材料也没有发生堆积。这是因为 CPB06 模型考虑了材料的拉压不对称性，

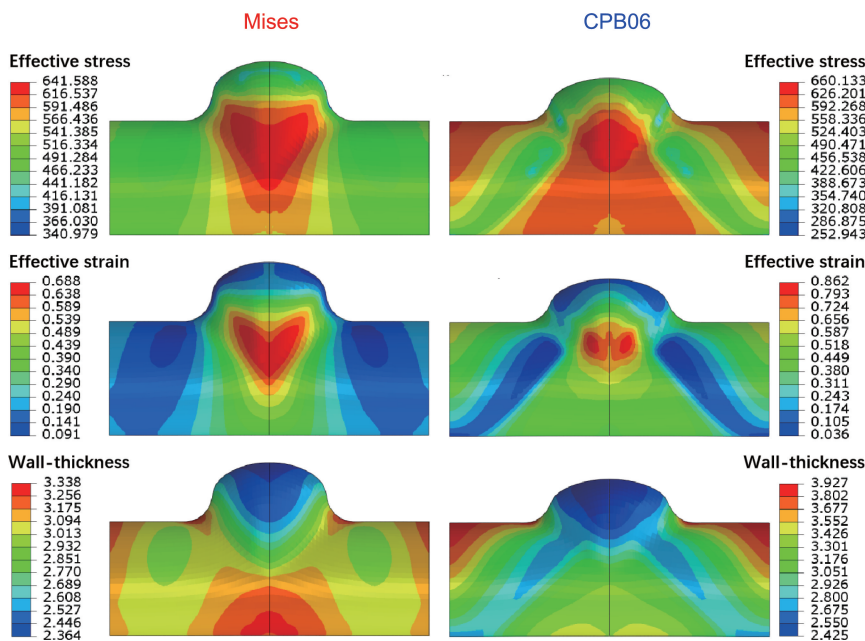


图 11 等效应力、等效应变和壁厚的分布的数值仿真结果对比

Fig. 11 Effective stress, effective strain and wall-thickness distributions comparison between simulated results based on Mises and CPB06 model

在大应变下的抗颈缩和抗材料堆积能力显著提升,因此管件内部材料难以堆积且支管顶部的材料减薄率小得多。同时可以明显看到,CPB06 预测的支管高度远小于米塞斯准则下的支管高度,表明 CPB06 模型下材料表现出显著的硬化效应。上述结果表明,屈服准则的选择对物理场分布的模拟结果有非常显著的影响,采用所建立的 CPB06 模型能够对纯钛三通成形过程的物理场演变行为及成形缺陷进行正确的分析预测,从而为工艺优化和失效分析提供理论支撑。

4 结 论

(1) TA2 纯钛退火轧管的显微组织由细小均匀的再结晶等轴晶粒构成,平均晶粒尺寸为 $17.3\ \mu\text{m}$ 。其结构类型与轧制板材的组织相同,即倾转基面组织,其最大极密度强度为 4.22,表现出明显的各向异性。拉伸性能测试表明,当沿管材轴线拉伸时,材料在延伸率约 13% 时即达到抗拉强度点,但直至拉伸至 40% 时才断裂,即表现出明显的扭曲强化效应。

(2) 针对纯钛分别建立了米塞斯各向同性屈服准则和先进的 CPB06 屈服准则,并采用前向欧拉积分方法将模型嵌入了有限元模型。分析表明 CPB06 模型能够反映纯钛的拉压不对称、各向异性和扭曲强化,能够准确描述单轴拉伸过程中颈缩的缓慢发展过程。

(3) 采用两种屈服准则下的有限元模型对纯钛三通成形过程进行了模拟仿真,并与实验结果进行了对比。结果表明,米塞斯屈服准则预测的材料过软,成形后的支管高度远大于实测值,甚至在较高的内压参数下发生与实际完全不符的崩溃现象;而采用 CPB06 模型进行模拟时,不仅所有工艺条件下均能顺利完成成形,且支管高度与实测值相差不到 1.6%。分析了两个屈服准则对三通管成形时物理场分布的影响,发现无论应力、应变还是厚度分布,两个模型均存在非常显著的差异,采用所

建立的 CPB06 屈服准则能够对物理场演变行为及成形缺陷进行正确的分析预测,为工艺优化和失效分析提供理论支撑。

参考文献 References

- [1] ALASWAD A, BENYOUNIS K Y, OLABI A G. *Material & Design* [J], 2012, 33: 328–339.
- [2] REDDY P V, REDDY B V, RAMULU P J. *Journal of Advanced Manufacturing Systems* [J], 2020, 19(4): 737–780.
- [3] BELL C, CORNEY J, ZUELLI N, *et al.* *International Journal of Material Forming* [J], 2020, 13: 789–828.
- [4] JOHNSON K I, NGUYEN B N, DAVIES R W, *et al.* *International Journal of Plasticity* [J], 2004, 20(6): 1111–1137.
- [5] MIRONOV S, MURZINOV M, ZHEREBTSOV S, *et al.* *Acta Materialia* [J], 2009, 57(8): 2470–2481.
- [6] CHOUHAN D K, MONDAL S, BHATTACHARYA B, *et al.* *International Journal of Plasticity* [J], 2023, 161: 103516.
- [7] BARAL M, HAMA T, KNUDSEN E, *et al.* *International Journal of Plasticity* [J], 2018, 105: 164–194.
- [8] PHAM Q T, LEE M G, KIM Y S. *International Journal of Mechanical Sciences* [J], 2019, 160: 90–102.
- [9] ARETZ H. *International Journal of Mechanical Sciences* [J], 2008, 24(9): 1457–1480.
- [10] BEAUSIR B, FUNDENBERGER J J. ATEX[®]-Analysis Tools for Electron and X-ray Diffraction [EB/OL]. (2017-02-19) [2024-01-15]. <http://www.atex-software.eu/>.
- [11] 吴佳欣, 王莹, Adrien CHAPUIS, 等. *重庆大学学报* [J], 2019, 42(8): 67–73.
WU J X, WANG Y, CHAPUIS A, *et al.* *Journal of Chongqing University* [J], 2019, 42(8): 67–73.
- [12] CAZACU O, PLUNKET B, BARLAT F. *International Journal of Plasticity* [J], 2006, 22(7): 1171–1194.
- [13] BARLAT F, ARETZ H, YOON J W, *et al.* *International Journal of Plasticity* [J], 2005, 21(5): 1009–1039.
- [14] WINER W O. *Wear* [J], 1967, 10(6): 422–452.