

# 考虑厚向应力的板材临界起皱判据建立及影响

杜冰<sup>1,2\*</sup> 李扬<sup>1,2</sup> 刘凤华<sup>1,2</sup> 董明鑫<sup>1,2</sup> 万宇凡<sup>1,2</sup> 钟庆帅<sup>1,2</sup>

1.燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室,秦皇岛,066004

2.燕山大学河北省金属精密塑性加工技术创新中心,秦皇岛,066004

**摘要:**起皱失稳是影响薄壁件实现精确塑性成型的主要技术挑战之一,在板料成形过程中厚向应力状态对板料的成形极限有很大影响,研究了不同厚向应力条件下板材塑性成形过程中的起皱失稳现象。采用ABAQUS软件中的Buckle-Dynamic算法结合实体单元建模建立扇形件充液压缩数值分析模型,并通过试验验证模拟算法的准确性。根据起皱分叉理论和数值分析结果,采用一种考虑厚向应力的板材临界起皱时刻界定方法建立了板材压缩条件下的临界起皱判定线。探讨了厚向应力对扇形件压缩起皱行为、抗皱性及临界起皱判定线在空间中位置的影响。研究结果表明,施加厚向应力可以提高板材的抗皱性,改善成形质量。研究结果可为板材成形工艺参数的选取及典型零件的试制提供参考及试验依据。

**关键词:**起皱失稳;实体单元建模;扇形件充液压缩;厚向应力;临界起皱判定线

**中图分类号:** TG386

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2025.05.019

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Establishment and Influences of Critical Wrinkling Criterion of Sheet Metals Considering Thickness Stress

DU Bing<sup>1,2\*</sup> LI Yang<sup>1,2</sup> LIU Fenghua<sup>1,2</sup> DONG Mingxin<sup>1,2</sup> WAN Yufan<sup>1,2</sup>  
ZHONG Qingshuai<sup>1,2</sup>

1.Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science(Yanshan University),  
Ministry of Education of China,Qinhuangdao,Hebei,066004

2.Hebei Engineering Technology Research Center of Metal Precision Plastic Processing,  
Yanshan University,Qinhuangdao,Hebei,066004

**Abstract:** Wrinkling instability was one of the main technical challenges affecting the precise plastic forming of thin-walled parts. The stress state in the thick direction had a great influence on the forming limit of the sheet metals during the sheet forming processes. In view of the above problems, the wrinkling instability of sheet metals in plastic forming processes was studied under different thickness stress conditions. The Buckle-Dynamic algorithm in ABAQUS software was combined with solid element modeling to establish a numerical analysis model of liquid-filled compression of fan-shaped parts, and the accuracy of the simulation algorithm was verified by tests. According to the wrinkling bifurcation theory and numerical analysis results, a method was adopted for defining the critical wrinkling time of the plates considering the thickness stress, and the critical wrinkling limit curve was established under the compression conditions of the plates. The influences of thickness stress on the compression wrinkling behaviors, wrinkle resistances and the positions of critical wrinkling limit curve in space of fan-shaped parts were discussed. The results show that the applications of thick stress may improve the wrinkle resistances of the sheets and improve the forming quality, which provides useful reference and experimental basis for the selection of sheet metal forming parameters and the trial production of typical parts.

**Key words:** wrinkling instability; solid element modeling; liquid-filled compression of fan-shaped part; thickness stress; critical wrinkling limit curve

## 0 引言

随着航天航空、国防军工、汽车工业等制造技

术领域对金属产品轻质化、强韧化要求的提高,薄壁件的成形工艺优化逐渐引起该领域专家的重视<sup>[1-3]</sup>。起皱失稳是影响薄壁件实现精确塑性成型的主要技术挑战之一,如何准确预测板材成形过程中出现的起皱失稳现象并控制皱纹朝着对生

收稿日期:2024-05-04

基金项目:国家自然科学基金(52175367);河北省省级科技计划(236Z1011G)

产有利的方向发展,是近年来塑性成形领域研究的热点与基础性难题<sup>[4]</sup>。薄壁件在成形过程中常伴随着复杂的边界条件,导致存在复杂多变的应力加载路径,进而引发剧烈的非均匀变形现象,这不仅增加了薄壁件产生起皱失稳的可能性,同时也加大了预测起皱失稳的难度<sup>[5-6]</sup>。

长期以来,国内外学者借助理论解析、试验测定及数值模拟等多元手段对板材起皱失稳问题展开研究,为揭示起皱失稳机理、掌握起皱失稳影响因素和规律、实现起皱失稳的准确预测和有效控制奠定了基础<sup>[7-8]</sup>。根据 HILL<sup>[9]</sup>提出的分叉理论,起皱失稳可以理解为板材在受载过程中由基本平衡路径转换至另一种平衡路径,宏观上表现为材料由面内变形转变为向面外变形。当分叉函数或其衍生的变分方程存在非零解时,标志着材料进入起皱阶段。NURCHESHMEH 等<sup>[10]</sup>分析了施加厚向应力的成形极限曲线(forming limit curve, FLC)随应变硬化系数、应变速率、板材厚度等因素的变化规律,研究结果表明,厚向应力对 FLC 在主应变空间中的位置存在一定影响。LI 等<sup>[11]</sup>结合多种几何微缺陷和各向异性系数,并运用显式有限元计算方法成功预测了管材成形过程中的起皱失稳现象。

板材液压成形技术凭借其先进的一体化成形方式,已成为轻质、薄壁及复杂形状整体构件加工的主要技术手段,展现出较高的成形极限、优良的表面质量和精确的成形精度<sup>[12-13]</sup>。在板材液压成形过程中,液体产生的压力作用于板材表面,使得成形板材处于三向应力状态。然而,目前板材成形模拟采用的壳单元无法考虑厚向应力对板材起皱的影响<sup>[14]</sup>,因此,设计适用于施加厚向应力的起皱失稳数值分析模型,探究板材起皱失稳规律并建立相应的起皱失稳判据,对丰富塑性成形理论、准确预测实际工程应用中的起皱失稳现象具有重要意义<sup>[15-16]</sup>。

基于上述思路,本文选取 304 不锈钢板材为研究对象进行扇形件压缩起皱试验,探究该板材在施加不同厚向应力条件下的起皱机理。采用 ABAQUS 软件中的 Buckle-Dynamic 算法结合实体单元建模建立扇形件充液压缩数值分析模型,以验证该模拟算法的准确性。基于数值模拟结果研究板材应力应变路径变化规律,确定板材在三向应力状态下临界起皱时刻的界定方法,建立板材压缩条件下的临界起皱判据,最后探究不同厚向应力对板材抗皱性及临界起皱判据的影响。研究结果可为板材成形工艺参数的选取及典型零件

的试制提供参考及试验依据。

## 1 扇形件充液压缩起皱试验

### 1.1 单向拉伸试验

本研究试件选用 304 不锈钢材料,以国家标准 GB/T 228.1—2010 为依据设置单向拉伸试件尺寸并设计单向拉伸试验,获得其性能参数。板材在压缩试验中受到的厚向应力对试验结果的影响较大,因此设置了三组 304 不锈钢板材单向拉伸试验,板材与轧制方向夹角分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$ 。截取试样的方位如图 1 所示。

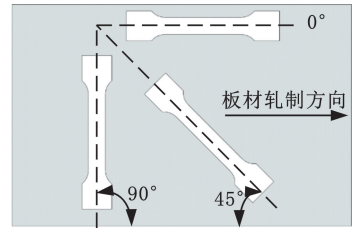


图 1 单向拉伸试验试件截取方位

Fig.1 Uniaxial tensile test specimen interception orientation

通过试验测得 304 不锈钢的弹性模量  $E_s = 210$  GPa,泊松比  $\mu = 0.3$ 。绘制真实应力-真实应变( $\sigma_t - \epsilon_t$ )曲线,见图 2。采用本构方程  $\sigma_t = \sigma_0 + K\epsilon_t$  高精度拟合(其中,  $\sigma_0$  为屈服应力,  $K$  为强度系数),拟合结果如表 1 所示。

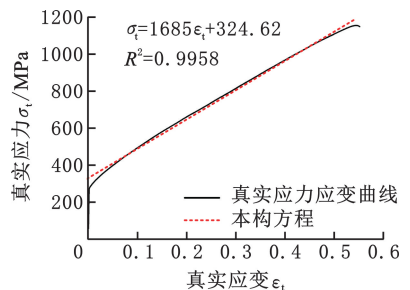


图 2 304 不锈钢真实应力-真实应变曲线

Fig.2 True stress-true strain curve of 304 stainless steel

表 1 试件的本构方程参数

Tab.1 Constitutive equation parameters of specimen

拟合参数	屈服应力 $\sigma_0$ /MPa	强度系数 $K$ /MPa	拟合均方差 $R^2$
拟合值	324.62	1685	0.9958

在 ABAQUS 有限元模拟模型中采用 Hill48 屈服准则<sup>[17]</sup>,通过板面不同方向的厚向异性系数计算平均厚向异性系数  $\bar{r}$ ,试验测得的板料厚向异性系数  $r_n$  与工程应变  $\epsilon$  曲线见图 3。

在板材成形过程中,采用平均厚向异性系数  $\bar{r}$  来描述板料的厚向异性,其表达式如下:

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4}$$

式中： $r_{0^\circ}$ 、 $r_{45^\circ}$ 、 $r_{90^\circ}$  分别为板料轧制方向与拉伸方向成  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  时的厚向异性系数，其中  $r_{0^\circ} = 0.782$ ， $r_{45^\circ} = 1.426$  和  $r_{90^\circ} = 0.917$  分别为曲线达到平直阶段时的平均值。

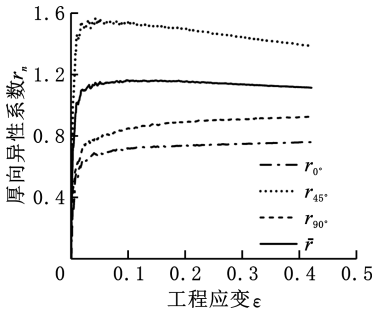


图 3 304 不锈钢厚向异性系数  $r_n$  与工程应变  $\varepsilon$  曲线

Fig.3 Thickness anisotropic coefficient  $r_n$  and engineering strain  $\varepsilon$  curve of 304 stainless steel

## 1.2 扇形件压缩试验试件的制备

在试件制备环节，利用激光切割轧制薄板制作试件。试件的尺寸图及实物图见图 4，其中板材厚度  $t$  为 0.8 mm。

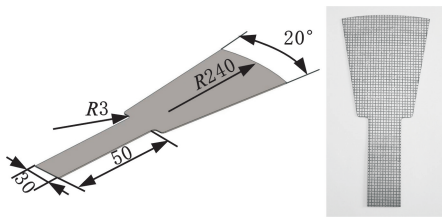


图 4 扇形试件尺寸及实物图

Fig.4 Size of fan-shaped specimen and physical drawing

在扇形件充液压缩起皱试验中无法直接观察扇形件的压缩变形过程，需要使用 AtlaScan Max 三维激光扫描仪对压缩后的扇形件进行图像采集分析，以获得其三维模型。AtlaScan Max 三维激光扫描仪及扫描过程如图 5 所示。

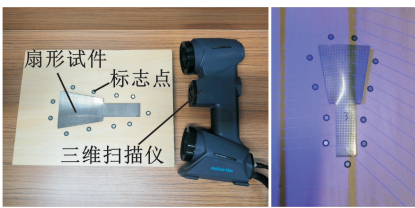


图 5 AtlaScan Max 三维激光扫描仪扫描过程

Fig.5 Scanning process of AtlaScan Max 3D laser scanner

## 1.3 扇形件充液压缩起皱试验与结果

为探究施加不同厚向应力条件下扇形件的压缩起皱规律，设计了扇形件充液压缩起皱试验。由于在实际成形工况中，采用刚性模具无法做到给板材的法向施加持续守恒且方向不发生改变的内应力，从而诱导出板材在厚向上的内应力，而且通过刚性模具施加厚向力往往会伴随着板材发生起皱时厚向位移的限制，因此本研究提出的施加厚向应力的板材压缩起皱试验唯有通过液压加载

的方式才能得以实现。此外，板材起皱失稳机理研究其实质是由于压应力引起的，开展直接的压缩起皱试验研究更具普遍意义<sup>[18]</sup>，因此本研究采用扇形件压缩起皱的试验方案，通过改变施加不同厚向应力来研究扇形件压缩起皱失稳情况。

如图 6 所示，压缩过程中扇形件处在模具扇形空腔内，两侧可以在支撑滑槽内竖直方向上移动，空腔内通过油入口注入液压油，以保证液压油充满整个扇形油腔且板料厚向受到的油压一致，诱导板材厚向产生与液体压力等同的厚向应力。液压油由一台额定压力为 20 MPa 的小型液压站供给，油压可根据工艺需求实时调整与监测。试验过程中通过碟形弹簧的压缩来提供法向载荷，使得上压板和下模具紧密贴合，试验模具吊装在万能拉伸试验机固定横梁，通过万能拉伸试验机控制所施加的位移和拉伸速度参数。

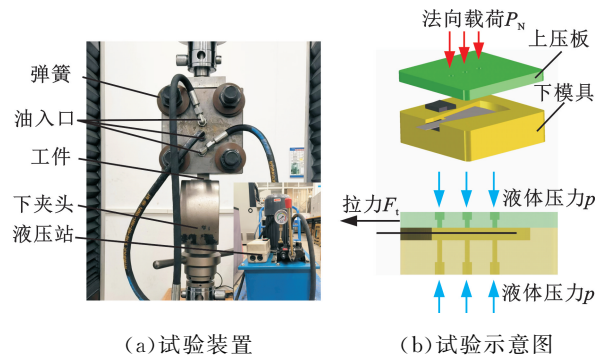


图 6 扇形件充液压缩起皱试验装置及示意图

Fig.6 Liquid-filled compression wrinkling test device and schematic diagram of fan-shaped parts

为探究不同边界条件对扇形件压缩起皱的影响，作为 304 不锈钢板材起皱形貌模拟技术的验证依据，本文将施加不同厚向应力这一边界条件作为扇形件压缩起皱的对照试验。以厚向应力  $\sigma_3$  分别为 0、3、6、9 MPa，角度为  $20^\circ$  及厚度为 0.8 mm 的扇形件对照组进行压缩起皱试验，拉伸速度为 2 mm/min，拉伸位移为 5 mm，扇形件压缩起皱结果如图 7 所示。不同厚向应力作用下的扇形件均发生了起皱行为。

## 2 扇形件充液压缩起皱模拟

### 2.1 建立数值分析模型

目前在研究板材成形时，大部分学者所选用的单元类型为壳单元和实体单元<sup>[19]</sup>，由于壳单元基于平面应力假设，忽略厚向应力的存在，不能考虑厚向施加液压导致内部产生厚向应力时的试件起皱规律，因此本研究在进行施加厚向应力条件下扇形件压缩模型建立过程中选用实体单元建

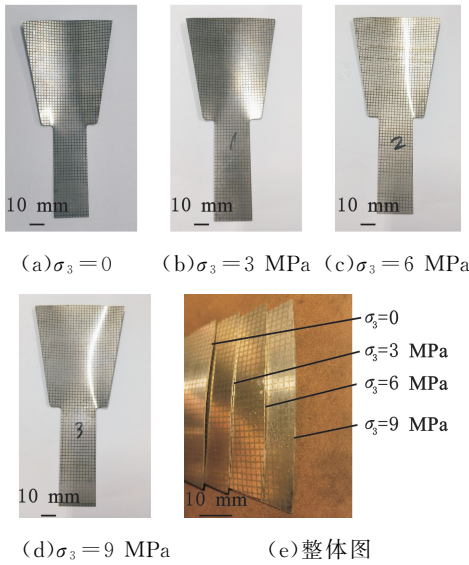


图 7 施加不同厚向应力下扇形件压缩起皱试验结果  
Fig.7 Compression wrinkling test results of fan-shaped parts under different thickness stresses

模。本研究采用引入初始缺陷的动力显式算法建立数值分析模型,将线性特征值分析 Buckle 计算输出的一阶屈曲模态作为初始形状缺陷引入 Dynamic 分析步中的理想网格模型中。引入初始缺陷的动态显式有限元法预测起皱流程如图 8 所示,根据扇形件充液压缩试验模型的边界条件建立对应的数值分析模型。

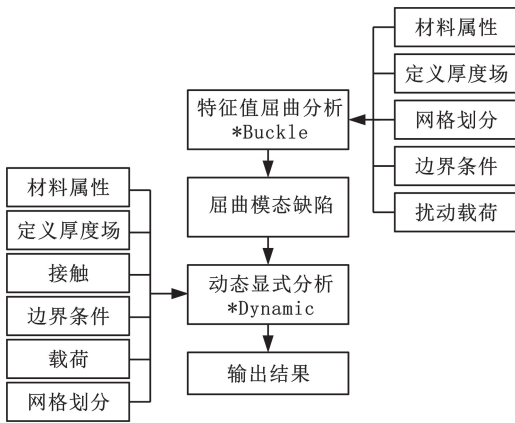


图 8 有限元模拟预测流程图

Fig.8 Forecast diagram of finite element simulation

扇形件在施加不同厚向应力作用下的压缩起皱模拟模型及网格划分情况如图 9 所示。将实际工况中模具对试件的作用等效为对相应区域设定的边界条件。其中,扇形件左右两侧的支撑端(对应模型中的部件 A 和部件 B)设置为完全固定,扇形件的夹持端(对应模型中的 C 区域)设置向  $y$  轴负方向的位移。当中间夹持端向下移动时,扇形件的变形区(对应模型中的 D 区域)内由于受到两侧支撑端的支反力以及夹持端的拉力,在  $z$  向产生起皱失稳。

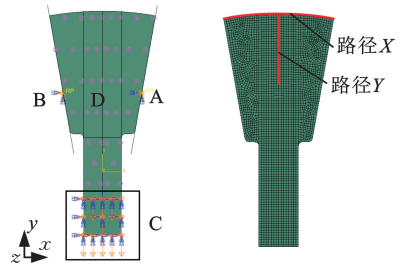


图 9 扇形件充液压缩起皱模型及网格划分情况

Fig.9 Liquid-filled compression wrinkling model and mesh division of fan-shaped parts

## 2.2 数值模拟结果与试验结果对比

将 AtlaScan Max 三维激光扫描仪扫描出的三维模型保存在 AtlaScan Max5.4.0.531 软件中。将 ABAQUS 软件中得到的数值模拟结果转换为图 10a 所示的 igs 格式,与 AtlaScan Max5.4.0.531 软件中保存的扫描结果(即图 10b 所示的 stl 格式文件)一起均导入到 PolyWorks 软件中进行形貌对比分析,扇形件压缩数值模拟结果图及三维激光扫描图见图 10。

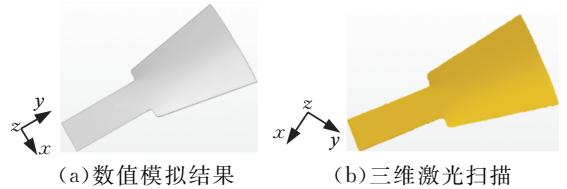


图 10 扇形件压缩起皱模拟结果图及三维激光扫描图

Fig.10 Compression wrinkling simulation results and three-dimensional laser scanning diagram of fan-shaped parts

选取厚度 0.8 mm、夹角  $20^\circ$ 、施加 3 MPa 厚向应力的实体单元的数值模拟结果,与其对应试验的三维激光扫描图在 Polyworks 软件中采用最佳拟合数据对象下拉菜单中的“数据致参考对象进行对齐”选项,并选择数据彩图下拉菜单中的“数据对象至参考对象曲面的偏差”选项,该偏差值用  $d$  表示,如图 11 所示。

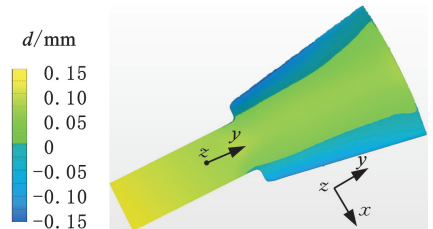


图 11 数据对象至参考对象曲面的偏差

Fig.11 Deviation from data object to reference object surface

提取图 9 中扇形件沿 X 路径的厚向位移,将实体单元模拟结果与试验结果进行对比,见图 12,可以看出,采用实体单元的 Buckle-Dynamic 建模方式得到的起皱形貌与试验结果趋于一致,

形成的皱纹高度基本相等,沿同一路径的历程变化一致,因此 Buckle-Dynamic 模拟方法能够准确地复现扇形件在充液压缩条件下的起皱失稳形貌,故本文采用的数值模拟方法科学可行。

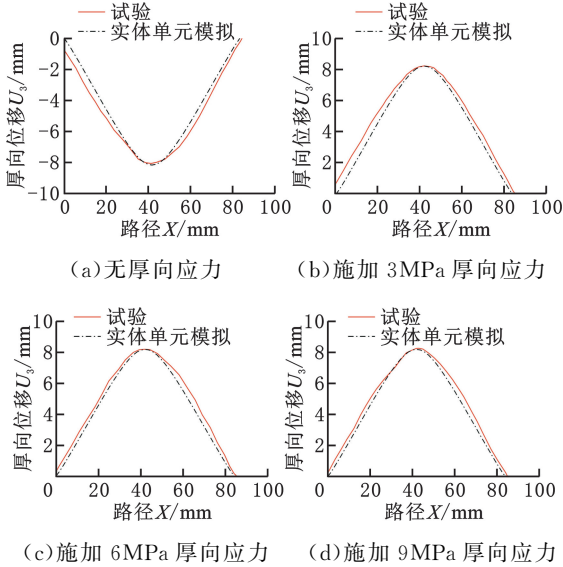


图 12 沿路径 X 的厚向位移试验数据与模拟数据

Fig.12 Thick displacement test data and simulation data along path X

### 3 三向应力状态板材临界起皱判据建立

#### 3.1 三向应力状态下扇形件临界起皱时刻界定

根据应力应变路径分叉原理<sup>[20]</sup>,板材在压缩成形过程中发生起皱失稳时皱纹处板厚方向两侧受力性质不同。以中性层为分界,一侧的板料垂直皱脊方向(如图 13 所示的  $x$  向)受压;另一侧受拉,即扇形件在压缩过程中进入临界起皱状态后,应力中性层两侧对应的应力和应变加载路径会发生分叉。将该分叉点对应的时刻定义为板材临界起皱时刻。在扇形件充液压缩数值模拟后处理中,选取皱脊位置中厚向位移的极值点作为起皱点,在板材厚度方向设置 5 个节点分布,记为节点  $i(i=1,2,\dots,5)$ ,如图 13 所示。

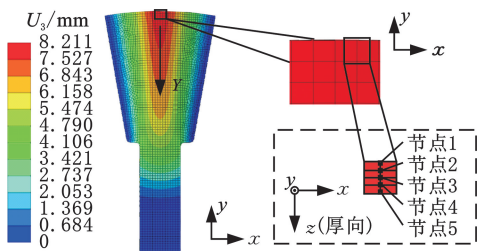


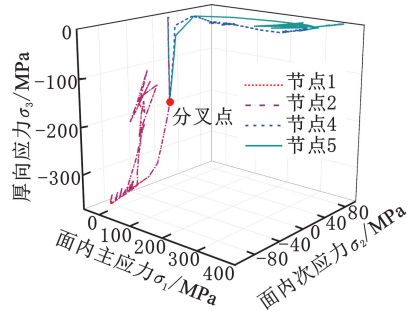
图 13 扇形件厚度方向节点设置

Fig.13 Node setting in the thickness direction of fan-shaped parts

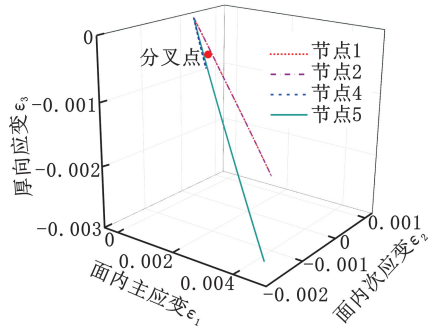
提取起皱点位置  $z$  向上 5 个节点的应变路径,确定应变路径的分叉点,分叉点的应变值所对

应的增量步即为扇形件的临界起皱时刻。该点在临界起皱时刻的主应力和主应变为临界起皱应力和临界起皱应变。

由试验和模拟结果可知,扇形件在充液压缩过程中扇形区域的中间位置最先发生起皱,再沿着 Y 路径开始延伸,因此扇形件的临界起皱点应位于中心线处。为准确界定数值模拟中试件的临界起皱时刻,以厚度 0.8 mm、夹角  $20^\circ$  且施加 3 MPa 厚向应力的扇形件为例,分别提取试件屈曲单元两侧对应节点的应力路径和应变路径并绘制于坐标系中,如图 14 所示。



(a) 应力路径曲线



(b) 应变路径曲线

图 14 实体单元节点应力应变路径曲线

Fig.14 Solid element node stress-strain path curve

由图 14 可知,在试件受力加载初期,中性层两侧对应节点的应力路径和应变路径均完全重合。当应力路径到达分叉点临界起皱发生时,节点 1、2 和节点 4、5 的应力路径分别以中性层为对称轴向相反的两个方向偏转,会出现非常明显的分叉现象,直至后屈曲变形结束。应变路径与应力路径有相似的分叉现象,在试件受力加载初期,扇形件三向处于受力状态,但并没有发生塑性应变,当应力达到一定值时,金属板材发生塑性应变,应变路径的分叉现象较应力路径的分叉现象较为明显。综合分析可知,由于应变路径的分叉点更易准确拾取,故试件的临界起皱时刻用应变路径分叉点来界定。根据应变距离判定,当金属板材两侧对应节点相应时刻的应变距离达到 0.001 时,即认为板材发生了起皱,则此时刻为临

界起皱时刻。

### 3.2 板材临界起皱判定线的建立

经典屈曲理论认为,当试件所受外力做功超出试件内部的变形能时,或面内的外力大于薄膜力时,试件会产生屈曲现象。然而,这一理论适用于分析试件形状规则且受力简单的情况,在应对形状不规则或受力情况复杂的试件时,其理论分析的局限性便凸显出来,难以准确地预测试件的起皱情况,因此本研究以数值模拟结果为基础建立扇形件压缩临界起皱判定线。

在以往的临界起皱判据研究中,将主应变作为判定依据建立的板材起皱极限图只适用于特定工况,即不同工艺参数下临界起皱应变线的斜率不同,不具有普遍适用性。本文考虑到应力路径同样对起皱有较为明显的影响,在面内两向应变的基础上引入了两向应力,将起皱极限图的纵横坐标都转化为量纲一的应变比和应力比,将表征量增加至 4 个,尝试建立以应力比和应变比表征的临界起皱判定线。

对于三向应力状态下板材临界起皱判定线的建立,以夹角  $20^\circ$ 、厚度 0.8 mm 并施加 3 MPa 厚向应力的扇形件为例,用同样的方式提取板材面内的应力应变数据,进而计算其应力比与应变比,随后进行数据点绘制和曲线拟合,得到临界起皱判定线如图 15 所示。同时提取了扇形件不同区域典型节点 A~G(图 15a 所示)最终分析步的应力应变数据,计算其应力比和应变比并在临界起皱判定线所处的坐标系中进行绘制,由图 15b 可知,基于应力比和应变比建立的临界起皱判定线能够准确地预测扇形件的压缩起皱失稳现象,在扇形件厚向位移  $U_3$  较大区域的节点位于判定线的下方,在扇形件厚向位移  $U_3$  较小区域的节点位于判定线的上方。

因此,为评估厚向应力对板材压缩起皱效果

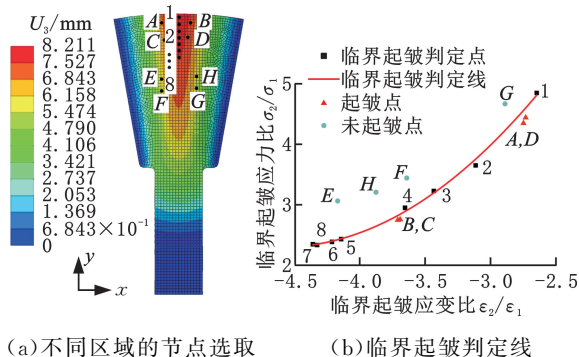


图 15 三向应力状态下板材临界起皱判据的建立

Fig.15 Establishment of critical wrinkling criterion of plate under three-dimensional stress state

的影响,可从不同区域选取代表性节点的应力应变数据,将这些提取的数据与已知的临界起皱判定线进行对比,若提取节点的应力比和应变比数据位于临界起皱判定线的下方,则认为该处位置属于起皱区域,反之则属于未起皱区域。

## 4 厚向应力对板材抗皱性及临界起皱判据的影响

### 4.1 厚向应力对板材抗皱性的影响

本节基于扇形件压缩起皱试验形貌及数值模拟结果对板材的抗皱性进行研究,从不同角度全面分析扇形件压缩起皱过程中板材的抗皱性。由文献[21]可知,通过临界起皱应变数据建立的临界起皱应变线与板材的抗皱性相关,因此本研究从板材的厚向位移、主应力路径及临界起皱应变线的斜率等方面对板材的抗皱性进行探究,建立较为全面的板材抗皱性的判定方法,并探究施加不同厚向应力对板材抗皱性的影响规律。

施加厚向应力属于改变板材外界边界条件的性质,当试件施加的厚向应力发生改变时会影响试件的抗皱性。为探究施加厚向应力对扇形件抗皱性的影响,设定扇形件的厚度为 0.8 mm、角度为  $20^\circ$ ,以施加厚向应力  $\sigma_3 = 3, 6, 9$  MPa 的扇形件为研究对象<sup>[22]</sup>,且在压缩过程中保证加载位移等其他边界条件完全相同。建立扇形件压缩起皱模拟模型,分别提取模拟结果中厚向位移云图和不同积分点的主应力路径的变化曲线图。模拟得到施加不同厚向应力条件下扇形件的厚向位移数据并绘制成条形图见图 16a,可以看出,施加不同厚向应力的扇形件均出现明显的起皱现象,且随着施加厚向应力的增大,板材的最大起皱高度呈减小的趋势。提取施加不同厚向应力条件下扇形件应力路径变化情况,如图 16b 所示,可以看出,施加不同厚向应力扇形件的应力路径各不相同,但同种工况下其应力路径变化趋势相似,且随着施加厚向应力的增大,厚度方向上不同节点主应力路径的分叉现象越晚出现,即 1 处最先发生分叉情况,2 处居中,3 处最后发生分叉情况。

由板材抗皱的评价指标可知,当皱纹数量相同时,皱纹的最大起皱高度(厚向位移)越小,板材的抗皱性越强。由此可得,施加不同厚向应力会影响板材的抗皱性,在一定界限内,施加厚向应力可以提高板材的抗皱性,从而改善板材的成形质量。

提取施加不同厚向应力条件下扇形件路径 Y 上起皱点处对应积分点应变轨迹分叉点的主应变

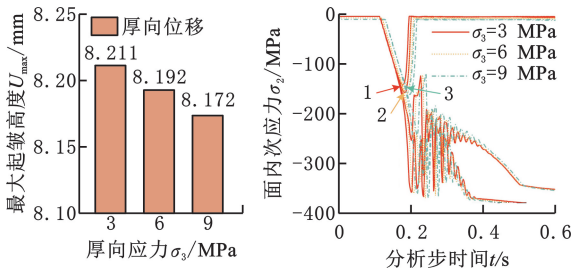


图 16 不同厚向应力条件下扇形件的最大厚向位移及主应力路径

Fig.16 The maximum thickness displacement and principal stress path of fan-shaped parts under different thickness stress conditions

和次应变数据,对施加不同厚向应力条件下扇形件压缩模拟结果中选取的节点进行线性拟合并得到其临界起皱应变线,如图 17~图 19 所示。在板材压缩过程中,扇形件纵向路径 Y 的临界起皱点应变数据可以拟合成斜率为  $k$  的近似通过原点的临界起皱应变线,拟合精度为  $R^2$ 。

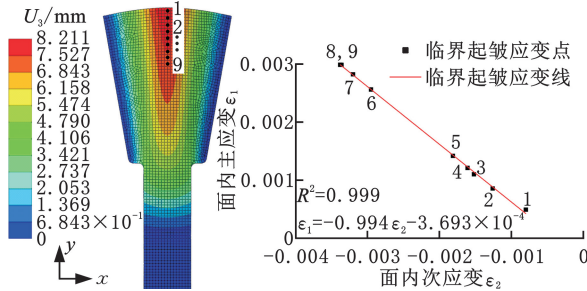


图 17 施加 3 MPa 厚向应力扇形件厚向位移云图及临界起皱应变线

Fig.17 Thickness displacement nephogram and critical wrinkling strain line of fan-shaped parts with 3 MPa thickness stress

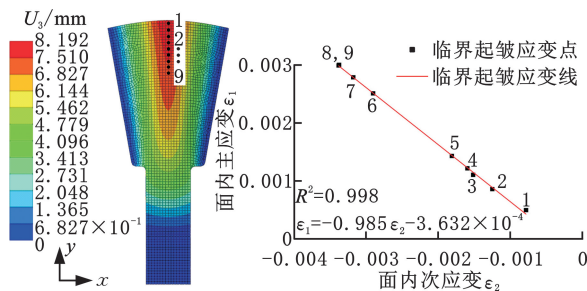


图 18 施加 6 MPa 厚向应力扇形件厚向位移云图及临界起皱应变线

Fig.18 Thickness displacement nephogram and critical wrinkling strain line of fan-shaped parts with 6 MPa thickness stress

观察所得到的拟合曲线发现,施加不同厚向应力条件时板材在相同路径下的斜率不同,施加 3 MPa 厚向应力扇形件的临界起皱应变线的斜率为  $-0.994$ ,施加 6 MPa 厚向应力扇形件的临界

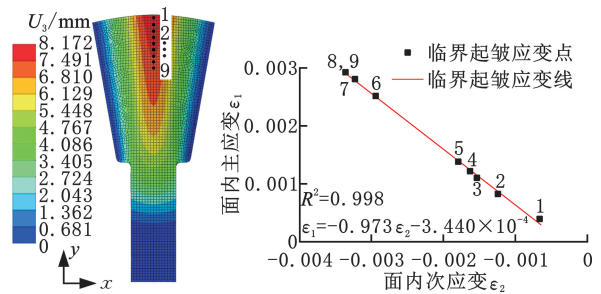


图 19 施加 9 MPa 厚向应力扇形件厚向位移云图及临界起皱应变线

Fig.19 Thickness displacement nephogram and critical wrinkling strain line of fan-shaped parts with 9 MPa thickness stress

起皱应变线的斜率为  $-0.985$ ,施加 9 MPa 厚向应力扇形件的临界起皱应变线的斜率为  $-0.973$ ,由此可得施加不同厚向应力条件时临界起皱应变线的大小顺序为:  $|k_{(3 \text{ MPa})}| > |k_{(6 \text{ MPa})}| > |k_{(9 \text{ MPa})}|$ 。

由前文中所得的皱纹最大起皱高度可知,施加不同厚向应力的板材抗皱性能高低(从低到高)为:施加 3 MPa 厚向应力,施加 6 MPa 厚向应力,施加 9 MPa 厚向应力。不同厚向应力条件下临界起皱应变线斜率用  $|\epsilon_1/\epsilon_2|$  表示,当板材达到临界起皱时刻时,根据  $|\epsilon_1/\epsilon_2|$  与 1 的关系分两种情况探讨板材的抗皱性。①当  $|\epsilon_1/\epsilon_2| \geq 1$  时,  $|\epsilon_1/\epsilon_2|$  越大,表明达到临界起皱时刻的主次应变数据愈悬殊,根据体积不变条件,厚向应变的绝对值也会越大,则等效塑性应变就越大,意味着起皱临界时刻的变形量越大,因此板材的抗皱性越强;  $|\epsilon_1/\epsilon_2|$  越接近 1(即两者越接近相反数),根据体积不变条件,表明厚向应变的绝对值越小,则等效塑性应变就减小,意味着起皱临界时刻的塑性变形量也越小,因此板材的抗皱性越弱。②当  $0 < |\epsilon_1/\epsilon_2| < 1$  时,  $|\epsilon_1/\epsilon_2|$  越大,表明达到临界起皱时刻的主次应变数据愈接近相反数,则此时板材的抗皱性越弱;  $|\epsilon_1/\epsilon_2|$  越小,则板材的抗皱性越强。由此可知:在保证板材厚度、形状和加载位移等边界条件一致的情况下,施加不同厚向应力会影响临界起皱应变线的斜率,本研究中施加不同厚向应力试件的临界起皱应变线斜率的绝对值均小于 1,施加的厚向应力越大,其临界起皱应变线斜率的绝对值越小,试件的抗皱性越强。

#### 4.2 厚向应力对板材临界起皱判据的影响

为探究厚向应力对扇形件临界起皱判定线的影响,设定扇形件的厚度为 0.8 mm,角度为  $20^\circ$ ,对扇形件分别施加 3、6、9 MPa 的厚向应力,并保证其他边界条件完全相同。提取板材临界起皱点的应力应变数据,观察施加不同厚向应力条件时

板材的临界起皱判定线在空间中的位置分布情况,如图 20 所示。

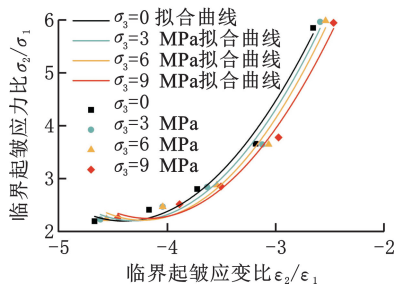


图 20 厚向应力对临界起皱判定线的影响

Fig.20 Influence of the thickness stress on the critical wrinkling limit curve

由图 20 可知,施加不同厚向应力拟合而成的临界起皱判定线在空间中的位置发生了移动,随着施加厚向应力的增大,临界起皱判定线向右平移。即当其他条件相同时,随着施加厚向应力的增大,应力比的绝对值保持不变时,应变比的绝对值减小。由上述抗皱性机理分析可知,当判定线向右移动时,对应工况的抗皱性增强。即随着施加厚向应力的增大,试件抗皱性增强。由此可得,本研究建立的临界起皱判定线可以用于分析厚向应力对起皱的影响。从图 20 中还可以看出,在不同的应力路径下,当应力比越大时,材料表现出的抗皱性受厚向应力的影响越强,当应力比值越小时,材料表现出的抗皱性受厚向应力的影响越弱。以上分析与板材抗皱性越强时,统一临界起皱判定线的分布区间右移的现象正好相匹配。

## 5 结论

1) 进行施加板面厚向压应力的扇形件压缩模拟模型建立过程中须采用实体单元建模。选用 ABAQUS 模拟软件中的 Buckle-Dynamic 算法结合实体单元对试件进行建模,可以准确地模拟板材的应力场和形变行为。

2) 基于数值模拟结果研究了扇形件在不同厚向应力下应力应变路径的变化规律,确定了板材在三向应力状态下临界起皱时刻的界定方法,建立了适用于板材压缩起皱的临界起皱判定线。

3) 从板材起皱高度、主应力路径变化、临界起皱应变线的斜率等角度全面分析了扇形件压缩起皱过程中板材的抗皱性。随着施加厚向应力的增大,板材的最大起皱高度减小,不同节点应力路径的分叉现象越晚出现,临界起皱应变线斜率的绝对值均小于 1 且斜率的绝对值越小,板材的抗皱性越强。

4) 研究了施加不同厚向应力对板材临界起皱

判据的影响规律并与其抗皱性进行联系。随着施加厚向应力的增大,试件临界起皱应力比和应变比的数值区间右移,板材的抗皱性增强。

## 参考文献:

- [1] 杜冰,李扬,赵翀昊,等. 盒形件拉深法兰起皱补偿压力计算法[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(10):72-83.  
DU Bing, LI Yang, ZHAO Chonghao, et al. Calculation Method of Wrinkle Compensation Blank Holder Force for Box Part Drawing Flange [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(10):72-83.
- [2] 秦泗吉,杨莉,盖纷纷. 平面应力条件下轴对称拉深成形法兰区起皱和破裂分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(23):3221-3226.  
QIN Siji, YANG Li, GAI Binbin. Wrinkling and Fracture Analysis of Flange Zone in Axisymmetric Deep Drawing under Plane Stress [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(23):3221-3226.
- [3] 刘志强,赵杰,王克环,等. 钛合金热成形工艺形变与组织演变耦合多尺度仿真研究进展[J]. 中国机械工程, 2020, 31(22):2678-2690.  
LIU Zhiqiang, ZHAO Jie, WANG Kehuan, et al. Research Progress on Coupling Multi-scale Simulation of Deformation and Microstructure Evolution of Titanium Alloy in Hot Forming Process [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(22):2678-2690.
- [4] CHEN Y Z, LIU W, ZHANG Z C, et al. Analysis of Wrinkling during Sheet Hydroforming of Curved Surface Shell Considering Reverse Bulging Effect [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 120:70-80.
- [5] 刘楠. 复杂边界条件下薄壁件塑性成形失稳起皱预测[D]. 西安:西北工业大学, 2015.  
LIU Nan. Instability and Wrinkling Prediction in Plastic Forming Processes of Thin-walled Parts under Complex Boundary Conditions [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [6] 程啸,李瑞,邹贵生,等. 薄壁构件渐进式电磁成形技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2024, 35(12):2092-2105.  
CHENG Xiao, LI Rui, ZOU Guisheng, et al. Research Progress on Incremental EMF Technology for Thin-walled Components [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(12):2092-2105.
- [7] TANG H X, WEN T, HONG J W, et al. Analysis of Shear Stress Wrinkling of Asymmetric Sheet Specimen under Offset Loading [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(3):

- 1451-1457.
- [8] YUAN S J. Fundamentals and Processes of Fluid Pressure Forming Technology for Complex Thin-walled Components[J]. Engineering, 2021, 7(3): 189-206.
- [9] HILL R. A General Theory of Uniqueness and Stability in Elastic-Plastic Solids[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1958, 6(3):236-249.
- [10] NURCHESHMEH M, GREEN D E. Influence of out of Plane Compression Stress on Limit Strains in Sheet Metals[J]. International Journal of Material Forming, 2012, 5(3):213-226.
- [11] LI H, LIU H R, LIU N, et al. Towards Sensitive Prediction of Wrinkling Instability in Sheet Metal Forming by Introducing Evolution of Triple Non-linearity: Tube Forming[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 161:105-125.
- [12] ZHANG S H, LANG L H, KANG D C, et al. Hydromechanical Deep-drawing of Aluminum Parabolic Workpieces-experiments and Numerical Simulation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(10):1479-1492.
- [13] 陈一哲. 2219 铝合金薄壁曲面件液压成形起皱行为与变形均匀性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- CHEN Yizhe. Wrinkling Behavior and Deformation Uniformity during Hydroforming of 2219 Aluminum Alloy Curved Shell[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [14] 郎利辉, 阚鹏, 王耀, 等. 铝合金板材三向应力状态下的成形性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(5):1527-1533.
- LANG Lihui, KAN Peng, WANG Yao, et al. Experiment on Formability of Aluminum Alloy Sheet under Three Dimensional Stress State[J]. Journal of Jilin University(Engineering Edition), 2017, 47(5):1527-1533.
- [15] 崔晓磊, 王小松, 苑世剑. 法向应力对板料成形极限影响的研究进展[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(2):1-7.
- CUI Xiaolei, WANG Xiaosong, YUAN Shijian. Progress on Effects of Through-thickness Normal-stress on Sheet Metal Forming Limit[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(2):1-7.
- [16] DU B, YANG H Y, WANG J Y, et al. Establishment of the Unified Critical Wrinkling Limit Curve of Thin-walled Parts Forming[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 140:1-18.
- [17] HILL R. The Mathematical Theory of Plasticity [M]. London: Oxford University Press, 1950.
- [18] 肖大志. 薄板压缩起皱的模拟研究[J]. 重庆钢铁高等专科学校学报, 1995(2):17-23.
- XIAO Dazhi. Simulation Study on Compression Wrinkling of Thin Plate[J]. Journal of Chongqing Iron and Steel College, 1995(2):17-23.
- [19] 郭禅, 郎利辉, 蔡高参, 等. TA1 板材对角拉伸试验及数值模拟研究[J]. 锻压技术, 2015, 40(2): 138-144.
- GUO Chan, LANG Lihui, CAI Gaocan, et al. TA1 Plate Diagonal Tensile Test and Numerical Simulation Study[J]. Journal of Forging Technology, 2015, 40(2):138-144.
- [20] KIM J B, YOON J W, YANG D Y, et al. Wrinkling Initiation and Growth in Modified Yoshida Buckling Test: Fi-Nite Element Analysis and Experimental Comparison[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42:1683-1714.
- [21] 李晗. 304 不锈钢板材塑性起皱研究与统一起皱判定线建立[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2021.
- LI Han. Research on Plastic Wrinkle of 304 Stainless Steel Sheet and Establishment of Unified Wrinkling Limit Diagram[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [22] 王哲. 法向压力加载方式对板材塑性变形行为的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- WANG Zhe. Study on the Effects of Normal Pressure Loading Mode on Sheet Metal Plastic Deformation Behavior [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.

(编辑 胡佳慧)

作者简介: 杜冰\*, 女, 1985年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为金属板管材特种成形工艺及设备。E-mail: pangpang115@ysu.edu.cn.

#### 本文引用格式:

杜冰, 李扬, 刘风华, 等. 考虑厚向应力的板材临界起皱判据建立及影响[J]. 中国机械工程, 2025, 36(5):1074-1082.

DU Bing, LI Yang, LIU Fenghua, et al. Establishment and Influences of Critical Wrinkling Criterion of Sheet Metals Considering Thickness Stress[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5):1074-1082.