

非线性路径下板料拉深成形过程中破裂预测

黄建科, 董湘怀

(上海交通大学 模具 CAD 国家工程研究中心, 上海 200030)

摘要: 在优选模型参数和简化孔洞形核规律的基础上, 采用 Gurson-Tvergaard (GT) 多孔材料本构模型分析圆筒件拉深过程; 根据金属成形工艺特点, 综合考虑拉伸型和剪切型 2 种不同韧性断裂机制, 提出一个统一的韧性断裂准则形式。对于未经过预变形和经过预变形的圆筒件拉深试验和数值模拟进行了比较, 结果表明: 相对于成形极限图, 新的韧性断裂准则可以更加准确地预测非线性路径下圆筒件的拉深破裂。

关键词: 金属成形; 韧性断裂; 孔洞形核; 拉深

中图分类号: TG306; TG111

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2009)01-0053-04

Prediction of Ductile Fracture in Deep Drawing of Sheet Metal with Nonlinear Strain Path

HUANG Jian-ke, DONG Xiang-huai

(National Die & Mould CAD Engineering Research Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Gurson-Tvergaard (GT) porous material model with optimized parameters and a practical void nucleation law is adopted to analyze deep drawing of cylindric parts. A unified fracture criterion, considering both tension-type mode and shear-type mode, is proposed and applied in the analysis. The comparison of experimental and numerical results of deep drawing using non-prestrained and prestrained blank confirms that our ductile fracture criterion (DFC) more accurately predicts the ductile fracture in the deep drawing process with nonlinear strain path compared with forming limit diagram (FLD).

Key words: ductile fracture; metalforming processes; void nucleation; deep drawing

在板料成形中, 破裂、起皱和回弹是三大主要质量缺陷, 这些缺陷的出现造成了材料的浪费。为了避免出现破裂等缺陷, 要反复修正工艺参数或修改模具形状, 从而造成生产周期的延长和产品成本的增加。如何迅速、准确地预测板料成形过程中可能出现的破裂等缺陷, 已成为板料成形技术发展的瓶颈问题, 也一直是冲压加工领域研究的难点和热点问题之一^[1]。成形极限图 (FLD) 通常用于定量地评价板料在不同加载路径下成形加工中的成形极限, 但是 FLD 是建立在比例加载条件下的, 而在实际生

产中, 由于几何边界条件和摩擦条件的限制, 应变路径通常偏离线性路径, 对于复杂形状零件成形、多工步成形等情况更是如此。韧性断裂准则 (DFC) 是根据板料成形过程中应力、应变及塑性变形能的变化来预测韧性断裂的发生, 因此可以考虑应变路径的变化。由于利用有限元数值模拟能获得变形中每一时刻的应力应变场, 这就促成了在有限元数值模拟技术中应用 DFC 预测板料成形极限。

文中在优选模型调整参数和简化形核规律的基础上, 采用 Gurson-Tvergaard (GT) 细观损伤模型分

收稿日期: 2009-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50835002, 50575143); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20040248005)

作者简介: 黄建科 (1980-), 男, 江西临川人, 博士生, 主要从事金属塑性成形过程中的数值模拟及损伤和断裂研究。

析韧性断裂问题,综合考虑拉伸型和剪切型两种韧性断裂形式,提出了一个统一形式的韧性断裂准则,并用于预测双相钢 DP450 在圆筒形零件拉深过程中的断裂现象。分别采用经过单向拉伸预变形和未经过预变形的两种圆形板料毛坯进行了拉深试验,比较了韧性断裂准则(DFC)和成形极限图(FLD)在非线形路径情况下对圆筒件拉深断裂现象预测的准确性。

1 GT 细观损伤模型及其相关断裂准则

Tvergaard 等^[2]引入调整参数(q_1, q_2, q_3)后的修正 Gurson 塑性势 Φ :

$$\Phi = \frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_y^2} + 2q_1 f \cos h \left(\frac{3q_2 \sigma_m}{2\bar{\sigma}} \right) - 1 - q_3 f^2 = 0 \quad (1)$$

式中: $q_3 = q_1^2$; $\bar{\sigma}$ 为等效 Mises 应力; σ_m 为静水应力; σ_y 为基体材料的流动应力; f 为孔洞体积分数。

当 $f=0$ 时, GT 塑性势将恢复成传统的 Mises 屈服函数形式。孔洞体积增长率由孔洞生长率和形核率构成。由于基体材料不可压缩,故孔洞生长率取决于基体材料的变形率。实验结果表明,应力三轴度 $\sigma_m/\bar{\sigma}$ 为控制新孔洞形核的主要因素,可表示为:

$$\begin{aligned} \dot{f} &= (\dot{f})_{\text{growth}} + (\dot{f})_{\text{nucleation}} \\ &= (1-f) \dot{\epsilon}_{ii}^p + A \langle \sigma_m/\bar{\sigma} - B \rangle \dot{\epsilon}^p \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\dot{\epsilon}_{ii}^p$ 为体积膨胀率; $\dot{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变率; A 和 B 为材料常数; $\langle x \rangle$ 表示 Macauley 算子, 当 $x \geq 0$ 时, $\langle x \rangle = x$; $x < 0$ 时, $\langle x \rangle = 0$ 。

迄今为止,许多学者从宏观断裂或细观损伤层面上提出了多种韧性断裂准则及其相关参数^[3]。已有的断裂准则一般针对具体的成形工艺,即使是同一材料,在不同工艺中仍要采用不同的断裂准则来判定其韧性断裂。因此,有必要建立一个预测各种不同变形路径下金属材料韧性断裂的准则。依据谢晓龙^[4]在不同应力三轴度 $\sigma_m/\bar{\sigma}$ 下所得韧性断裂试样形貌的扫描电子显微镜照片,可以将韧性断裂的产生机制归结为拉伸型(高应力三轴度下)和剪切型(低应力三轴度下)2 种类型。其中,拉伸型韧性断裂的断口被孔洞所覆盖,孔洞体积明显增加,典型的塑性变形过程为单向拉伸;剪切型韧性断裂的微观形貌为少量孔洞能形核,孔洞体积变化不大,但孔洞形状沿剪切带的方向被拉长,典型的塑性变

形为扭转和压缩。由数值模拟与实验结果对比发现,只有当 $\sigma_1 > 0$ 时才能发生上述 2 种类型的韧性断裂。在综合考虑拉伸型和剪切型损伤断裂因素的基础上,笔者提出了以下适用于不同变形路径的韧性断裂判定准则

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left[\frac{\sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_m} + C_1 \frac{\sigma_1 \sigma_3'}{\sigma_1' (\sigma_1 - \sigma_3)} \right] d\bar{\epsilon}_p = C \quad (3)$$

式中: $\bar{\epsilon}_f$ 为断裂临界时刻的等效塑性应变; σ_1' 为最大主应力偏量; σ_3' 为最小主应力的偏量; C_1, C 为材料常数。

式(3)既可以较好地描述两种不同类型的韧性断裂现象,也保证了不同变形路径的断裂准则积分值为大致相同的材料常数。材料点累积的损伤值 D 定义为式(3)左边的积分,当 D 累积达到 C 时,材料将达到韧性断裂的临界状态。

2 数值模拟和实验结果

采用板料标准单向拉伸试验确定试验用高强双相钢 DP450 的真实流动应力应变曲线如图 1 所示,其平均厚向异性系数为 0.85。

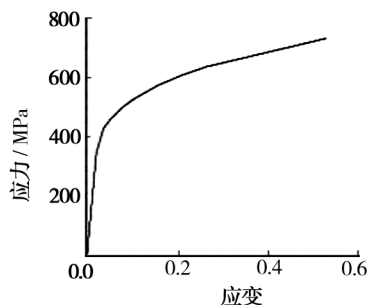


图1 试验钢板真实应力应变曲线

Fig. 1 Curve of stress-strain

通过拟合数值模拟和板料标准单向拉伸试验所得载荷-行程曲线,确定 GT 模型参数和部分材料参数为 $q_1 = 1.45, q_2 = 1.05, A = 0.01, B = 0$ 。

为了获取线性和非线性路径下圆筒件拉深破裂的不同试验数据,圆筒件拉深试验采用经过单向拉伸预变形和未经过预变形的两种圆形板料毛坯。将设计好的宽板在专用夹头和夹板的固定下在 Zwick 拉伸机上进行单向拉伸,然后采用线切割方法得到经过单向拉伸预变形的圆形板料毛坯。由于试验拉伸机的行程的限制,设计的宽板在拉伸方向的有效

标距尺寸小于垂直于拉伸方向的尺寸,故宽板拉伸后的应变分布是不均匀的。预变形的圆形毛坯是从经过单向拉伸后伸长 10% 的宽板上线切割后得到的,其直径为 180 mm,图 2 给出经过预变形的圆形毛坯上等效应变的分布。圆形毛坯上分布不均匀的

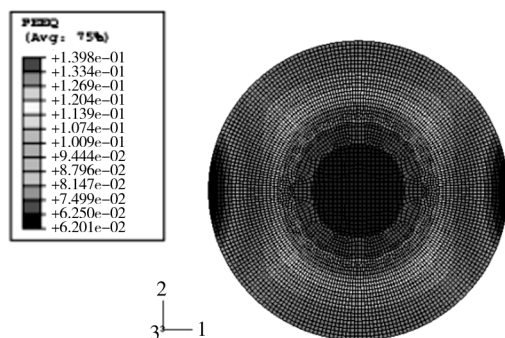


图2 经过预变形的圆形毛坯的等效应变分布(1方向为单向拉伸方向)

Fig.2 Equivalent strain distribution of pre-strained cylindrical blank

塑性应变,在拉伸方向(1方向)上圆形毛坯边缘的塑性应变明显小于垂直于拉伸方向(2方向)上毛坯边缘的塑性应变。因此在后续的圆筒件拉深过程中板料流动将呈现出各向不均匀性。

试验中未经过预变形和经过预变形的圆筒件拉深的极限拉深深度(临界破裂深度)分别为 40 和 20 mm,分别选取临界破裂深度 40 和 20 mm 为两种圆形毛坯拉深过程有限元模拟的边界条件。由于 FLD 是建立在比例加载条件下的,为了预测非线性路径下圆筒件拉深过程中的破裂现象,采用前述的韧性断裂准则(式(3))来判定破裂现象的发生。对于试验用钢板,板料标准单向拉伸试验和未经过预变形的圆筒件拉深试验得到临界损伤破裂值应为同一常数值,因此结合板料标准单向拉伸试验和未经过预变形的圆筒件拉深试验的物理测量值和数值模拟计算数据,则由式(3)得:

$$C_1 = \frac{\left[\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_m} d\bar{\varepsilon}_p \right]_{\text{Ten}} - \left[\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_m} d\bar{\varepsilon}_p \right]_{\text{Dra}}}{\left[\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_1 \sigma'_3}{\sigma'_1 (\sigma_1 - \sigma_3)} d\bar{\varepsilon}_p \right]_{\text{Dra}} - \left[\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_1 \sigma'_3}{\sigma'_1 (\sigma_1 - \sigma_3)} d\bar{\varepsilon}_p \right]_{\text{Ten}}} \quad (4)$$

式中:下标 Ten 和 Dra 分别表示标准单向拉伸试件和未经过预变形圆形毛坯拉深试件。

由式(4)和式(3)可以计算出韧性断裂准则中的材料常数值 C_1 和 C ,由此可以得到试验用钢板 DP450 的韧性断裂材料参数 $C_1 = 1.05$ 和 $C = 0.18$ 。

图 3a,b 分别是数值模拟得到的未经过预变形

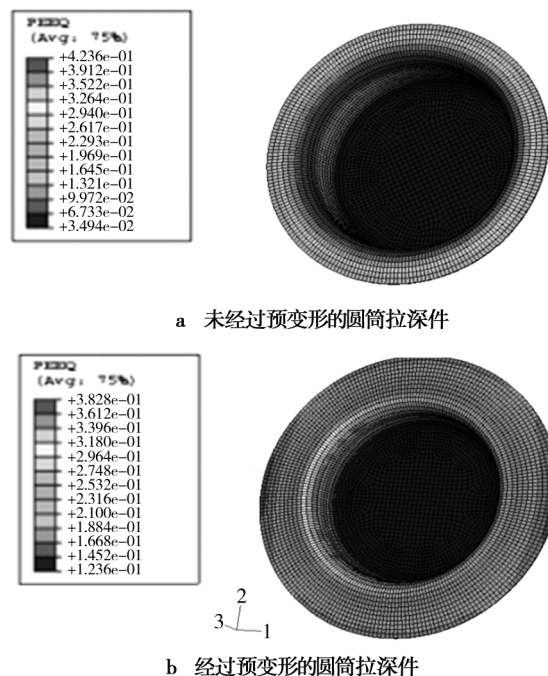
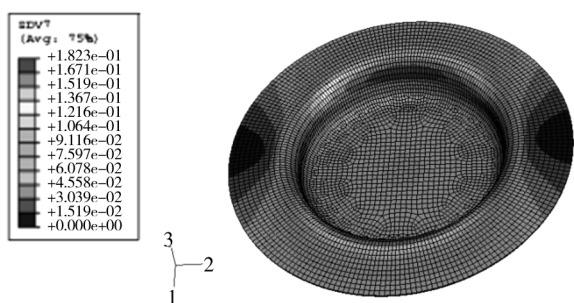


图3 圆筒拉深件的等效应变分布

Fig.3 Equivalent strain distribution of deep drawn cylindrical parts

和经过预变形的圆筒拉深件在各自极限拉深深度下的等效应变的分布。从应变分布看,圆筒件拉深过程中等效应变最大处出现在凹模圆角位置。相比于未经过预变形的圆筒拉深件,经过预变形的圆筒拉深件的应变分布表现出明显的各向不均匀性。由于圆形毛坯在 1 方向(单向拉伸方向)上的塑性应变明显小于 2 方向(垂直于单向拉伸方向)上的塑性应变,板料在 1 方向的应变强化效果要弱于 2 方向,圆筒件拉深过程中 1 方向上凸缘部分要比 2 方向上凸缘部分更容易向凹模内流动。因此在凹模圆角位置处 1 方向的等效应变要大于 2 方向上的相关量。

由于 FLD 对于非线性路径下圆筒件拉深过程中的破裂预测并不准确,而韧性断裂准则(DFC)是根据板料成形过程中应力、应变及相关过程变量的变化来预测韧性断裂的发生,可以运用于复杂变形路径下板料破裂的预测。因此采用式(3)表示的韧性断裂准则来判定破裂现象的发生,断裂准则中的相关参数的确定前面已经论述。图 4 是经过预变形的圆筒拉深件

图4 损伤值 D 的分布Fig. 4 Distribution of damage value D

中损伤值 D 的分布。当冲头下压的深度为 19.5 mm 时,损伤值 D 在 1 方向的筒壁上最大达到临界值 0.18,此时筒壁位置将发生破裂,与试验中观察到的冲头下压 20 mm 时筒壁位置出现裂纹的现象相吻合。采用线性路径下得到的 FLD 预测破裂时对应的主应变点离破裂临界线还有一定的安全裕度。这说明对于非线性路径下的板料破裂预测,文中提出的韧性断裂准则比 FLD 更加准确。

3 结论

采用 GT 细观损伤本构模型分析了圆筒件拉深

过程,在综合考虑拉伸和剪切两种不同韧性断裂影响因素的基础上,提出了一个统一的塑性加工中的韧性断裂准则。在拉深中采用经过单向拉伸预变形和未经过预变形的两种圆形板料毛坯拉深试验,试验结果与数值模拟结果对比表明:相对于成形极限图,笔者提出的新断裂准则可以更加准确地预测非线性应变路径下圆筒件的拉深破裂。

参考文献:

- [1] 胡平,柳玉起,李运兴. 板料成形缺陷及其数值仿真[J]. 应用基础与工程科学学报, 1999, 7(1): 39-54.
- [2] TVERGAARD V, NEEDLEMAN A, LO K K. Flow Localization in the Plane Strain Tensile Test[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1981, 29(2): 115-142.
- [3] VENUGOPAL R A, RAMAKRISHNAN N, KRISHNA K R. A Comparative Evaluation of the Theoretical Failure Criteria for Workability in Cold Forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142(1): 29-42.
- [4] 谢晓龙. 精冲成形延性损伤断裂与数值模拟研究[D]. 上海:上海交通大学, 2006.
- [4] 毛华杰,史宏江,华林,等. 对称冷辗扩分体锥形套圈宽展研究[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(4): 66-70.
- [5] JIA G W, HUA L, MAO H J. Surface Layer Microstructure Evolution of M2 Steel Cold Ring Rolling Mandrel Roller on Fatigue Crack Initiation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 562-565.
- [6] ZHOU X P, HUA L. Microstructures and Properties of Coating from Cemented Carbide by Vacuum Powder Sintering[J]. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2004, 22: 247-250.
- [7] HUA L, PAN L B, LAN J. Researches on the Ring Stiffness Condition in Radial-axial Ring Rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2570-2575.
- [8] 潘立波. 环件径轴向轧制变形规律与 CAPP 系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.
- [9] 华林,左治江. 环件轧制技术现状和发展[J]. 锻造与冲压, 2006(4): 28-33.
- [10] 张猛,胡亚民. 摆辗技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [11] 胡亚民,何怀波,牟小云,等. 摆动辗压工艺及模具设计[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2001: 1-260.
- [12] 胡亚民,华林,赖周艺,等. 汽车摩托车齿轮类零件的冷摆辗精密成形[J]. 中国机械工程, 2006(s1): 140-143.
- [13] 程培元,胡锐,华林,等. 直齿圆锥齿轮摆辗成形有限元分析[J]. 热加工工艺, 2006, 35(21): 65-68.
- [14] 胡锐,程培元,华林,等. 工艺参数对直齿圆锥齿轮摆辗凹模应力及凹模失效形式影响[J]. 热加工工艺, 2007, 36(1): 38-41.
- [15] 卢志国,程培元,华林. 摆辗机机身有限元分析[J]. 锻压装备与制造技术, 2007, 42(4): 32-34.
- [16] 程培元,胡锐,卢志国,等. 直齿圆锥齿轮摆辗成形最大辗压力的有限元研究[J]. 锻压技术, 2008, 33(1): 50-52.

(上接第 26 页)