

复杂应变路径加载下 7075-T6 铝合金的损伤演化

郑唐杰^{1,2}, 李 贵^{1,2,3}, 许 成^{1,2}, 方学彬^{1,2}

(1. 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉科技大学 机械传动与制造过程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081; 3. 武汉科技大学 精密制造研究院, 湖北 武汉 430081)

摘要: 以 7075-T6 高强铝合金为研究对象, 探明其在复杂应变路径加载后的力学性能, 设计了可调节变形量的复杂应变装配模型, 并基于 GTN 本构模型进行了单向拉伸和复杂应变路径加载下单向拉伸的仿真模拟, 研究了不同变形量对仿真试样的位移-载荷曲线和真实应力-真实应变曲线的影响, 分析了 f_0 、 f_N 、 f_C 、 f_F 这 4 个孔洞体积分数对复杂应变路径加载下试样的真实应力-真实应变曲线的影响。结果表明: 在施加复杂应变路径后, 试样断裂处所受的应力减小, 应变大幅减小; f_0 和 f_C 主要影响曲线的颈缩阶段, f_N 主要影响曲线的屈服阶段, 而 f_F 对曲线的影响较小。结果显示, 相较于单向拉伸的仿真结果, 复杂应变路径加载下的真实应力-真实应变曲线能更准确地反映汽车覆盖件在冲压生产过程中的损伤演化过程。

关键词: 7075-T6 铝合金; 损伤模型; 复杂应变路径; 孔洞体积分数; 单向拉伸

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.034

中图分类号: TG115.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 12-0227-07

Damage evolution on 7075-T6 aluminum alloy under complex strain path loading

Zheng Tangjie^{1,2}, Li Gui^{1,2,3}, Xu Cheng^{1,2}, Fang Xuebin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Education Ministry, 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: For 7075-T6 high-strength aluminum alloy, the mechanical properties after loading in complex strain paths were ascertained, and complex strain assembly model with adjustable deformation was designed. Based on the GTN constitutive model, the simulations of uniaxial tension and uniaxial tension under complex strain path loading were carried out, respectively, the influences of different deformations on the displacement-load curve and true stress-true strain curve for simulated specimen were studied, and the influences of four void volume fractions of f_0 , f_N , f_C , f_F on the true stress-true strain curve for specimen under complex strain path loading were analyzed. The results show that after applying complex strain paths, the stress and strain at fracture site of sample decrease greatly. f_0 and f_C mainly affect the necking stage of the curve, f_N mainly affects the yield stage of the curve, while f_F has little effect on the curve. The results show that compared with the simulation results of uniaxial tension, the true stress-true strain curve under complex strain path loading is more accurate for the damage evolution process of automotive panels during the stamping production process.

Key words: 7075-T6 aluminum alloy; damage model; complex strain path; void volume fraction; uniaxial tension

随着全球汽车使用数量的日益增加, 减少汽车在生产和使用过程中所带来的环境污染迫在眉睫, 研究表明, 汽车轻量化能够在一定程度上减少排放

和降低燃油使用量^[1-2]。7075 铝合金因为质量轻、密度低、耐腐蚀性强等特点被广泛应用于汽车领域^[3], 在汽车覆盖件冲压生产过程中, 随着覆盖件复杂程度的不断提高, 现在更多地采用多道次的成形工序, 相应的板料也会经历非线性的变形路径^[4-5], 此时通过传统的线性应变条件下的板料损伤演化结果来判断复杂成形条件下板料损伤演化结果则变得不具有准确性。

为了更好地了解应变路径于铝合金成形的影响, Majidi O 等^[6]针对超塑性镁铝合金板进行了双向拉

收稿日期: 2022-01-09; 修订日期: 2022-04-12

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: 郑唐杰 (1997-), 男, 硕士

E-mail: jiemaol010@163.com

通信作者: 李 贵 (1983-), 男, 博士, 副教授

E-mail: leegui2030@wust.edu.cn

伸有限元模拟,选取了3个本构模型分别测试其仿真精度。Qin J S 等^[7]进行了压缩-拉伸、拉伸-拉伸、轧制-拉伸和拉伸-轧制-拉伸试验,研究了AA3103 铝合金在单、双应变路径变化作用下的应力、应变行为。Li Z F 等^[8]发现采用考虑剪应力和主应力的 Mohr-Coulomb 准则 (M-C) 能够较好地预测 Al6011-T6 铝合金在各种应变条件下的断裂过程。Rahmaan T 等^[9]通过研究 AA6013-T6 铝合金、AA7075-T6 铝合金和开发中的 AA7XXX-T76 铝合金在高应变率下的本构行为和各向异性塑性,发现流动应力会随着应变率的增加而略有增加。Liao J 等^[10]通过扫描电子显微镜、透射电子显微镜和电子背散射衍射对在不同应变路径加载下的3种马氏体含量不同的 DP 钢板进行了微观结构分析,在其拉伸试验中观察到瞬态硬化行为和永久软化。韩非等^[11]通过不同角度轧制方向下的2步拉伸试验得到了980 钢的屈服轨迹,验证了复杂应变路径的改变与弹塑性流动间的关系。

上述研究工作均是采用双线性应变路径来进行的,但是在实际汽车覆盖件冲压成形的过程中,板料变形所经历的必然是一系列非线性应变路径叠加的过程,所以,通过对7075 铝合金在复杂应变路径加载下的损伤演化行为展开深入研究和进行模拟预测,可以达到对其加工成形特性较为精确的评估。本文采用 GTN 本构模型对复杂应变路径加载下的7075-T6 铝合金板材的损伤演化进行研究。

1 基于 GTN 本构模型的单向拉伸模拟

Needleman A 和 Tvergaard V^[12-13]在 Gurson 模型的基础上对其进行修正,得到了 Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) 损伤模型,模型的屈服函数 φ 如式 (1) 所示:

$$\varphi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} \right)^2 + 2f^* q_1 \cosh \left(\frac{3}{2} \times \frac{q_2 \sigma_m}{\sigma_0} \right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (1)$$

式中: σ_{eq} 为宏观 Von Miss 等效应力; σ_0 为等效屈服应力; σ_m 为宏观静水应力; q_1 、 q_2 、 q_3 为修正参数; f^* 为等效孔洞体积分数,当 $f^* = 0$ 时,该模型退化为 Von Miss 屈服函数。

f^* 的定义如式 (2) 所示:

$$f^* = \begin{cases} f, & f \leq f_c \\ f_c + k(f - f_c), & f_c < f < f_F \\ f_N, & f \geq f_F \end{cases} \quad (2)$$

式中: f 为孔洞体积分数; k 为孔洞长大加速因子, $k = \frac{f_N - f_c}{f_F - f_c}$; f_c 为材料的临界孔洞体积分数; f_F 为材料的断裂孔洞体积分数; f_N 为孔洞形核的体积分数。

在 GTN 损伤模型中,损伤参数共有9个,分别是: q_1 、 q_2 、 q_3 、 f_0 、 f_N 、 f_c 、 f_F 、 S_N 、 ε_N 。一般取 $q_1 = 1.5$, $q_2 = 1$, $q_3 = q_1^2 = 2.25$, $S_N = 0.1$, $\varepsilon_N = 0.1$ 。其中, f_0 为初始孔洞的体积分数; ε_N 为形核应变平均值; S_N 为 ε_N 的标准偏差。

本文使用 Abaqus 6.14.4 版本有限元分析软件,仿真模拟使用7075-T6 高强度铝合金板料为模拟对象,建立其拉伸试验有限元模型,材料输出参数、弹性模量与泊松比如表1所示,标距内网格大小为1 mm,其余部分网格大小为2 mm,设置边界条件为左端进行铰接,右端施加大小为20 mm、方向水平向右的位移,并设置其在该其他方向的自由度为0。铝合金试样尺寸和仿真模型如图1所示。

表1 7075-T6 铝合金的基本力学性能
Table 1 Basic mechanical properties of 7075-T6 aluminum alloy

参数	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	伸长率/ %
数值	630	537	71	0.33	13.6

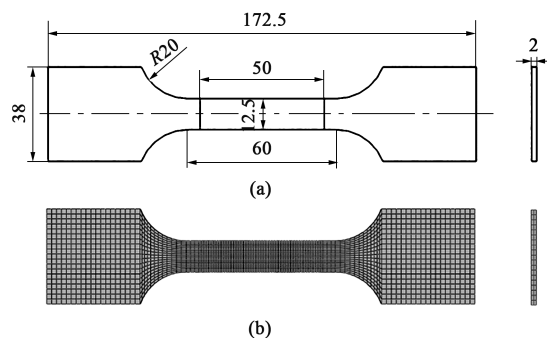


图1 试样尺寸 (a) 及网格划分 (b)
Fig. 1 Sample sizes (a) and grid division (b)

首先,调试 GTN 损伤模型中的 f_0 、 f_N 两个参数的值,分别使试验和仿真得到的位移-载荷曲线和真实应力-真实应变曲线的弹性和屈服阶段吻合;再调试 f_c 、 f_F 两个参数,分别使试验和仿真得到的位移-载荷曲线和真实应力-真实应变曲线的断裂点位置一致,得到最后的 GTN 损伤模型的损伤参数 (表2)^[14]。

对试样进行仿真模拟,并与参考文献 [15] 所示的试验结果进行对比,得到最终适合的损伤参数后进行单向拉伸试验仿真,得到的试验和仿真结果及

表 2 GTN 损伤模型的损伤参数
Table 2 Damage parameters of GTN damage model

参数	f_0	f_N	f_C	f_F
数值	0.0007	0.0167	0.0238	0.0485

其位移-载荷曲线和真实应力-真实应变曲线如图 2 所示。

2 应变路径加载模拟及分析

2.1 应变路径加载方案

为了更贴近铝合金在实际冲压过程中的受力情

况，在仿真模拟中，本文选择先对 7075 铝合金试样分别进行 3 种“W”形的路径加载，再对其一端进行拉伸，使其流过加载区，最后进行单向拉伸试验模拟，以实现

对实际冲压过程中铝合金损伤情况的模拟和预测。
应变路径加载装配图以及施加变形模块的具体尺寸如图 3 所示，其中，凸模 A、凹模 B 为应变路径加载模块，C、D 为夹持模块，均为解析刚体，试样水平放置于凹模 B 上，由凸模 A 进行应变加载。

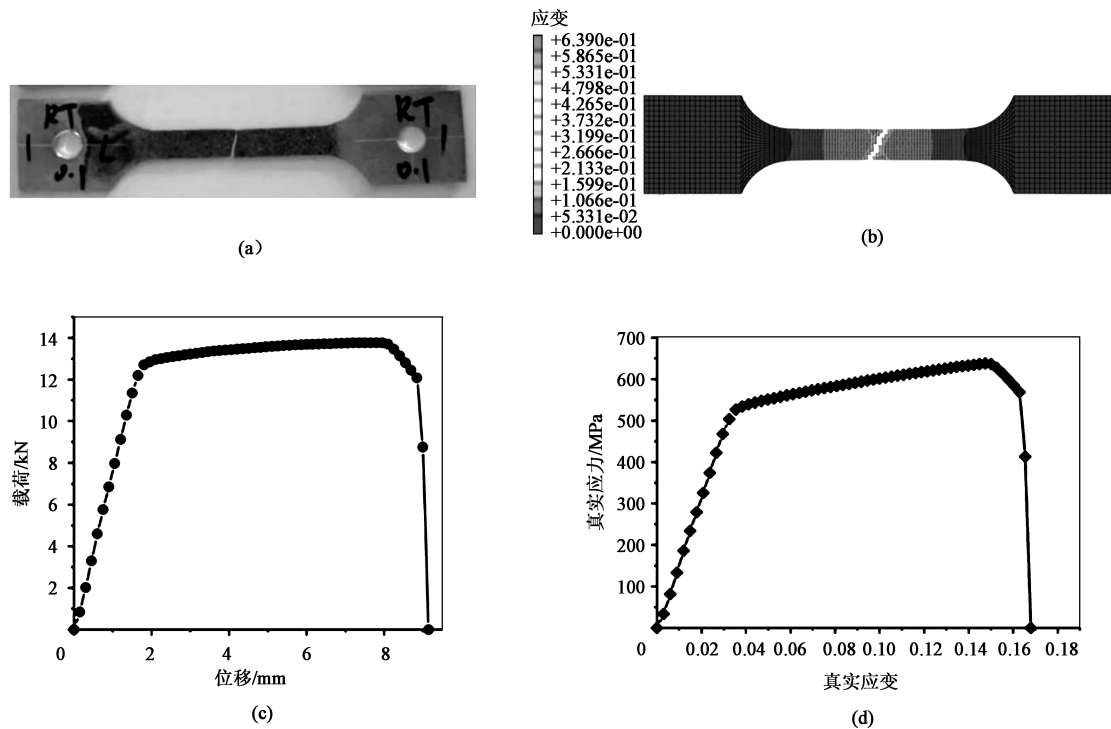


图 2 试验与仿真结果及位移-载荷曲线和真实应力-真实应变曲线
(a) 单向拉伸试验结果 (b) 仿真模拟应变云图 (c) 位移-载荷曲线 (d) 真实应力-真实应变曲线

Fig. 2 Test and simulation results and curves of displacement-load and true stress-true strain
(a) Uniaxial tensile test results (b) Cloud map of strain in simulation (c) Displacement-load curve (d) True stress-true strain curve

试样变形部分的加载由“W”形弧度区域进行控制。“W”形区域中，凸模的凹弧半径为 R_1 、凸弧半径为 R_2 ，凹模的凸弧半径为 R_1 、凹弧半径为 R_2 。弧线段的水平长度与试样标距部分的长度相等，为 50 mm，在标距长度固定的前提下，通过调整圆心角度数即可改变“W”形圆弧段的波动程度，即可改变变形量的大小。3 组仿真模拟选取的圆心角度数和圆弧半径如表 3 所示。

变形量的计算公式如 (3) 所示：

$$\Delta L = \frac{\frac{4\theta}{2\pi} \times 2\pi \times \frac{R_1 + R_2}{2}}{L} = \frac{2\theta(R_1 + R_2)}{L} \quad (3)$$

式中： ΔL 为试样的变形量，本文的变形量为 1.99%； L 为试样标距部分的长度； θ 为圆弧弧度。

凹弧与凸弧半径的差值与试样厚度 d 相等，本文中为 2 mm，如式 (4) 所示：

$$|R_1 - R_2| = d \quad (4)$$

应变路径的具体加载流程为：限制模块 B、C、D 的 6 个自由度，模块 A 向下加载，为试样施加“W”形变形，加载速率和单向拉伸速率相同，均为 $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，当 A、B 模块上、下圆弧段中点的距离为 2.1 mm 时完成变形加载。A、B、C、D 这 4 个工具表面与试样之间的接触为无润滑的干摩擦，摩擦因数均设定为 0.14。试样变形加载完成后对试

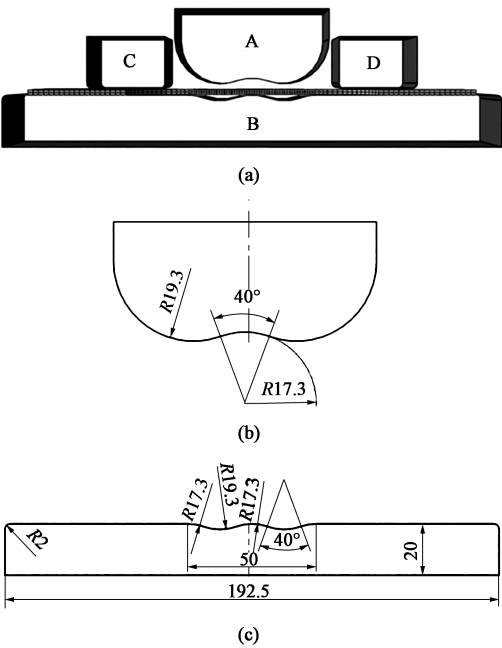


图 3 应变路径加载装配图及模型尺寸

(a) 应变加载装配图 (b) 凸模尺寸 (c) 凹模尺寸
Fig. 3 Strain path loading assembly drawing and model dimensions
(a) Strain path loading assembly drawing (b) Dimensions of punch
(c) Dimensions of die

表 3 3 组仿真模拟模型的变形圆弧参数

Table 3 Deformation arc parameters for three simulation models

圆心角度/(°)	圆弧半径 R_1 /mm	圆弧半径 R_2 /mm
30	23.15	25.15
35	19.78	21.78
40	17.27	19.27

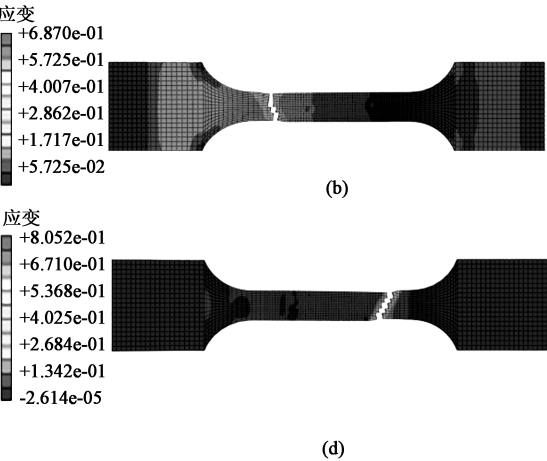
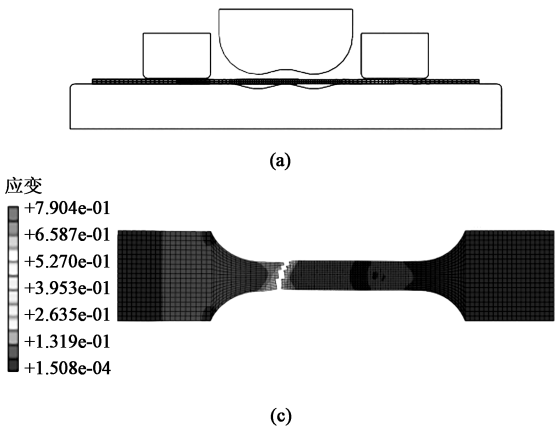


图 5 试样装配与单向拉伸断裂结果
(a) 变形量为 1.99% 的装配模型 (b) 变形量为 1.99% 的仿真应变云图 (c) 变形量为 1.57% 的仿真应变云图
(d) 变形量为 1.11% 的仿真应变云图

Fig. 5 Assembly and uniaxial tensile fracture results of specimens

(a) Assembly model at deformation amount of 1.99% (b) Simulated strain cloud map at deformation amount of 1.99%
(c) Simulated strain cloud map at deformation amount of 1.57% (d) Simulated strain colud map at deformation amount of 1.11%

样右端施加位移载荷，另一端不限制其自由度，将试样从模具中完整抽出后完成整个试样应变路径的加载（图 4），加载完成后对其进行单向拉伸仿真模拟。

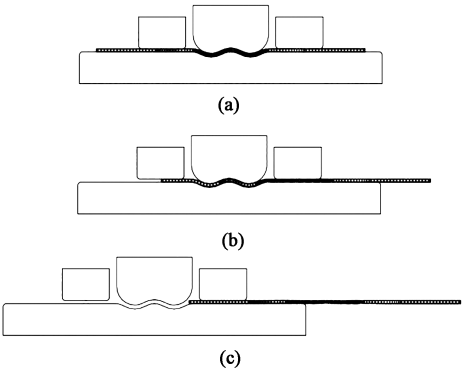


图 4 应变路径加载过程

(a) 施加应变 (b) 抽出试样 (c) 试样完整抽出
Fig. 4 Strain path loading process
(a) Application of strain (b) Extraction of sample
(c) Complete extraction of sample

2.2 仿真结果分析讨论

3 组仿真模拟模型和试样断裂结果如图 5 所示。图 5a 为圆心角度为 40°、变形量为 1.99% 的装配模型；图 5b 为图 5a 模型下的仿真结果，裂纹表现出倾斜但倾斜程度较小；图 5c 为圆心角度为 35°、变形量为 1.57% 的仿真结果，裂纹倾斜程度增加；图 5d 为圆心角度为 30°、变形量为 1.11% 的仿真结果，裂纹倾斜明显。可以看出，随着圆心角度与变形量的逐渐减少，其裂纹倾斜程度逐渐增加，与单向拉伸结果逐渐接近。

图 6 为单向拉伸仿真模拟和变形量分别为 1.99%、1.57%和 1.11%时的真实应力-真实应变与位移-载荷曲线。根据图 6 可知，施加了变形的试样在进行单向拉伸时其弹性阶段的斜率会明显升高，但在 1.11%~1.99%的变形量范围内，3 组曲线在弹性阶段的斜率变化并不明显，同时施加了变形量的试样也会更早进入屈服阶段并在同等的应变条件下承受更大的应力。变形量为 1.99%的试样在拉伸时最早断裂，其次为变形量为 1.57%和 1.11%的试

样，随着变形量的增加，对应试样的断裂点向图 6 中的右下角移动，即变形量增大，断裂点应变减小，应力减小。观察曲线整体走势可以得知，在 7075-T6 高强铝合金试样发生拉伸断裂前，进行不同变形量的加载会对其在拉伸断裂阶段的力学性能造成明显的影响，主要影响屈服阶段的应变量，但对其斜率的影响不大，发生变形会使弹性阶段的斜率变大，但变形量的改变对斜率的影响较小，颈缩阶段则基本不受变形的加载以及变形量的影响。

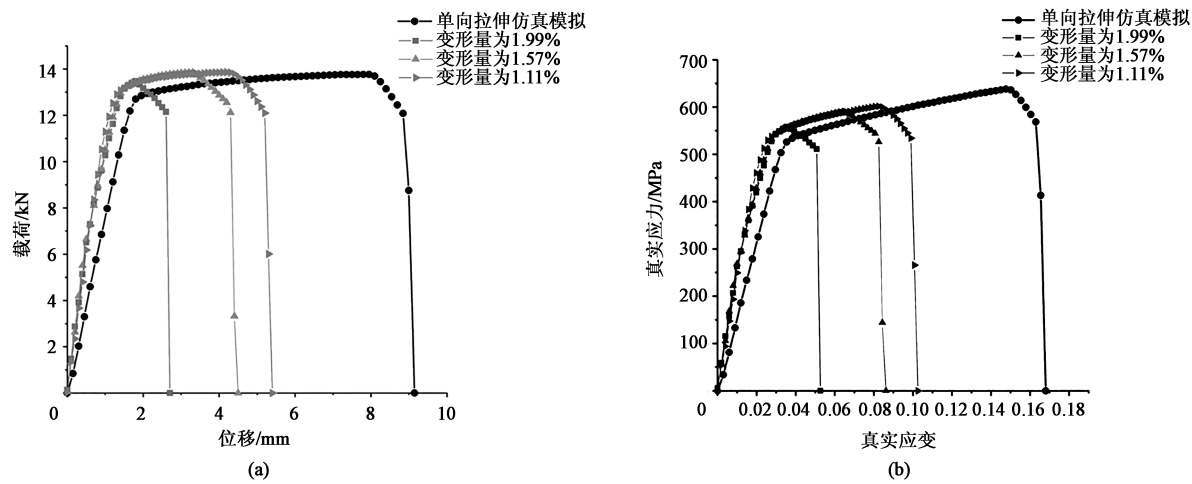


图 6 不同变形量时的位移-载荷曲线 (a) 与真实应力-真实应变曲线 (b)

Fig. 6 Displacement-load curves (a) and true stress-true strain curves (b) under different deformation amounts

GTN 损伤模型主要反映孔洞体积分数的演变规律，孔洞体积分数在模型中具有不可或缺的重要位置，其值的改变会使得材料的真实应力-真实应变曲线也发生改变，为了解孔洞体积分数对经过应变路径加载后的 7075-T6 铝合金试样力学性能的影响，选取了变形量为 1.11%、圆心角度为 30° 条件下的应变路径加载仿真模型对试样进行加载路径-单向拉伸的仿真模拟，针对 f_0 、 f_N 、 f_C 、 f_F 这 4 个损伤参数设置 3 个变量（表 4），进行了 12 组仿真模拟。

表 4 损伤参数取值表

Table 4 Values of damage parameters

损伤参数	取值 1	取值 2	取值 3
f_0	0.0003	0.0050	0.0100
f_N	0.0167	0.0300	0.0500
f_C	0.0100	0.0238	0.0350
f_F	0.0300	0.0485	0.0600

从图 7a 中可以看出，初始孔洞体积分数主要影响曲线的颈缩阶段，随着孔洞体积分数的增大，曲

线断裂点处的应力增大，真实应变减小，而对曲线其余部分及最大真实应力值的影响较小。图 7b 中，形核孔洞体积分数主要影响曲线的屈服和颈缩阶段，随着形核孔洞体积分数的增大，曲线的断裂点向左大幅移动，曲线的颈缩阶段几乎消失，在仿真结果中也显示试样发生断裂前几乎无颈缩过程，曲线弹性部分则受形核孔洞体积分数的影响较小。图 7c 中，随着临界孔洞体积分数的增大，曲线的断裂点逐渐向右下方移动，断裂点处的真实应力减小，真实应变增大，颈缩阶段的应变量增大，曲线其余部分的趋势一致，几乎未受到影响。图 7d 中，在不同的断裂孔洞体积分数下，真实应力-真实应变曲线并无明显变化，3 条曲线在断裂点之前的部分几乎重合，断裂点的位置几乎一致，断裂孔洞体积分数对真实应力-真实应变曲线无明显影响。

为了进一步验证复杂应变路径加载下仿真模拟结果的准确性，与参考文献 [16] 进行的单个弯曲应变路径加载试验结果进行对比。在经过 1 次和 2 次过筋试验后，试样更快地进入屈服阶段且曲线屈服阶段的曲线上移，试样提前断裂，断裂点左移，

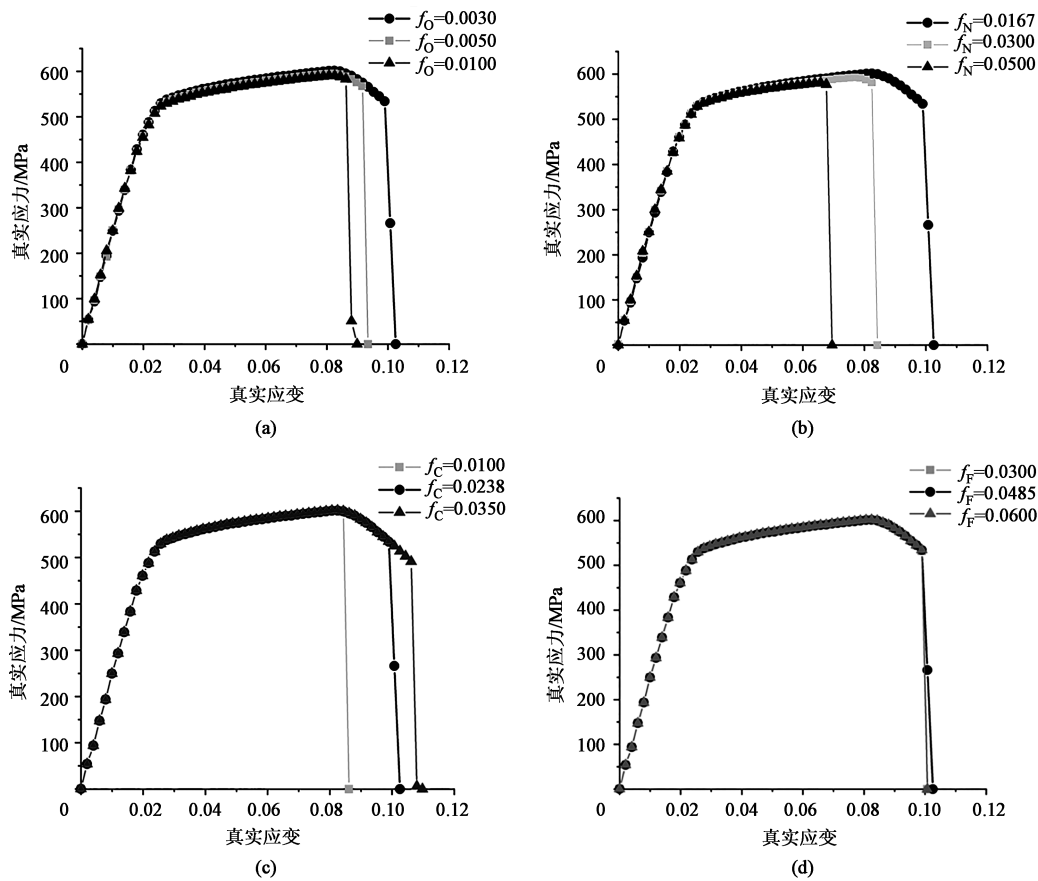


图 7 孔洞体积分数对真实应力-真实应变曲线的影响

(a) 初始孔洞 (b) 形核孔洞 (c) 临界孔洞 (d) 断裂孔洞

Fig. 7 Influences of void volume fraction on true stress-true strain curves

(a) Initial void (b) Nucleation void (c) Critical void (d) Fracture void

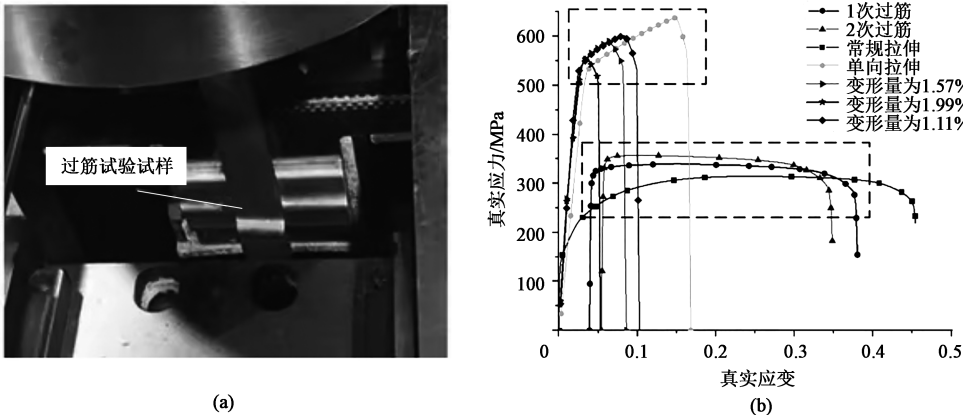


图 8 过筋试验试样 (a) 和不同条件下的真实应力-真实应变曲线 (b)

Fig. 8 Reinforcement test specimen (a) and true stress-true strain curves under different conditions (b)

其过筋试验试样和力学曲线如图 8 所示，在施加应变后，上方虚线框中的曲线和下方虚线框中的曲线呈现相同的变化趋势：进入屈服阶段后，所受真实应力值增加，屈服阶段的曲线上移，曲线断裂点处的真实应变值减小。

3 结论

(1) 使用 GTN 损伤模型得到 7075-T6 铝合金试样的单向拉伸断裂仿真结果和该状态下试样的位

移-载荷曲线和真实应力-真实应变曲线, 用于后续仿真对比。

(2) 建立可以通过改变圆心角度以及凸模的凹弧半径和凸弧半径来调整试样变形量的复杂应变路径加载模型, 得到变形量分别为 1.11%、1.57% 和 1.99% 时试样的单向拉伸断裂仿真结果。试样的裂纹倾斜度随着变形量的增加而减少, 对比 3 组不同变形量和普通单向拉伸下试样的力学曲线和试验结果发现, 变形量的增加会使得试样在进行单向拉伸时更早地断裂, 其能承受的应力上限也更小。

(3) 选取变形量为 1.11%、圆心角度为 30° 条件下的应变路径加载仿真模型, 研究在加载了变形后的孔洞体积分数对真实应力-真实应变曲线的影响: f_0 和 f_N 主要影响材料的真实应力-真实应变曲线断裂点的位置和颈缩阶段的真实应变量, f_C 主要影响到达真实应力最大值后的颈缩部分, f_F 对曲线的影响较小。

参考文献:

- [1] 李光霁, 刘新玲. 汽车轻量化技术的研究现状综述 [J]. 材料科学与工艺, 2020, 28 (5): 47-61.
Li G J, Liu X L. Literature review on research and development of automotive lightweight technology [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28 (5): 47-61.
- [2] 洪腾蛟, 董福龙, 丁凤娟, 等. 铝合金在汽车轻量化领域的应用研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (4): 1-6.
Hong T J, Dong F L, Ding F J, et al. Application of aluminum alloy in automotive lightweight [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (4): 1-6.
- [3] 刘辰辰, 陈亚军, 李柯, 等. 7075 航空铝合金原位腐蚀-多轴疲劳行为分析 [J]. 中国机械工程, 2019, 30 (5): 615-621.
Liu C C, Chen Y J, Li K, et al. Analysis for in-situ corrosion-multiaxial fatigue behaviors of 7075 aerospace aluminum alloys [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30 (5): 615-621.
- [4] 王大鹏, 李晓峰. 某汽车内板冲压成形工艺优化及回弹补偿 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (9): 40-46.
Wang D P, Li X F. Stamping process optimization and springback compensation of an automobile inner plate [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (9): 40-46.
- [5] 徐涛涛, 孔垂品, 李俊杰, 等. 汽车覆盖件冲压工艺分析系统 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (5): 74-82.
Xu T T, Kong C P, Li J J, et al. Process analysis system for stamping of automobile panel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (5): 74-82.
- [6] Majidi O, Jahazi M, Bombardier N. Prediction of material behavior during biaxial stretching of superplastic 5083 aluminum alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102 (5/8): 2357-2366.
- [7] Qin J S, Bjorn H, Odd S H. Experimental characterization and modeling of aluminum alloy AA3103 for complex single and double strain-path changes [J]. International Journal of Plasticity, 2019, 112: 158-171.
- [8] Li Z F, Lu S H, Yang W K, et al. Study on the ductile fracture rule of 6061-T6 aluminum alloy sheet under different strain conditions [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72 (10): 2721-2728.
- [9] Rahmaan T, Noder J, Abedini A, et al. Anisotropic plasticity characterization of 6000- and 7000-series aluminum sheet alloys at various strain rates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 135 (C): 103390. 1-103390. 20.
- [10] Liao J, Jose A S, Augusto B L, et al. Mechanical microstructural behaviour and modelling of dual phase steels under complex deformation paths [J]. International Journal of Plasticity, 2017, 93, 269-290.
- [11] 韩非, 操召兵. 复杂应变路径下 Q&P980 超高强钢的非弹性回复行为 [J], 清华大学学报: 自然科学版, 2018, 58 (10): 921-928.
Han F, Cao Z B. Inelastic of Q&P980 ultra high strength steel with a complicated deformation path [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2018, 58 (10): 921-928.
- [12] Needleman A, Tvergaard V. An analysis of ductile rupture in notched bars [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1984, 32 (6): 461-490.
- [13] Tvergaard V, Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar [J]. Acta Metallurgica, 1984, 32 (1): 157-169.
- [14] 郭建超, 张立研, 曹艳艳, 等. 基于 GTN 损伤模型的双相钢激光拼焊板冲压成形失效行为研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (17): 86-89, 94.
Guo J C, Zhang L Y, Cao Y Y, et al. Research on failure behavior of stamping forming of dual-phase steel laser tailor welded blanks based on GTN Damage model [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (17): 86-89, 94.
- [15] 盈亮, 刘文权, 王丹彤, 等. 7075-T6 铝合金温成形损伤演化试验与仿真 [J]. 中国有色金属学报, 2016, 26 (7): 1383-1390.
Ying L, Liu W Q, Wang D T, et al. Experimental and simulation of damage evolution behavior for 7075-T6 aluminum alloy in warm forming [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26 (7): 1383-1390.
- [16] 柯俊逸. 复杂加载条件下金属板料的成形极限研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
Ke J Y. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Philosophy in Engineering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018.