

## 基于修正 LM 算法的 Barlat89 和 Y-U 联合模型参数反求

刘迪辉<sup>1†</sup>, 王小康<sup>1</sup>, 王双明<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南长沙 410082;

2. 柳州福臻车体实业有限公司, 广西柳州 545000)

**摘要:**为精确预测高强钢的回弹,需要使用准确且全面描述其材料力学性能的材料模型参数,由此提出了一种基于修正的 Levenberg Marquardt (LM) 优化算法对 Barlat89 和 Yoshida-Uemori (Y-U) 联合模型参数进行反求的方法.以高强钢材料 DP780 为例,通过单向拉伸和拉伸压缩试验获取材料的力学性能曲线,使用 LS-DYNA 软件进行与试验对标的仿真分析,采用修正的 LM 算法连续优化仿真预设的材料模型参数,使得最终仿真求解输出与试验获取的材料性能曲线达到最小二乘意义上的相等,得到最优的材料联合模型参数.研究表明:使用的 LM 算法相关系数为 0.951 4,算法收敛性较好;反求出的 Barlat89 和 Y-U 联合模型参数,能够同时较准确地描述 DP780 材料单向拉伸和拉伸压缩力学性能曲线;仿真结果曲线与试验曲线拟合程度较高,两者的平均相对误差为 4.65%.此方法所获取的材料模型参数反映了材料正、反向加载时的力学特性,同时能够极大地提升回弹预测精度.

**关键词:**高强钢;回弹;本构模型;优化;材料试验

**中图分类号:**TG386 **文献标志码:**A

## Parameter Inverse of Barlat89 and Y-U Joint Model Based on Modified LM Algorithm

LIU Dihui<sup>1†</sup>, WANG Xiaokang<sup>1</sup>, WANG Shuangming<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Liuzhou Fuzhen Bodywork Industrial Co., Ltd., Liuzhou 545000, China)

**Abstract:** In order to accurately predict the springback of high-strength steel, it is necessary to use the material model parameters that accurately and comprehensively describe the material mechanical properties. Therefore, an inverse calculation method of the parameters of the Barlat89 and Yoshida-Uemori (Y-U) combined model was proposed based on the modified Levenberg Marquardt (LM) optimization algorithm. Using high-strength steel DP780 as an example, the mechanical property curve of the material was obtained through unidirectional tensile and tensile compression tests. LS-DYNA software was used to simulate and analyze the object of the test. The modified LM algorithm was used for continuously optimizing the material model parameters preset by simulation. Finally, the simula-

\* 收稿日期:2022-03-11

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(201631390158), Natural Science Foundation of Hunan Province(201631390158)

作者简介:刘迪辉(1975—),男,湖北荆州人,湖南大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: dihui@163.com

tion output equals the material property curve obtained from the experiment in the sense of least squares, and the optimal material combination model parameters are obtained. The results show that the correlation coefficient of the LM algorithm is 0.951 4, and the convergence of the LM algorithm is good. The inverse Barlat89 and Y-U model parameters can accurately describe the uniaxial tensile and tensile compression mechanical properties of DP780 materials at the same time. The simulation curve fits well with the test curve, and the average relative error of the two curves is 4.65%. The material model parameters obtained by this method reflect the mechanical properties of materials under forward and reverse loading and can markedly improve the prediction accuracy of springback.

**Key words:** high strength steel; springback; constitutive models; optimization; materials testing

当前,汽车车身零部件的设计与制造广泛采用高强钢材料,因此在生产具有结构复杂、自由曲面多和尺寸与形状精度要求高等特点的零件时,回弹问题显得极为突出<sup>[1]</sup>.回弹问题不可能被完全根除,准确预测零件成形后回弹发生的部位和回弹值才能减少模具调试次数,缩短模具开发周期.高强钢的回弹是板料成形后在大应变下的应力释放,在冲压回弹仿真分析中,采用单一的材料本构模型参数无法准确模拟出板料成形后的应力应变场,回弹仿真的精度将无法保证.

文献[2]通过参数求解的方法推导 Barlat89 屈服准则下双相钢 DP600 的各向异性系数,并证明其比 Hill48 屈服准则在对板料各向异性行为的预测上更为准确.为更好地描述大应变循环塑性变形行为以及大预应变后小范围再屈服时的应力应变响应,文献[3]提出一种新的材料本构模型,该模型能够准确模拟材料反向加载时表现出的瞬态包辛格效应、循环硬化特性及加工硬化迟滞.文献[4-7]将 Y-U 模型与其他先进的材料硬化模型一同应用到回弹仿真分析中,并将结果与实际对比发现:Y-U 模型的回弹预测精度最高,重合性最好.文献[8-9]采用试验结合数值计算的方法确定 Y-U 模型材料参数,然而数值计算公式繁杂且计算过程烦琐,实际应用困难.文献[10]采用遗传算法与仿真相结合的方式对冲压材料的参数反求,验证了优化算法与仿真结合用于冲压成形材料参数获取的准确性.文献[11]借助模拟退火算法结合有限元计算与物理试验反演分析出 Y-U 模型的参数.文献[12]将 LM 优化算法应用于 Johnson-Cook 材料模型参数求解中,证实将该算法应用于材料参数识别的实用性.文献[13]通过结合拉伸压缩试验和 V 型模弯曲模拟的优化过程评估 Y-U 模型参数,能够更加精确地预测回弹,但此参数

求解方法实操性较差.

完整的高强钢材料本构模型必须能够体现其拉伸阶段的硬化曲线和各向异性,以及反向加载时所表现出的变弹性模量和加工硬化特性.基于上述分析,本文提出一种确定 Barlat89 和 Y-U 联合本构模型参数的方法,首先通过材料试验获取高强钢材料的力学性能数据,其次分别建立与试验相对应的有限元仿真计算模型,最后运用修正的 LM 算法不断优化仿真中材料模型参数使其计算结果不断逼近试验数据,反求出联合模型材料参数,并验证其准确性.此方法的应用,易于获取更加精确地反映材料力学性能的本构模型参数,提高业界对高强钢材料回弹的预测精度,缩短模具开发周期,降低开发成本.

## 1 反求模型和方法

### 1.1 Barlat89 和 Y-U 联合模型

Barlat89 屈服准则对应于 LS-DYNA R13 软件中 36 号材料模型,其一般表达式为:

$$f(\theta) = a|K_1 + K_2|^n + a|K_1 - K_2|^n + b|2K_2|^n = 2\sigma^n \quad (1)$$

其中,

$$K_1 = \frac{\sigma_{xx} + p\sigma_{yy}}{2} \quad (2)$$

$$K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} + p\sigma_{yy}}{2}\right)^2 + q^2\sigma_{xy}^2} \quad (3)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $p$ 、 $q$  为各向异性特征参数.

LS-DYNA R13 软件中 226 号材料模型结合了 Barlat89 屈服准则和 Y-U 非线性运动硬化模型.Y-U 模型是一种描述材料屈服后流动准则的强化模型,该模型可以体现材料在大塑性应变和复杂塑性应变下的材料塑性行为.如图 1 所示,该混合硬化模型假

设在应力空间中屈服面在边界内移动.

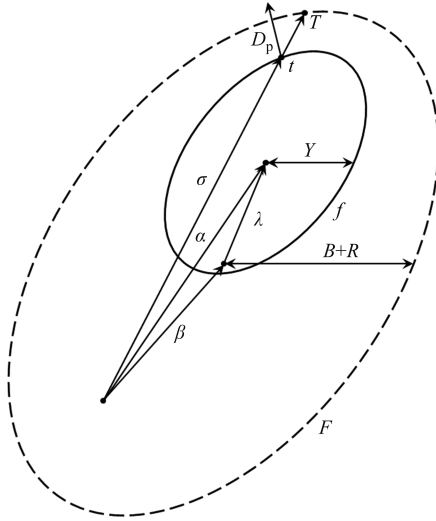


图1 Y-U混合硬化模型

Fig.1 Y-U hybrid hardening model

材料初始状态和后续变形的屈服函数分别表示为:

$$f_0 = f(\sigma) - Y = 0 \quad (4)$$

$$f_0 = f(\sigma - \alpha) - Y = 0 \quad (5)$$

式中:屈服面 $f$ 为柯西应力 $\sigma$ 的函数; $Y$ 为初始屈服应力; $\alpha$ 为随有效塑性应变率变化的背应力.

边界面 $F$ 可以用边界面中心参数 $\beta$ 表示:

$$F = f(\sigma - \beta) - (B + R) = 0 \quad (6)$$

式中: $B$ 和 $R$ 分别为边界面的初始尺寸和各向同性硬化分量.

边界面的各向同性强化如式(7)所示,其随动硬化如式(8)、式(9)和式(10)所示.

$$\dot{R} = m(R_{sat} - R)\dot{\varepsilon} \quad (7)$$

$$\lambda = \alpha - \beta \quad (8)$$

$$t = B + R - Y \quad (9)$$

$$\dot{\beta} = m\left(\frac{2}{3}bD_p - \beta'\dot{\varepsilon}\right) \quad (10)$$

式中: $\dot{R}$ 为各向同性硬化率; $m$ 为各向同性硬化速率参数; $R_{sat}$ 为大塑性应变下 $R$ 的饱和值; $\dot{\varepsilon}$ 为有效塑性应变率; $\lambda$ 表示屈服面相对于边界面的运动; $t$ 为应力变化量; $\dot{\beta}$ 和 $\beta'$ 分别为 $\beta$ 的目标率和偏应力分量.

当模型应用于高强钢时,将 $R$ 修正为式(11),使用参数 $C_1$ 、 $C_2$ 以考虑其在循环加载变形中的材料特性.

$$R = R_{sat}[(C_1 + \varepsilon)^{C_2} - C_1^{C_2}] \quad (11)$$

另外,材料参数 $h$ 描述非各向同性面的膨胀率.通过式(12)来描述材料经过塑性变形后卸载过程中的变弹性模量特性.

$$E = E_0 - (E_0 - E_A)[1 - \exp(-\xi\varepsilon)] \quad (12)$$

式中: $E_0$ 和 $E_A$ 分别为初始和无限大预应变下材料的弹性模量; $\xi$ 为弹性模量缩减系数.

## 1.2 修正的LM优化算法

LM算法能够提供非线性最小化问题的数值解,并能有效解决过参数化和冗余参数问题,具有快速稳定、迭代次数相对较少的特点.本文对该算法进行修正,对多目标进行优化反求,并添加权重系数来衡量各目标之间的相互影响.

采用误差函数提供有限元仿真与试验测试结果之间的误差度量,通过使用预设参数集执行仿真模拟与实际测试结果进行对比以重新识别原始参数集,最后通过不断调整所设定的参数集使目标函数最小化.误差函数和目标函数分别如式(13)、式(14)所示.

$$\varepsilon_i(X) = \left| \frac{(\eta_c)_s - (\eta_c)_t}{(\eta_c)_t} \right| + \omega \left| \frac{(\eta_c)_s - (\eta_c)_t}{(\eta_c)_t} \right| \quad (13)$$

$$\varphi(X) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2(X) + \sum_{i=1}^{N_c} \frac{\psi(i)}{C(i)} \quad (14)$$

式中: $X$ 为反求参数集; $(\eta_c)_s$ 、 $(\eta_c)_t$ 分别为拉伸仿真计算结果和试验测试结果; $(\eta_c)_s$ 、 $(\eta_c)_t$ 为拉压仿真计算结果和试验测试结果; $\omega$ 为权重系数; $N_c$ 为约束条件个数; $C$ 为反求参数的约束函数; $\psi$ 为罚函数.

## 1.3 方法和流程

首先通过三个不同轧制方向的DP780材料试件的单向拉伸试验以及单个方向通过位移控制的拉伸压缩试验,获取试件加载过程中载荷、时间位移等试验数据.然后采用LS-DYNA R13软件建立起与试验条件一致的分别采用36号材料模型的单向拉伸和226号联合材料模型的拉伸压缩仿真模型,计算并输出载荷与时间的仿真数据.最后使用改进的LM优化算法程序,反复优化仿真计算中的材料模型参数,将仿真数据与试验数据进行对比,使两者之差达到最小二乘意义上的最小,先反求出材料单向拉伸硬化曲线参数和各向异性系数,然后将各向异性系数代入联合模型中反求出模型中的Y-U模型参数.联合模型参数反求流程如图2所示.

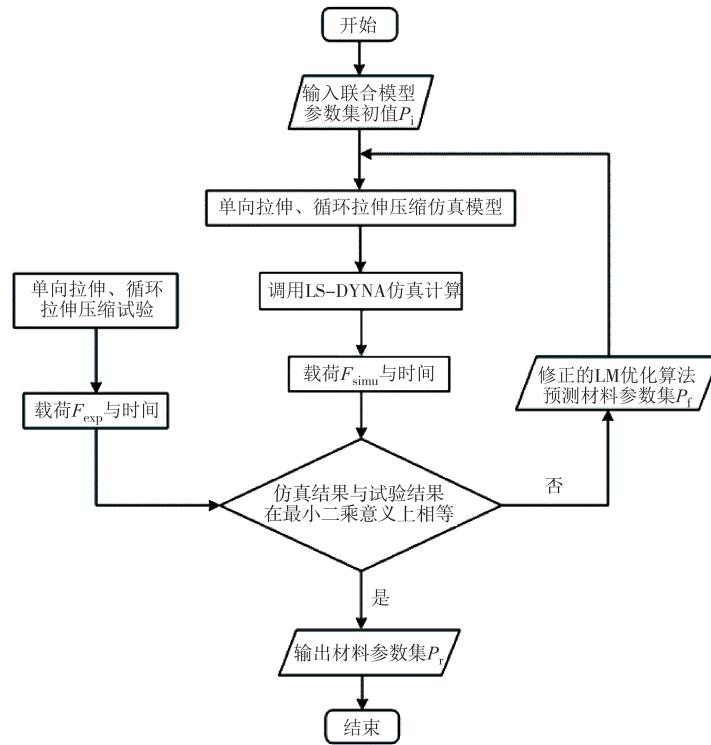


图2 联合模型参数反求流程

Fig.2 Joint model parameter inverse process

## 2 试验设计

### 2.1 单向拉伸试验

试验所用试件材料为高强钢 DP780, 采用非标准试件, 件厚 1.4 mm, 图3为试件的尺寸图, 试验时试件的夹持位置为图3中阴影部分.

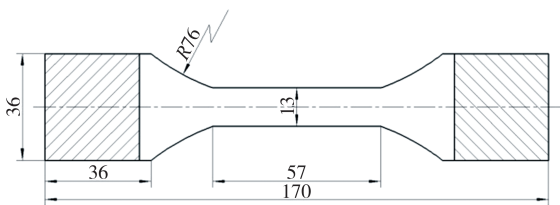


图3 单向拉伸试验试件尺寸(单位:mm)

Fig.3 Uniaxial tensile test specimen size(unit:mm)

分别取轧制方向为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 的三组试件进行单向拉伸试验, 同时也为反求其各向异性系数提供试验数据. 通过试验得到该材料不同轧制方向试件的工程应力应变曲线如图4所示, 从图4中可以看出高强钢 DP780 材料有着明显的屈服阶段, 三个方向力学性能不同, 体现出明显的各向异性, 因此其本构模型参数必须包含其各向异性系数.

分析处理数据, 得出 DP780 材料的基本参数如表1所示.

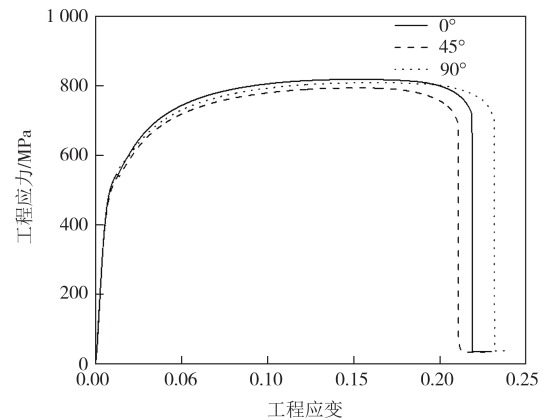


图4 不同轧制方向的板料力学性能曲线

Fig.4 Mechanical property curves of sheet metal in different rolling directions

表1 DP780材料基本参数

Tab.1 Basic parameters of DP780 material

材料参数	试验值
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	7 830
泊松比	0.28
弹性模量/GPa	195
屈服强度/MPa	541
抗拉强度/MPa	818

### 2.2 拉伸压缩试验

金属薄板在压缩状态下会发生屈曲失稳, 为了保证试验的顺利进行, 试验时采用专门设计的夹具

避免试件发生弯曲变形<sup>[14]</sup>,试验仪器及所采用的夹具如图5所示.同时为了最大限度地降低试验过程中夹具与试件间的摩擦因素对试验的影响,在夹具内部边角内置与试件厚度相同的垫片,并在进行试验前在试件外表包一层聚乙烯薄膜并加涂润滑脂.



图5 拉伸压缩试验仪器和夹具  
Fig.5 Tensile compression test instruments and fixtures

为了避免试件延伸部过长导致其在压缩过程中失稳,设计的非标准试件如图6所示,试件的尺寸参数变化对最终反求结果的影响基本可以忽略,但是应根据实际采用的夹具尺寸确定试件尺寸.试验设定拉压速率为2 mm/min,以试件初始状态为起点,试验过程中先将试件拉伸+2 mm,然后反向压缩到-2 mm,最后拉伸至+2 mm,至此完成一个拉伸压缩过程.

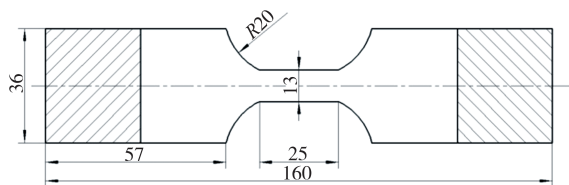


图6 拉伸压缩试验试件尺寸(单位:mm)  
Fig.6 Tensile compression test specimen size(unit:mm)

由于采用疲劳试验机进行试验,试验进行时所测量出的载荷值会伴随高频噪声和大幅震荡波,为降低这些误差所带来的影响,必须对试验所测得的数据进行滤波处理,得到材料拉伸压缩时载荷-位移曲线如图7所示.图7中展示了该材料正、反向加载时的硬化曲线,可以看出在正、反向加载过程中塑性应变不同,正向和反向屈服时的斜率不同反映出其

变弹性模量特性.

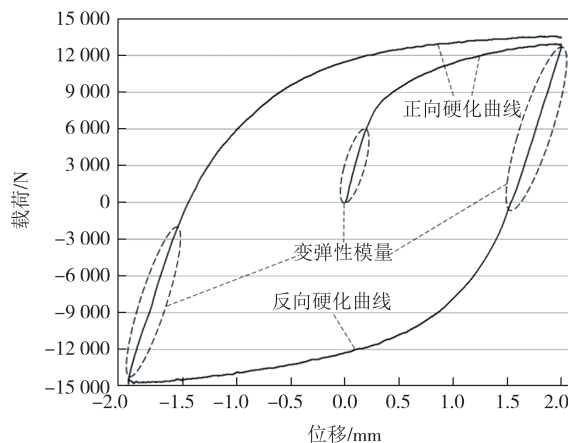


图7 拉伸压缩载荷-位移曲线  
Fig.7 Tensile compression load-displacement curve

### 3 联合模型参数反求

#### 3.1 参数反求准备

##### 3.1.1 Y-U模型在LS-DYNA中的应用

Y-U模型在LS-DYNA R13软件中通过 $C_B$ 、 $Y$ 、 $S_C$ 、 $K$ 、 $R_{sat}$ 、 $S_B$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_{OE}$ 等参数设置来体现.其中 $C_B$ 对应为边界面的初始应力 $B$ ,初始屈服应力 $Y$ 为弹性极限, $S_C$ 为控制运动硬化速率的材料参数, $K$ 对应为各向同性硬化速率参数 $m$ , $S_B$ 对应为材料参数 $b$ , $C_{OE}$ 对应为弹性模量缩减系数 $\xi$ .因此确定要反求的参数为 $C_B$ 、 $Y$ 、 $S_C$ 、 $K$ 、 $R_{sat}$ 、 $S_B$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_{OE}$ 等9个参数.

##### 3.1.2 仿真计算模型

在进行仿真计算时采用试件的1/4模型,同时删去试件与夹头重叠部分,如图8所示,这样可以极大地节约计算成本,缩短仿真和反求时间.相应地在接下来进行仿真时所设置的试验相关参数及反求所用的试验数据均应进行减半处理.

#### 3.2 反求过程

参数反求分两步进行:第一步采用36号BARLAT89材料模型进行仿真计算,基于三组轧制方向分别为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 试件的拉伸试验数据反求出硬化参数和各向异性系数 $R_0$ 、 $R_{45}$ 和 $R_{90}$ .第二步采用226号联合模型,使用上一步中反求出的各向异性系数,结合单向拉伸试验和拉伸压缩试验数据反求出联合模型中的9个Y-U模型参数.

提取三个不同轧制方向的单向拉伸试验数据各25组和拉伸压缩试验数据300组,取其中的载荷-时

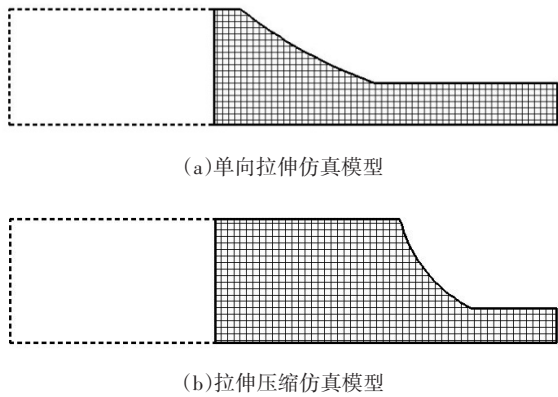


图8 板料仿真计算模型

Fig.8 Sheet metal simulation calculation model

间数据作为反求试验数据.反求的参数初值、搜索范围、迭代次数和收敛值如表2所示.

表2 联合模型参数初值、搜索范围、收敛值及迭代次数  
Tab.2 Joint model parameter initial value, search range, convergence value and number of iterations

参数	初值	搜索范围	迭代次数	收敛值
$R_0$	1.00	[0.8, 1.2]		0.939
$R_{45}$	1.00	[0.8, 1.2]	13	1.011
$R_{90}$	1.00	[0.8, 1.2]		0.903
$C_B/\text{MPa}$	450.00	[350, 600]		486.600
$Y/\text{MPa}$	500.00	[400, 600]		464.000
$S_c$	200.00	[100, 400]		225.000
$K$	30.00	[10, 50]		27.890
$R_{sat}/\text{MPa}$	40.00	[20, 60]	9	38.180
$S_B/\text{MPa}$	400.00	[300, 500]		382.420
$C_1$	0.01	[0, 0.1]		0.016
$C_2$	0.30	[0.1, 0.5]		0.440
$C_{OE}$	40.00	[10, 60]		11.970

最终收敛时两次反求所使用的改进LM算法的平均相关系数为0.951 4,证明反求算法的收敛较为理想,反求得各参数的收敛值即为联合模型各参数值.

### 3.3 模型参数分析验证

反求出的 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 三个轧制方向试件的Barlat89材料模型参数,其相应的仿真计算结果与试验数据对比如图9所示.

将最终反求得到的联合模型参数,分别代入单向拉伸和拉伸压缩仿真模型中,进行求解后输出载荷-时间曲线并与实际试验获取的数据曲线进行对比,如图10所示.

通过结果对比分析可以得出,反求出的联合模型参数能够同时描述DP780材料单向拉伸和拉伸压

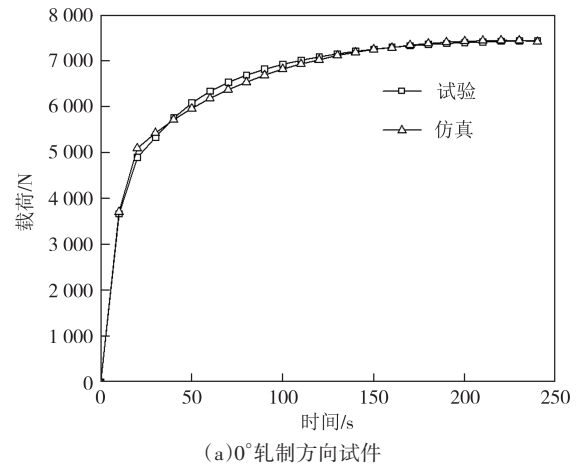
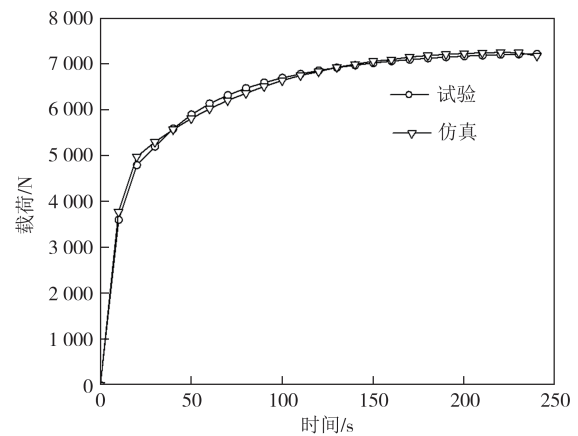
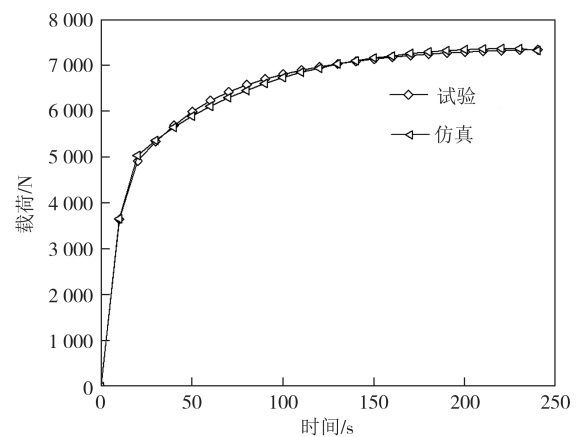
(a) $0^\circ$ 轧制方向试件(b) $45^\circ$ 轧制方向试件(c) $90^\circ$ 轧制方向试件

图9 Barlat89模型参数仿真计算结果与试验结果对比

Fig.9 Comparison between simulation results and experimental results of Barlat89 model parameters

缩的力学性能线,即较全面地体现了该材料正、反向加载时所表现的特性.虽然仿真和试验的载荷-时间曲线未完全重合,但误差波动幅度在 $\pm 6\%$ 之间,平均相对误差为4.65%,考虑到模型简化、仿真求解计算及试验操作过程等可能导致误差产生的因素,该误差在可接受的范围之内,证明上述联合模型材料参数获取方法能够应用到实际工程当中.

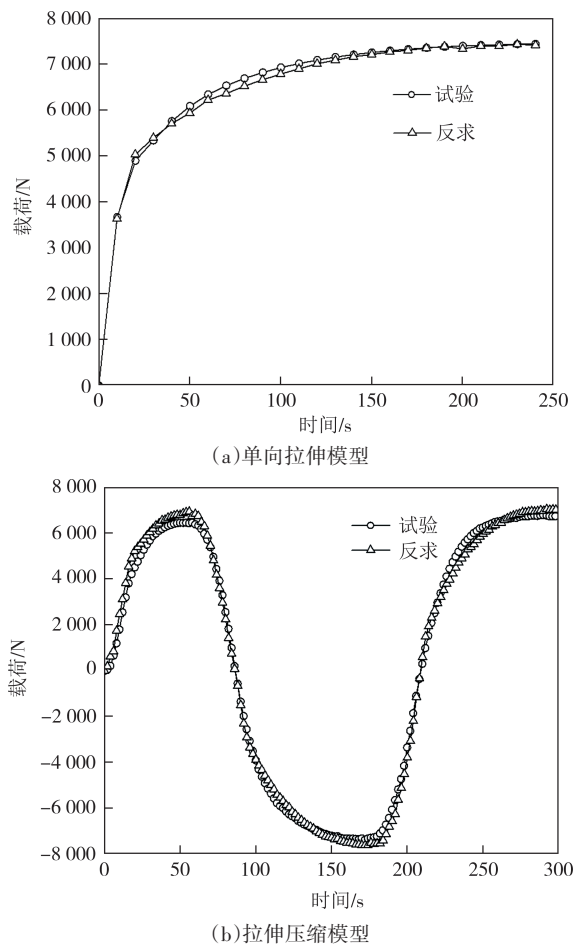


图10 联合模型参数仿真计算结果与试验结果对比

Fig.10 Comparison between simulation results and experimental results of joint model parameters

## 4 结论

本文提出了一种将仿真模型与材料试验结合,并采用修正的LM算法优化材料模型参数来反求Barlat89和Y-U联合模型材料参数的方法,得出以下结论:

1)通过三个轧制方向的单向拉伸试验和一个方向的拉伸压缩试验,能够描述材料的各向异性、正反向加载硬化曲线以及变弹性模量等,Barlat89和Y-U联合模型材料参数能够描述上述材料力学性能。

2)采用修正的LM算法,分两步反求出了高强钢材料DP780的联合模型参数,通过将反求的材料模型参数的仿真计算结果与实际试验数据进行对比分析证明了反求参数能够较准确地描述材料力学性能。

3)该方法获取的材料模型参数相比于直接通过

理论计算获得的参数,对材料力学性能的描述更加准确,采用这套方法获取的高强钢材料模型参数可以提高回弹仿真精度。

## 参考文献

- [1] 徐正兴.汽车覆盖件回弹评测与材料参数反求研究[D].厦门:华侨大学,2012:19-32.  
XU Z X. Research on springback evaluation for automotive panels and inverse determination of material parameters [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2012: 19-32. (in Chinese)
- [2] 王海波,陈正阳,阎昱.屈服准则对DP600钢板各向异性行为的预测能力[J].塑性工程学报,2015,22(2):45-50.  
WANG H B, CHEN Z Y, YAN Y. Capabilities of yield criteria on predicting the anisotropic behaviors of DP600 steel sheet [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (2) : 45-50. (in Chinese)
- [3] YOSHIDA F, UEMORI T. A model of large-strain cyclic plasticity and its application to springback simulation [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45 (10) : 1687-1702.
- [4] 桂婉婷,孙玲,张民权,等.不同材料模型和测量方法对冲压回弹预测精度的影响[J].塑性工程学报,2021,28(3):34-40.  
GUI W T, SUN L, ZHANG M Q, et al. Influence of different material models and measurement methods on stamping spring back prediction accuracy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(3): 34-40. (in Chinese)
- [5] 牛超,陈新平,陈军.不同材料强化模型对QP钢回弹预测精度的理论及应用研究[J].塑性工程学报,2019,26(1):221-226.  
NIU C, CHEN X P, CHEN J. Theory and application study on spring back prediction accuracy for QP steel with different material hardening models [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(1): 221-226. (in Chinese)
- [6] SLOTA J, JURCISIN M, SPIŠÁK E, et al. An investigation of springback in sheet metal forming of high strength steels [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 693: 370-375.
- [7] 刘贞伟,郭运.基于Yoshida-Uemori材料模型的整形工艺超高强钢地板纵梁的回弹分析[J].锻压技术,2018,43(10):62-67.  
LIU Z W, GUO Y. Springback analysis on sizing process of longitudinal floor beam for super high strength steel based on Yoshida-Uemori material model [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(10): 62-67. (in Chinese)
- [8] 张璐,陈劫实,陈军.基于Yoshida-Uemori硬化模型的高强钢

- 冲压件回弹预测研究[J]. 模具技术, 2012(3): 11-14.
- ZHANG L, CHEN J S, CHEN J. Springback prediction of advanced high strength steel part based on Yoshida-Uemori hardening model[J]. Die and Mould Technology, 2012(3): 11-14. (in Chinese)
- [9] 晏佳伟, 胡启, 王振振, 等. 不同硬化模型对第3代超高强度钢板冲压回弹预测的比较[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(11): 1334-1339.
- YAN J W, HU Q, WANG Z Z, et al. A comparison study of different hardening models in springback prediction for stamping of the third generation ultra high strength steel [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(11): 1334-1339. (in Chinese)
- [10] 刘华, 江开勇, 林俊义. 基于遗传算法和仿真的冲压材料参数反求[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(5): 485-488.
- LIU H, JIANG K Y, LIN J Y. Inverse identification of material parameters in stamping based on numerical simulation and genetic algorithm [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2013, 34(5): 485-488. (in Chinese)
- [11] 徐杰, 王田, 张荣. 基于模拟退火算法的高强钢 Yoshida-Uemori 材料模型参数反演分析[J]. 锻压技术, 2016, 41(6): 133-137.
- XU J, WANG T, ZHANG R. Parameter inversion on Yoshida-Uemori material model of high strength steel based on simulated annealing algorithm [J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(6): 133-137. (in Chinese)
- [12] SHROT A. Determination of Johnson-cook parameters from machining simulations [J]. Computational Materials Science, 2012, 52(1): 298-304.
- [13] TOROS S. Parameters determination of yoshida uemori model through optimization process of cyclic tension-compression test and V-bending springback [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2016, 13(10): 1893-1911.
- [14] 刘迪辉, 庄京彪, 李光耀. 金属薄板包辛格效应的试验研究 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(4): 542-546.
- LIU D H, ZHUANG J B, LI G Y. Research on baushinger effect of sheet metal by experiments [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(4): 542-546. (in Chinese)