

# 激光焊接接头剪切 GTN 模型损伤参数识别

陈 兵, 张杨坤, 王 洋, 刘晟哲, 韩焱阳

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 利用试验与仿真结果结合神经网络和遗传算法的方法, 对 DP980 激光焊接接头的力学性能不均匀特性进行了研究, 得到了剪切修正 Gurson-Tvergaard-Needleman 模型优化焊接接头的损伤参数, 将优化结果代入有限元模型和试验结果进行对比以验证拟合参数的准确性, 并通过孔洞体积分数变化分析杯突试样横向裂纹扩展的原因。通过以上方法获得了准确的焊接接头力学性能, 可应对复杂应力状态下的焊接接头断裂损伤的分析预测。

**关键词:** 材料加工; 激光焊接; 损伤模型; 参数识别; 杯突试验

**中图分类号:** TG407 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)12-3468-10

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230157

## Damage parameter identification of laser welded joint shear Gurson-Tvergaard-Needleman model

CHEN Bing, ZHANG Yang-kun, WANG Yang, LIU Sheng-zhe, HAN Jin-yang

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Experimental and simulation results were combined with neural network and genetic algorithm methods to study the non-uniform mechanical properties of DP980 laser welded joints. The shear correction Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) model was obtained to optimize the damage parameters of the welded joints. The optimization results were substituted into the finite element model and compared with the experimental results to verify the accuracy of the fitting parameters, and analyze the cause of transverse crack propagation in cup-shaped specimens through changes in pore volume fraction. Accurate mechanical properties of welded joints were obtained through the above methods to analyze and predict fracture damage of welded joints under complex stress states.

**Key words:** material processing; laser welding; damage model; parameter identification; cupping test

## 0 引 言

进入 21 世纪以来, 随着节能减排及绿色制造等政策的逐步深入, 轻量化已成为制造行业共识, 以车辆行业为例, 车身结构件大量使用轻质高强

板材, 以减轻车重, 降低油耗, 减少排放<sup>[1,2]</sup>。国内外冶金生产企业为了满足增加轻质高强板材生产的市场需求, 通过激光焊接工艺实现相邻两卷带钢头尾连接以提高生产效率。但在实际生产中, 因相邻卷高强板材焊接接头质量不佳, 在轧制工

**收稿日期:** 2023-02-21.

**基金项目:** 国家重点研发项目基金项目 (2023YFB4706905).

**作者简介:** 陈兵 (1976-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 现代激光加工技术, 多物理场仿真.

E-mail: bingchen9803@ustb.edu.cn

序中断带故障频发,严重影响生产节奏和企业经济效益。而高强板材焊接接头不均匀的力学性能是在轧制工序中发生断裂的直接诱因。因此,对焊接接头的力学性能开展机理研究具有重要的工程意义。

目前,GTN 模型(Gurson-Tvergaard-Needleman model)被广泛应用于金属材料尤其是钢制结构断裂失效分析中<sup>[3,4]</sup>。GTN 模型预测的准确性主要取决于相关计算参数的精度,这些参数可通过大量计算获得,且需要由试验手段校核确认<sup>[5]</sup>。肖晋等<sup>[6]</sup>在试验载荷-位移曲线测试基础上,以 6016 铝合金材料为例,算得其 GTN 模型参数。Oh 等<sup>[7]</sup>采用 GTN 模型对 STPT410 碳素钢管在纯弯曲条件下的韧性断裂进行了模拟,其根据断裂韧性数据确定了 GTN 模型中的参数,并对参数精度影响因素进行了探讨。刘文权等<sup>[8]</sup>采用 GTN 孔洞损伤模型修正经典 M-K 成形极限预测理论,在计算模型中耦合了材料损伤演化影响因素,由修正的 M-K 模型对 22MnB5 的成形极限进行了理论预测。刘妹妹等<sup>[9]</sup>引入临界等效塑性应变作为单元失效判据,建立起韧性材料在低应力三轴度下的细观损伤判据,完善了韧性材料细观损伤行为研究体系。

综上所述,虽然众多学者在激光焊接领域所取得的研究成果显著,但对焊接接头部位材料损伤的力学性能和数值模型上的研究偏少,难以准确预测焊接接头部位材料断裂损伤。为此,本文以高强板带钢 DP980 为激光焊接材料,采用试验研究与仿真模拟相结合的方式,建立了焊接接头损伤力学模型,并且通过杯突试验和仿真结果对比分析,验证了本文方法的有效性,可以进一步预测焊接接头损伤断裂规律,具有较为显著的工程价值。

## 1 焊接接头局部力学性能模型建立

### 1.1 母材和纵向接头拉伸试验

本文研究对象是在乘用车车身结构件市场占有率最大的高强钢 DP980,其材料组分如表 1 所示。

对 DP980 带钢进行激光焊接的设备为某钢厂使用的大功率 CO<sub>2</sub> 激光焊机,正常工作工况下激光最大输出功率为 12.0 kW。其焊接速度最高可达 10 m/min,允许焊接的带钢厚度范围为 1.6~6.0 mm,焊接带钢间隙为 0.0~1.0 mm。

表 1 高强板带钢 DP980 材料组分表

Table 1 Chemical composition of DP980 high-strength steel

材料组分	质量分数/%	材料组分	质量分数/%
C	0.095	CR	0.500
Si	0.350	Mo	0.200
Mn	2.300	Ti	0.040
P	0.015	Fe	余量
S	0.004		

使用焊丝牌号为 MG-51T。本次焊接采用 0 间隙进行激光拼焊,将两块带钢对接在一起,激光焊机发射头垂直工件表面进行焊接作业,试验使用的焊接工艺参数为:焊接功率 12 kW,焊接速度 2.0 m/min,离焦量-2 mm,退火电流 80 A。

为获得焊接接头的局部力学性能参数,在 DP980 薄板激光焊接处进行切割,在同一块焊接薄板上进行拉伸试件取样,分别得到母材及纵向焊接接头部位拉伸试样,试样厚度为 3.2 mm。

DP980 是一种具有较高强度的双相钢,当材料没有达到屈服强度  $\sigma_s$  时,服从弹性胡克定律,当材料处于屈服强度  $\sigma_s$  和塑性小变形  $\sigma_b$  范围内,材料的真实应力  $\sigma$  与应变  $\epsilon$  的规律满足 Hollomon 强化模型<sup>[10]</sup>,即:

$$\begin{cases} \sigma = E\epsilon, & \sigma \leq \sigma_s \\ \sigma = K\epsilon^n, & \sigma_s < \sigma < \sigma_b \end{cases} \quad (1)$$

根据母材和纵向接头的拉伸测试结果,得到如图 1 所示的工程应力-应变曲线。当应力在屈服阶段前,采用最小二乘法拟合出材料的弹性模量  $E$ ,材料屈服阶段后拟合出 Hollomon 强化模型中的强度系数  $K$  和硬化指数  $n$ 。通过母材应力应变曲线拟合得到弹性模量  $E$  为 187.282 GPa,强度系数  $K$  为 1 161,硬化指数  $n$  为 0.117。

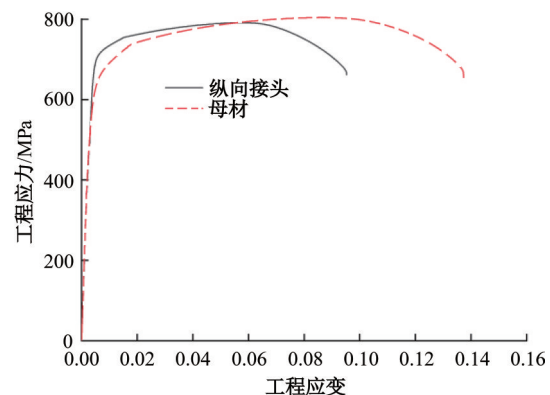


图 1 纵向接头和母材的应力应变曲线对比

Fig. 1 Comparison of stress-strain curves between longitudinal joint and base metal

### 1.2 焊缝和热影响区力学性能参数求解

本节综合了混合法则与维氏硬度测试的优点,拟合计算出焊缝和热影响区Hollomon强化模型系数。“混合法则”方法是假定焊接纵向接头的母材区、焊缝区、热影响区在拉伸过程中应变均保持统一变化,最终通过拉伸结果对焊缝的平均力学性能进行计算<sup>[11]</sup>,本节对平行于母材的拉伸试样,将其横截面分为三部分:母材、热影响区和焊缝,其面积为三部分之和,且内力之和与施加的外载荷  $F$  相等,如图2所示,各部分的几何及力学关系如式(2)(3)所示。

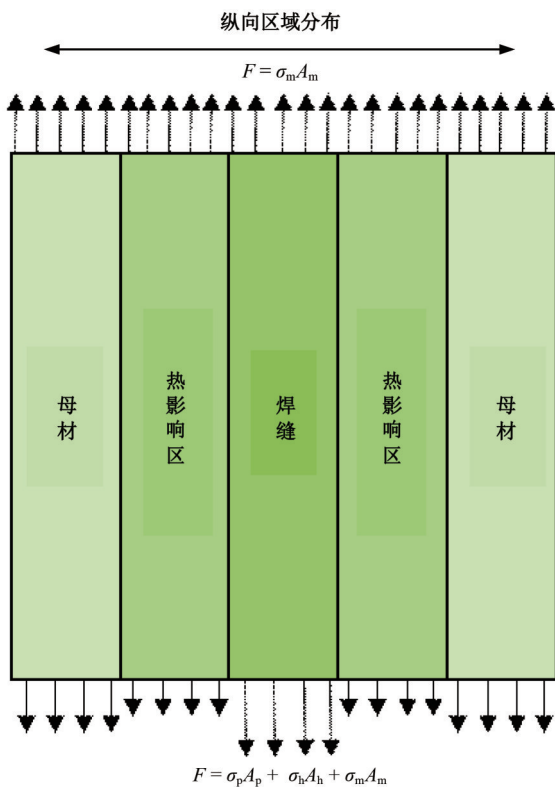


图2 混合法则示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mixing rule

$$A_m = A_p + A_h + A_w \quad (2)$$

$$F = \sigma_m A_m = \sigma_p A_p + \sigma_h A_h + \sigma_w A_w \quad (3)$$

式中:  $A_m$ 、 $A_p$ 、 $A_h$ 、 $A_w$  分别为整个试样的横截面积和母材、热影响区、焊缝的面积;  $\sigma_m$ 、 $\sigma_p$ 、 $\sigma_h$ 、 $\sigma_w$  分别为整个试样的应力和母材、热影响区、焊缝的应力。各区域的宽度可以通过维氏硬度梯度变化进行表征。维氏硬度和材料强度间存在着线性关系,可借助经验公式进行描述<sup>[12]</sup>:

$$\frac{\sigma_w - \sigma_p}{HV_w - HV_p} = \frac{\sigma_h - \sigma_p}{HV_h - HV_p} \quad (4)$$

式中:  $HV_p$ 、 $HV_h$ 、 $HV_w$  分别为母材、热影响区和焊缝的维氏硬度。联立式(2)~(4)可以得到焊缝处应力及热影响区的应力分布计算公式:

$$\sigma_w = \frac{A_m(HV_w - HV_p)(\sigma_m - \sigma_p)}{A_w(HV_w - HV_p) + A_h(HV_h - HV_p)} + \sigma_p \quad (5)$$

$$\sigma_h = \sigma_p + \frac{HV_h - HV_p}{HV_w - HV_p}(\sigma_w - \sigma_p) \quad (6)$$

### 1.3 维氏硬度测量

焊缝和热影响区的硬度可以通过显微维氏硬度试验进行测量。使用维氏硬度仪沿焊缝中心两侧进行硬度测试,熔池的顶部、底部以及中性层维氏硬度分布曲线如图3所示。

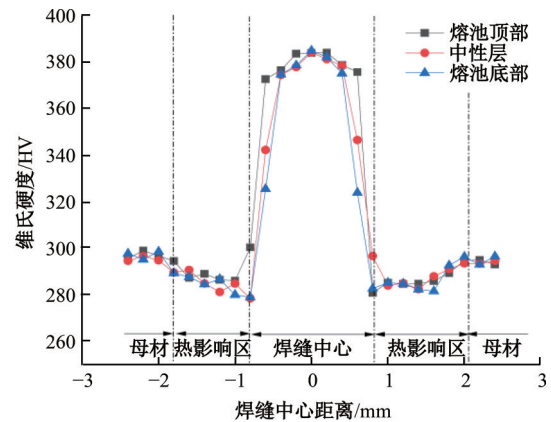


图3 显微硬度分布曲线图

Fig. 3 Distribution curve of microhardness

由图3维氏硬度的梯度分布规律可知,焊缝中心区域宽度为1.6 mm,一侧热影响区的宽度为1.0 mm,继而算出混合法则所需焊接接头不同区域面积值。焊缝平均硬度为370.71 HV,热影响区平均硬度为286.18 HV,母材平均硬度为295.39 HV。将焊接接头不同区域面积和硬度值代入式(5)和(6),得到不同区域拟合应力应变曲线结果对比,如图4所示。

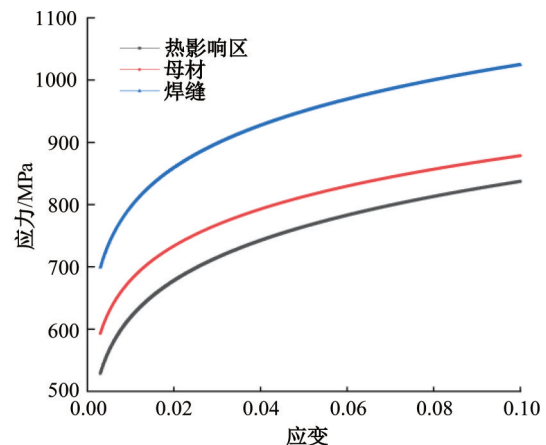


图4 焊接接头不同区域拟合结果对比

Fig. 4 Comparison of fitting results in different regions of welded joints

由图 4 可以看出,焊缝部位的应力整体高于热影响区和母材区应力,热影响区应力值最低,这与使用显微维氏硬度值表征并分析热影响区存在软化区的结论是一致的,通过塑性小变形阶段拟合的 Hollomon 模型外延获得材料的无损伤塑性强化曲线,由此通过“混合法则”得到了焊接接头各个区域无损条件下的弹塑性参数,为后续计算仿真工作奠定了材料参数基础。

#### 1.4 弹塑性参数有限元验证

为了验证 1.3 节得到的焊接接头各个区域弹塑性参数,在 ABAQUS 中建立焊缝区域纵向接头试样 1:1 模型,并对拉伸模型按照维氏硬度测定的焊接接头各个区域大小进行区域划分,赋予不同的材料属性,对焊缝和热影响区的计算网格进行加密。

本文所建试样模型如图 5 所示。

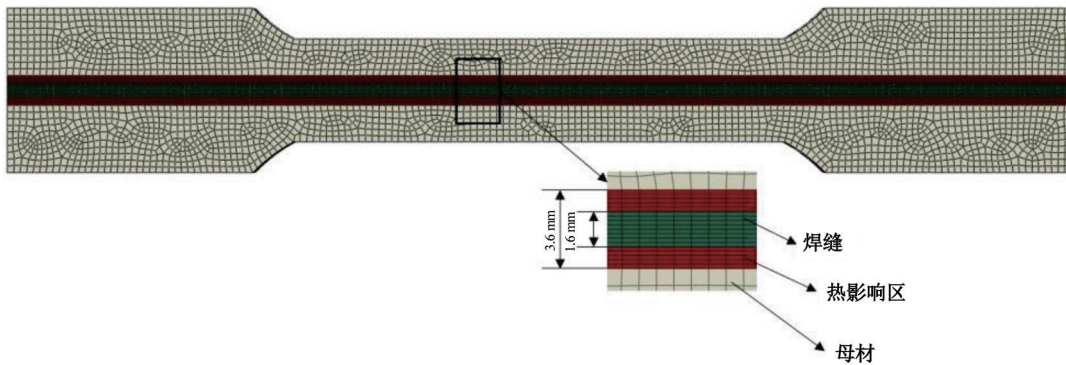


图 5 焊接接头网格划分图

Fig. 5 Grid division diagram of welding joint

模型两端施加刚体约束,一端固定,另一端施加位移。从后处理提取载荷位移曲线,和纵向接头拉伸试验结果进行对比,如图 6 所示。

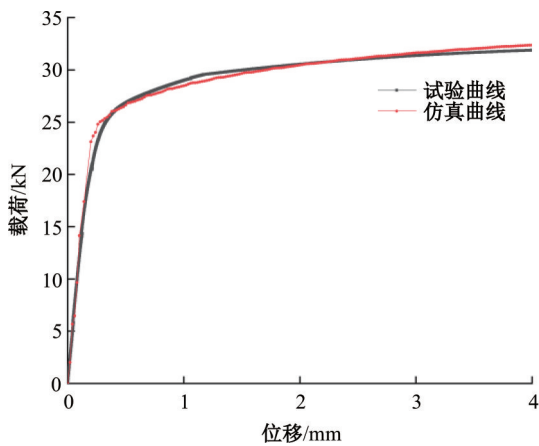


图 6 纵向接头仿真和试验载荷位移曲线对比图

Fig. 6 Comparison diagram of load displacement curve of simulation and test of optimal parameters of longitudinal joints

从图 6 可知,材料在弹性变形阶段拟合良好,试验曲线与仿真曲线基本吻合,但进入屈服阶段后,仿真曲线与试验曲线存在细微偏差(最大相对误差为 3.16%),充分证明拟合的焊接接头力学性能参数较为准确。随着等效塑性应变的不断增大,材料的损伤增大,当材料进入塑性大变形区时,仿真曲线逐渐高于试验曲线。

## 2 剪切修正的 GTN 损伤模型参数确定

金属材料发生韧性断裂时,微观断裂力学理论认为是材料所含夹杂物或第二相粒子诱发了空穴形核,形成微孔洞效应,随着微孔洞不断长大、聚合直至产生宏观裂纹,裂纹扩展最终导致材料失效<sup>[13]</sup>。近年来,较多学者从微孔洞理论出发研究材料损伤变形规律,研究成果较多,GTN 模型就是在业界受到较多关注的成果之一,此模型采用孔洞体积分数这一损伤变量来描述韧性材料的破坏过程,其塑性势函数表达式为:

$$\Phi(\sigma_{eq}, \sigma_m, \bar{\epsilon}_p, f) = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\bar{\sigma}}\right)^2 + 2f^*(f)q_1 \cosh\left(-\frac{3q_2\sigma_m}{2\bar{\sigma}}\right) - 1 - q_3 f^{*2}(f) = 0 \quad (7)$$

式中: $\bar{\epsilon}_p, f$ 为 GTN 模型中的两个内变量; $\bar{\epsilon}_p$ 为微观层次的等效塑性应变,即材料无损伤等效塑性应变; $\bar{\sigma}$ 为微观层次等效应力,即材料无损伤应力。 $\sigma_{eq}$ 为等效应力; $\sigma_m$ 为静水应力; $f$ 为孔洞体积分数; $q_1, q_2, q_3$ 为材料本构模型修正系数; $f^*$ 为孔隙率,是关于孔洞体积分数  $f$  的函数。

$$f^*(f) = \begin{cases} f, f \leq f_c \\ f_c + \frac{1/q_1 - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c), f_c < f < f_F \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $f_c$  为聚合积分数;  $f_F$  为断裂时的孔洞体积分数。

对于孔洞体积分数的演化规律, 可细分为两种: 孔洞生长和新孔洞形核。即孔洞体积分数的增量为:

$$df = df_{\text{growth}} + df_{\text{nucleation}} \quad (9)$$

式中:  $df_{\text{growth}}$  为孔洞生长部分增量;  $df_{\text{nucleation}}$  为孔洞形核部分增量。

考虑到孔洞剪切变形对材料损伤的影响, Nahshon 等<sup>[14]</sup>将孔洞在剪切变形条件下产生的形状畸变等效成孔洞体积增加, 即在损伤演化过程中, 孔洞演化增加孔洞畸变这一项, 故剪切修正 GTN 模型中孔洞损伤演化规律为:

$$df = df_{\text{growth}} + df_{\text{nucleation}} + df_{\text{shear}} \quad (10)$$

$$df_{\text{shear}} = k_w f^*(f) \omega(\sigma_{ij}) \frac{s_{ij} d\epsilon_p}{\sigma_{\text{eq}}} \quad (11)$$

$$\omega(\sigma_{ij}) = 1 - \left( \frac{27J_3}{2\sigma_{\text{eq}}^3} \right)^2 \quad (12)$$

式中:  $df_{\text{shear}}$  为剪切变形带来的孔洞畸变部分增量;  $k_w$  为材料的剪切损伤参数, 与材料属性相关。  $s_{ij}$  为应力偏张量;  $J_3$  为应力偏张量的第三不变量。  $\omega(\sigma_{ij})$  反映了当前应力状态, 取值为 0~1, 当  $\omega=0$  时, 表示材料处于纯拉伸或纯压缩状态; 当  $\omega=1$  时, 表示材料处于纯剪切状态。

在 GTN 模型中增加剪切修正项后扩大了 GTN 模型的适用范围, 传统的 GTN 模型在低应力三轴度的情况下, 孔洞生长增加的体积分数很少, 但仍会出现材料失效, 预测效果并不理想<sup>[15,16]</sup>。因此, 本文采用 ABAQUS 提供的二次开发接口 VUMAT 编写剪切修正 GTN 模型子程序, 对焊接接头损伤断裂问题进行研究。

### 2.1 母材损伤参数确定

母材损伤参数的确定, 需要用大量的有限元仿真来找出不同的参数变化对载荷位移曲线的影响规律, 从而确定其大致的取值范围。

剪切修正的 GTN 模型参数大致分两类: ① 材料无损伤弹塑性参数类, 包括弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$ 、强度系数  $K$ 、硬化指数  $n$ , 这类参数可通过材料力学试验获得; ② 损伤参数类, 包括材料本构修正系数  $q_1, q_2, q_3$ ; 损伤演化参数: 初始孔洞体积

分数  $f_0$ 、形核参数  $f_N$ 、剪切参数  $k_w$ ; 临界和断裂参数:  $f_c, f_F$ 。

对于材料本构修正系数可以取 Tvergaard<sup>[17]</sup> 建议值:  $q_1 = 1.5, q_2 = 1.0, q_3 = 2.25$ 。Springmann<sup>[18]</sup>指出形核方差  $S_N$  对载荷位移曲线影响不大, 对于金属材料可以取  $S_N = 0.1$ 。其中初始体积分数的取为 0。因此, 对于母材需要确定的参数为  $\epsilon_N, f_N, k_w, f_c, f_F$ , 其中,  $\epsilon_N$  为形核应变。

材料参数弹性模量  $E$ 、强度系数  $K$ 、硬化指数  $n$  等参数已由混合法则求得, 泊松比  $\mu$  设置为 0.3, 屈服应力、塑性应变等参数通过载荷位移参数计算得到。

为了能够精确找到一组最合适的损伤参数, 定义区别度函数  $\nabla f$  来衡量试验曲线和仿真曲线之间的距离。为量化描述仿真曲线和试验曲线的接近程度, 将位移分为一系列的点  $i = 1, 2, 3, \dots, j$ , 各点对应一个仿真实验计算得到的载荷力和试验载荷力区别度函数为:

$$\nabla f = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \sqrt{(F_i^{\text{exp}} - F_i^{\text{sim}})^2} \quad (13)$$

式中:  $F_i^{\text{exp}}$  为第  $i$  个点的试验载荷力;  $F_i^{\text{sim}}$  为第  $i$  个点的仿真载荷力;  $j$  为总选取的点数。

区别度值越小, 表示仿真曲线和试验曲线近似程度越高。区别度示意图如图 7 所示。

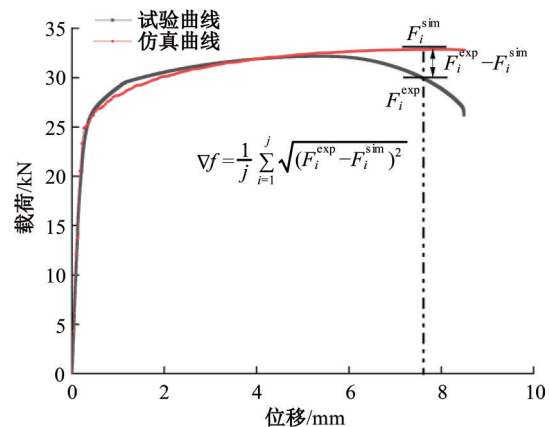


图 7 区别度示意图

Fig. 7 Schematic diagram of discrimination

采用大量的有限元仿真结果反演, 并对比仿真结果和试验结果, 计算区别度, 选取区别度最小的损伤参数; 损伤参数取值为  $\epsilon_N = 0.1, f_N = 0.085, f_c = 0.14, f_F = 0.19, k_w = 3$ ; 代入仿真模型与缺口试样的裂纹萌生的初始位置进行对比, 如图 8 所示。

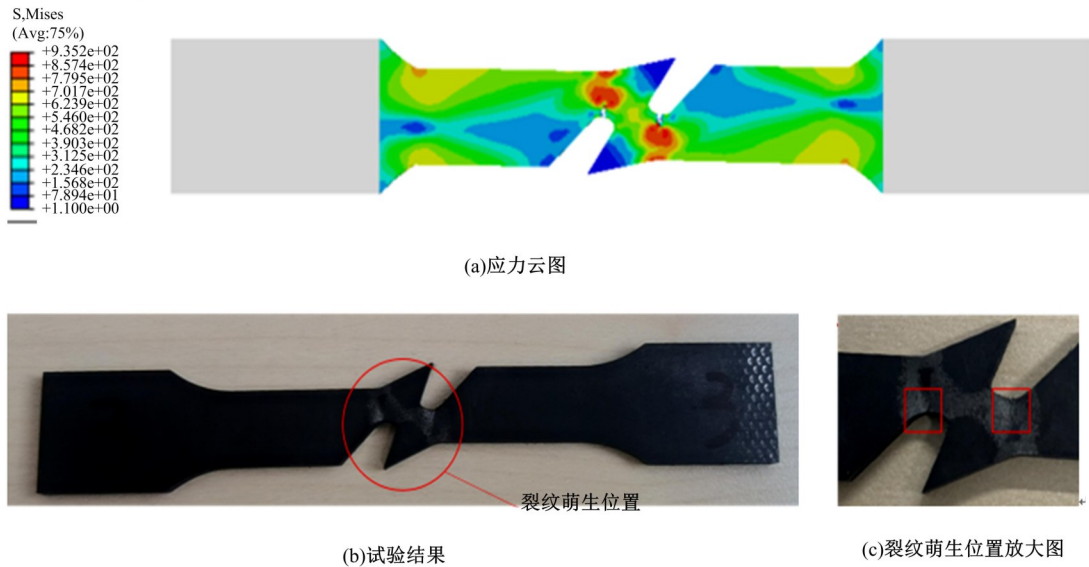


图 8 缺口试样拉伸和试验裂纹萌生

Fig. 8 Tensile testing and crack initiation in notched specimens

从图 8 可以发现,仿真模型缺口试样计算结果与实际拉伸试验缺口试样的裂纹萌生初始位置基本相同,充分证明了该模型能准确预测出母材的损伤断裂行为。

### 2.2 焊接接头剪切修正 GTN 模型参数识别

对于焊缝和热影响区的损伤参数识别,其识别参数多,如果采用同母材相同的方法,使用大量的有限元模拟来寻找最优参数,具有一定的盲目性。本文通过神经网络结合优化算法来训练出最适合的焊缝和热影响区的损伤参数。借助人工神经网络,训练模型来建立不同损伤参数和载荷位移曲线的力学响应关系。近年来,机器学习方法被广泛应用于数据挖掘中,通过大量的数据训练完成对系统自身的改善。通过对权重的不断优化,使得神经网络的输出不断逼近真实值<sup>[19]</sup>。

在本文所建立的神经网络模型中,有限元模型共有 325 组,其中 70% 作为训练集,用来训练神经网络模型;30% 作为测试集,用来检验神经网络的拟合效果。神经网络层数为 3 层,激活函数设为 Relu 函数。其中,神经网络的输入为焊缝和热影响区的损伤参数。焊缝的损伤参数为形核体积分数 $f_N^w$ 、形核平均应变 $\epsilon_N^w$ 、聚合体积分数 $f_c^w$ 、断裂体积分数 $f_F^w$ 、剪切损伤参数 $k_w^w$ 、热影响区的损伤参数为形核体积分数 $f_N^h$ 、形核平均应变 $\epsilon_N^h$ 、聚合体积分数 $f_c^h$ 、断裂体积分数 $f_F^h$ 、剪切损伤参数 $k_w^h$ ,共 10 个输入参数,输出为拉伸模型的仿真曲线和试验曲线的区别度值。中间层神经网络选为

12 个。其中,训练集和测试集上的神经网络输出区别度和真实区别度对比如图 9 所示。采用拟合

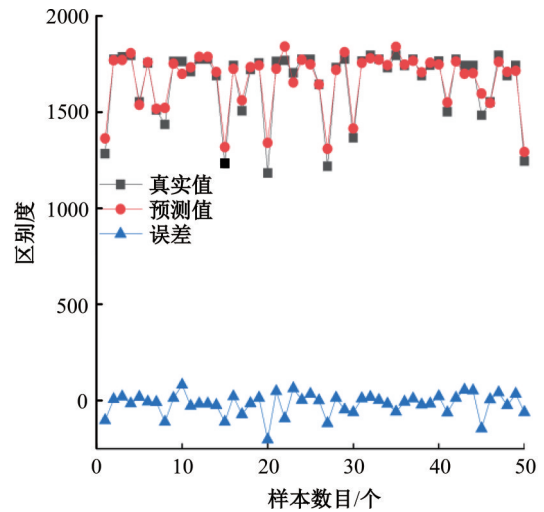


图 9 预测值和真实值误差对比

Fig. 9 Comparison of error between predicted value and real value

优度  $R^2$  衡量神经网络拟合的好坏, $R^2$  取值为 $[0, 1]$ ,越接近 1 说明拟合程度越好,其计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (14)$$

式中: $y_i$ 为真实值; $\bar{y}$ 为样本平均值; $\hat{y}_i$ 为预测值; $m$ 为样本总数。

从图 9 可以看出,预测值都较为接近真实值,误差曲线在 0 附近上下波动。

根据式(14)可以计算出训练集和测试集的

$R^2$  分别为 0.965 和 0.936。说明神经网络模拟拟合程度良好,对于已经训练好的神经网络模型,输入焊缝和热影响区的损伤参数,输出纵向接头模型和剪切模型的区别度平方和。当区别度越小时,说明仿真曲线和试验曲线越接近。为找到最合适的损伤参数使得仿真曲线和试验曲线最接近,采用遗传算法来优化神经网络模型。遗传算法是通过模拟自然界进化来寻找最优的算法,通过基因的交叉、选择、变异操作,根据适应度函数选择优良个体保存下来。不断重复此过程直到找出最优个体。采用遗传算法来优化神经网络模型的输入参数,使得输出的区别度最小。其中,遗传算法的优化变量为焊缝和热影响区的损伤参数,优化目标为区别度函数,具体为:

$$\begin{cases} \text{Find } X = \{x_1, x_2, \dots, x_8\}^T \\ \min \quad \nabla f(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(F_i^{\text{exp}} - F(X)_i^{\text{sim}})^2} \quad (15) \\ \text{s.t.} \quad x_j^L \leq x_j \leq x_j^U, j = 1, 2, \dots, 10 \end{cases}$$

优化变量  $x_1, x_2, \dots, x_8$  分别对应焊缝和热影响区的损伤参数为  $f_N^w, \epsilon_N^w, f_c^w, f_F^w, f_N^h, \epsilon_N^h, f_c^h, f_F^h$ 。

表 2 遗传算法优化结果

Table 2 Optimization results of genetic algorithm

结束	$f_N^w$	$\epsilon_N^w$	$f_c^w$	$f_F^w$	$k_w^w$	$f_N^h$	$\epsilon_N^h$	$f_c^h$	$f_F^h$	$k_w^h$
优化值	0.085 2	0.119 2	0.146 2	0.170 1	2.982 1	0.125 33	0.121 2	0.125 3	0.190 2	2.887 2
最终取值	0.085	0.119	0.146	0.170	2.982	0.125	0.121	0.125	0.190	2.887

将遗传算法优化的结果代入有限元模型中,纵向接头剪切试样的仿真和试验载荷位移曲线、应力云图和裂纹萌生对比如图 11 和图 12 所示。

从图 11、12 可以发现,试验和仿真的裂纹起裂位置和扩展方向基本相同,宏观断裂特征相近,仿真的载荷位移曲线略低于试验曲线,预测结果和试验曲线的这种误差是多方面因素造成的。比如,试样的加工精度不够、试验数据不准确、试样尺寸测量得不精确、建立的有限元模型不标准、网格大小的影响、数值算法不合理、确定的损伤参数不恰当等。这些诸多因素导致的误差无法完全消除,只能尽量去减少和控制,以便保证预测结果和试验曲线能够很好地吻合。

综上,采用嵌入修正的 GTN 细观损伤模型的 ABAQUS 有限元软件建模,得到的数值模拟断裂预测结果和试验曲线趋势基本一致,验证了该模型的有效性以及该方法的合理性。整体趋势吻合,最大相对误差为 8.2%。说明遗传算法优

$x_j^L, x_j^U$  分别代表优化参数  $x_j$  的下限与上限。

遗传算法初始种群数目设置为 100,最大迭代次数设置为 200,种群变异率设置为 0.2。遗传算法的进化图如图 10 所示。由图 10 可知,在进化初始阶段,种群最佳适应度快速下降,经过 70 代进化后最佳适应度基本保持不变,说明算法收敛。最终的优化结果如表 2 所示。

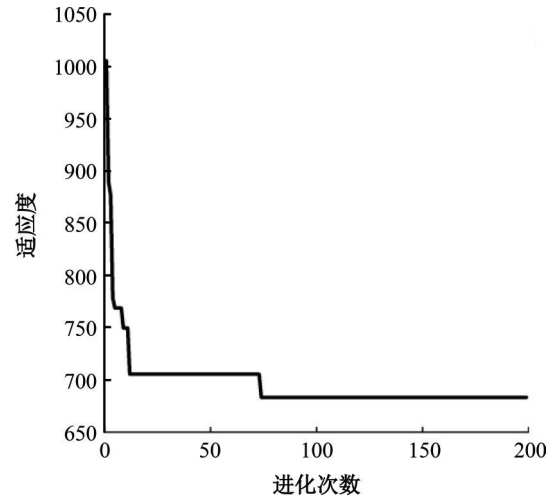


图 10 遗传算法进化图

Fig. 10 Evolution diagram of genetic algorithm

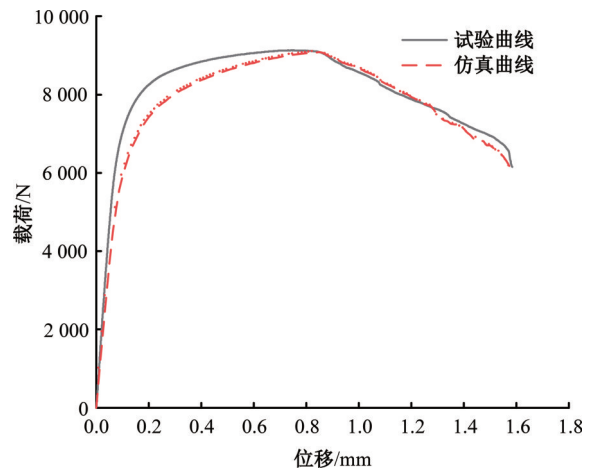


图 11 纵向接头剪切模型仿真和试验的载荷位移曲线对比

Fig. 11 Comparison of load displacement curves of longitudinal joint shear model simulation and test

化的剪切修正 GTN 参数可以准确预测出焊接接头缺口试样的断裂。

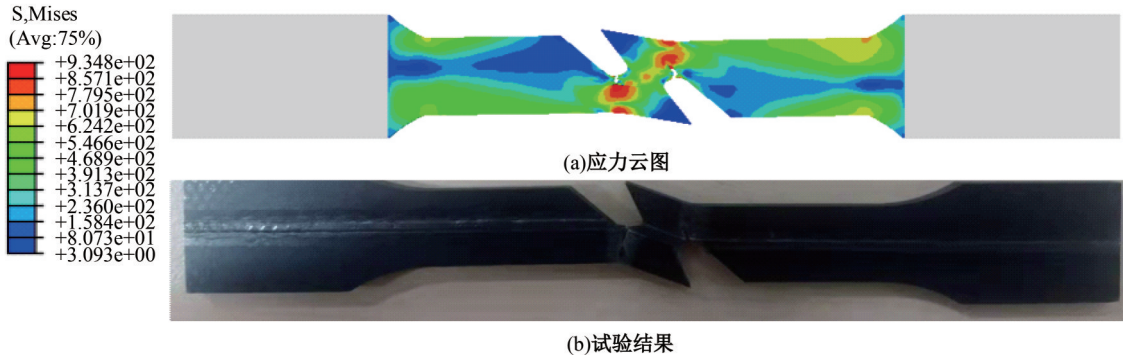


图 12 纵向接头缺口试样拉伸和试验裂纹对比

Fig. 12 Comparison of tensile and test cracks of longitudinal joint notch specimen

### 3 杯突试验验证

#### 3.1 杯突试验

为验证拟合参数的正确性并探寻焊缝区域易发生裂纹的位置和裂纹扩展方向的相关规律,开展焊缝杯突试验,并通过裂纹扩展方向判别焊缝质量优劣。试验设备为德国 Zwick 公司生产的 BUP600 杯突成形试验机。试样为 90 mm×90 mm 的 DP980 薄板焊缝材料,冲压速度为 0.3 mm/s,冲压头直径为 22 mm。试样及试验结果如图 13 所示。

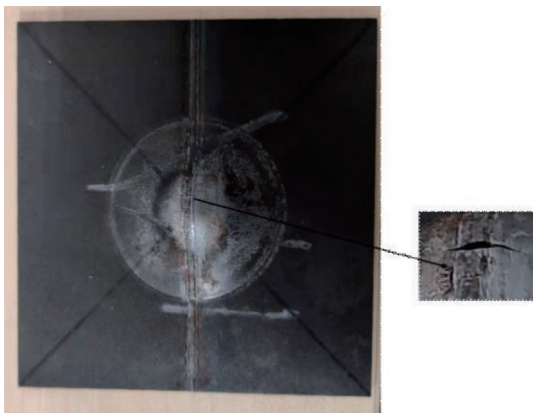


图 13 杯突试验结果及裂纹扩展方向

Fig. 13 Cupping test results and crack propagation direction

从图 13 可以看出,焊接接头在焊缝部位的裂纹开口度最大,裂纹方向垂直于焊缝,说明焊缝质量合格。分析其原因为:在合适的焊接工艺下,焊缝得到强化,此时焊接接头的杯突性能主要受高强度焊缝的影响,最终当应变超出焊缝的变形极限而未达到母材成形极限时,产生裂纹并垂直于焊缝向母材扩展;若焊接工艺参数选取不合理,会在焊缝区域形成低塑性、低韧性的不利组织,在外力作用下,裂纹易在材料组织层片间发生并迅速

扩展,使得焊缝在变形过程中且远低于其成形极限的情况下提前出现裂纹,导致杯突值较低,出现裂纹平行于焊缝扩展的现象<sup>[20]</sup>。

#### 3.2 杯突仿真及结果分析

建立如图 14 所示的焊缝材料杯突加载的三维仿真模型,将试样切分成不同的区域,每个区域分别赋予不同的材料属性,将获得的材料力学性能参数代入有限元仿真软件中,模拟母材、焊缝、热影响区。其中,压模、垫模、杯突球头设定为刚体,冲压深度设定为 9.5 mm,与试验载荷突然下降时的杯突值相等。

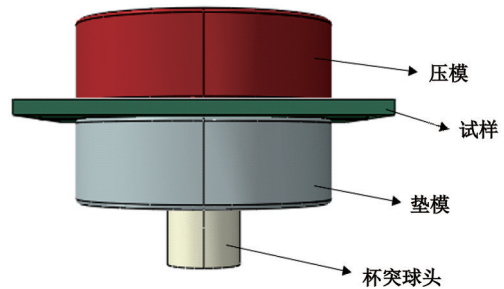


图 14 杯突模型

Fig. 14 Cupping test model

随着杯突球头的不断下压,应力不断增加,从图 15 可以看出,焊缝处的应力最大。在焊缝和热影响区产生了横向扩展的裂纹,与试验结果相同。为进一步分析焊接接头裂纹扩展的原因,提取热影响区和焊缝处一个单元的孔洞体积分数随冲压深度的变化规律,如图 16 所示。

由于使用的是球形冲头,焊缝区首先接触冲头,刚开始冲压,焊缝处的孔洞体积分数大于热影响区的孔洞体积分数,随着冲压深度的增加,热影响区为软化区,所以孔洞体积分数逐渐大于焊缝处的体积分数。最终焊缝和热影响区的单元都被删除,出现横向扩展的裂纹,与试验结果相同,证明

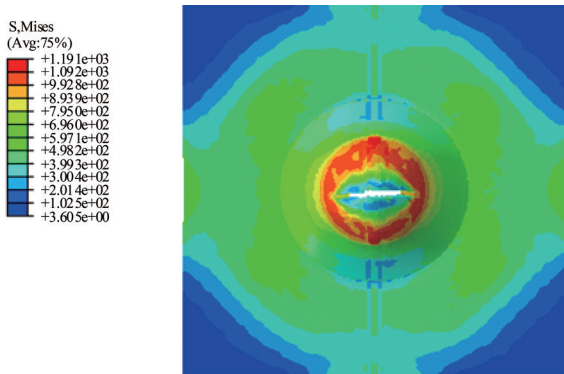


图 15 杯突应力云图

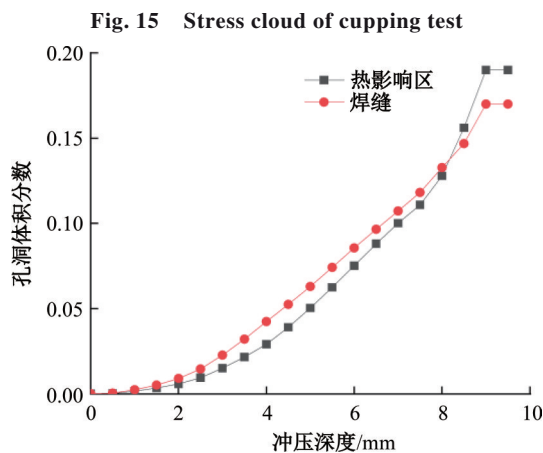


图 16 孔洞体积分数随冲压深度变化规律图

Fig. 16 Variation law of hole volume fraction with stamping depth

了拟合参数的准确性,验证了技术路线的正确性。

通过图 17 杯突试验和仿真对比可以看出,仿真曲线与试验曲线较为贴近,仿真曲线和试验曲线的走势相同。这也证明了拟合参数的正确性,可以正确预测出焊接接头的损伤断裂行为。

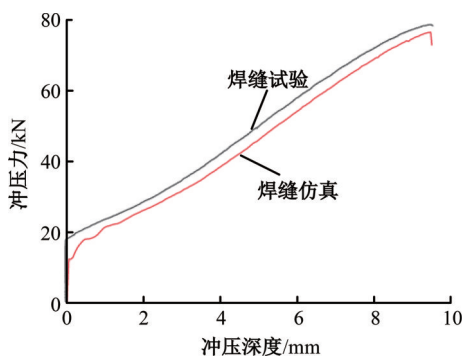


图 17 杯突试验和仿真曲线对比

Fig. 17 Comparison between cupping test and simulation curves

## 4 结论

(1)结合拉伸试验与“混合法则”,借助维氏硬

度与材料强度的经验公式,拟合出的应力与维氏硬度表征的规律相一致。并利用有限元模型对比仿真与试验结果,二者载荷位移曲线在弹性阶段和塑性小变形阶段基本吻合,结果表明混合法则拟合的损伤参数具有较高的准确性和可信度。

(2)基于有限元反演法和机器学习的优势,建立了焊缝、热影响区的损伤参数对纵向接头的载荷位移曲线的非线性关系模型。并通过遗传算法优化神经网络模型后得出了最佳损伤参数,采用优化损伤参数的 GTN 细观损伤模型进行的数值模拟断裂预测结果和试验曲线趋势基本一致,验证了该方法的合理性。

(3)实现了 GTN 模型在低应力三轴度剪切状态下的应用,并通过剪切修正 GTN 模型模拟了杯突试验冲压过程,利用 GTN 参数孔洞体积分数的变化规律来解释杯突试验焊缝横向扩展的原因,仿真结果与试验裂纹扩展走向相同,验证了本文优化损伤参数可以准确预测出焊接接头的损伤断裂行为,剪切 GTN 模型可以预测复杂应力状态下的断裂行为。

## 参考文献:

[1] Merklein M, Johannes M, Lechner M, et al. A review on tailored blanks-production, applications and evaluation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(2): 151-164.

[2] 谷净巍, 于思彬, 韩立军, 等. 激光焊接速度对超高强度钢焊缝微观组织和显微硬度的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2012, 42(3): 656-659.

Gu Zheng-wei, Yu Si-bin, Han Li-jun, et al. Effect of welding speed on microstructure and micro hardness of the weld seam of laser welded ultra-high strength steel[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2012, 42(3): 656-659.

[3] Gurson A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I-yield criteria and flow rules for porous ductile media[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1977, 99(1): 2-15.

[4] Tvergaard V, Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar[J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(1): 157-169.

[5] 王江超, 卓子超, 熊家炜, 等. 基于 Gurson 模型的船用属单向拉伸断裂分析[J]. 船舶与海洋工程, 2020, 36(4): 44-49, 70.

Wang Jiang-chao, Zhuo Zi-chao, Xiong Jia-wei.

- Fracture analysis of marine metal under axial tension based on Gurson model[J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2020, 36(4): 44-49, 70.
- [6] 肖晋, 胡玉梅, 金晓清, 等. 基于各向异性 GTN 模型的铝合金损伤参数确定[J]. *机械强度*, 2018, 40(5): 1189-1193.
- Xiao Jin, Hu Yu-mei, Jin Xiao-qing, et al. Damage parameters identification of aluminum alloy based on anisotropic GTN model[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2018, 40(5): 1189-1193.
- [7] Oh Y R, Nam H S, Kim Y J, et al. Application of the GTN model to ductile crack growth simulation in through-wall cracked pipes[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2018, 159(1): 35-44.
- [8] 刘文权, 盈亮, 荣海, 等. 基于损伤修正 M-K 模型的高强度钢成形极限预测[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2019, 49(4): 1266-1271.
- Liu Wen-quan, Ying Liang, Rong Hai, et al. Forming limit prediction of high strength steel based on damage modified M-K model[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(4): 1266-1271.
- [9] 刘妹妹, 陈建钧, 潘红良. 低应力三轴度下孔洞行为的有限元研究[J]. *机械强度*, 2017, 39(1): 85-91.
- Liu Mei-mei, Chen Jian-jun, Pan Hong-liang. Finite element study of void behavior under low stress triaxiality[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2017, 39(1): 85-91.
- [10] Zhao K, Wang L, Chang Y, et al. Identification of post-necking stress-strain curve for sheet metals by inverse method[J]. *Mechanics of Materials*, 2016, 92(1): 107-118.
- [11] Abdullah K, Wild P M, Jeswiet J J, et al. Tensile testing for weld deformation properties in similar gage tailor welded blanks using the rule of mixtures[J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2001, 112(1): 91-97.
- [12] Song Y L, Lin H, Chu D, et al. Characterization of the in-homogeneous constitutive properties of laser welding beams by the micro-vickers hardness test and the rule of mixture[J]. *Materials and Design*, 2012, 37(5): 19-27.
- [13] Mohr D, Marcadet S J. Micromechanically-motivated phenomenological Hosford-Coulomb model for predicting ductile fracture initiation at low stress triaxialities[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 67(16): 40-55.
- [14] Nahshon K, Xue Z. A modified Gurson model and its application to punchout experiments[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76(8): 997-1009.
- [15] Wang J L, Li C Z, Wan Y, et al. Size effect on the shear damage under low stress triaxiality in micro-scaled plastic deformation of metallic materials[J]. *Materials & Design*, 2020, 196(12): 109-125.
- [16] Li X, Chen Z H, Dong C F. Size effect on the damage evolution of a modified GTN model under high/low stress triaxiality in meso-scaled plastic deformation[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 26(1): No. 101782.
- [17] Tvergaard V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions[J]. *International Journal of Fracture*, 1981, 17(4): 389-407.
- [18] Springmann M, Kuna M. Identification of material parameters of the Gurson-Tvergaard-Needleman model by combined experimental and numerical techniques[J]. *Computational Materials Science*, 2005, 32(3/4): 544-552.
- [19] 张永波, 朱英韬. 基于主成分分析和 GA-BP 神经网络的带钢焊接质量预测[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(17): 128-132.
- Zhang Yong-bo, Zhu Ying-tao. Prediction of welding quality of strip steel based on principal component analysis and GA-BP neural network[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(17): 128-132.
- [20] 洪永昌, 计遥遥, 张武, 等. DP500 高强钢脉冲激光焊接接头的组织和性能[J]. *电焊机*, 2014, 44(5): 79-84.
- Hong Yong-chang, Ji Yao-yao, Zhang Wu. Research on microstructure and properties of DP500 high strength steel joints by pulsed laser welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2014, 44(5): 79-84.