

# 焊缝对拼焊板纵向拉伸成形性能的影响规律

林建平, 邢丹英, 胡巧声, 陈水生

(同济大学 机械工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 基于焊缝和母材应变相等的假设, 推导出拼焊板纵向拉伸时平均延伸率与母材材料参数、焊缝材料参数及母材与焊缝初始宽度比之间的关系. 在母材材料参数一定时, 采用有限元方法分析了焊缝材料参数、初始宽度比对拼焊板纵向拉伸抗拉强度和平均延伸率的影响规律. 结果表明, 焊缝强度系数  $K$  对拼焊板纵向拉伸抗拉强度的影响较为显著, 而对平均延伸率影响较小; 焊缝硬化指数  $n$  对抗拉强度影响很小, 对平均延伸率影响较大; 初始宽度比对试件拉伸性能的影响存在一个敏感区域 ( $0 \sim 20$ ), 当初始宽度比大于 20 时, 拼焊板随其变化趋于平缓.

**关键词:** 拼焊板; 焊缝; 平均延伸率; 初始宽度比

**中图分类号:** TG 316

**文献标识码:** A

## Effect of Weld on Formability of Longitudinal Tailor Welded Blanks

LIN Jianping, XING Danying, HU Qiaosheng, CHEN Shuisheng  
(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Based on the “iso-strain hypothesis”, the relationship was obtained between mean elongation and influence factors such as base material properties, weld properties and initial width ratio of the base metal and weld. The finite element method was employed to analyze the influence laws of the weld properties and initial width ratio on the tensile strength and mean elongation with constant base material properties. The results demonstrate that the strength coefficient  $K$  of the weld has more influence on the tensile strength and less effect on the mean elongation; the hardening coefficient  $n$  is just contrary; initial width ratio has significant effect on them in its sensitive area ( $0 \sim 20$ ) and when initial width ratio exceeds 20, the effect becomes subtle.

**Key words:** tailor-welded blanks; weld; mean elongation; initial width ratio

作为实现汽车轻量化重要手段之一的拼焊板 (tailor-welded blanks, TWBs) 冲压技术, 是指将两块或两块以上的金属板料焊接在一起, 然后一次冲压成形, 节省了工序以及总体的模具成本. 其组成板料可以具有不同厚度、性能、材质和表面涂层<sup>[1-2]</sup>, 具有灵活的可设计性. 然而, 由于焊缝及其热影响区的硬化作用, 使拼焊板较单一母材成形性能有较大程度下降.

目前, 评价拼焊板成形性能主要采用单向拉伸试验 (包括焊缝垂直于拉伸方向与平行于拉伸方向) 和胀形实验等. 根据文献[3]可知, 相同厚度和强度的激光拼焊板与单一母材相比, 当主应变方向平行于焊缝时, 最大成形高度下降了 30%, 且失效发生在焊缝界面. 而且基础试验结果表明<sup>[4-5]</sup>, 拼焊板纵向拉伸 (焊缝平行于拉伸方向) 时屈服强度、抗拉强度提高, 应变硬化指数和伸长率降低是影响拼焊板成形能力的主要原因. 但是, 纵向拉伸时焊缝提前失效导致拼焊板延伸率下降的原因目前只是停留在焊缝塑性差的定性分析上<sup>[4,6]</sup>, 尚未见到能从机理上揭示延伸率与母材、焊缝之间关系的文献.

笔者基于等应变假设推导出拼焊板纵向拉伸延伸率与母材、焊缝及其宽度尺寸之间的关系, 并结合有限元方法研究了拼焊板纵向拉伸成形性能的影响因素, 为揭示拼焊板成形性能下降机理提供一定的理论支持.

## 1 拼焊板纵向拉伸力学分析

假设拼焊板由两块相同性能材料、不同厚度的钢板焊接而成 (厚度分别为  $t_1$  和  $t_2$ ,  $t_2 > t_1$ ), 拼焊板纵向拉伸的横截面示意图见图 1<sup>[7]</sup>, 母材和焊缝初始宽度分别为  $w_1$ ,  $w_2$ . 为了便于衡量拼焊板不同于母材

收稿日期: 2009-05-20

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20070247025); 上海汽车工业科技发展基金资助项目 (0705)

作者简介: 林建平 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为板料成形与汽车轻量化技术.

E-mail: jplin58@tongji.edu.cn

的拉伸性能,本文称拼焊板分散性失稳时的延伸率为平均延伸率,而此时的应变为极限平均应变.

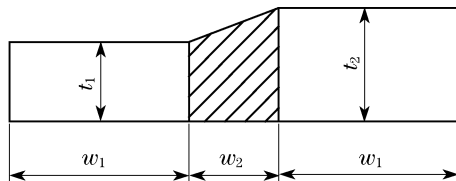


图1 拼焊板横截面示意图

Fig.1 Cross-section of tailor welded blanks

拼焊板纵向拉伸时,外界力所加载的方向与焊缝平行,在分析拼焊板纵向拉伸时,进行以下两点假设:①焊缝与母材变形均匀,即在拉伸中试样各处应变是相等的;②母材和焊缝的应力应变关系遵循Ludwick-Hollomon定律,即母材和焊缝的应力应变曲线为幂指数硬化曲线<sup>[8-9]</sup>,则

$$\sigma_b = K_b \epsilon_b^{n_b} \quad (1)$$

$$\sigma_w = K_w \epsilon_w^{n_w} \quad (2)$$

式中: $\sigma_b, \sigma_w$ 分别为母材、焊缝的应力值; $\epsilon_b, \epsilon_w$ 分别为母材、焊缝的应变值; $K_b, K_w$ 分别为母材、焊缝的强度系数; $n_b, n_w$ 分别为母材、焊缝的应变硬化指数.

对于同材拼焊板,在纵向焊缝试样的拉伸实验中,若加载在整个试样上的力为 $P$ ,则根据力的平衡方程,可得

$$P = \sigma_b A_b + \sigma_w A_w \quad (3)$$

式中: $A_b, A_w$ 分别为拉伸试样中母材、焊缝的横截面积.

把式(1)及式(2)代入式(3)可得

$$P = K_b \epsilon_b^{n_b} A_b + K_w \epsilon_w^{n_w} A_w \quad (4)$$

由假设 $\epsilon_b = \epsilon_w = \epsilon$ 可得

$$P = K_b \epsilon^{n_b} A_b + K_w \epsilon^{n_w} A_w = K_b \epsilon^{n_b} \frac{A_{0b} l_0}{l} + K_w \epsilon^{n_w} \frac{A_{0w} l_0}{l} \quad (5)$$

式中: $\epsilon$ 为拉伸试样的均匀应变值; $l_0, l$ 分别为拉伸试样初始长度和瞬时长度; $A_{0b}, A_{0w}$ 分别为拉伸试样母材和焊缝的初始横截面积.

当拉伸试样分散性失稳时,拉伸载荷达到最大值,即 $dP=0$ ,对式(5)求导得

$$\frac{\epsilon_j^{n_w} (n_w - \epsilon_j)}{\epsilon_j^{n_b} (n_b - \epsilon_j)} = - \frac{A_{0b}}{A_{0w}} \frac{K_b}{K_w} \quad (6)$$

式中: $\epsilon_j$ 为极限平均应变值.

由式 $\epsilon_j = \ln \frac{l_j}{l_0}$  ( $l_j$ 为试样分散性失稳时的极限

长度)和 $\delta_u = \frac{l_j - l_0}{l_0}$ 可得

$$\epsilon_j = \ln(1 + \delta_u) \quad (7)$$

式中: $\delta_u$ 为平均延伸率.

又由图1可得母材和焊缝初始面积比为

$$\frac{A_{0b}}{A_{0w}} = \frac{2w_1(t_1 + t_2)}{(t_1 + t_2)w_2} = \frac{2w_1}{w_2} = 2w^* \quad (8)$$

式中: $w^*$ 为初始宽度比, $w^* = \frac{w_1}{w_2}$

把式(7),(8)代入式(6),可得拼焊板纵向拉伸时的平均延伸率计算公式

$$\frac{[\ln(1 + \delta_u)]^{n_w} [n_w - \ln(1 + \delta_u)]}{[\ln(1 + \delta_u)]^{n_b} [n_b - \ln(1 + \delta_u)]} = - 2w^* \frac{K_b}{K_w} \quad (9)$$

由式(9)可知,拼焊板纵向拉伸时的平均延伸率由母材和焊缝的材料参数 $K_b, K_w, n_b, n_w$ 及初始宽度比 $w^*$ 共同决定.

## 2 有限元分析模型及实验验证

有限元仿真计算采用Abaqus软件,试件的尺寸参照国标GB/T 228—2002,如图2.

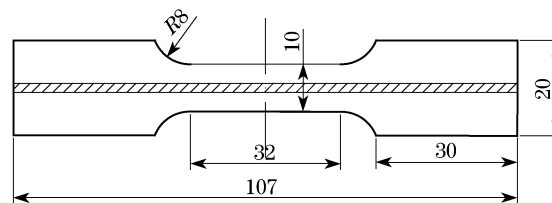


图2 单拉试件基本尺寸(单位:mm)

Fig.2 Dimensions of a tensile specimen (unit:mm)

在整个分析中,母材取DX53DZ100MB,材料参数见表1,厚度为1.75 mm/2.50 mm组合.建立有限元模型如图3,焊缝宽度取为2 mm,材料参数根据文献[5-6]的范围取 $K_r = K_w/K_b = 1.5$ , $n_r = n_w/n_b = 0.5$ .在试件标称长度内,有限元单元长、宽为1 mm,焊缝取为0.5 mm.由于主要的变形不在夹持部分发生,为了节约计算时间,此处设置较大的单元尺寸.母材及焊缝均采用四边形壳单元,厚度方向具有5个积分点.试件一端采用固支边界条件,即完全限制3个方向上的平移以及旋转自由度.试件另一端在水平方向即加载方向可以自由移动.

表1 DX53DZ100MB 材料参数

Tab.1 Material properties of DX53DZ100MB

$n$	$K/\text{MPa}$	杨氏模量/GPa	泊松比
0.35	478	210	0.3

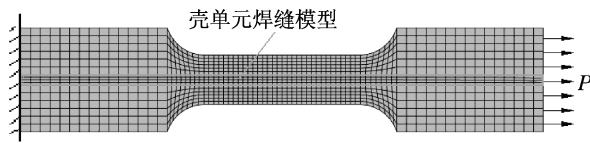


图3 拼焊板单拉试件有限元模型  
Fig.3 Model of finite element analysis

为了验证此拼焊板单向拉伸有限元模型的可靠性,对相同尺寸的 DX53DZ100MB 板材,母材厚度分别为 1.75 mm 和 2.5 mm 的 3 个拼焊板试件进行单向拉伸实验,实验中拉伸速度为  $6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,其他参数参照 GB/T228—2002 规定.对拼焊板拉伸试验结果和有限元仿真结果从缩颈位置、应力应变曲线两方面进行对比,结果见图 4—6.

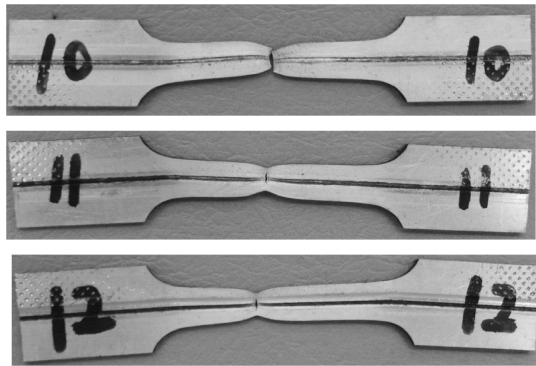


图4 拉伸试验结果  
Fig.4 Experimental results of tensile specimens

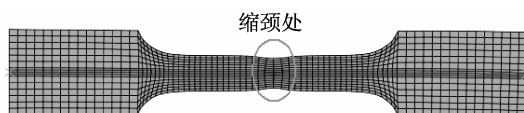


图5 有限元仿真结果  
Fig.5 Simulation results of tensile specimens

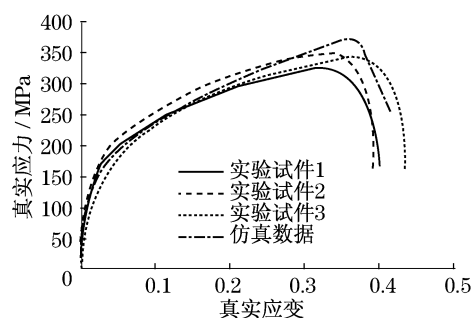


图6 单拉试验和仿真得到的应力应变曲线  
Fig.6 Stress-strain curve obtained from experiments and simulations

从图 4 和图 5 可以看到,实验和模拟试样缩颈位置都是在标距中心或附近,图 6 显示他们的应力

应变曲线也较为吻合,因此,该有限元模型是可靠的,可用于后续拼焊板单拉成形性能研究的有限元分析.

### 3 拼焊板纵向拉伸成形性能影响因素分析

#### 3.1 焊缝材料参数的影响

现有研究表明,不同的激光焊接参数(如焊接电流、压力、材料搭边、辗压焊接功率、焊接速度等)会影响焊缝性能<sup>[10]</sup>,且与激光焊缝相比母材强度系数  $K$  增加,硬化指数  $n$  减小<sup>[5]</sup>.因此,研究不同焊缝材料参数对拼焊板纵向拉伸成形性能的影响具有重要意义.本文根据文献[8—9]对于焊缝材料参数范围取不同的  $K_r, n_r$  组合进行研究,通过有限元仿真得到的抗拉强度、平均延伸率与母材的抗拉强度、平均延伸率比较分别可以得到不同焊缝材料参数时的抗拉强度增加率和平均延伸率下降率,并将仿真获得的平均延伸率下降率与式(9)计算得到的理论值进行对比,结果见图 7,8.

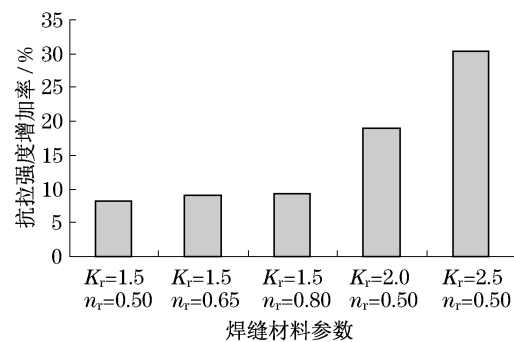


图7 不同焊缝材料参数的抗拉强度增加率  
Fig.7 Increasing rates of tensile strength for different weld properties

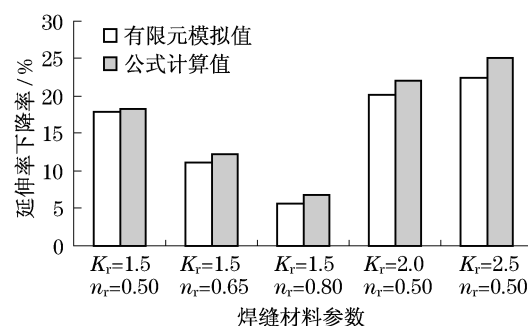


图8 不同焊缝材料参数的延伸率下降率  
Fig.8 Decreasing rates of elongation for different weld properties

从图7可以看出,随着焊缝  $K_r$  从 1.5 增加到 2.5,试件抗拉强度增加率提高约 22%;随着焊缝  $n_r$  从 0.50 增加到 0.80,其抗拉强度基本保持不变。

从图8可以看出,有限元模拟值与公式计算值较为吻合,随着焊缝材料参数  $K_r$  的增大, $n_r$  减小,即焊缝与母材材料性能相差越大时拼焊板平均延伸率相比母材下降越大,而且参数  $n_r$  对延伸率影响较显著。根据有限元仿真结果,当  $n_r$  固定为 0.50,改变  $K_r$  从 1.5 上升到 2.5 时,延伸率下降率大约提高 4.6%;而当  $K_r$  固定为 1.5,改变  $n_r$  从 0.50 上升到 0.80 时,其延伸率下降率提高将近 12%。该研究结果可为实际生产中合理选择焊接参数提供一定的参考。

### 3.2 初始宽度比的影响

单板材在进行单向拉伸试验时,其性能受尺寸参数的影响并不大。而由式(9)表明,初始宽度比会影响拼焊板平均延伸率;同时实验研究也发现,由于焊缝的存在,不同宽度试件的拼焊板纵向拉伸性能相差较大,导致拼焊板材料的塑性指标不一致,这给拼焊板的使用带来不便,所以有必要研究初始宽度比与拼焊板塑性指标之间的关系。为简化研究,本文固定焊缝材料性能参数  $K_r = K_w/K_b = 1.5$ ,  $n_r = n_w/n_b = 0.50$ ,焊缝宽度为 2 mm 不变,改变拼焊板宽度得到不同初始宽度比,同时与母材的分析结果进行比较,得到初始宽度比与拼焊板抗拉强度增加率和平均延伸率下降率的关系曲线见图9,10。

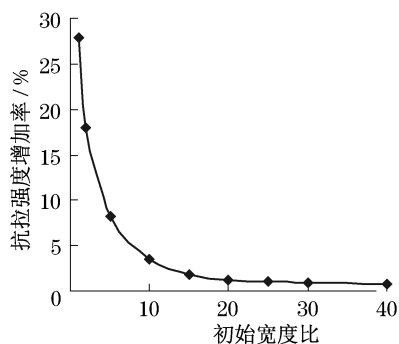


图9 初始宽度比与抗拉强度增加率的关系

Fig.9 Increasing rate of tensile strength for different initial width ratios

根据图10可知,有限元模拟值与公式计算值较为吻合,而且从图9,10可以看出,在焊缝尺寸不变情况下,试样宽度越大即初始宽度比  $w^*$  越大时,拼焊板抗拉强度增加率和平均延伸率下降率均减小,即拼焊板性能与母材越接近。且在  $0 < w^* < 20$  时,初始宽度比对拼焊板纵向拉伸性能影响较为显著;

当  $w^* > 20$  时,拼焊板性能随初始宽度比的变化趋于平缓。由此说明小型纵向拉伸试件初始宽度比对试件成形性能影响存在一个敏感区域 ( $0 < w^* \leq 20$ ),即在该区域内设计拉伸试验时,必须考虑试件尺寸对试验结果的影响,从而使由不同尺寸拼焊板测得的塑性指标具有可比性。

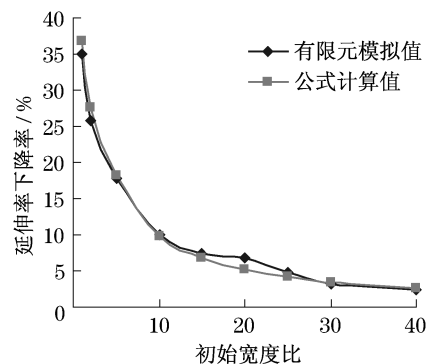


图10 初始宽度比与延伸率下降率的关系

Fig.10 Decreasing rate of elongation for different initial width ratios

## 4 结论

(1) 推导出拼焊板纵向拉伸时的平均延伸率计算公式,发现延伸率由母材和焊缝的材料性能参数及初始宽度比共同决定。

(2) 焊缝材料性能参数  $K, n$  会影响拼焊板纵向拉伸性能。焊缝的强度系数  $K$  主要影响拼焊板纵向拉伸时的抗拉强度,而焊缝的应变硬化指数  $n$  对平均延伸率影响较显著。

(3) 在焊缝尺寸不变情况下,试样宽度越大即初始宽度比越大时,拼焊板抗拉强度增加率和平均延伸率下降率均减小,拼焊板性能与母材越接近。且初始宽度比对拼焊板拉伸性能的影响存在一个敏感区域 ( $0 < w^* \leq 20$ ),当  $w^* > 20$  时,拼焊板拉伸性能随其变化趋于平缓。

### 参考文献:

- [1] 李淑慧,林忠钦,倪军,等.拼焊板在车身覆盖件冲压成形中的研究进展[J].机械工程学报,2002,38(2):1.  
LI Shuhui, LIN Zhongqin, NI Jun, et al. Current development and trends of the tailored blank application in auto-body stamping[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(2):1.
- [2] Saunders F I, Wagoner R H. Forming of tailor welded blanks [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1994, 27(9): 2605.

(下转第1380页)