

DOI: 10.3901/JME.2009.04.183

# 激光拼焊板成形极限图的理论建立方法\*

陈 炜 彭志刚 侯 波 贝建伟 冯华云

(江苏大学机械工程学院 镇江 212013)

**摘要:** 由变形不均引起的颈缩或断裂是激光拼焊板的成形难题, 工程中迫切需要了解拼焊板的成形性能。成形极限图是一种评价板料成形性能的有效手段, 通常可以由试验法和理论计算法获得。目前试验法成本高, 费时费工; 理论计算法尚不完善, 需进一步研究改进。提出一种新的拼焊板成形极限图理论计算模型, 结合 HOSFORD 屈服准则, 获得了高强度 IF 钢等厚激光拼焊板的成形极限图, 计算结果与试验数据吻合较好, 证实拼焊板成形极限图的理论建立方法的正确性。基于拼焊板成形极限图的理论建立方法, 可在已知拼焊板焊接区材料性能参数的条件下快速获得拼焊板成形极限图。

**关键词:** 激光拼焊板 成形极限图 理论计算模型 极限应变

中图分类号: TG386.41

## Theoretical Establishment of Forming Limit Diagram for Laser Tailor-welded Blanks

CHEN Wei PENG Zhigang HOU Bo BEI Jianwei FENG Huayun

(College of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

**Abstract:** Necking or fracture caused by the non-uniform deformation is the problem that affects the forming of laser tailor-welded blanks (LTWB), thus the formability of LTWB needs to be known urgently. Forming limit diagram (FLD), which can be established by experiment or theoretical calculation, is an important method to evaluate the formability of sheet metal. However, the FLD obtained by experiment costs much and takes more time. And the method of theoretical calculation is not yet perfect and needs further improvement. A new theoretical model is developed to compute the FLD of same gauge laser tailor-welded blank. Base on the theoretical model, the FLD of same gauge laser tailor-welded blanks made of high strength interstitial free (HS-IF) steel is calculated by using the Hosford's yield criteria. Good correlation between the calculation result and experimental data is indicated. The FLD of laser tailor-welded blanks can be obtained conveniently through this method after the material performance parameters of welding zone are given.

**Key words:** Laser tailor-welded blanks Forming limit diagram Theoretical model Limit strain

## 0 前言

板料在不同变形方式下的极限应变构成的成形极限图, 是薄板成形工艺分析和工艺设计的有效工具<sup>[1]</sup>。

成形极限图(Forming limit diagram, FLD)可以通过试验方法和理论计算来建立。试验法获得的成形极限图较准确, 但成本高, 费时费工。FLD 的理论计算是基于塑性本构关系和屈服准则, 以集中性

失稳准则作为颈缩与断裂的条件进行解析的。母材性质差别以及焊缝的存在改变了传统单一板料塑性成形中的流动规律, 使得激光拼焊板(Laser tailor-welded blanks, LTWB)的成形极限表现出其独有的特点。

CAYSSIALS<sup>[2]</sup>在试验研究基础之上提出了激光拼焊板的理论计算方法, 但其仅给出了拼焊板平面应变 FLD<sub>0</sub> 的计算公式, 并未阐述如何获得完整的 FLD。DAVIES 等<sup>[3]</sup>提出了胀形状态下拼焊铝板 FLD 的理论计算模型。若已知初始缺陷度值  $f_0$  的统计分布和母材与焊接区的流体力学特性, 即可理论计算拼焊板 FLD 右半部分。但作者未给出试验验证, 其理论模型的正确性值得商榷。国内外学者对

\* 国家自然科学基金(50475125, 50775102)和江苏省教育厅青蓝工程(苏教师(2007)2 号)资助项目。20080630 收到初稿, 20081108 收到修改稿

拼焊板成形极限图的理论研究刚刚起步, 激光拼焊板 FLD 的理论研究尚不完善, 理论计算模型和计算方法需要进一步研究。

本文提出等厚激光拼焊板成形极限图的理论计算模型, 结合 HOSFORD 屈服准则, 计算获得高强度 IF 钢等厚激光拼焊板的成形极限图。通过将计算结果与文献[4]中的试验数据进行比较, 证实了本文建立的激光拼焊板 FLD 理论模型的正确性。

## 1 拼焊板成形极限图的理论计算模型

宏观上, 激光拼焊板由四部分组成: 母材 1、母材 2、焊缝和热影响区, 如图 1 所示。但焊缝、热影响区及母材区之间在微观上并没有明显的分界线, 其相互间是交错连续的组织<sup>[5-6]</sup>。焊缝及热影响区(即焊接区)的硬度高于母材, 塑性、韧性差, 难以变形<sup>[6-7]</sup>。由于受到焊接区的约束作用, 使得邻近热影响区的母材在拼焊板变形过程中表现出“异常”的力学行为。此时焊接区的约束作用是主要影响因素, 需要建立能够反映焊接区对母材约束作用的理论计算模型。

图 1 为本文提出的激光拼焊板力学分析模型, 其中, 1 为主应变方向, 2 为次应变方向, 字母 a 表示焊接区, 其宽度待确定, 字母 b 表示母材区。由于焊接区硬度高, 难以变形, 当外力作用于拼焊板时, 焊接区仅充当传力的作用。图 1 可简化成图 2 所示模型, 其中  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为激光拼焊板的主、次应力,  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  分别为激光拼焊板的主、次应变。根据力平衡条件

$$F_{1a} = F_{1b} \quad (1)$$

式中,  $F_{1a}$ 、 $F_{1b}$  分别表示 a、b 区在 1 方向的受力。

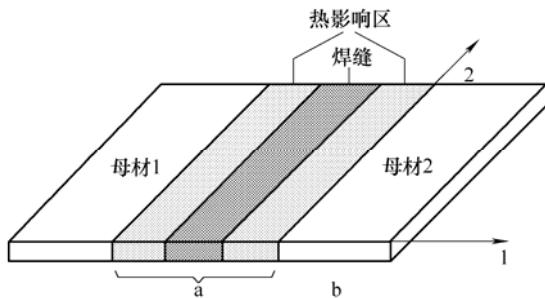


图 1 激光拼焊板成形极限图理论分析模型

整个变形过程中, 假定 a 区在 2 方向的应变增量  $d\varepsilon_{2a}$  与 b 区在 2 方向的应变增量  $d\varepsilon_{2b}$  相等, 即

$$d\varepsilon_{2a} = d\varepsilon_{2b} \quad (2)$$

将式(1)整理得

$$\sigma_{1a} \exp(\varepsilon_{3a}) = \sigma_{1b} \exp(\varepsilon_{3b}) \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon_{3a}$ 、 $\varepsilon_{3b}$  为厚向应变,  $\sigma_{1a}$ 、 $\sigma_{1b}$  分别为 a 区、

b 区的主应力。

板料在变形过程中的应变强化行为由式(4)描述。其中  $K$  为强化系数,  $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\varepsilon}$  分别为等效应力、等效应变,  $\dot{\bar{\varepsilon}}$  为等效应变率,  $m$  为应变率敏感系数,  $n$  为强化指数

$$\bar{\sigma} = K \dot{\bar{\varepsilon}}^m \bar{\varepsilon}^n \quad (4)$$

定义  $\varphi$  为等效应力与主应力之比, 即

$$\varphi = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_1} \quad (5)$$

理论分析简化模型如图 2 所示。

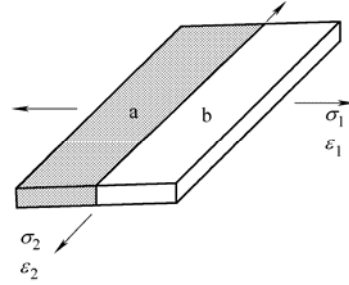


图 2 理论分析简化模型

结合式(4)、(5), 由式(3)可得

$$\frac{1}{\varphi_a} K_a \dot{\bar{\varepsilon}}_a^{m_a} \bar{\varepsilon}_a^{n_a} \exp(\varepsilon_{3a}) = \frac{1}{\varphi_b} K_b \dot{\bar{\varepsilon}}_b^{m_b} \bar{\varepsilon}_b^{n_b} \exp(\varepsilon_{3b}) \quad (6)$$

式中,  $\bar{\varepsilon}_a$ 、 $\bar{\varepsilon}_b$  分别为 a、b 区等效应变,  $\dot{\bar{\varepsilon}}_a$ 、 $\dot{\bar{\varepsilon}}_b$  分别为 a、b 区等效应变率,  $\varepsilon_{3a}$ 、 $\varepsilon_{3b}$  分别为 a、b 区厚向应变,  $\varphi_a$ 、 $\varphi_b$  分别为 a、b 区等效应力与主应力之比,  $K_a$ 、 $K_b$  分别为 a、b 区强化系数,  $n_a$ 、 $n_b$  分别为 a、b 区强化指数,  $m_a$ 、 $m_b$  分别为 a、b 区应变率敏感系数。

定义  $\rho$  为次应变增量  $\Delta\varepsilon_2$  和主应变增量  $\Delta\varepsilon_1$  之比,  $\beta$  为等效应变增量与主应变增量之比,  $\alpha$  为次应力与主应力之比, 即

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \rho = \frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1} \quad \beta = \frac{\Delta\bar{\varepsilon}}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\varepsilon}_1} \quad (7)$$

假定 a、b 区应变率敏感系数相等, 即  $m_a = m_b = m$ , 计算过程中, 等效应变  $\bar{\varepsilon}$  以微量  $\Delta\bar{\varepsilon}$  增加时, 等式(6)转化为

$$\frac{1}{\varphi_a} K_a \left( \frac{\beta_a}{\rho_a} \right)^m (\bar{\varepsilon}_a + \Delta\bar{\varepsilon}_a)^{n_a} \exp(\varepsilon_{3a}) = \frac{1}{\varphi_b} K_b \left( \frac{\beta_b}{\rho_b} \right)^m (\bar{\varepsilon}_b + \Delta\bar{\varepsilon}_b)^{n_b} \exp(\varepsilon_{3b}) \quad (8)$$

式中,  $\rho_a$ 、 $\rho_b$  分别为 a、b 区次应变增量和主应变增量之比,  $\beta_a$ 、 $\beta_b$  分别为 a、b 区等效应变增量与主应变增量之比,  $\alpha_a$ 、 $\alpha_b$  分别为 a、b 区次应力与

主应力之比。

$\varphi$ ,  $\rho$  可由屈服准则计算获得。基于以上理论模型, 引入 HOSFORD 屈服准则<sup>[8]</sup>

$$|\sigma_1|^\mu + |\sigma_2|^\mu + r|\sigma_1 - \sigma_2|^\mu = (r+1)\bar{\sigma}^\mu \quad (9)$$

式中,  $\mu$  为应力指数,  $r$  为各向异性指数。

由式(5)和式(9)可以得到

$$\varphi = \left[ \frac{1 + \alpha^\mu + r(1-\alpha)^\mu}{r+1} \right]^{\frac{1}{\mu}} \quad (10)$$

根据塑性流动原则, 可得

$$\rho = \frac{\alpha^{(\mu-1)} - r(1-\alpha)^{\mu-1}}{1 + r(1-\alpha)^{(\mu-1)}} \quad (11)$$

通过以上理论分析, 已经把激光拼焊板 FLD 理论计算问题转化为求解式(8)这个非线性方程的数学问题。

## 2 焊接区性能参数的确定

上述模型中, 需要确定 a 区(即焊接区)强化系数  $K_a$ 、强度指数  $n_a$ , 方能求解式(8)获得极限应变。

单拉试验中, 拼焊板单拉试件的焊缝处于中间位置且平行于拉伸方向时, 拼焊板单拉试件力学分析模型如图 3 所示。图 3 中  $b$  表示单拉试件标注宽度,  $b_a$  表示单拉试件焊接区宽度,  $p$ 、 $p_1$ 、 $p_2$  和  $p_a$  分别表示拼焊板试件、母材 1、母材 2 和焊接区的作用力。由力平衡原理得

$$p_1 + p_2 + p_a = p \quad (12)$$

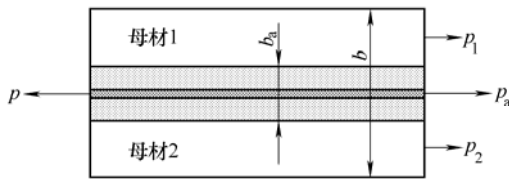


图 3 拼焊板单拉试件受力示意图

室温常速下, 应力  $\sigma$  与应变  $\varepsilon$  的关系

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (13)$$

假设母材 1、母材 2 和焊接区三者变形过程中沿拉伸方向的主应变值均为  $\varepsilon_1$ , 结合  $p = \sigma A$  (其中  $A$  为截面积), 式(12)转化为

$$K_1 \varepsilon_1^{n_1} \frac{b-b_a}{2} + K_2 \varepsilon_1^{n_2} \frac{b-b_a}{2} + K_a \varepsilon_1^{n_a} b_a = K \varepsilon_1^n b \quad (14)$$

式中,  $K$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_a$  分别表示拼焊板单拉试件、母材 1、母材 2 和焊接区的强化系数,  $n$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  和

$n_a$  分别表示拼焊板单拉试件、母材 1、母材 2 和焊接区的强化指数。

根据文献[4]提供的高强度 IF 钢激光拼焊板单拉试验数据, 取焊接区宽度  $b_a = 4$  mm, 利用式(14), 通过线性回归方法计算拼焊板拉伸失稳模型 a 区强化系数  $K_a$ 、强化指数  $n_a$ 。

## 3 拼焊板成形极限图的算法流程

激光拼焊板 FLD 的理论建立方法是根据拼焊板的结构特点及拉伸失稳特点建立理论计算模型, 基于该模型构建力学平衡方程式。然后通过单拉试验确定以上力学平衡方程计算所需的焊接区性能参数, 解方程获得激光拼焊板在各种应变状态下的极限应变值, 原理如下。

在某应变状态下, 赋予 a 区(焊接区)在垂直焊缝方向的一个应变增量  $\Delta\varepsilon_{1a}$ , 根据以上力学平衡方程计算 b 区(母材区)垂直于焊缝方向的应变增量  $\Delta\varepsilon_{1b}$ 。

如果  $\Delta\varepsilon_{1b} / \Delta\varepsilon_{1a} \leq f$  ( $f$  为失效判据), 认为拼焊板没有达到极限状态, 更新 a 区、b 区相关参数值, 在以上变形基础上再次于 a 区叠加一个应变增量  $\Delta\varepsilon_{1E}$ , 计算 b 区  $\Delta\varepsilon_{1b}$ 。

以上重复进行, 至  $\Delta\varepsilon_{1b} / \Delta\varepsilon_{1a} > f$  时, 认为拼焊板达到极限应变状态, 此时的  $(\varepsilon_{2a}, \varepsilon_{1a})$  即为该应变状态下激光拼焊板的极限应变值。

最后将各种应变状态下的极限应变值绘制到以次应变为横坐标、主应变为纵坐标的坐标系中即可获得激光拼焊板的成形极限图。

图 4 所示为拼焊板 FLD 的算法流程图。

## 4 计算结果与讨论

根据文献[4]提供的高强度 IF 钢 0.8 mm / 0.8 mm 厚度组合的激光拼焊板母材性能参数值, 本文取值应变率敏感度  $m = 0.015$ , 应力指数  $\mu = 6$ , 焊接区各向异性指数  $r_a = 0.9$ 。基于以上提供的算法解式(8), 用 VC++ 6.0 软件编程计算, 假定失效判据  $f = 10$  时拼焊板达到成形极限状态, 获得激光拼焊板在各应变状态下的极限应变值。

FLD 右半部, 即“拉一拉”区, 在各应变状态下, 变形的初始阶段, 载荷稳定上升, 应变路径保持线性。随着变形的进行, 由于焊接区难以变形, 制约了邻近焊接区的一段母材在焊缝方向的塑性流动, 导致其应变路径产生漂移, 拼焊板的母材部分

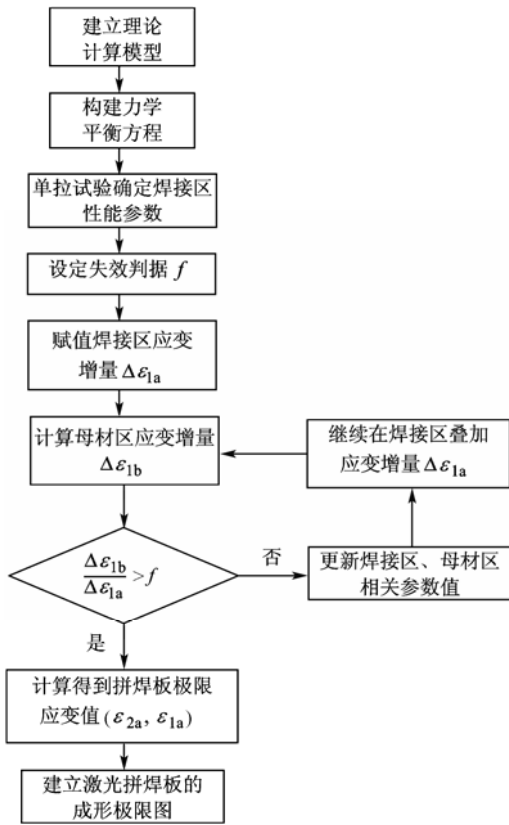


图 4 激光拼焊板 FLD 的算法流程图

首先进入分散性失稳阶段。当母材部分应变状态逐渐趋近平面应变状态，即  $d\varepsilon_{2b} \approx 0$ ，集中性失稳产生，拼焊板达到极限应变状态，此时 a 区的应变值即为拼焊板的极限应变。将 a 区各应变状态下的极限应变点相联成线即得拼焊板理论 FLD 右半部分，如图 5 实线所示，图 5 中虚线为 a 区路径变化情况。正是由于焊接区在变形过程中对靠近焊接区母材的这种牵制作用，降低了拼焊板的成形性能。

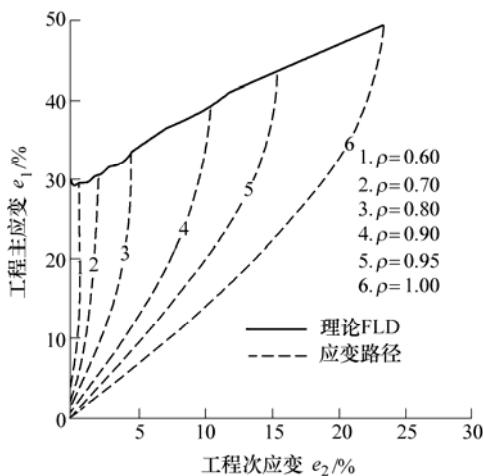


图 5 激光拼焊板右半部 FLD

将理论计算获得的等厚激光拼焊板 FLD 与文献[4]中的试验数据进行比较，如图 6 所示。在拉压应变区和双拉区，激光拼焊板的理论 FLD 与试验数

据吻合较好，而在平面应变区及其附近理论 FLD 稍低于试验数据，但差别不大。理论计算结果和试验数据总体吻合良好。采用上述理论模型能够正确反映激光拼焊板的成形极限行为，基于本文建立的理论模型及计算方法能够较为准确地获得激光拼焊板的成形极限图。

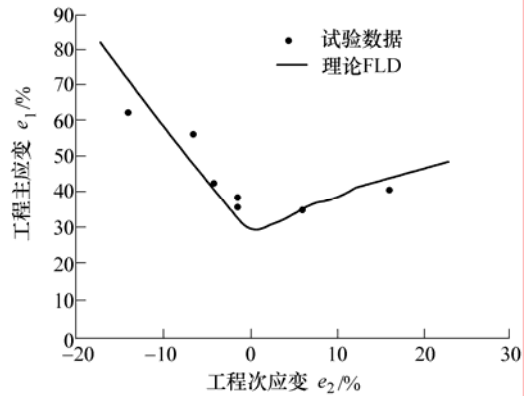


图 6 计算结果与文献[4]中的试验数据相比较

### 5 结论

- (1) 提出一种新的拼焊板成形极限图理论建立方法，基于该方法能够准确、快速地获得拼焊板 FLD。
- (2) 建立激光拼焊板成形极限图理论计算模型，结合 HOSFORD 屈服准则，计算获得等厚高强度 IF 钢激光拼焊板的 FLD，计算结果与试验数据吻合良好，证实了拼焊板 FLD 理论建立方法的正确性。
- (3) 计算结果表明，由于受到焊缝和热影响区的制约作用，邻近焊缝的母材在平行于焊缝方向上的变形受到牵制，使其应变路径向平面应变状态漂移，降低了激光拼焊板的成形性能。

### 参 考 文 献

- [1] CHEN W, LIU Z J, HOU B, et al. Study on multi-stage sheet metal forming for automobile structure-pieces [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 113-117.
- [2] CAYSSIALS F. Specific forming limit curves for tailored blanks[C]// Iron and Steel Society/AIME, 40th Mechanical Working and Steel Processing Conference Proceedings, USA, 1998, 36: 55-60.
- [3] DAVIES R, GRANT G, SMITH M, et al. Describing the formability of tailor welded blanks[R]. SAE Technical Paper Series, 2002-01-2085.
- [4] DRY D, HUGHES D, OWEN R. Methods of assessing

(下转第 191 页)