

双金属复合板的拉伸回弹特性研究

管奔,王亚飞,臧勇,秦勤,张超

(北京科技大学机械工程学院,北京 100083)

摘要:以弹塑性力学理论为基础,对双金属复合板在平面应力状态下的拉伸回弹过程进行解析,得出回弹残余曲率及残余应变中性轴偏移量的解析方程,继而结合有限元仿真和试验分析钢-铝复合板的拉伸回弹变形行为。研究表明,复合板拉伸回弹后呈现纯弯曲状态,残余曲率随着载荷的增大而增大,对于任意材料的双金属复合板均存在一个复合配比值,在该值下拉伸回弹产生的残余曲率最大。

关键词:双金属复合板;拉伸;回弹;中性轴偏移量;残余曲率

中图分类号: TB 331 **文献标志码:** A

引用格式:管奔,王亚飞,臧勇,等. 双金属复合板的拉伸回弹特性研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2015, 39(2):98-104.

GUAN Ben, WANG Yafei, ZANG Yong, et al. Study on springback property of bimetal composite plate under tensile loading [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2):98-104.

Study on springback property of bimetal composite plate under tensile loading

GUAN Ben, WANG Yafei, ZANG Yong, QIN Qin, ZHANG Chao

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

Abstract: Based on the elastic-plastic mechanics, the springback characteristics of bimetal composite plate were analyzed under the plane stress condition, and the analytical equations of residual curvature and neutral axis offset of residual strain were obtained. By combining the FEM method and experiments, the steel-aluminum bimetal composite was analyzed specifically. The results show that the bimetal composite plate after springback exhibits a pure bending state and the residual curvature will increase with the increase of load. There exists a stable mixture ratio value, which results in the maximal residual curvature for any materials of layers.

Keywords: bimetal composite plate; tensile; springback; neutral axis offset; residual curvature

双金属复合板是由两层不同性能的金属通过一定结合方法形成的一种复合材料。双金属复合板既具有复层材料耐腐蚀、耐热、耐磨损等性能,同时又具备基层材料的强度和刚度,具有广泛的应用优势^[1-3]。对于长期输送含有 H₂S 等腐蚀性介质的油气井钻采设备、炼化装置及集输管道,服役环境的长期腐蚀将严重影响其承载能力,最终造成设备的损伤性失效^[4-7];采用双金属复合板加工制造的石油工

业装备不但具有极强的抗极端服役环境的能力,同时还能够保证装备足够的刚度和强度水平^[8-10]。Choi 等^[11]对双金属复合板在单轴拉伸时宽度方向上的翘曲进行了数值计算和有限元分析;刘洪伟等^[12]对不锈钢-铝合金复合板拉伸时宽度方向上的附加应力进行了分析;Hino 等^[13]对钢铝复合板的拉弯弹复进行了试验及理论研究;Liu、Yilamu 等^[14-15]研究了金属/聚合物/金属三层复合板的弯曲回弹及

收稿日期:2014-11-30

基金项目:国家“863”计划项目(2013AA031302);中国博士后科学基金项目(2014M550611);中央高校基本科研业务费(FRF-TP-14-023A1)

作者简介:管奔(1985-),男,师资博士后,博士,主要从事塑性加工工艺与装备等方面的研究工作。E-mail: niuben57@163.com。

铝复合板的V型弯曲弹复;Yu等^[16]研究了爆炸复合板生产中残余应力引起的板材弯曲;赵军、王效岗等^[17-18]对金属复合板的拉伸混合法则及塑性失稳及双金属复合板的矫直过程进行了研究。综合国内外文献,目前对于金属复合板的拉伸回弹成形特性的理论研究还不多见。笔者以双金属层状复合板为研究对象,对其在平面应力状态下的拉伸回弹特性进行理论解析,建立残余应力与残余应变的数学关系;并运用所得到的理论对钢铝复合板进行实例研究。

1 复合板拉伸回弹特性理论解析

1.1 模型建立

与单一金属板材不同,金属复合板存在复合界面,而不同的界面类型^[19]、界面缺陷都会对复合板的拉伸力学行为产生影响。本文将界面视为结合完好的理想平面,且暂不考虑界面对复合板的影响,并引入以下基本假设:

(1)复合板界面结合完好,层与层之间应变连续,变形过程中不会产生分层;

(2)忽略拉伸载荷偏心及附加弯矩的影响,拉伸时截面应变保持一致,即考虑为同步位移载荷拉伸;

(3)将拉伸过程看作平面应力状态。

金属复合板拉伸回弹的力学过程如下:设复合板原长为 L ,受一对位移载荷拉伸至长度为 $L+2\delta_k$,此时复合板的拉伸应变为 ε_k ,然后卸载位移载荷,复合板开始回弹,其结果是板长缩短并发生弯曲,如图1所示。由于板材回弹过程截面应力、应变的线

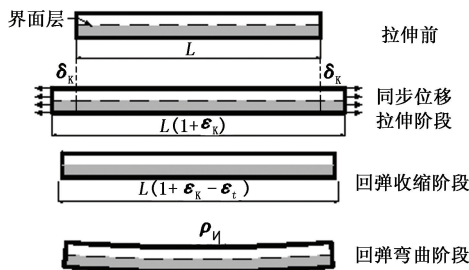


图1 复合板拉伸回弹弯曲示意图

Fig.1 Schematic diagram for explaining springback and bending of bimetal composite plate in stretch

弹性叠加特性,回弹可以分解为两个独立的阶段:回弹收缩阶段和回弹弯曲阶段。回弹收缩阶段假设板材仅发生缩短不发生弯曲,板材回弹 ε 至截面应力合力为零;回弹弯曲阶段板材发生纯弹性弯曲 ρ ,截面应力进行重新分布,使截面弯矩为零,完成最终弹复过程。最终截面的残余应力分布可以等效表示为

回弹收缩阶段与回弹弯曲阶段截面应力状态的叠加。

1.2 理论解析

假设复合板材料1、2的本构关系可以用理想弹性-线性强化模型表示,其弹性模量为 E_1 、 E_2 ,屈服极限为 σ_{1s} 、 σ_{2s} ,屈服应变为 $\varepsilon_{1s} = \sigma_{1s}/E_1$ 、 $\varepsilon_{2s} = \sigma_{2s}/E_2$,强化阶段斜率为 E'_1 、 E'_2 ,组元厚度为 h_1 、 h_2 ,复合板总厚度为 h ,实际板厚坐标为 Z ,截面残余应变为 $\varepsilon_c(Z)$,则弯曲残余曲率为 $A = \varepsilon_c(Z)/Z$ 。

将复合板几何及材料参数进行无量纲化,定义复合板总厚度为1,无量纲厚度坐标为 $z = Z/h$,材料1厚度为 λ ,则材料2厚度为 $1-\lambda$;定义残余应变为0的纵截面为残余应变中性轴,则残余应变中性轴相对界面层偏移量为 δ_c ;再定义材料参数 $\lambda_E = E_1/E_2$, $\overline{\varepsilon}_{1s} = \varepsilon_{1s}/\varepsilon_{2s}$, $\overline{E}'_1 = E'_1/E_2$, $\overline{E}'_2 = E'_2/E_2$;载荷参数 ε'' ,回弹应变 $\overline{\varepsilon}_t = \varepsilon_t/\varepsilon_{2s}$,残余应变 $\overline{\varepsilon}_c(z) = \varepsilon_c(z)/\varepsilon_{2s}$,残余应力表示为 $\overline{\sigma}_{1c} = \sigma_{1c}/\sigma_{2s}$, $\overline{\sigma}_{2c} = \sigma_{2c}/\sigma_{2s}$,残余曲率为 $C = A/A_1$,其中, $A_1 = 2\sigma_{2s}/(hE_2)$, A_1 为厚度 h 的材料2单一板材的弹性极限曲率^[20]。

若拉伸应变为 $\overline{\varepsilon}_k$,则此时组元材料无量纲应力为

$$\overline{\sigma}_{1K} = \begin{cases} \lambda_E \overline{\varepsilon}_k, & \overline{\varepsilon}_k \leq \overline{\varepsilon}_{1s}; \\ \lambda_E \overline{\varepsilon}_{1s} + \overline{E}'_1 (\overline{\varepsilon}_k - \overline{\varepsilon}_{1s}), & \overline{\varepsilon}_k > \overline{\varepsilon}_{1s}. \end{cases} \quad (1)$$

$$\overline{\sigma}_{2K} = \begin{cases} \overline{\varepsilon}_k, & \overline{\varepsilon}_k \leq \overline{\varepsilon}_{2s}; \\ 1 + \overline{E}'_2 (\overline{\varepsilon}_k - 1), & \overline{\varepsilon}_k > \overline{\varepsilon}_{2s}. \end{cases} \quad (2)$$

当回弹应变为 $\overline{\varepsilon}_t$ 时,材料内部的正应力为

$$\begin{cases} \overline{\sigma}_{1t} = \overline{\sigma}_{1K} - \lambda_E \overline{\varepsilon}_t, \\ \overline{\sigma}_{2t} = \overline{\sigma}_{2K} - \overline{\varepsilon}_t. \end{cases} \quad (3)$$

复合板回弹收缩阶段不发生弯曲,截面回弹至内力合力为0;则根据内力平衡准则,截面应力存在如下关系:

$$\lambda (\overline{\sigma}_{1K} - \lambda_E \overline{\varepsilon}_t) + (1-\lambda) (\overline{\sigma}_{2K} - \overline{\varepsilon}_t) = 0.$$

可得

$$\overline{\varepsilon}_t = \frac{\lambda \overline{\sigma}_{1K} + (1-\lambda) \overline{\sigma}_{2K}}{\lambda \lambda_E + (1-\lambda)}. \quad (4)$$

由式(3)及式(4)可得回弹收缩阶段截面的应力状态。此时复合板内力矩是不平衡的,对截面应力进行积分可得回弹收缩阶段完成后截面内力形成的弯矩 \overline{M}_t 为

$$\overline{M}_t = \overline{\sigma}_{1t} \frac{\lambda^2}{2} + \overline{\sigma}_{2t} \frac{(1-\lambda)^2}{2} = (\overline{\sigma}_{1K} - \lambda_E \overline{\varepsilon}_t) \frac{\lambda^2}{2} +$$

$$(\overline{\sigma_{2K}} - \overline{\varepsilon_t}) \frac{(1-\lambda)^2}{2} \tag{5}$$

实际上根据平截面假设,在纯弯矩作用下的截面会发生等曲率的弯曲,因此任意纯弯矩 M 作用下复合板的弯曲应变状态如图 2 所示。定义弯矩 M 作用下的应变中性轴距界面层的距离为 δ ,截面相对于 z 轴转动的角度为 θ 。其中 δ, θ 可正可负, θ 为正表示复合板向材料 1 侧弯曲, θ 为负表示复合板向材料 2 侧弯曲。

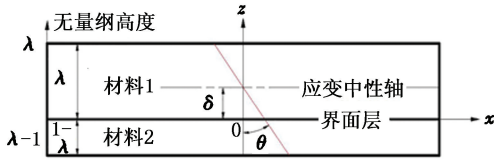


图 2 复合板纯弯曲截面应变分布

Fig. 2 Section strain distribution for bimetal composite plate in pure bending

截面沿 z 轴方向的应变分布函数可表示为

$$\overline{\varepsilon}(z) = \tan \theta (\delta - z) \tag{6}$$

复合板的弯曲正应力为

$$\begin{cases} \overline{\sigma_{1M}} = \lambda_E \tan \theta (\delta - z), & 0 < z \leq \lambda; \\ \overline{\sigma_{2M}} = \tan \theta (\delta - z), & \lambda - 1 \leq z < 0. \end{cases} \tag{7}$$

由于纯弯曲正应力沿截面分布的合力为 0, 因此可得

$$\int_0^\lambda \overline{\sigma_{1M}} dz + \int_{\lambda-1}^0 \overline{\sigma_{2M}} dz = 0. \tag{8}$$

将式(7)代入式(8)可得

$$\lambda_E \tan \theta \left(\delta \lambda - \frac{1}{2} \lambda^2 \right) + \tan \theta \left[\frac{1}{2} (\lambda - 1)^2 - \delta (\lambda - 1) \right] = 0.$$

整理可得 δ 为

$$\delta = \frac{\lambda_E \lambda^2 - (\lambda - 1)^2}{2 \lambda_E \lambda - 2(\lambda - 1)}. \tag{9}$$

若弯曲正应力对截面产生的弯矩为 \overline{M} , 则

$$\int_0^\lambda \overline{\sigma_{1M}} z dz + \int_{\lambda-1}^0 \overline{\sigma_{2M}} z dz = \overline{M}. \tag{10}$$

将式(7)代入式(10)可得

$$\begin{aligned} & \lambda_E \tan \theta \left(\frac{1}{2} \delta \lambda^2 - \frac{1}{3} \lambda^3 \right) + \\ & \tan \theta \left[\frac{1}{3} (\lambda - 1)^3 - \frac{1}{2} \delta (\lambda - 1)^2 \right] = \overline{M}. \end{aligned}$$

整理可得

$$\tan \theta = \frac{\overline{M}}{\lambda_E \left(\frac{1}{2} \delta \lambda^2 - \frac{1}{3} \lambda^3 \right) + \left[\frac{1}{3} (\lambda - 1)^3 - \frac{1}{2} \delta (\lambda - 1)^2 \right]}. \tag{11}$$

若 $\overline{M} = -\overline{M}_i$, 则截面应力的变化过程可视为截面

回弹收缩阶段形成的弯矩 \overline{M}_i 进一步弹复释放弯矩的过程, 即前述回弹弯曲阶段; 而式(3)及式(7)所确定的两种应力状态相叠加即为拉伸回弹完毕后截面的残余应力状态, 复合板残余曲率即为弯矩 \overline{M}_i 引起的曲率; 且 $\tan \theta$ 与 C 存在如下关系:

$$C = \frac{A}{A_1} = \frac{\varepsilon_c(Z)}{Z} \cdot \frac{h}{2\varepsilon_{2s}} = \frac{\overline{\varepsilon_c(z)}}{2z} = \frac{\tan \theta}{2}.$$

复合板最终的残余曲率可表示为

$$C = \frac{-(\overline{\sigma_{1K}} - \lambda_E \overline{\varepsilon_t}) \frac{\lambda^2}{2} - (\overline{\sigma_{2K}} - \overline{\varepsilon_t}) \frac{(1-\lambda)^2}{2}}{\lambda_E \left(\delta \lambda^2 - \frac{2}{3} \lambda^3 \right) + \left[\frac{2}{3} (\lambda - 1)^3 - \delta (\lambda - 1)^2 \right]}. \tag{12}$$

将式(3)与式(7)相加可得复合板最终的残余应力分布公式为

$$\begin{cases} \overline{\sigma_{1c}} = \overline{\sigma_{1K}} - \lambda_E \overline{\varepsilon_t} - 2\lambda_E C (\delta - z), & 0 < z \leq \lambda; \\ \overline{\sigma_{2c}} = \overline{\sigma_{2K}} - \overline{\varepsilon_t} - 2C (\delta - z), & \lambda - 1 \leq z < 0. \end{cases} \tag{13}$$

弯曲方向确定式为

$$F = \overline{\sigma_{1K}} - \lambda_E \overline{\varepsilon_t}. \tag{14}$$

若 $F > 0$, 则复合板向材料 1 侧弯曲; 若 $F < 0$, 则复合板向材料 2 侧弯曲; 若 $F = 0$, 则复合板拉伸回弹后保持平直, 残余曲率为 0。

2 钢铝复合板拉伸回弹特性

2.1 理论研究

以钢-铝爆炸复合板为例对其拉伸回弹过程进行分析; 复合板样件如图 3 所示。分别在样件不同组元上通过线切割获得拉伸试样并进行材料拉伸试验, 得到各组元材料的应力应变关系, 再依据理想弹性-线性强化模型对其进行拟合, 结果如图 4 所示。

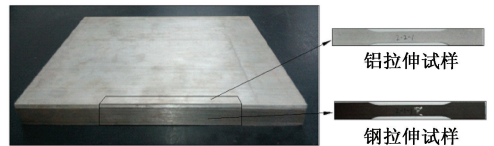


图 3 钢铝复合板拉伸试样

Fig. 3 Tensile specimens of steel-aluminum bimetal composite

拟合后的钢-铝复合板组元材料的力学性能参数如表 1 所示。

残余曲率 C 随钢比例 λ 、拉伸应变 $\overline{\varepsilon_K}$ 的变化如图 5 所示。由图 5 可知:

(1) 当载荷一定时, 板材残余曲率随钢比例 λ 的增大先增大后减小, 且不论在何种载荷条件下, 残

余曲率均在 $\lambda = 0.36$ 左右达到峰值。定义残余曲率峰值所对应的组元材料所占比例为 λ_m 。

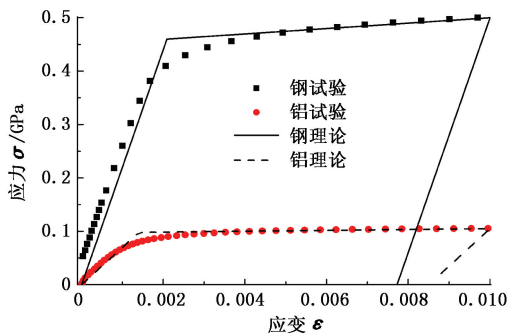


图 4 钢铝复合板拉伸回弹双线性模型

Fig. 4 Bi-linear model for St-Al bimetallic plate stretch and springback

表 1 材料力学性能参数

Table 1 Material mechanical parameters

组元材料	E/GPa	σ_s/MPa	ϵ_s	E'/GPa
钢(材料 1)	220	460	0.002 09	5. 06
铝(材料 2)	70	98	0.001 40	0. 814

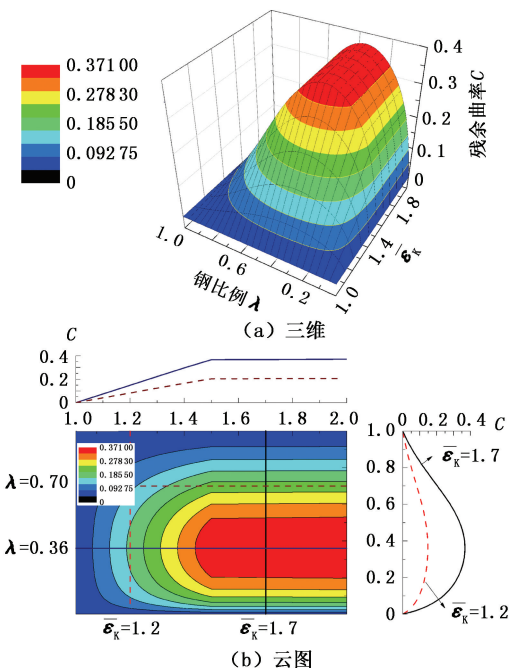


图 5 残余曲率三维变化及云图

Fig. 5 Three-dimension graph and nephogram for changes of residual curvature

(2) 当钢比例一定时,残余曲率在只有铝屈服时随着载荷增大线性增大,在钢铝均屈服时随着载荷增大仅会有微弱增大。

对于任意不同材料配比的双金属复合板,均存在拉伸卸载后产生相对最大曲率的 λ_m 值,具体可通过对式(12)进行数值求导得到。对于本文中研

究的钢-铝复合板,在 $\lambda = 0.36$ 时拉伸卸载后残余曲率最大。在复合板的 U 型成形中,可以通过 λ_m 预测复合板的弹复状态,控制拉伸载荷产生的侧壁弯曲曲率。

2.2 有限元仿真

采用 ABAQUS 建立一体化二维有限元模型如图 6 所示。根据对称性采用 1/2 模型,模型尺寸为长度 $L=1\ 000\ \text{mm}$,总厚 $h=100\ \text{mm}$ 。模型右端为对称约束,左端施加拉伸位移载荷 δ_k ,卸载过程解除该位移载荷。有限元分析采用 CPS8R 二次平面应力单元,单元网格为 $5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ 。

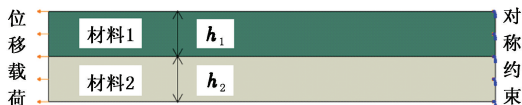


图 6 有限元模型

Fig. 6 FEM model

采用不同钢比例 λ 及拉伸载荷 $\overline{\epsilon_k}$ 模拟分析了钢铝复合板的拉伸回弹特性。以 $\lambda = 0.4$ 为例,卸载回弹后复合板的残余第一主应力分布如图 7 所示。由图 7 可知:不同载荷拉伸回弹后,复合板均向钢侧弯曲;复合板两端由于外区的影响残余应力分布不规律,但中部大部分区域为纯弯曲形态的稳定区。

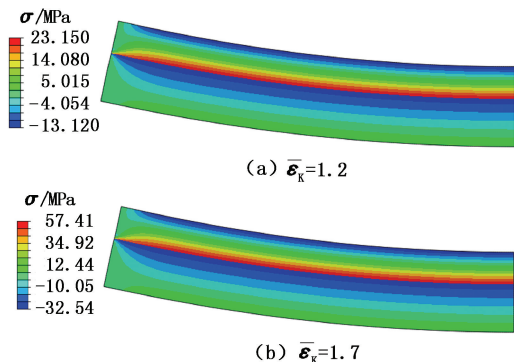


图 7 钢铝复合板残余应力分布云图

Fig. 7 Nephogram of residual stress for St-Al bimetallic plate

取稳定区截面厚度方向建立节点路径,分析得到截面残余应变、应力分布如图 8 所示。观察发现截面残余应变呈线性分布,证明了平截面假设是成立的。

从图 8(a)可以看出,当只有铝屈服时($1 < \overline{\epsilon_k} < 1.493$),残余应变中性轴位于较强的钢侧,并且位置保持不变,随着载荷的增大应变分布 θ 逐步增大;当钢铝均屈服时($\overline{\epsilon_k} \geq 1.493$),残余应变中性轴向钢侧移动,应变分布 θ 增大缓慢。

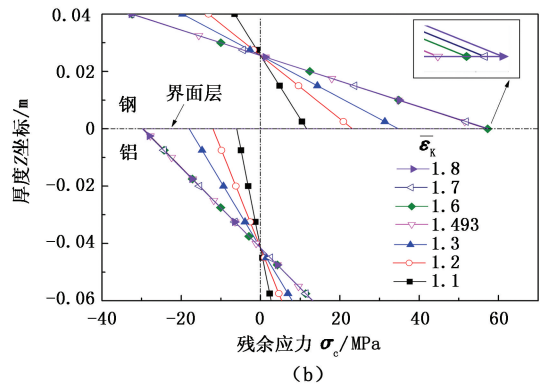
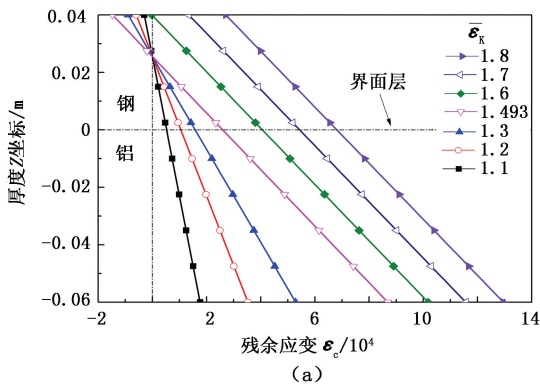


图8 钢铝复合板残余应变、残余应力分布

Fig. 8 Distributions of residual strain and residual stress for St-Al bimetallic plate

从图8(b)可以看出,由于应变连续性和材料性能的突变,截面残余应力在界面处不连续,由钢侧的拉应力突变为铝侧的压应力;当只有铝屈服时,随着载荷的增大残余应力逐渐增大;当钢铝均屈服时,残余应力增大缓慢;应力分布存在两个应力中性轴,且应力中性轴位置不随载荷变化。

2.3 仿真结果与理论解析对比

将仿真得到的截面残余应变分布进行线性拟合,根据拟合函数斜率计算出仿真残余曲率A,进行无量纲化后得出残余曲率C,其与理论解析结果的对比如图9所示。观察发现有限元仿真结果与理论解析结果吻合度极高。

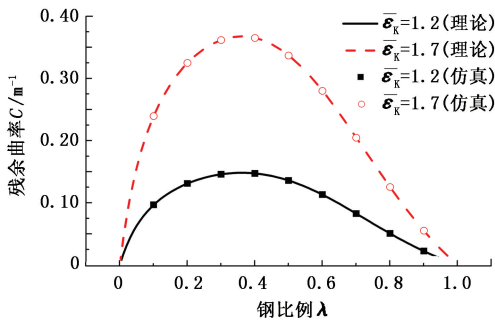


图9 残余曲率的仿真结果与理论解析对比

Fig. 9 Simulation results compared with analytical theory of residual curvature

3 钢铝复合板拉伸回弹试验研究

采用与图3中的单材料拉伸试样相同的加工方法,对复合板样件进行线切割,制得钢/铝厚度为1 mm/2 mm、1.5 mm/1.5 mm、2 mm/1 mm,总厚度为3 mm的复合拉伸卸载非标试样,试样长度为250 mm,宽度为20 mm,试验过程每个规格试样进行两组试验(表2)。如图10所示,拉伸卸载试验在INSTRON拉伸试验机上进行,以位移载荷加载,拉伸

应变速率为0.001 s⁻¹,试验时为保证钢铝均发生屈服,拉伸应变选取0.01。钢-铝复合试样拉伸回弹后弯曲如图11所示。观察图11可发现复合板均向钢侧弯曲,与理论及仿真结果一致。



图10 INSTRON 拉伸试验机

Fig. 10 INSTRON tensile testing machine

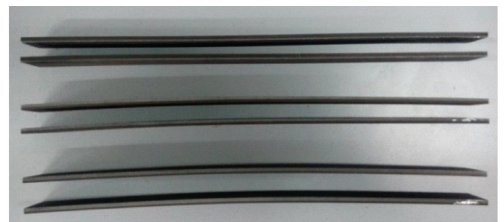


图11 钢铝复合板拉伸回弹弯曲图

Fig. 11 Experiments for St-Al bimetallic plate springback in stretch

采用Handyscan 3D™手持式三维激光扫描仪对拉伸卸载后的试样进行扫描得到其几何形态数据及拉伸卸载后试件的挠度云图如图12所示。对扫描数据进行前处理后导入Geomagic Qualify软件中进行板形弯曲曲率的分析,分析时删去夹持端,对试件拉伸段进行挠曲度测量,通过挠曲度与曲率的几何关系得到试件的残余曲率。

分析挠度云图可知,拉伸卸载后的复合板基本呈现具有均匀曲率的纯弯曲状态,不同钢比例的试件拉伸卸载后残余曲率见表 2。与理论解析对比分析(图 13)可发现试验结果与理论解析结果的最大

误差控制在 10% 以内,且很好地预测了回弹曲率的变化趋势。试验结果全部略小是由于拉伸试验过程中试件的夹持端对弯曲回弹存在一定抑制作用。

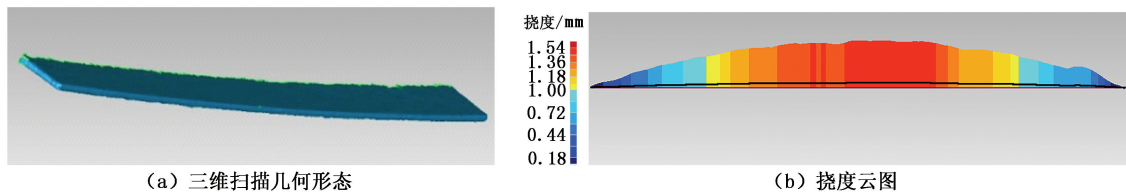


图 12 Geomagic Qualify 试件挠曲度测量

Fig. 12 Bend measurement of deflection using Geomagic Qualify

表 2 试验工况及其结果

Table 2 Experiment conditions and results

钢/铝厚度	钢比例 λ	试样编号	拉伸应变 ϵ_k	残余曲率 C/m^{-1}
1 mm/2 mm	0.333	1-1	0.01	0.347
		1-2	0.01	0.383
1.5 mm/1.5 mm	0.500	2-1	0.01	0.330
		2-2	0.01	0.327
2 mm/1 mm	0.667	3-1	0.01	0.224
		3-2	0.01	0.207

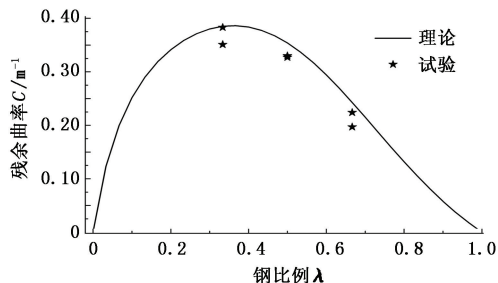


图 13 试验结果与理论解析对比

Fig. 13 Experiment results compared with analytical theory

4 结 论

(1) 双金属复合板拉伸至屈服卸载后,稳定段呈现均匀的弯曲状态,整体向较强的材料一侧发生弯曲,在对复合板进行塑性加工过程中须考虑该现象。

(2) 对于钢铝复合板,当只有铝屈服时,残余曲率随着载荷的增大而增大;当钢铝均屈服时,随着载荷的增大,残余曲率增大缓慢。

(3) 拉伸卸载后的复合板存在两个残余应力中性轴,且位置不随载荷变化。

(4) 对于双金属复合板均存在一个基本不随载荷水平变化的 λ_m 值,使拉伸回弹产生的残余曲率最大。本文中研究的钢铝复合板的 $\lambda_m=0.36$ 。

参考文献:

[1] 李龙,张心金,刘会云,等. 不锈钢复合板的生产技术及工业应用[J]. 轧钢,2013,30(3):43-47.
LI Long, ZHANG Xinjin, LIU Huiyun, et al. Production technology and application of stainless steel clad plate [J]. Steel Rolling, 2013,30(3):43-47.

[2] 马志新,胡捷,李德富,等. 层状金属复合板的研究和生产现状 [J]. 稀有金属,2003,27(6):799-803.
MA Zhixin, HU Jie, LI Defu, et al. Overview of research and manufacture of layer-metal composite plate [J]. Chinese Journal of Rare Metals,2003,27(6):799-803.

[3] 李龙,张心金,祝志超,等. 初始板厚和压下量对热轧复合钢板复合厚度比的影响 [J]. 特殊钢,2014(5):43-46.
LI Long, ZHANG Xinjin, ZHU Zhichao, et al. Effect of initial plate thickness and reduction on cladding ratio of hot-rolled clad steel plate [J]. Special Steel,2014(5):43-46.

[4] 崔铭伟,曹学文,封子艳,等. 局部腐蚀油气管道失效压力计算方法 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(6):123-128.
CUI Mingwei, CAO Xuewen, FENG Ziyang, et al. Calculation method of oil-gas pipeline failure pressure with localized corrosion [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(6):123-128.

[5] 帅健,张春娥,陈福来. 非线性有限元法用于腐蚀管道失效压力预测 [J]. 石油学报,2008,29(6):933-937.
SHUAI Jian, ZHANG Chun'e, CHEN Fulai. Prediction of failure pressure in corroded pipelines based on non-linear finite element analysis [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(6):933-937.

[6] 彭朋,陈国明,畅元江. 深水环境下腐蚀隔水管涡激疲劳可靠性评价 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(3):138-142.

- PENG Peng, CHEN Guoming, CHANG Yuanjiang. Vortex-induced fatigue reliability evaluation of deep water riser with corrosion defects[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(3):138-142.
- [7] 刘雪云,王琳,钟诗胜,等. 拱顶罐罐顶腐蚀数据的统计分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(1):150-153.
- LIU Xueyun, WANG Lin, ZHONG Shisheng, et al. Statistical analysis of corrosion data of vaulted tank roof[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(1):150-153.
- [8] 张国信,李双权. 双相不锈钢的性能及其在石化行业的应用[J]. 石油化工设备技术,2007,28(4):55-59.
- ZHANG Guoxin, LI Shuangquan. Performance of duplex stainless steel and its application in petrochemical industry[J]. Petro-chemical Equipment Technology, 2007, 28(4):55-59.
- [9] 宋文杰. 2205 双相不锈钢在克拉 2 工程中的应用技术[M]. 北京:石油工业出版社,2007.
- [10] 姜放,曹晓燕,施岱艳,等. 双相不锈钢在油气工业中的工程应用[J]. 天然气与石油,2011,29(3):58-60,75,88.
- JIANG Fang, CAO Xiaoyan, SHI Daiyan, et al. Application of duplex stainless steel in oil and gas industry[J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29(3):58-60,75,88.
- [11] CHOI S H, KIM K H, OH K H, et al. Tensile deformation behavior of stainless steel clad aluminum bilayer sheet[J]. Materials Science and Engineering, 1997, 222(2):158-165.
- [12] 刘洪伟,郭成,臧顺来. 不锈钢-铝合金复层材料拉伸力学性能分析[J]. 中国机械工程,2007,18(7):862-865.
- LIU Hongwei, GUO Cheng, ZANG Shunlai. Analysis of tension property of stainless steel-aluminum alloy clad [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(7):862-865.
- [13] HINO R, GOTO Y, YOSHIDA F, et al. Springback of sheet metal laminates in draw-bending[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139(1):341-347.
- [14] LIU L, WANG J, et al. Modeling springback of metal-polymer-metal laminates[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(3):599-604.
- [15] YILAMU K, HINO R, HAMASAKI H, et al. Air bending and springback of stainless steel clad aluminum sheet[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(2):272-278.
- [16] YU Y, ASHCROFT I A, SWALLOWE G, et al. An experimental investigation of residual stresses in an epoxy-steel laminate[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26(7):511-519.
- [17] 赵军,李硕本. 金属复合板的拉伸失稳判据[J]. 机械工程学报,1995,31(5):103-108.
- ZHAO Jun, LI Shuoben. Plastic instability of laminated sheet metal when stretched[J]. Journal of Mechanical Engineering, 1995, 31(5):103-108.
- [18] 王效岗,李乐毅,王海澜,等. 双金属复合板材辊式矫直的数值模型[J]. 材料研究学报,2014,28(4):308-313.
- WANG Xiaogang, LI Leyi, WANG Hailan, et al. Numerical modeling for roller leveling process of bimetal-plate[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28(4):308-313.
- [19] 金泉. 界面力学[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [20] 崔甫. 矫直原理与矫直机械[M]. 2版. 北京:冶金工业出版社,2002.

(编辑 沈玉英)