

文章编号 1004-924X(2012)12-2599-08

## 用数字散斑法测量铜/铝复层板拉伸变形

孙 涛<sup>1,2\*</sup>, 梁 晋<sup>1</sup>, 蔡 勇<sup>3</sup>, 王伊卿<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 四川工程职业技术学院 机电工程系, 四川 德阳 618000;  
3. 西南科技大学 制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:**提出了一种基于数字散斑相关法和双目立体视觉技术的全场三维变形测量方法, 实现了对爆炸焊接制备的铜/铝复层材料的变形测量。研究了该方法所涉及的数字散斑相关算法、三维坐标、位移和应变计算等关键技术, 借助于 VC++6.0 开发环境, 研制并开发了用于铜/铝复层板全场变形测量的试验系统及其软件。为了验证本文所述测量方法的可行性, 进行了精度验证实验和铜/铝复层板单向拉伸试验, 且对复层板拉伸试验结果与有限元软件 Abaqus 数值模拟结果进行了对比分析。结果表明: 本文方法的应变测量精度优于 0.5%, 与引伸计测得的结果基本相当; 测得的应变极值分布与有限元模拟结果很吻合; 在板料发生颈缩前, 塑性应力-应变模拟曲线与试验结果很吻合; 整个变形过程中位移-载荷模拟曲线的变化趋势与试验结果一致, 模拟得到的极限载荷的相对误差为 0.06%~2.25%。实验结果说明, 数字散斑方法是一种精确获得复层板料全场应变的有效手段。

**关键词:**数字散斑相关法; 铜/铝复层板; 变形测量; 应变分析; 数值模拟

**中图分类号:**O436.1; TG83 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122012.2599

## Measurement of deformations for copper/aluminum clad under tension with digital speckle correlation

SUN Tao<sup>1,2\*</sup>, LIANG Jin<sup>1</sup>, CAI Yong<sup>3</sup>, WANG Yi-qing<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. Department of Mechanical and Electrical Engineering,  
Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000, China;  
3. School of Manufacturing Science and Engineering,  
Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)  
\* Corresponding author, E-mail: sunmark2005@163.com

**Abstract:** To measure the deformation of copper/aluminum clad metals made by explosive welding technique, a new full-field three-dimensional deformation measurement method based on the digital speckle correlation method and binocular stereovision was proposed and implemented. The related key technologies including image correlation matching, three-dimensional coordinates, displacement and strain reconstruction were investigated. Then a deformation measurement system and corresponding software were developed based on the VC++6.0 platform. To validate the feasibility of the proposed

收稿日期: 2012-06-19; 修订日期: 2012-08-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50975219, 50975221); 江苏省科技创新项目(No. SBC201210069)

method, a precision test and a copper/aluminum clad tensile test were conducted, and the experimental data of the test and the numerical simulation using Abaqus software were compared. Experimental results show that the accuracy of strain measurement is not lower than 0.5%, very close to that of the extensometer. The extreme strain distribution based on digital speckle correlation method is coincident with that the finite element simulation well. Furthermore, the simulated curves of plastic stress-strain are in agreement with the experimental data before necking the sheet metal, and the tendency of simulated curves of displacement-load is consistent with the experimental data in the whole tensile processes. Moreover, the relative errors of simulated ultimate load are from 0.06% to 2.25%. It demonstrates that the digital speckle correlation method is an effective tool to obtain the full-field strain of sheets accurately.

**Key words:** digital speckle correlation method; copper/aluminum clad; deformation measurement; strain analysis; numerical simulation

## 1 引言

复合材料在拉伸变形过程中的应变分布会由于其组分的性能误配而与单一材料的应变分布有很大的差异<sup>[1]</sup>,因此获得高精度的全场应变是研究复层材料力学性能的基础。目前常用电阻应变片、引伸计、位移传感器、加速度传感器等器件来测量变形应变,它们具有精度高、测量结果稳定等优点,不过这些方法只能逐点测量,不能得到全场数据,且测量范围有限(一般只有 10%)。传统的光学测量方法,如光弹片法、全息干涉法、散斑照相术法、电子散斑干涉法、密栅云纹方法等,通常采用激光光源,不但光路复杂,其测量结果还易受外界振动的影响<sup>[2]</sup>。

由 Sutton 等人提出的数字散斑法(Digital Speckle Correlation Method, DSCM)<sup>[3-4]</sup>通过跟踪和匹配变形前后所采集图像的灰度信息来测量物体在各种载荷作用下表面整体的瞬时位移场和应变场。该方法具有非接触、高精度、光路简单,受环境影响小,自动化程度高等优点,并逐渐成为实验力学领域一种非常重要的光学测量手段。Cao Jian 等<sup>[5]</sup>在设计透明单向拉伸-压缩试验装置中引入数字散斑法,获得了准确的材料应变数据。M. Teaca 等<sup>[6]</sup>将数字散斑方法应用在双向拉伸试验中研究板料各向异性。A. Andersson 等<sup>[7]</sup>采用 DSCM 方法,通过深冲方式测得了低碳钢板、超高强度钢板和铝板的成形极限图。然而到目前为止,将 DSCM 方法应用到复层材料

的变形和应变测量上的报道还不多见。

铜/铝复层材料具有良好的性能,可以代替铜成为很多结构件的生产原料,如散热片、过滤板等<sup>[8]</sup>。本文结合数字图像相关法和双目立体视觉技术<sup>[9]</sup>,提出并实现了一种用于测量爆炸焊接方法制备的铜/铝复层板拉伸全场应变的方法,并将试验结果与有限元软件 Abaqus 的数值模拟结果进行对比来验证 DSCM 方法的有效性。

## 2 数字散斑法理论基础

### 2.1 数字散斑相关模型

数字散斑方法的核心是两幅图像上对应点的匹配,基本原理如图 1 所示。其中一幅作为参考图像,另外一幅作为待匹配图像,在参考图像中,取以待匹配点  $(x, y)$  为中心的  $(2M+1) \times (2M+1)$  大小的矩形子图像;在待匹配图像中,通过一定的搜索方法,并按照某一相关函数进行相关计算,寻找与选定子图像相关系数最大的以  $(x', y')$  为中心的子图像,则点  $(x', y')$  即为点  $(x, y)$  在待匹配图像中的对应点<sup>[10]</sup>。

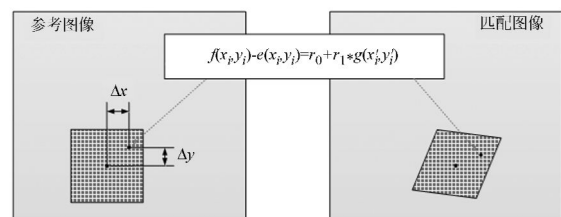


图 1 数字散斑法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of digital speckle correlation method

在进行相关匹配时,左右图像需按照某一映射函数进行计算,本文采用一阶映射函数,其中包含了旋转、平移、正应变和剪切应变等分量<sup>[11]</sup>。

$$\begin{cases} x_i' = x_0 + \Delta x + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ y_i' = y_0 + \Delta y + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $\Delta x, \Delta y$  分别是点 $(x_i, y_i)$ 与子图像中心点在 $x, y$ 方向的距离; $u, v$ 分别是子图像中心点变形后在 $x, y$ 方向的位移分量; $u_x, u_y, v_x, v_y$ 为参考子图像的一阶位移梯度。

点 $(x_i, y_i)$ 的灰度值 $f(x_i, y_i)$ 与点 $(x_i', y_i')$ 的灰度值 $g(x_i', y_i')$ 之间的关系表示为:

$$f(x_i, y_i) - e(x_i, y_i) = r_0 + r_1 * g(x_i', y_i'), \quad (2)$$

式中: $e(x_i, y_i)$ 表示噪声部分, $r_0, r_1$ 用于补偿由于光照引起的灰度差异。

假设子图像中有 $n$ 个像素点,像素灰度受到独立同分布的噪声干扰,对应的参考子图像和变形子图像间的相似程度通过下式衡量:

$$C_{SSD}(p) = \sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i) - r_0 - r_1 * g(x_i', y_i')]^2, \quad (3)$$

式中: $p = [u, u_x, u_y, v, v_x, v_y, r_0, r_1]$ 为相关参数向量。式(3)为非线性方程,可利用最小二乘法迭代求解,但需要给出未知数的初值。通常 $u, v$ 通过粗匹配获得,其它的未知数为:

$$u_x = u_y = v_x = v_y = r_0 = 0; r_1 = 1. \quad (4)$$

然而,误差较大的初值不但会降低最小二乘迭代算法的计算速度,还有可能得到错误的收敛结果。因此,本文借鉴文献[12]的种子点匹配方法计算初值,如图 2 所示。具体方法可参考文献[12],本文不再赘述。

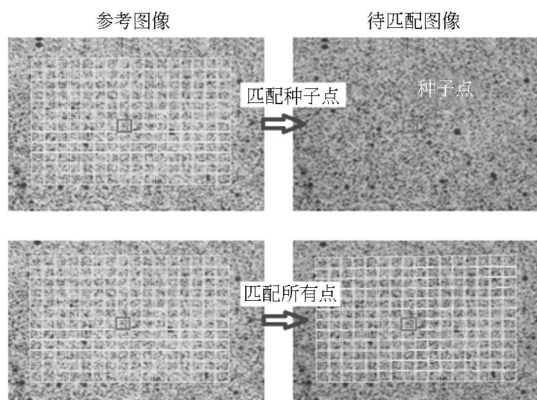


图 2 基于种子点的相关匹配

Fig. 2 Correlation matching based on seed point

匹配完成后,对于任意一个变形状态的左右两幅子图像中心点,利用三角测量原理来重建其对应的三维空间坐标。

### 2.2 应变场计算

将所有状态进行三维重建后,以状态 1(未变形状态)为参考状态,变形过程中任意一个状态的三维点坐标减去参考状态的三维点坐标就得到该状态的三维位移。

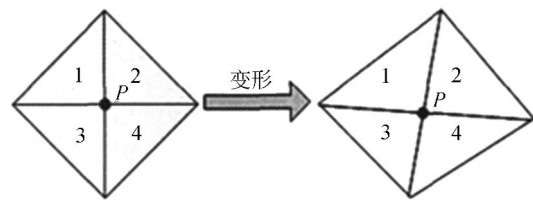


图 3 三维应变计算

Fig. 3 Calculation of three dimensional strain

如图 3 所示,为了求取点 $P$ 变形后的应变,在变形前的参考状态中,利用点 $P$ 周围的 4 个点与点 $P$ 建立 4 个三角形。对于每一个三角形,根据其变形前后的边长变化可以获得基于柯西-格林张量的拉格朗日应变。然后,取 4 个三角形的应变平均值作为点 $P$ 的应变。

### 3 试验方法

试验所用的铜/铝(T2 紫铜/1060 纯铝)复层板由宝鸡申奥金属材料有限公司提供,经爆炸焊接而成,为消除焊接应力对该复层板进行了适当热处理<sup>[13]</sup>。本文采用了 3 个经线切割和砂纸打磨而成的国标规定的比例试样,尺寸如图 4 所示(虚线框内为计算区域),试样铜/铝厚度比为 0.54,复层板总厚 1 mm。试样表面喷涂黑白哑光漆形成黑白相间的随机分布图案,作为数字图像相关法跟踪被测件表面变形的散斑特征。

本文根据数字散斑相关算法和变形测量理论,基于 Windows XP 环境,利用 VC++6.0 研制开发了用于复层板料变形测量的计算机软件 XJ-TUDIC/VS,如图 5 所示,并利用该软件对试验数据进行测量和分析。试验装置如图 6 所示,试验机为瑞格尔公司制造的 RGM4100 型电子万能材料试验机。试验流程如图 7 所示,流程中的相机

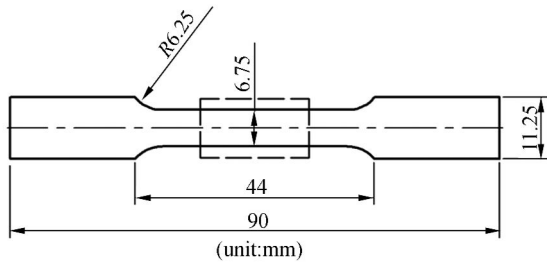


图 4 拉伸试样

Fig. 4 Tensile sample

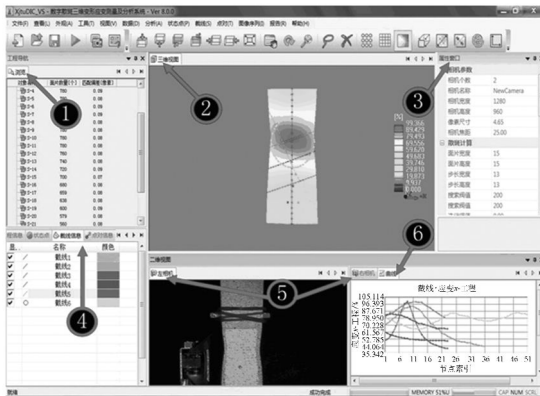


图 5 复层板料变形测量软件

Fig. 5 Software for deformation measurement of clad-metal sheet

标定可参考文献[14]。

为了验证 XJTUDIC/VS 系统在材料力学性能试验方面的可行性,在图 6 所示的试验装置上进行了钢试件的标准拉伸实验,并在试件表面布置引伸计用于精度的验证和对比。试件材料为 Q235 钢,厚度为 2 mm,通过线切割加工而成;引伸计标距为 50 mm,应变测量精度达到 0.5%,可测量的最大应变为 50%。

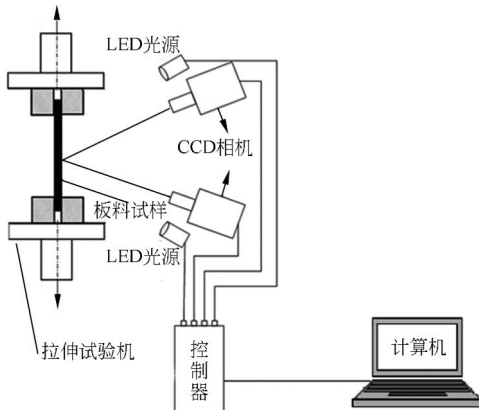


图 6 基于数字散斑相关法的试验装置简图

Fig. 6 Diagram of experimental setup based on DSCM

为了统一试验过程和有限元分析过程的坐标,本文规定试样的拉伸方向为  $x$  轴,垂直于拉伸方向的试样宽度方向为  $y$  轴,试样的厚度方向为  $z$  轴,然后对铜/铝复层板进行了整体应变分析和有限元建模。力学参数检测和有限元分析结果是图 4 所示矩形虚线框内试样计算区域的多点平均值。

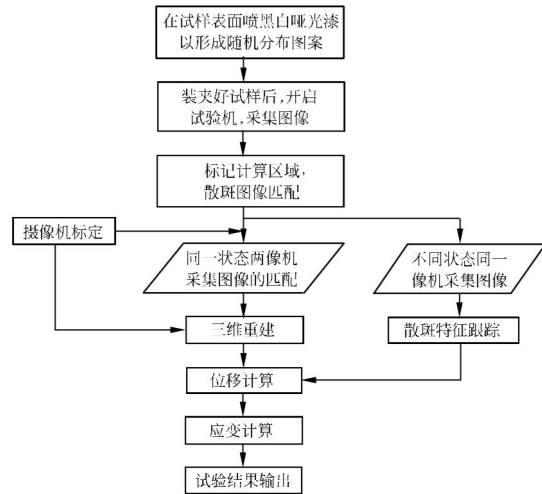


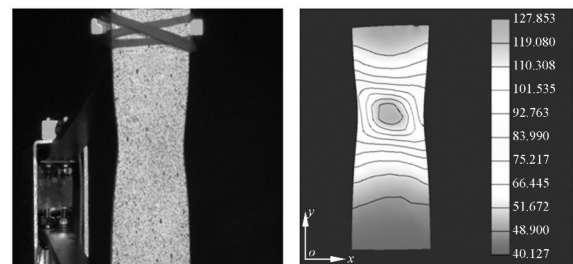
图 7 基于数字散斑相关法的拉伸试验流程图

Fig. 7 Flow chart of tensile test based on DSCM

## 4 试验结果与分析

### 4.1 验证试验结果

图 8 为验证试验中钢试件在被拉伸到缩颈时所采集的图像及软件计算结果。从图中可以看出,试件被拉伸到缩颈时,缩颈区的应变最大。图 9 为钢制薄板试件拉伸试验中,在不同变形状态下分别利用引伸计和 XJTUDIC/VS 系统测得的试件表面同一变形区域的平均应变的拟合结果。



(a) 散斑图

(b) 物表应变场

(a) Speckle image

(b) Surface strain field

图 8 三维变形场

Fig. 8 Three-dimensional deformation field

拟合直线方程为  $y=0.9961x+0.005$ ,说明两种方法之间的偏差约为 0.4%,因为试验所用引伸计的应变测量精度为 0.5%,所以 XJTUDIC/VS 系统的应变测量精度应不低于 0.5%。误差产生的原因主要包括:(1)引伸计在拉伸过程中相对试件有细微打滑现象;(2)两种方法本身都存在一定的测量误差。试验表明,本文提出的测量方法能够重建出载荷作用下试件表面的变形场,且测量结果能直观显示。

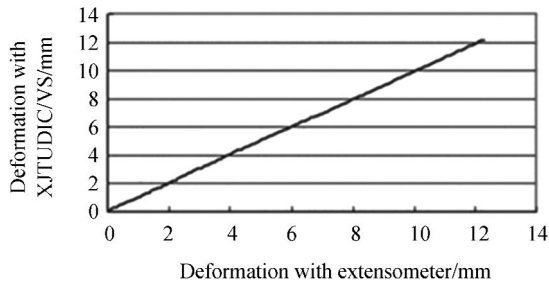


图 9 本文方法与引伸计测量结果对比

Fig.9 Fitting line of test results between proposed method and extensometer

4.2 板料应变

图 10 是基于 DSCM 方法测量得到的铜/铝复层板的真实应力-应变曲线,表 1 为试验得到的材料力学性能参数。由图 10 可知,3 个试样在初始弹性阶段的真实应力-应变曲线基本上重合,达到各自屈服点  $\sigma_{0.2}$  后开始分离,且随着真实应变的增加,相同应变水平下真实应力的差异也随之变大。由表 1 可知,弹性变形阶段的弹性模量  $E$  差异比较小,塑性变形阶段的屈服强度  $\sigma_{0.2}$  和抗拉强度  $\sigma_b$  差异比较大,但反映塑性性能指标的断

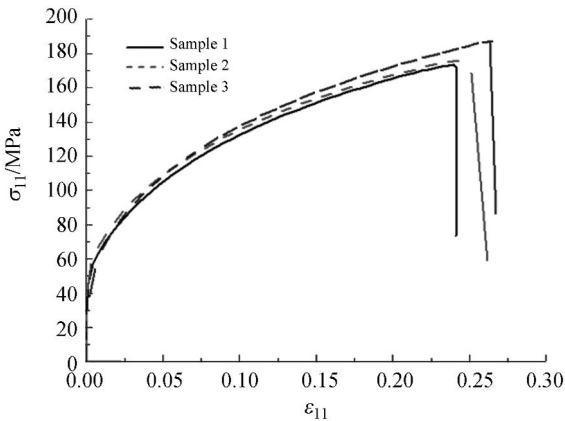


图 10 真实应力-应变曲线

Fig.10 True stress-strain curves

裂延伸率  $\delta$  差异却比较小。力学性能参数出现差异的原因可能与铜/铝复层板的制造工艺有关,现有的爆炸焊接工艺还不能保证复层板界面各部分的力学性能参数一致<sup>[15]</sup>,这也从侧面印证了复层板料应变分布比单一材料复杂。

表 1 铜/铝复层板力学性能

Tab.1 Mechanical properties of copper/aluminum clad

试样编号	弹性模量 E/GPa	泊松比 $\mu$	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	断裂延伸率 $\delta$ /%
1	5.387	0.288	73.831	173.216	11.88
2	5.229	0.273	85.966	175.954	11.50
3	5.167	0.269	66.979	187.113	12.25
均值	5.261	0.277	75.592	178.781	11.88

4.3 有限元建模

采用有限元方法对拉伸过程进行模拟,以验证试验结果的有效性<sup>[16-17]</sup>。本文采用有限元分析软件 Abaqus 6.10,该软件是国际上最先进的大型通用有限元计算分析软件之一,具有强大的计算功能和广泛的模拟性能,拥有大量不同种类的单元模型、材料模型和分析工程等,可以处理高度非线性问题。

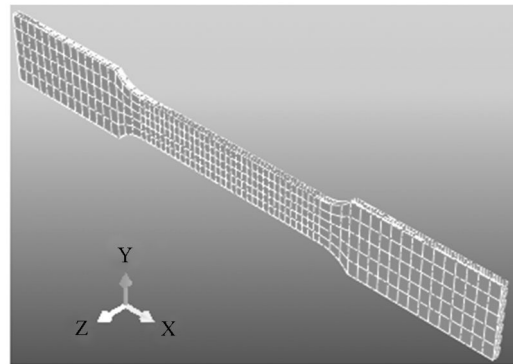


图 11 铜/铝复层板有限元模型

Fig.11 Finite element model of copper/aluminum clad

在 Abaqus 中进行弹塑性分析时,同一个模型中可以混合使用弹塑性材料和线弹性材料。本文定义线弹性材料时,输入的弹性模量  $E$  和泊松比是表 1 中 3 个试样的平均值;而定义弹塑性材料时,输入的是各试样的真实应力和塑性应变。为得到比较规则的网格,利用实体划分技术将试件划分为 5 个部分,然后根据分析精度要求设置不同的网格密度,在厚度方向上划分了 5 层网格,

整个实体模型划分网格后得到的有限元模型如图 11 所示。所选单元类型为 20 节点二次减缩积分实体单元(C3D20R),划分网格后单元数是 1 700 个,节点数为 9 072 个。在加载环节,对板料一端进行全约束,对另外一端施加位移载荷。

4.4 试验结果与有限元模拟结果对比

轴向真实应变  $\epsilon_{11}$  是由轴向塑性应变  $\epsilon_{11}^p$  和轴向弹性应变  $\epsilon_{11}^e$  两部分构成的,其表达式为:

$$\epsilon_{11}^p = |\epsilon_{11}| - |\epsilon_{11}^e| = |\epsilon_{11}| - \frac{|\sigma_{11}|}{E} \quad (5)$$

在 Abaqus 分析结果中,式(5)中的轴向真实应力  $\sigma_{11}$  对应的是 Mises 应力,轴向真实应变  $\epsilon_{11}$  在几何非线性问题中对应的是对数应变,轴向塑性应变  $\epsilon_{11}^p$  对应的是等效塑性应变。图 12 的曲线就是根据式(5)绘制的,但只考虑了弹塑性变形部分。由图 12 可知,在板料发生颈缩之前,3 个试样的塑性应力-应变模拟曲线与试验结果吻合很好;由图 13 可知,有限元模拟应变分布与基于数字散斑方法得到的应变结果吻合得比较好,尤其是应变极值区域,这也进一步说明本文方法的有效性。由表 2 可知,模拟得到的抗拉强度小于试验结果,相对误差为 0.62%~0.78%。

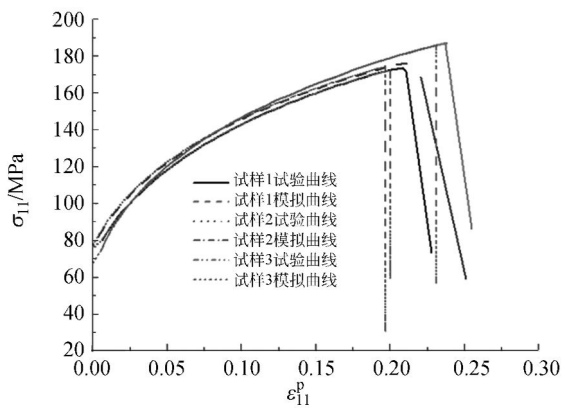


图 12 塑性应力-应变曲线

Fig. 12 Plastic stress-strain curves

表 2 抗拉强度

Tab.2 Tensile strength

试样	抗拉强度/MPa		相对误差 (%)
	试验结果	模拟结果	
1	173.216	172.150	0.62
2	175.954	174.584	0.78
3	187.113	185.947	0.62

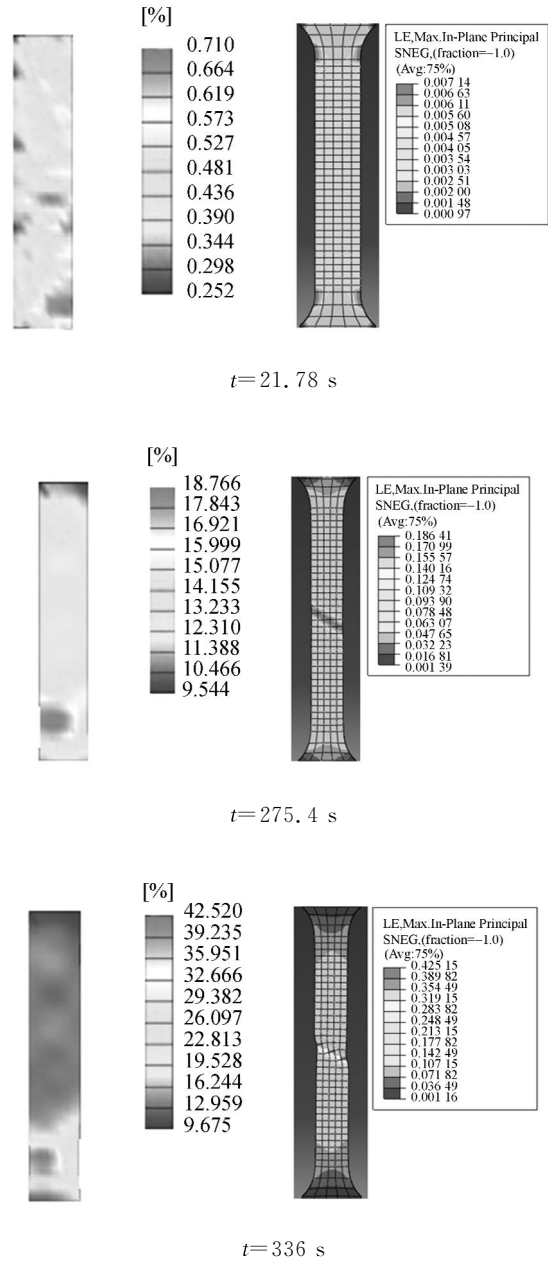


图 13 基于数字散斑法的试件应变分布图和有限元模拟的应变分布图

Fig. 13 Strain distributions of samples based on DSCM and FE simulation

表 3 极限载荷

Tab.3 Ultimate loads

试样	极限载荷/N		相对误差 (%)
	试验结果	模拟结果	
1	922.16	922.73	0.06
2	931.48	945.46	1.50
3	960.34	981.90	2.25

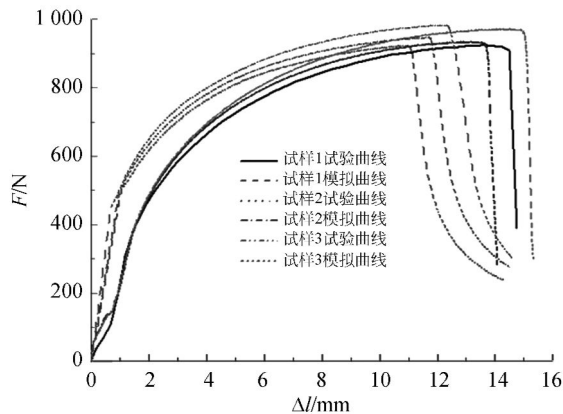


图 14 位移-载荷曲线

Fig. 14 Displacement-load curves

由图 14 可知,位移-载荷模拟曲线与试验结果的变化趋势一致,且 3 个试样的模拟曲线在整个变化过程中都位于试验曲线上方,这说明相同位移下模拟得到的载荷要大于实际载荷;并且模拟结果比试验结果更快达到极限载荷,这也意味着模拟过程比试验过程更早达到颈缩阶段。由表 3 可知,模拟得到的极限载荷高于试验结果,相对误差为 0.06%~2.25%。

综合图 12~图 14 和表 2、表 3 的结果可知,数字散斑相关方法测量复层板料的变形和应变是

#### 参考文献:

- [1] 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 H W, GUO CH, ZANG SH L. Analysis of tension property of stainless steel-aluminum alloy clad [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18 (7):862-865. (in Chinese)
- [2] 潘兵,吴大方,高镇同. 基于数字图像相关方法的非接触高温热变形测量系统[J]. 航空学报,2010, 31 (10):1960-1967.  
PAN B, WU D F, GAO ZH T. A non-contact high temperature deformation measuring system based on digital image correlation technique [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31 (10): 1960-1967. (in Chinese)
- [3] CHU T C, RANSON W F, SUTTON M A, et al. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. *Exp. Mech.*, 1985, 25(3):232-245.
- [4] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging

有效的,且精度很高。随着图像采集部件性能的提高,三维散斑测量技术的发展以及测量设备和环境的改善,采用本文方法能够获取更高的变形测量精度。

## 5 结 论

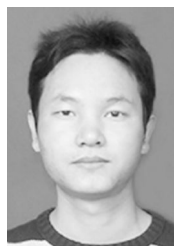
本文针对铜/铝复层板料变形测量的需求,围绕数字散斑相关技术进行了深入研究。利用研制开发的数字散斑全场变形测量系统 XJTUDIC/VS 对铜/铝复层板进行了精度验证和实际测量试验,并利用有限元软件 Abaqus 数值模拟结果对 DSCM 方法进行了有效性验证。实验结果表明:本文方法的应变测量精度优于 0.5%,与引伸计得到的结果基本相当,能够简单、快速、精确地得到铜/铝复层板料在拉伸变形中的全场应变,且应变极值分布与有限元模拟结果吻合很好;在板料发生颈缩前,塑性应力-应变模拟曲线与试验结果吻合,但得到的抗拉强度值较小,相较于试验结果其误差为 0.62%~0.78%;位移-载荷模拟曲线的变化趋势与试验结果一致,但得到的载荷值大于试验结果,并比试验结果更快达到极限载荷,相对于试验结果其误差为 0.06%~2.25%。

techniques in experimental stress analysis [J]. *Opt. Eng.*, 1982, 21(3):427-431.

- [5] CAO J, LEE W, CHENG H S, et al. Experimental and numerical investigation of combined isotropic-kinematic hardening behavior of sheet metals [J]. *International Journal of Plasticity*, 2009, 25:942-972.
- [6] TEACA M, CHARPENTIER I, MARTINY M, et al. Identification of sheet metal plastic anisotropy using heterogeneous biaxial tensile tests [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010, 52:572-580.
- [7] ANDERSSON A, THILDERKVIST P, LILJEN-GREN M. Experimental evaluation of strains in the tension-compression using a new tool geometry, X-Die [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 200(I-ID):1-11.
- [8] TSENG H C, HUNG C H, HUANG C C. An analysis of the formability of aluminum/copper clad metals with different thicknesses by the finite element method and experiment [J]. *Int. J. Adv.*

- Manuf. Technol.*, 2010, 49:1029-1036.
- [9] 刘建伟, 梁晋, 梁新合, 等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1):126-134.  
LIU J W, LIANG J, LIANG X H, *et al.*. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):126-134. (in Chinese)
- [10] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10):2244-2253.  
TANG ZH Z, LIANG J, XIAO ZH ZH, *et al.*. Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2244-2253. (in Chinese)
- [11] 孙伟, 何小元, Quan C, 等. 基于数字图像相关的三维刚体位移测量方法[J]. 光学学报, 2008, 28(5):895-901.  
SUN W, HE X Y, QUAN C, *et al.*. Three-dimensional rigid body displacement measurement based on digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5):895-901. (in Chinese)
- [12] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 大变形测量数字图像的种子点匹配方法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(11):51-55.  
TANG ZH Z, LIANG J, XIAO ZH ZH, *et al.*. Digital image correlation method based on seed point for large deformation measurement [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(11):51-55. (in Chinese)
- [13] LEE J E, BAE D H, CHUNG W S, *et al.*. Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187-188:546-549.
- [14] 胡浩, 梁晋, 唐正宗, 等. 大视场多像机视频测量系统的全局标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2):369-378.  
HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Global calibration for multi-camera videogrammetric system with large-scale field-of-view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):369-378. (in Chinese)
- [15] 黄杏利, 汪洋, 徐鹏, 等. 铝/钛/钢爆炸复合板性能研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(16):103-105.  
HUANG X L, WANG Y, XU P, *et al.*. Research on property of aluminum/titanium/steel explosive clad plate [J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(16):103-105. (in Chinese)
- [16] CHEN Z X, LIANG J, GUO C, *et al.*. Application of the speckle technique for three-dimensional deformation measurement [J]. *Opt. Eng.*, 2012, 51(1):013604-1-013604-7.
- [17] CABEZAS E E, CELENTANO D J. Experimental and numerical analysis of the tensile test using sheet specimens [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2004, 40:555-575.

#### 作者简介:



孙涛(1982-),男,河南南阳人,博士研究生,讲师,2009年于昆明理工大学获得硕士学位,主要从事三维光学测量、有限元模拟方面的研究。E-mail: sunmark2005@163.com



蔡勇(1962-),男,贵州纳雍人,博士,教授,2006年于西南交通大学获得工学博士学位,现为西南科技大学制造科学与工程学院院长,主要从事计算机图像处理、计算机控制等方面的研究。E-mail: caiy@swust.edu.cn



王伊卿(1964-),男,陕西西安人,博士,副教授,2001年于西安交通大学获得博士学位,主要从事机械制造与设计、焊接技术、板料成型技术、优化设计等方面的研究。E-mail: wyq1102@163.com

#### 导师简介:



梁晋(1968-),男,河南郑州人,博士,教授,博士生导师,1990年、1993年、2001年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为西安交通大学机械工程学院模具所所长,主要从事机电控制、机器视觉等方面的研究。E-mail: liangjin@mail.xjtu.edu.cn