



数字图像相关方法检测铜/铝复层材料应变研究

李艳芹 郭照灿 张德海

Strain detection of copper/aluminum clad material based on digital image correlation method

LI Yanqin, GUO Zhaocan, ZHANG Dehai

引用本文:

李艳芹, 郭照灿, 张德海. 数字图像相关方法检测铜/铝复层材料应变研究[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 586–594. DOI: 10.5768/JAO202344.0303003

LI Yanqin, GUO Zhaocan, ZHANG Dehai. Strain detection of copper/aluminum clad material based on digital image correlation method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(3): 586–594. DOI: 10.5768/JAO202344.0303003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0303003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于数字散斑相关法的双金属复层板应变光学检测问题研究](#)

Strain optical detection technology applied for bi-metal clad plate using digital speckle correlation method

应用光学. 2018, 39(6): 873–879 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0603004>

[用于铝板缺陷无损检测的激光超声有限元模拟研究](#)

Finite element simulation in laser ultrasound for non-destructive testing of aluminum defect materials

应用光学. 2019, 40(1): 150–156 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107004>

[激光辐照碲镉汞平面探测器的热应力损伤研究](#)

Thermal-stress damage of MCT infrared focal plane array detector caused by laser irradiation

应用光学. 2018, 39(5): 751–756 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0506003>

[基于数字图像相关技术的隐框玻璃幕墙抗风压性能评估](#)

Evaluation of wind resistance performance for hidden frame glass curtain walls based on digital image correlation technique

应用光学. 2020, 41(6): 1197–1206 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0602003>

[基于有限元分析的小口径离轴抛物面反射镜支撑结构设计](#)

Design of support structure for small caliber off-axis parabolic reflector based on finite element analysis

应用光学. 2019, 40(6): 1160–1166 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0605004>

[激光超声检测带过渡圆角平板表面缺陷的数值研究](#)

Numerical study on surface defects detection of plate with transition fillet by laser ultrasound

应用光学. 2020, 41(1): 214–219 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0107005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2023) 03-0586-09

数字图像相关方法检测铜/铝复层材料应变研究

李艳芹¹, 郭照灿², 张德海¹

(1. 郑州轻工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 宇通客车股份有限公司, 河南 郑州 450016)

摘要: 针对传统应变检测方法中存在的操作过程复杂、无法实现实时测量和受环境影响较大等问题, 采用数字图像相关 (DIC) 方法对铜/铝复层板及其组分材料拉伸过程中的应变数值进行实时测量, 将该测量结果与拉伸机获得结果、有限元模拟测量结果相互对比, 结果表明: 基于 DIC 方法和拉伸试验所得铜板、铝板及铜/铝复层板的应变曲线很接近; DIC 测量所得主应变与有限元模拟主应变具有较高一致性, 且表面应变分布和最大主应变基本相同, 其应变相差最大为 0.442%, 最小为 0.008%; 有限元模拟所得应变差值变化较大, 最大变化为 4.950%, DIC 方法所得应变差值变化较小, 最大变化为 0.693%。在该基础上, 通过引入应变差值来对比研究 DIC 方法和有限元方法所得结果精度, 证明了 DIC 方法用于铜/铝复层板拉伸应变检测的可行性和优越性。

关键词: 铜/铝复层材料; 数字图像相关法; 有限元; 应变检测

中图分类号: TN873

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202344.0303003](https://doi.org/10.5768/JAO202344.0303003)

Strain detection of copper/aluminum clad material based on digital image correlation method

LI Yanqin¹, GUO Zhaocan², ZHANG Dehai¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. Yutong Bus Co.,Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: In view of the problems existing in the traditional strain detection methods, such as complex operation process, inability to realize real-time measurement and great influence by the environment, the digital image correlation (DIC) method was used to measure the strain values of copper/aluminum clad plate and its components during the tensile process, and the measured results were compared with those obtained by the stretching machine and the finite element simulation measurement. The results show that the strain curves of Cu plate, Al plate and Cu/Al clad plate obtained by DIC method and tensile test are very similar. The principal strain measured by DIC method has a high consistency with that simulated by finite element method, and the surface strain distribution is basically the same as the maximum principal strain, with a maximum difference of 0.442 % and a minimum of 0.008 %. The strain differences obtained by finite element simulation has a large variation with the maximum variation of 4.950 %, while that obtained by DIC method has a small variation with the maximum variation of 0.693 %. On this basis, the precision of DIC method and finite element method was studied by introducing strain differences, which verified the feasibility and superiority of the DIC method for the tensile strain detection of Cu/Al clad plate.

Key words: copper/aluminum clad material; digital image correlation method; finite element method; strain detection

收稿日期: 2022-06-20; 修回日期: 2023-04-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51975324); 河南省科技攻关项目 (202102210087); 江苏盐城市创新领军人才项目 (盐委 [2020] 40 号)

作者简介: 李艳芹 (1974—), 女, 研究生, 高级工程师, 主要从事先进材料成形过程控制技术研究。E-mail: yqli@zzuli.edu.cn

通信作者: 张德海 (1973—), 男, 教授, 博士, 主要从事先进材料成形过程控制、光学检测及其交叉学科研究。

E-mail: zhangdehai0318@163.com

引言

近年来,随着铜资源的价格持续上涨,对企业制造成本的控制产生了极大影响,同时也对廉价替代材料的制备提出了新的挑战^[1-2]。铜/铝复层材料是业界公认的铜材料替代品,它结合了铜、铝两种金属的优点,具有电导率强、耐蚀性好、性价比高等特点,得到了国内外学者的广泛关注与研究。虽然铜/铝复层材料的相关研究较多,但关于该材料静态拉伸力学性能的研究较少。另外,在拉伸力学性能研究中,传统应变检测方法(引伸计、应变电测、云纹干涉等)长期存在操作过程复杂、无法实现实时测量和受环境影响较大等问题^[3],限制了铜/铝复层材料的进一步发展与应用。

数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法是一种非接触式的可用于全场变形测量的方法,能在不改变被测试样力学性能的情况下对试样的变形进行测量,具有试验设备及测量过程简单、抗干扰能力强、适用测量范围广泛等突出优点,是试验力学领域中一种重要的光学测量手段^[4-5]。Luo 等人首次将 DIC 方法应用于 304L 不锈钢的位移、应变场测量^[6],开启了该方法在不锈钢材料应变测量方面的应用,但没有应用于双层金属板料的测量。陈志新等人通过 DIC 方法和有限元方法研究了 Q235B 钢、45 钢和 T8 钢拉伸过程中颈缩处的应变及应变分布^[7],但缺乏对全局部位的三维变形检测。Caballero 等人采用 DIC 方法对喷丸强化处理的镍基高温合金加载过程中的局部化应变进行了研究^[8],但对应变结果的可视化研究未曾涉足。王潇舷等人采用 DIC 技术和空心钢筋测试了混凝土表面及钢筋表面的应变,并基于弹性力学推导了钢筋锈胀应力模型^[9],但在模型预测方面缺乏基础理论支撑。Merezko 等人通过 DIC 方法对高辐照不锈钢的宏观应变进行了研究^[10],但在微观领域研究方面没有涉足。邹田春等人利用 DIC 方法研究了钛合金-芳纶纤维复合材料单搭接接头拉伸载荷下的应变与失效形式^[11],但是对弯曲状态下的应变没有研究。上述研究中 DIC 方法^[12-13]集中应用在单一材料的应变检测,应用在复层材料尤其是铜/铝复层材料的应变检测研究在国内还未见报道。因此采用 DIC 方法^[14]对铜/铝复层板及其组分材料拉伸过程中的全场应变进行测量,具有重要的研究价值和理论意义。

本文采用 DIC 方法^[15]对铜/铝复层板及其组分材料拉伸过程中的全场应变进行测量,并将测量结果、拉伸试验结果和有限元模拟结果对比,通过引入应变差值研究 DIC 方法和有限元方法获得理想结果。结果表明:基于 DIC 方法和拉伸试验所得铜板、铝板及铜/铝复层板的应变曲线很接近;DIC 测量所得主应变与有限元模拟主应变具有较高一致性,且表面应变分布和最大主应变基本相同,其应变相差最大为 0.442%,最小为 0.008%;有限元模拟所得应变差值变化较大,最大变化为 4.950%,DIC 方法所得应变差值变化较小,最大变化为 0.693%,证明 DIC 方法用于铜/铝复层板拉伸应变检测的可行性。

1 实验

1.1 试验材料

试验用铜/铝复层板由陕西钛程金属复合材料有限公司生产,爆炸焊接后轧制而成,其组分材料分别为 T2 纯铜和 1060 纯铝,化学成分如表 1、表 2 所示。

表 1 T2 纯铜化学成分

Table 1 Chemical composition of T2 pure copper

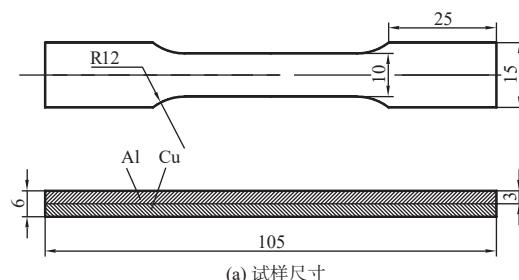
Fe	Zn	S	P	Si	Ag	Cu
0.012	0.008	0.007	0.009	0.006	0.009	余量

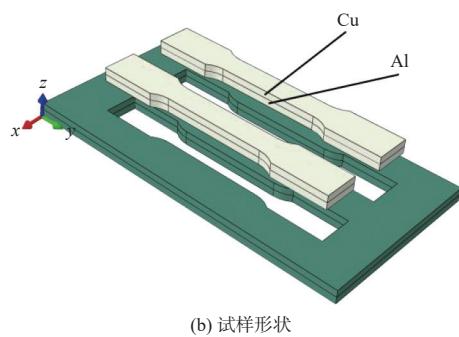
表 2 1060 纯铝化学成分

Table 2 Chemical composition of 1060 pure aluminum

Si	Fe	Mn	Zn	Cu	Mg	Al
0.25	0.35	0.03	0.05	0.05	0.03	余量

为研究铜/铝复层板铜面和铝面拉伸过程中的应变变化,参照 GB/T 228.1,采用线切割的方法在铜/铝复层板上截取 2 个拉伸试样,试样尺寸及形状如图 1 所示。利用砂纸对拉伸试样进行打磨,并在其表面喷涂黑白哑光漆,制作散斑图案。喷涂散斑后的拉伸试样如图 2 所示。





(b) 试样形状

图 1 拉伸试样尺寸及形状

Fig. 1 Size and shape of tensile sample

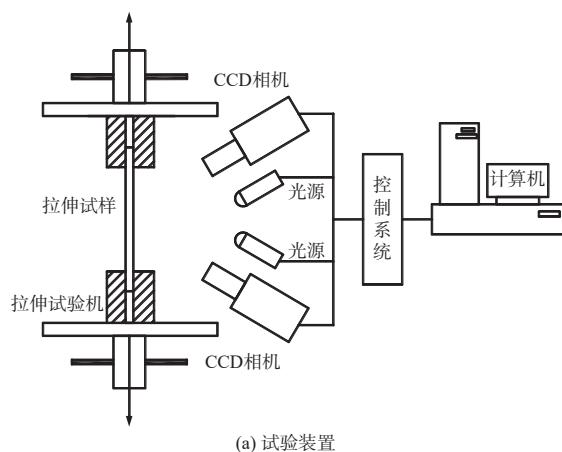


图 2 喷涂散斑的拉伸试样

Fig. 2 Tensile sample sprayed with speckles

1.2 试验装置

DIC 试验装置如图 3 所示。



(a) 试验装置

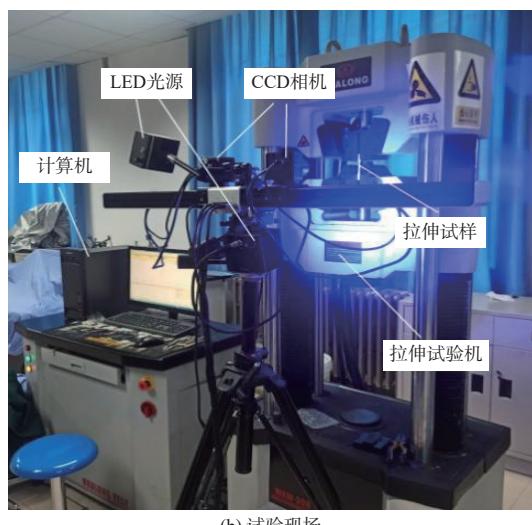


图 3 DIC 试验装置

Fig. 3 Test device of DIC

试验将 XTDIC 非接触全场应变测量系统与 WAW-300 拉伸试验机相结合, 对铜板、铝板及铜/铝复层板拉伸过程中的应变进行测量。该应变测量系统主要配置为: 2 个分辨率为 1600×1200 像素的工业 CCD 相机、2 个焦距为 50 mm 的 VS-5018M 镜头、2 个 AFT-BL100 蓝色 LED 光源、标定板、三脚架等。

2 有限元模拟

有限元模拟包括前处理、分析运算和后处理 3 个阶段。在前处理中建立铜板、铝板及铜/铝复层板拉伸试样的有限元模型, 并定义 3 种材料的弹塑性参数, 其中弹性参数输入材料的弹性模量 E 和泊松比 μ , 塑性参数输入材料的 Johnson-Cook 模型参数测定值。在分析运算阶段, 通过定义内聚力单元来表征铜/铝复层板界面间的损伤、演化过程, 并将试样模型一端固定, 另一端施加位移载荷, 使其沿 y 方向均匀拉伸。在对拉伸试样模型进行网格划分时, 采用 C3D8R 单元类型, 试样划分成 5 005 个单元和 6 942 个节点, 其网格模型如图 4 所示。在后处理中显示分析运算的结果, 如应力、应变云图及应力-应变曲线图等。

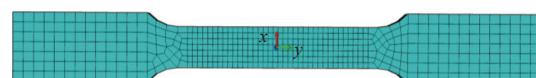


图 4 拉伸试样网格模型

Fig. 4 Mesh model of tensile sample

3 实验结果与分析

3.1 DIC 测量所得位移和应变

在 XTDIC 应变测量系统中截取试样标距段的未变形散斑图像, 定义散斑图像的左下角为坐标原点, 宽度方向为 x 轴正方向, 长度方向(拉伸方向)为 y 轴正方向, 并选取上端中点 A 和下端中点 B 作为观测点, 将两点连线作为计算区域, 如图 5 所示。通过 DIC 方法对变形前后的散斑图像进行灰度特征匹配和相关计算, 得出试样拉伸过程中不同方向的位移和应变。铜板、铝板及铜/铝复层板不同方向的位移、应变曲线如图 6 所示。



图 5 散斑图像坐标及观测点

Fig. 5 Speckle image coordinate and observation points

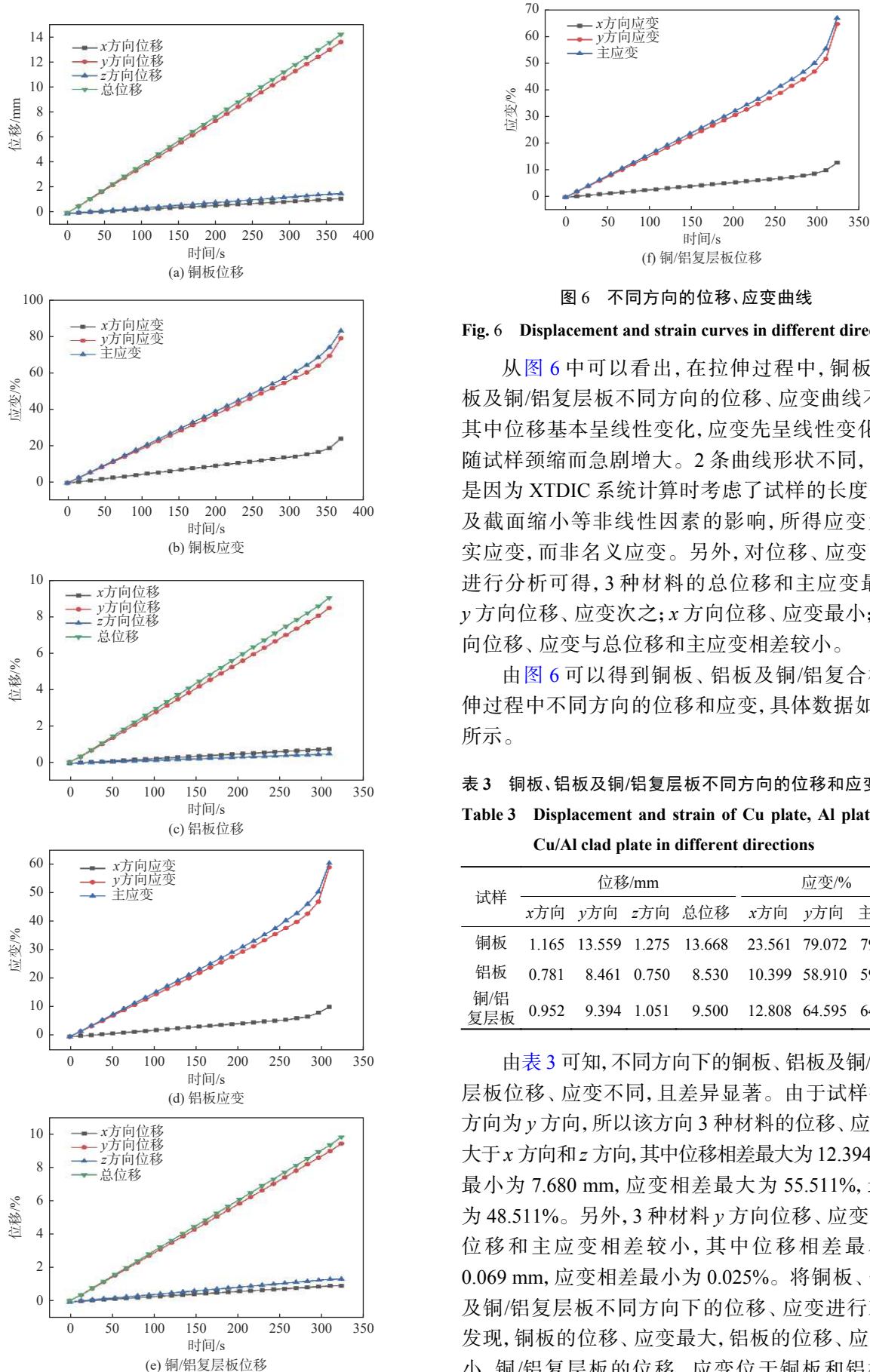


图 6 不同方向的位移、应变曲线

Fig. 6 Displacement and strain curves in different directions

从图 6 中可以看出, 在拉伸过程中, 铜板、铝板及铜/铝复层板不同方向的位移、应变曲线不同, 其中位移基本呈线性变化, 应变先呈线性变化, 后随试样颈缩而急剧增大。2 条曲线形状不同, 主要是因为 XTDIC 系统计算时考虑了试样的长度伸长及截面缩小等非线性因素的影响, 所得应变为真实应变, 而非名义应变。另外, 对位移、应变曲线进行分析可得, 3 种材料的总位移和主应变最大, y 方向位移、应变次之; x 方向位移、应变最小; y 方向位移、应变与总位移和主应变相差较小。

由图 6 可以得到铜板、铝板及铜/铝复合板拉伸过程中不同方向的位移和应变, 具体数据如表 3 所示。

表 3 铜板、铝板及铜/铝复层板不同方向的位移和应变

Table 3 Displacement and strain of Cu plate, Al plate and Cu/Al clad plate in different directions

试样	位移/mm				应变/%		
	x 方向	y 方向	z 方向	总位移	x 方向	y 方向	主应变
铜板	1.165	13.559	1.275	13.668	23.561	79.072	79.322
铝板	0.781	8.461	0.750	8.530	10.399	58.910	59.263
铜/铝复层板	0.952	9.394	1.051	9.500	12.808	64.595	64.620

由表 3 可知, 不同方向下的铜板、铝板及铜/铝复层板位移、应变不同, 且差异显著。由于试样拉伸方向为 y 方向, 所以该方向 3 种材料的位移、应变远大于 x 方向和 z 方向, 其中位移相差最大为 12.394 mm, 最小为 7.680 mm, 应变相差最大为 55.511%, 最小为 48.511%。另外, 3 种材料 y 方向位移、应变与总位移和主应变相差较小, 其中位移相差最小为 0.069 mm, 应变相差最小为 0.025%。将铜板、铝板及铜/铝复层板不同方向下的位移、应变进行对比发现, 铜板的位移、应变最大, 铝板的位移、应变最小, 铜/铝复层板的位移、应变位于铜板和铝板之

间,且与铜板的位移、应变相差较大,与铝板的位移、应变相差较小。

由于试样的拉伸方向为 y 方向,所以该方向的位移、应变能较好反映试样拉伸过程中的位移、应变变化,而 x 方向和 z 方向的位移、应变相对较小,影响较小,可以不予考虑。为进一步研究铜/铝复层板与其组分材料间的位移、应变关系,将铜板、铝板及铜/铝复层板 y 方向的位移和应变分别绘制在同一图上,如图 7 所示。

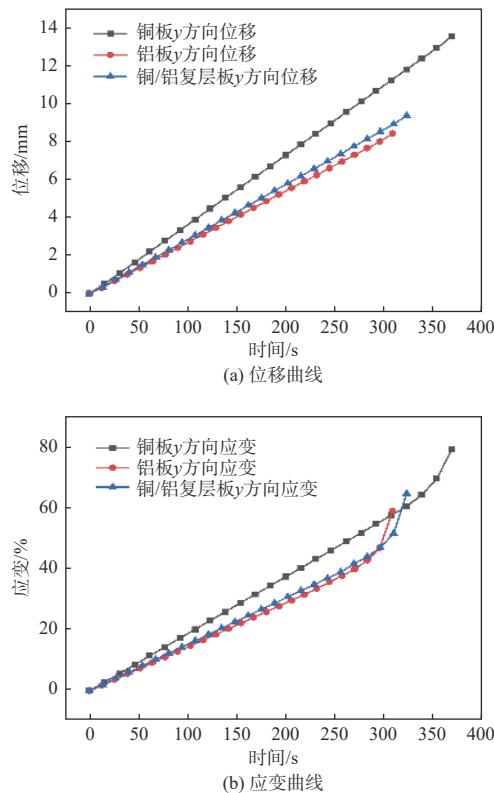


图 7 铜板、铝板及铜/铝复层板 y 方向的位移、应变曲线

Fig. 7 Displacement and strain curves of Cu plate, Al plate and Cu/Al clad plate in Y direction

在图 7 试样的整个拉伸过程中,铜板沿 y 方向位移始终大于铝板和铜/铝复层板,铜/铝复层板在 y 方向位移始终位于铜板和铝板之间,且与铝板位移曲线较为接近。对应变曲线进行分析可得,在拉伸前期,铜板 y 方向应变最大,铜/铝复层板次之,铝板最小。当试样发生颈缩将要断裂时,3 种材料的应变发生骤增,但断裂时刻铜板的应变最大,铝板最小,铜/铝复层板位于两者之间。

3.2 与拉伸试验所得应变对比

由于拉伸试验与 DIC 试验同步进行,所以两者的试验时间基本相同,因此将 2 种方法所得铜板、铝板及铜/铝复层板的应变曲线进行对比,研究铜/铝复层板与其组分材料间的应变关系,验证 DIC

方法的有效性。基于拉伸试验和 DIC 方法所得铜板、铝板及铜/铝复层板的应变曲线如图 8 所示。

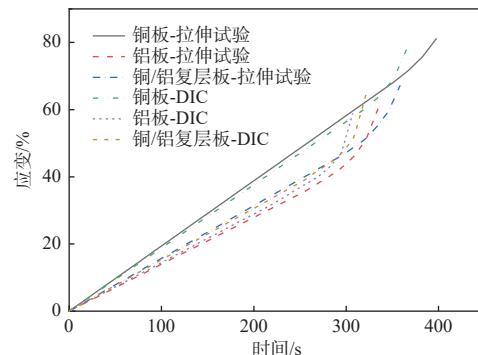


图 8 基于拉伸试验和 DIC 方法所得铜板、铝板及铜/铝复层板的应变曲线

Fig. 8 Strain curves of Cu plate, Al plate and Cu/Al clad plate obtained by tensile test and DIC method

由图 8 可知,在整个拉伸过程中,不论是拉伸试验所得应变曲线还是 DIC 测量所得应变曲线,铜板的应变均最大,铝板的应变均最小,铜/铝复层板的应变均位于铜板与铝板之间。将基于拉伸试验和 DIC 方法所得铜板、铝板及铜/铝复层板的应变曲线进行对比可以看出,3 种材料 DIC 测量所得应变曲线与拉伸试验所得应变曲线很接近,表明采用 DIC 方法能真实地反映试样拉伸过程中的应变变化,验证了 DIC 方法的有效性。另外,铜板及铜/铝复层板拉伸试验所得应变大于 DIC 测量所得应变,而铝板与之相反。由于 3 种材料 DIC 方法所得应变曲线比拉伸试验所得应变曲线先达到强度极限,所以当试样发生颈缩后,DIC 方法所得应变大于拉伸试验所得应变。但当试样发生断裂后,拉伸试验所得断裂应变大于 DIC 方法所得断裂应变。

3.3 与有限元模拟应变对比

由 XTDIC 应变测量系统可以得到铜板、铝板及铜/铝复层板拉伸过程中的主应变云图,在有限元分析中,最大主应变对应的是对数应变的最大值。为进一步验证基于 DIC 方法所得应变结果的有效性,文中选择试样塑性变形阶段中的某一时刻,对该时刻下由 DIC 方法和有限元方法所得主应变云图进行对比。由于该时刻铜板、铝板及铜/铝复层板均处于塑性变形阶段,3 种材料应变相差较大,将 DIC 测量结果与有限元模拟结果进行对比更具说服力。由 DIC 方法和有限元方法所得铜板、铝板及铜/铝复层板的主应变云图如图 9 所示,其中左图为 DIC 测量主应变,右图为有限元模拟主应变。

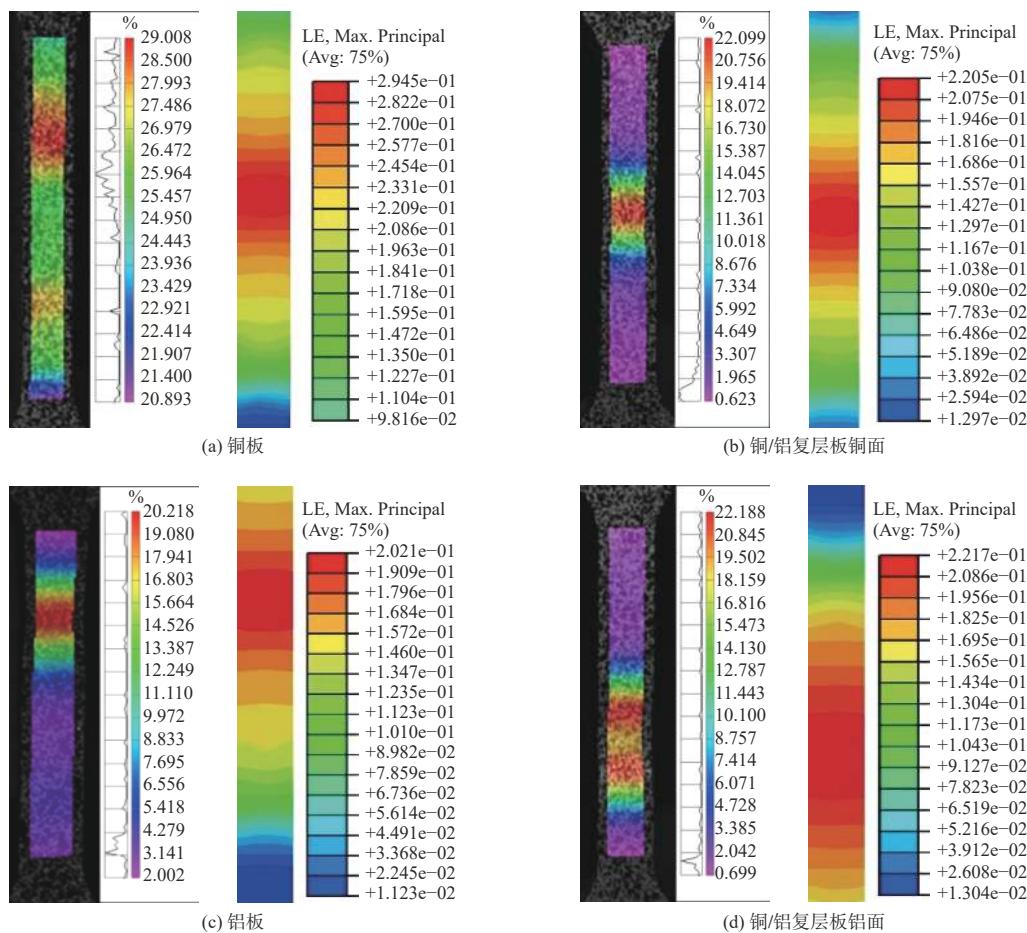


图 9 铜板、铝板及铜/铝复层板试样的应变分布图

Fig. 9 Strain distribution diagram of Cu plate, Al plate and Cu/Al clad plate samples

由图 9 可知, 铜板、铝板及铜/铝复层板虽然均处于塑性变形阶段, 但主应变云图并不相同, 其中 DIC 测量所得铜板的最大主应变为 29.008%, 铝板的最大主应变为 20.218%, 铜/铝复层板的铜面与铝面主应变云图存在差异, 这主要是由于组分材料铜、铝的力学性能不同, 导致试样拉伸过程中难以达到屈服和破坏的同步, 但铜面与铝面的最大主应变基本相同, 其差值仅为 0.089%, 且位于铜板与铝板之间。将 DIC 测量所得主应变与有限元模拟主应变进行对比发现, 两者具有较高一致性, 且最大主应变基本相同, 其应变相差最大为 0.442%, 最

小为 0.008%。另外, 通过对比试样表面的应变分布可得, 2 种方法所得的应变分布也基本相同, 表明采用 DIC 方法对铜板、铝板及铜/铝复层板进行拉伸应变检测是可行的。

3.4 3 种方法所得应变对比

由拉伸试验、DIC 方法和有限元方法均可得出铜板、铝板及铜/铝复层板拉伸过程中的应变曲线, 为进一步研究 3 种方法所得应变之间的关系, 选取 3 种材料屈服时刻、强化时刻和断裂时刻的应变进行分析。具体应变如表 4 所示。

表 4 铜板、铝板及铜/铝复层板不同时刻的应变

Table 4 Strain of Cu plate, Al plate and Cu/Al clad plate at different times

试样	屈服时刻			强化时刻			断裂时刻		
	DIC 方法	拉伸 试验	有限元 方法	DIC 方法	拉伸 试验	有限元 方法	DIC 方法	拉伸 试验	有限元 方法
铜板	12.283	12.566	14.422	65.692	66.219	63.125	79.072	80.032	77.898
铝板	7.746	7.891	9.045	55.444	56.098	54.905	58.910	59.748	58.232
铜/铝 复层板	10.009	9.930	11.265	57.385	57.788	56.130	64.595	65.304	64.191

为了便于对 3 种方法所得应变进行对比, 将铜板、铝板及铜/铝复层板不同时刻的应变绘制于同一堆积柱状图中, 如图 10 所示, 其中 QF-DIC、QF-TT 和 QF-FEM 分别为屈服时刻 DIC 方法、拉伸试验和有限元方法所得应变; QH-DIC、QH-TT 和 QH-FEM 分别为强化时刻 DIC 方法、拉伸试验和有限元方法所得应变; DL-DIC、DL-TT 和 DL-FEM 分别为断裂时刻 DIC 方法、拉伸试验和有限元方法所得应变。

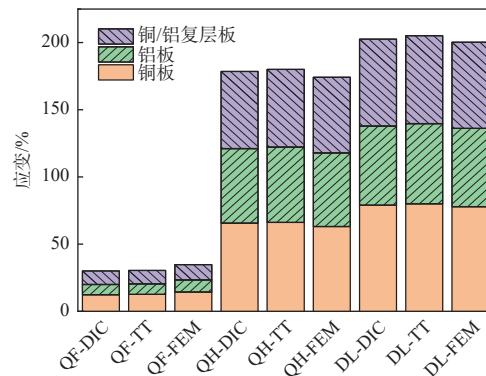


图 10 屈服、强化和断裂时刻铜板、铝板及铜/铝复层板的应变

Fig. 10 Strain of Cu plate, Al plate and Cu/Al clad plate at yield, strengthening and fracture time

由图 10 得出, 断裂时刻应变最大, 强化时刻应变次之, 屈服时刻应变最小。当试样处于屈服时刻, 3 种材料 DIC 方法所得应变与拉伸试验所得应变相差很小, 其差值最小为 0.079%。相较于 DIC 方法和拉伸试验, 有限元模拟所得应变较大, 其中铜板应变最大, 为 14.422%。当试样处于强化时刻, 3 种材料的应变相对较大。与屈服时刻相比, DIC 方法所得应变与拉伸试验所得应变之间的差值在增大。但总体来说, 其差值依旧很小, 为 0.403%; 而强化时刻有限元模拟所得应变偏小, 其中铝板的应变最小, 为 54.905%。当试样处于断裂时刻, 3 种材料的应变达到最大, 与 DIC 方法和有限元方法相比, 拉伸试验所得应变较大, 其中铜板应变最大、铝板最小, 铜/铝复层板的应变位于铜板与铝板之间, 且与铝板应变相差较小。

为计算 DIC 方法和有限元方法所得应变结果的精确程度, 以拉伸试验所得应变为基准, 引入应变差值 $\Delta\epsilon$, 其中 $\Delta\epsilon_{DIC}$ 为 DIC 方法所得应变差值, $\Delta\epsilon_{FEM}$ 为有限元方法所得应变差值, 该值在一定程度上反映了 DIC 测量应变、有限元模拟应变与拉伸试验所得应变之间的吻合程度, 定义如下:

$$\begin{cases} \Delta\epsilon_{DIC} = \epsilon_{DIC} - \epsilon_{TT} \\ \Delta\epsilon_{FEM} = \epsilon_{FEM} - \epsilon_{TT} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϵ_{DIC} 为 DIC 测量所得应变; ϵ_{TT} 为拉伸试验所得应变; ϵ_{FEM} 为有限元模拟应变。

依据表 4, 利用(1)式, 可以计算得出铜板、铝板及铜/铝复层板不同时刻的应变差值, 进而得到表 5 和图 11。

表 5 铜板、铝板及铜/铝复层板不同时刻的应变差值

Table 5 Strain differences of Cu plate, Al plate and Cu/Al clad plate at different times

试样	Cu/Al clad plate at different times %					
	屈服时刻		强化时刻		断裂时刻	
	$\Delta\epsilon_{DIC}$	$\Delta\epsilon_{FEM}$	$\Delta\epsilon_{DIC}$	$\Delta\epsilon_{FEM}$	$\Delta\epsilon_{DIC}$	$\Delta\epsilon_{FEM}$
铜板	-0.283	1.856	-0.527	-3.094	-0.960	-2.134
铝板	-0.145	1.154	-0.654	-1.193	-0.838	-1.516
铜/铝复层板	0.079	1.335	-0.403	-1.658	-0.709	-1.113

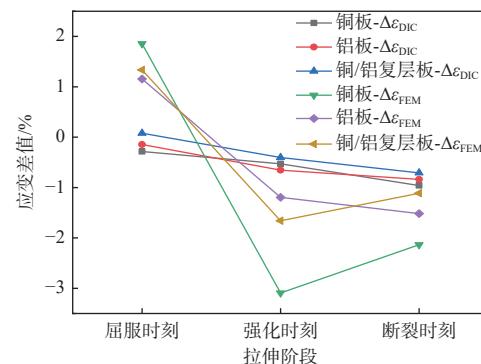


图 11 铜板、铝板及铜/铝复层板的应变差值曲线

Fig. 11 Strain difference curves of Cu plate, Al plate and Cu/Al clad plate

由图 11 看出, 同一时刻, 不同材料应变差值不同。同一材料不同时刻, 应变差值也不同, 并且 DIC 方法所得应变差值变化较小, 有限元方法所得应变差值变化较大。对 DIC 方法所得应变差值进行分析可得, 3 种材料的应变差值变化较小, 其中铜/铝复层板应变差值变化最小, 为 0.630%, 铝板应变差值变化最大, 为 0.693%, 并且应变差值多为负值, 表明 DIC 方法所得应变与真实应变相比较小。另外, 与铜板、铝板相比, 铜/铝复层板应变差值的绝对值较小, 其最小值仅为 0.079%, 表明 DIC 方法所得铜/铝复层板应变与真实应变最为接近, 而铜板、铝板的应变差值整体处于 -0.960%~ -0.145% 之间, 与真实应变相差不大。对有限元方法所得应变差值进行分析可得, 在整个拉伸过程中, 不同时刻应变差值不同, 且差异显著, 其中铜

板的应变差值变化最大, 为 4.950%; 铜/铝复层板的应变差值变化较大; 铝板的应变差值变化最小。另外, 在屈服时刻, 3 种材料的应变差值均大于 0, 而强化时刻和断裂时刻, 3 种材料的应变差值均小于 0, 表明有限元方法所得应变在真实应变附近上下波动, 与真实应变之间存在一定差异。

综上所述, 与有限元方法相比, 基于 DIC 测量所得应变与真实应变最为接近, 采用 DIC 方法测量铜/铝复层板的拉伸应变是可行的, 且该方法能够实时检测试样拉伸过程中的应变变化。

4 结论

1) 在拉伸过程中, 铜板、铝板及铜/铝复层板不同方向的位移、应变不同, 且差异显著, 其中铜板的位移、应变最大, 铝板最小, 铜/铝复层板位于铜板和铝板之间, 且与铜板相差较大, 与铝板相差较小。3 种材料的总位移和主应变最大, y 方向位移、应变次之, x 方向最小, 且 y 方向位移、应变与总位移和主应变相差较小, 其中位移相差最小为 0.069 mm, 应变相差最小为 0.025%。

2) 基于拉伸试验和 DIC 方法所得铜板、铝板及铜/铝复层板的应变曲线很接近, 且铜板和铜/铝复层板拉伸试验所得应变大于 DIC 测量所得应变, 而铝板与之相反。DIC 测量所得主应变与有限元模拟主应变具有较高一致性, 且两者表面应变分布和最大主应变基本相同, 其应变相差最大为 0.442%, 最小为 0.008%。不同时刻, 不同材料的应变差值不同, 且有限元模拟所得应变差值变化较大, 其最大变化为 4.950%, DIC 方法所得应变差值变化较小, 其最大变化为 0.693%。

3) 通过将 DIC 方法、拉伸试验和有限元方法所得应变进行对比分析, 证明了 DIC 方法用于铜/铝复层材料拉伸应变检测的可行性与可靠性。同时, 该方法也为其他复层材料的应变检测提供了参考。

参考文献:

- [1] 李慧, 龙萍, 牛永胜, 等. Al/Cu复合材料制备中理论与工艺研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(7): 148-153.
LI Hui, LONG Ping, NIU Yongsheng, et al. Fabrication of Al/Cu composite: theoretical and technological progresses[J]. Materials Reports, 2016, 30(7): 148-153.
- [2] 姜业欣, 娄花芬, 解浩峰, 等. 先进铜合金材料发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 84-92.
JIANG Yixin, LOU Huafen, XIE Haofeng, et al. Development status and prospects of advanced copper alloy[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 84-92.
- [3] 王立忠, 张振, 赵建博, 等. 小幅面高温焊缝变形的数字图像相关测量[J]. 光学精密工程, 2021, 29(4): 802-812.
WANG Lizhong, ZHANG Zhen, ZHAO Jianbo, et al. Digital image correlation measurement of high temperature weld seam deformation with small format[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(4): 802-812.
- [4] 张德海. 三维数字化建模与逆向工程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2016.
ZHANG Dehai. 3D digital modeling and reverse engineering [M]. Beijing: Beijing University Press, 2016
- [5] 孙涛, 梁晋, 郭翔, 等. 铜/铝复层板成形极限视觉测量方法及成形性能[J]. 中国机械工程, 2015, 26(7): 977-981.
SUN Tao, LIANG Jin, GUO Xiang, et al. Forming limit vision measurement and formability of Cu/Al clad metals[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(7): 977-981.
- [6] LUO P F, CHAO Y J, SUTTON M A, et al. Accurate measurement of three-dimensional displacement in deformable bodies using computer vision[J]. Experimental Mechanics, 1993, 33: 123-132.
- [7] 陈志新, 彭小龙, 王梧旭, 等. 三维数字图像相关法在碳钢拉伸试验中的应用[J]. 机械工程材料, 2020, 46(1): 104-110.
CHEN Zhixin, PENG Xiaolong, WANG Wuxu, et al. Application of three-dimensional digital image correlation method in carbon steel tensile test[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 46(1): 104-110.
- [8] CABALLERO A O, JACKSON T, FONSECA J Q, et al. High-resolution digital image correlation study of the strain localization during loading of a shot-peened RR1000 nickel-based superalloy[J]. Acta Materialia, 2021, 220: 117306.
- [9] 王潇舷, 金祖权, 姜玉丹, 等. 基于 DIC 与应变测试的混凝土中钢筋锈胀应力分析[J]. 材料导报, 2019, 33(8): 2690-2696.
WANG Xiaoxuan, JIN Zuquan, JIANG Yudan, et al. Analysis of stress in concrete induced by corrosion of reinforcing bar based on DIC and strain test[J]. Materials Reports, 2019, 33(8): 2690-2696.
- [10] MEREZHKO M S, MEREZHKO D A, ROFMAN O V, et al. Macro-scale strain localization in highly irradiated

- stainless steel investigated using digital image correlation[J]. *Acta Materialia*, 2022, 231: 117858.
- [11] 邹田春, 秦嘉徐, 李龙辉, 等. 钛合金-芳纶纤维复合材料单搭接接头渐进失效分析[J]. 材料导报, 2020, 34(10): 2143-2146.
- ZOU Tianchun, QIN Jiaxu, LI Longhui, et al. Progressive failure analysis of titanium alloy-aramid fiber composites single lap joints[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(10): 2143-2146.
- [12] UEMATSU Y, KAKIUCHI T, NIIMI K, et al. Local strain analysis under quasi-static tensile loading in Al/steel dissimilar friction stir weld by a digital image correlation method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(1-2): 349-360.
- [13] 张志城, 从一博, 郭照灿, 等. 基于数字散斑相关方法的 VCM 深冲钢板力学性能评价[J]. 精密成形工程, 2020, 12(2): 37-42.
- ZHANG Zhicheng, CONG Yibo, GUO Zhaochan, et al. Mechanical performance evaluation of VCM deep-impact steel plate based on digital speckle correlation method[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2020, 12(2): 37-42.
- [14] 潘兵, 王博. 数字体图像相关方法研究进展[J]. *科学通报*, 2017, 62(16): 1671-1681.
- PAN Bing, WANG Bo. Research progress in digital volume correlation method[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(16): 1671-1681.
- [15] ZHANG Dehai, LI Junheng, ZHU Huimin, et al. The researches and applications of reverse engineering in the protection and inheritance of national handcrafts[J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2020, 12(9): 1063-1069.