

文章编号: 1001-4888(2024)02-0127-13

基于双平面镜辅助多视角三维数字图像 相关方法的板材 Lankford 系数直接测量*

朱开宇¹, 陈斌¹, 孙子杰², 潘兵¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院 强度与结构完整性全国重点实验室, 北京 100191;

2. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100863)

摘要: Lankford 系数是评价板材成形性能的关键参数, 准确测量 Lankford 系数对于经典的各向异性屈服准则的应用有重要意义。本文提出了一种基于双平面镜辅助多视角数字图像相关方法的板材 Lankford 系数测量方法, 在双平面镜的辅助下, 仅使用一套基于双目立体视觉的三维数字图像相关系统即可同时测量试件前后表面的形貌与变形场, 再通过反射变换, 即可直接测量板材全场厚度及厚度应变, 进而实现对板材 Lankford 系数的直接测量, 避免了现有测量方法对体积守恒假设的依赖。通过 45 号钢和 DP780 双相钢板状试样的单轴拉伸实验, 比较了本文提出的直接测量方法与已有间接测量方法的测量差异, 结果显示, 本文方法与基于体积守恒假设的 Lankford 系数测量偏差对于颈缩区分别为 2.62% 和 0.41%, 对于非颈缩区分别为 7.07% 和 1.21%, 证明了本文方法的测量准确性。本文方法提供了一种低成本且简便有效的板状试样双表面及厚度变形场测量技术, 在 Lankford 系数、硬化指数、杨氏模量等金属材料本构参数的准确表征中具有实用前景。

关键词: Lankford 系数; 多视角数字图像相关方法; 厚度应变; 平面镜

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-186

0 引言

作为经典的各向异性屈服准则, Hill 48 准则^[1]和 Hosford 准则^[2]等被广泛地应用于金属成形过程中的塑性行为预测。为了使用这些准则, 需首先获得材料的 Lankford 系数^[3-5]进行参数标定。Lankford 系数, 又称为 R 值或塑性应变比^[6], 表示板材受到拉伸或压缩力时抵抗变薄或变厚的能力, 定义为板状金属试件横向(宽度方向)应变 ϵ_x 与厚度方向应变 ϵ_z 的比值(即 $R = \epsilon_x / \epsilon_z$)。Lankford 系数是评价板材弯曲性、抗减薄性、扩孔性等成形性能的关键参数^[7], 在车辆钣金成形等领域存在广泛应用。准确测定 Lankford 系数, 对于研究材料的拉压成形性能, 获得可靠的数值模拟结果, 从而实现钣金制造过程的质量控制具有重要意义。

传统的材料 Lankford 系数确定方法主要包括基于材料和结构的模型或理论进行估计、基于引伸计和卡尺的手工测量以及基于射线和超声方法的测量。理论估计方法^[8-9]避免了复杂的实际实验, 然而, 由于多晶材料的晶体结构往往难以精确建模, 且同种材料进行不同的热处理方式会改变晶体构型, 目前的理论估计准确性并不高^[10-11]。基于引伸计和卡尺的测量^[12]方法主要是使用引伸计测量单向拉伸试

* 收稿日期: 2023-08-23; 修回日期: 2023-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(11925202); 强度与结构完整性全国重点实验室研究项目(LSSIZZYJ202305)

通信作者: 潘兵(1978-), 男, 博士, 教授。主要从事光测力学方法基础理论、应用及其仪器化的研究。Email: panb@buaa.edu.cn

件长度方向的应变,再用卡尺等工具测量宽度方向的应变,或长宽方向的应变均使用引伸计进行测量。但引伸计仅能测量少数加载状态下特定点的 Lankford 系数,无法获得全加载过程的全场测量。同时,夹持不当会损伤试件,卡尺测量又极其依赖人工经验,因此这种方法的准确性也较为有限。此外,基于射线和超声方法的测量^[13]方法具有快速、无损的优点,但其所需的设备较为昂贵和复杂,且检测准确性受被测板材的振动及周围环境温度变化的影响较大。因此,以上 3 类方法要么准确性有限,要么设备十分复杂,使得 Lankford 系数在板材的设计与工业生产中的高准确性、快速测定受到了极大限制。

非接触全场变形测量方法——数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法^[14-17]的出现为 Lankford 系数的测量提供了新的思路。该方法 2010 年被应用于 Lankford 系数的间接测量^[18]。后来的学者在该研究的基础上进一步延伸,结合 DIC 对 IF 钢(超低碳钢,Interstitial-Free Steel)的 Lankford 系数进行了间接测定,得到了与机械引伸计准确性类似但稳定性更高的结果^[19]。韩国浦项科技大学的研究者^[7]对单次实验测量一个 Lankford 系数的方法进行改进,设计了一种基于 DIC 的更高效的 Lankford 系数测量方法,通过单次拉伸实验获得沿加载方向和与加载方向正交的 Lankford 系数。然而,上述方法均是基于等体积假设的间接测量,即假设被测材料在塑性变形的过程中不发生体积变化(即满足 $\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0$)。这些方法本质上仍是对材料正面,即拉伸方向和水平方向的应变 ϵ_x 和 ϵ_y 进行测量,没有获得 ϵ_z 从而实现 Lankford 系数的直接测量,与理论定义不完全符合。

为实现 Lankford 系数的直接测量,文献^[20]提出使用 2 台相机从侧面同时拍摄带缺口试件的加载方向和厚度方向的变形场。这种方法摆脱了对等体积假设的依赖,但预制的缺口会引入残余应变,且厚度方向尺寸狭小,散斑场制备和 DIC 计算并不容易。为了解决这一问题,有学者^[10]提出使用基于多相机的多视角 DIC(multi-view DIC, MV-DIC)实现 Lankford 系数的直接测量。通过在试件的前后各放置一对相机进行变形场的记录与拍摄,并利用一块双面标定板将这两对相机的测量结果统一到同一个世界坐标系中,再通过前后面上对应点的厚度方向坐标相减,即可获得不同加载状态下的厚度。然而,基于多相机的多视角 DIC 方法^[21-22]通常存在设备复杂昂贵、多相机同步困难等固有问题^[23],难以在更大范围内推广使用。

双平面镜辅助多视角 DIC 是由本文作者于 2018 年提出的^[24]。作为用于全景或双表面形状、运动和变形测量的 DIC 技术分支,相较于传统的需要 3 个或更多同步相机的多视角 DIC 方法,该方法仅需使用一套常规立体视觉系统和 2 块置于物体后方的平面镜。低成本和实施过程简单的固有优势使其成为传统多视角 DIC 技术在测量常规尺寸试样全景或双表面变形时的实用且更低成本的替代技术。

为了简单、高效地实现 Lankford 系数测量,本文提出使用双平面镜辅助的多视角 DIC^[23-25]测量板状试件的 Lankford 系数,基于一套双相机 3D-DIC 系统即可实现对被测物体的全景或双表面测量。在本文中,首先介绍了双平面镜辅助的多视角 DIC 和反射变换标定的基本原理;而后,给出了厚度方向应变的计算方法,并通过 45 号钢板和 DP780 双相钢板沿与轧制方向成不同角度裁切下的 3 个试件的 Lankford 系数实际测量实验验证了该方法的可行性与准确性。

1 方法

1.1 双平面镜辅助的多视角 DIC

双平面镜辅助的多视角 DIC 系统的示意图如图 1 所示。该系统主要包括 2 台工业相机,2 块前表面反射镜和照明光源。2 台工业相机以上下的相对方位安装在试件前方的固定支架上(一般为三脚架),镜头前方安装蓝色窄带通滤波片以进行蓝光主动成像^[26];2 块前表面反射镜 M_1 和 M_2 被放置在表面制备了散斑的试件后方,以通过其反射同时观测并采集板状试件的前后表面图像;平面镜上预制了黑/白散斑以辅助估计平面镜的反射变换矩阵;通过蓝光光源照明后,2 个反射在平面镜中的虚像和平面镜上预制的散斑通过窄带通滤波片成像在相机靶面上,从而实现对板状试件双表面形貌、变形场的同步观测。

基于双平面镜辅助的多视角 DIC 直接测量板状试件 Lankford 系数的主要步骤与流程如图 2 所示。2 台工业相机组合成的双目立体视觉系统通过经典的张氏标定法^[27]进行标定,从而获取该系统的内外

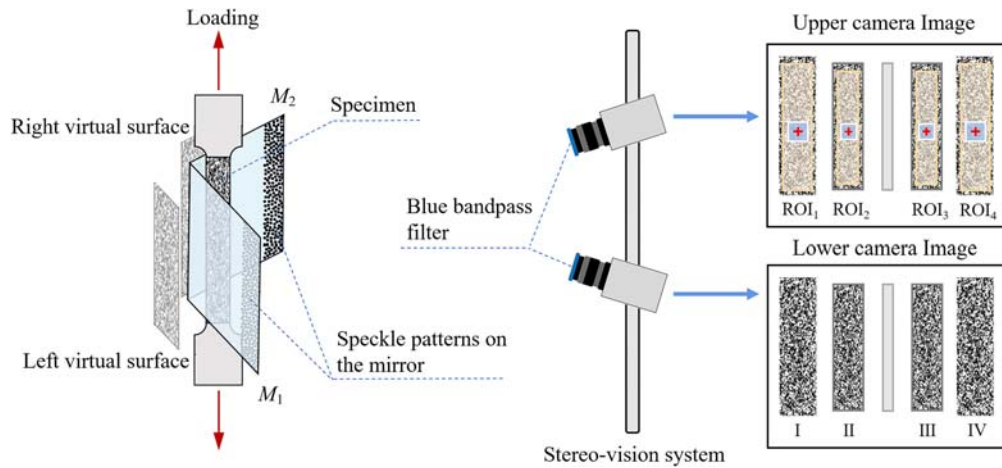


图 1 双平面镜辅助的多视角 DIC 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mirror-assisted MV-DIC method

参数并建立整个系统的全局世界坐标系。试件通过万能拉伸试验机进行单轴拉伸加载。在加载前或预加载状态下拍摄一对图像作为参考图像对,其后对试件施加载荷并拍摄图像作为变形图像序列。

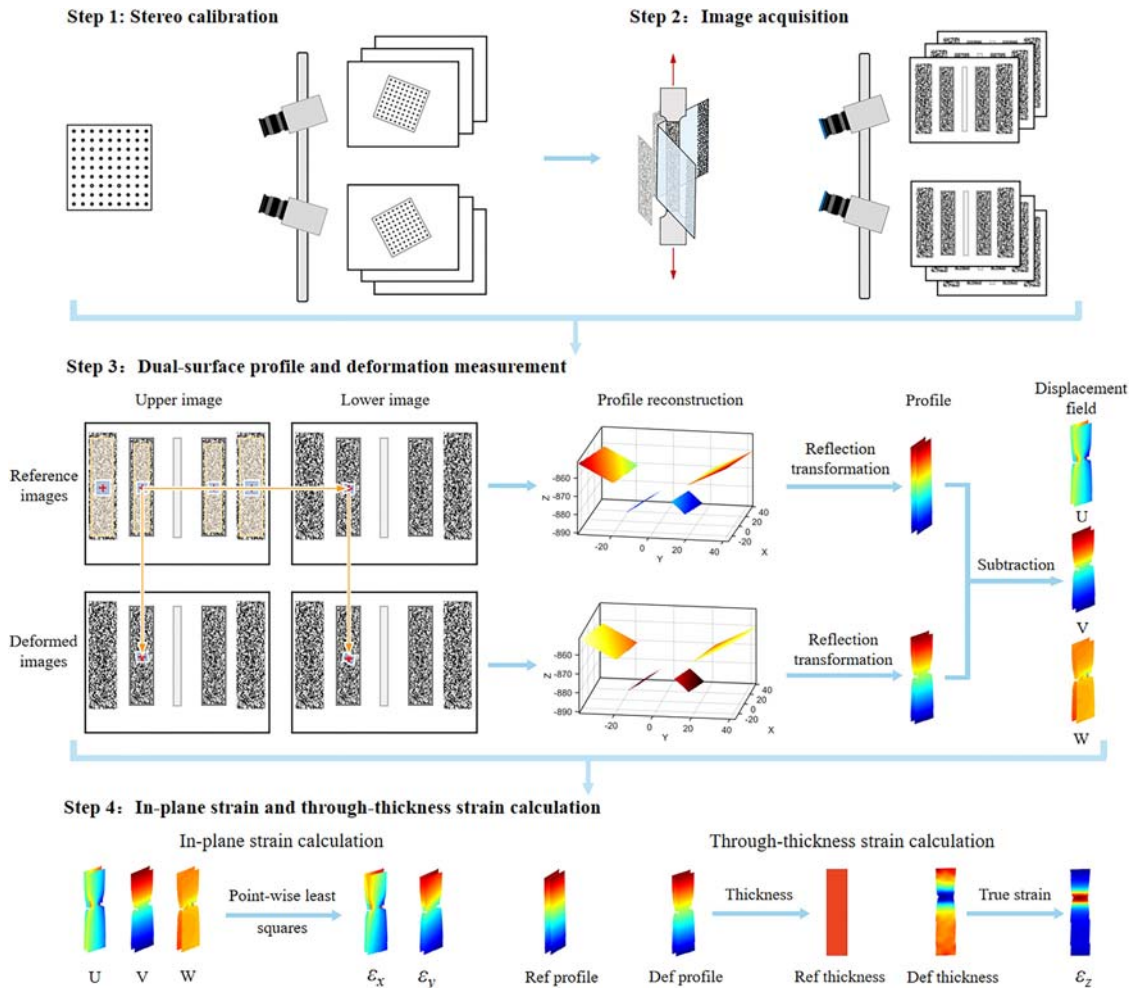


图 2 基于双平面镜辅助的多视角 DIC 直接测量试件 Lankford 系数的主要步骤

(Ref: 参考, Def: 变形, 形貌云图中的颜色深浅表示 Z 坐标的大小)

Fig. 2 Main steps for directly measuring the Lankford coefficient based on mirror-assisted MV-DIC (Ref: reference, Def: deformed, in the profile map, the variation in color represents the magnitude of the Z-coordinate)

使用基于子区的 DIC 算法对获得的图像序列进行处理,具体而言,每张图像中包含 4 个 SOI(Surface of Interest,感兴趣表面),对应试件在平面镜中反射的 2 个虚拟表面和 2 块平面镜上预制的散斑。在上方相机拍摄的参考图像(Upper Reference Image)的每个 SOI 上指定 ROI(Region of Interest,感兴趣区域),即图 1 右侧中的 $ROI_1 \sim ROI_4$ 。每个 ROI 中以特定的步长作为间距均匀布置计算点网格。使用高效的 IC-GN(Inverse Compositional Gauss-Newton,反向组合高斯-牛顿)算法^[28],可实现散斑图像间高效、稳健的全场计算点匹配。具体地,上参考图像中的每个计算点首先与下参考图像中的计算点进行立体匹配,而后上参考图像与下参考图像中的计算点分别与上变形序列与下变形序列中的计算点进行匹配。

完成图像匹配后,可以基于三角测量原理获得虚拟试件表面与平面镜预制散斑区域的三维形貌点云。基于平面镜预制散斑区域的三维形貌点云,可计算平面镜的反射变换矩阵,进而对虚拟试件表面进行反射变换,获得虚拟点云对应的实际坐标,并将坐标系进一步变换到试件对应位置处。

平面镜反射变换原理(基于虚物体模式^[24]进行说明)如图 3 所示,以左侧平面镜 M_1 与 M_1 反射的虚拟左侧试件面为例,假设 M_1 指向外侧的单位法向量为 \mathbf{n} ,平面镜到坐标系原点 O_c 的距离为 d ,试件左侧表面上的任一随机点 P ,其在平面镜中反射的点为 P_v 。依据此前的研究工作^[23-25],可以得到反射变换关系如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{O}_c \mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} - 2\mathbf{m}\mathbf{m}^T & 2d\mathbf{n} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{O}_c \mathbf{P}_v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵;矩阵 $\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} - 2\mathbf{m}\mathbf{m}^T & 2d\mathbf{n} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$ 即为所求的平面镜反射变换矩阵。由式(1)可知,实现平面镜反射变换的关键是求得对应平面镜平面的单位法向量 \mathbf{n} 和该平面到坐标原点 O_c 的距离 d 。

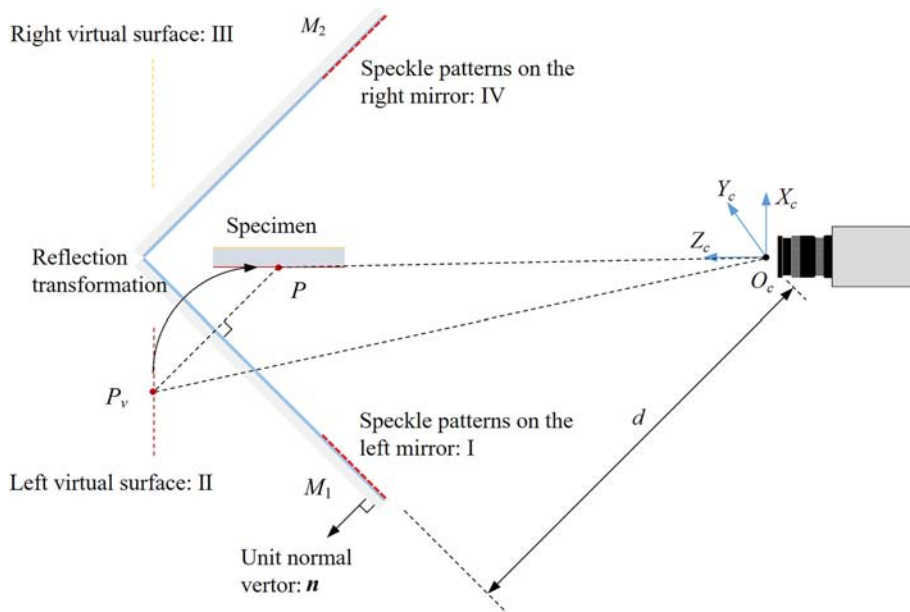


图 3 平面镜反射变换原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the reflection transformation

依据 DIC 计算平面镜表面预制散斑得到的平面镜平面点云,可以使用最小二乘拟合得到平面方程。假设得到的平面方程为

$$Ax + By + Cz - 1 = 0 \quad (2)$$

则该平面的单位法向量 \mathbf{n} 和距离 d 可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{n} = (A / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}, B / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}, C / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}) \\ d = 1 / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \end{cases} \quad (3)$$

A、B、C 为平面方程的系数,值得注意的是,如果法向量 \mathbf{n} 以式(3)计算得到,则式(2)中的常数项必须为负数,以保证 \mathbf{n} 的方向与向量 \mathbf{PP}_0 相同。

在得到 \mathbf{n} 和 d 后,依据 DIC 计算得到的试件虚拟表面点云可被反射变换到其实际位置,从而得到 2 个试件面在全局世界坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 下的实际坐标,完成平面镜反射变换标定。而后,基于试件表面初始形貌点云坐标与变形形貌点云坐标的差值获得位移场,进而通过逐点最小二乘计算得到应变场,即拉伸方向应变 ϵ_y 和求 Lankford 系数所需的宽度方向应变 ϵ_x 。而厚度方向应变 ϵ_z 的求法,将在 1.2 节中进一步介绍。

1.2 Lankford 系数计算方法

在完成反射变换后,为了计算位移场与应变场,需要将全局世界坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 转换到新的坐标系 $O-XYZ$ 上。该坐标系 Y 轴与试件加载方向平行, Z 轴垂直于试件表面,坐标原点 O 位于左表面中心。本节后续提到的所有坐标,均是基于 $O-XYZ$ 坐标系的。

获得试件 2 个表面在真实位置处的点云坐标后,参考 CHEN 等^[29] 提出的厚度方向应变测量方法求得对应图像采集时刻的试件厚度分布。为此,需要求得左侧表面上的点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 在右侧表面的对应点(投影点)的空间三维坐标。由于试件表面并不一定为平整的理想平面,且 2 个表面在 DIC 计算时是分开独立计算的, P 点在右侧表面上的对应点可能不在 DIC 计算点网格上,因而需要进行插值计算。

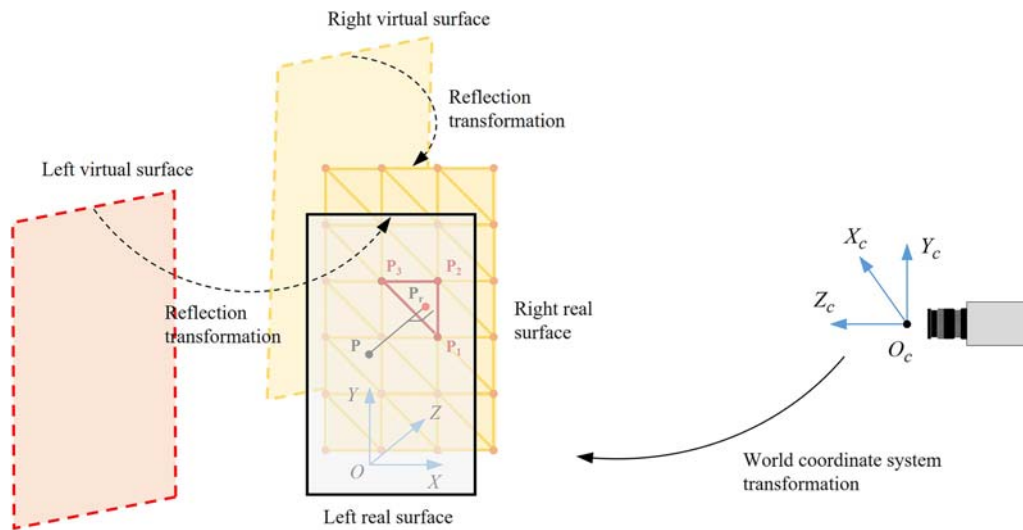


图 4 试件厚度方向应变计算方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the through-thickness strain calculation method

如图 4 所示,本文基于 Delaunay 三角剖分原理在试件的右侧表面生成不均匀分布的三角网格^[29-30]。完成剖分后,网格的节点即为计算得到的试件右侧表面形貌点云。此时,每个三角网格都可以视为一个通过其 3 个结点的平面。假设 $O-XY$ 平面上的 P 点落于三角形 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 内部,则通过 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ 点的平面 $z = ax + by + c$ 一定满足式(4)中的条件:

$$\begin{cases} z_1 = ax_1 + by_1 + c \\ z_2 = ax_2 + by_2 + c \\ z_3 = ax_3 + by_3 + c \end{cases} \quad (4)$$

即

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

P 点在后表面的投影点 $P_r(x_p, y_p, z_r)$ 的 z 坐标可以表示为

$$z_r = ax_p + by_p + c = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

则板厚 t 为

$$t = z_r - z_p \quad (7)$$

若初始状态厚度为 t_0 , 可得厚度方向对数应变 $\epsilon_z = \ln(t/t_0)$ 。绘制 ϵ_x - ϵ_z 曲线, 并将其中线性较好的段拟合到直线, 取其斜率为试件的 Lankford 系数^[10]。此外, 对于板材, Lankford 系数通常由面内载荷的 3 个不同方向(平行于轧制方向、与轧制方向成 45° 、与轧制方向成 90°) 确定, 加权平均 Lankford 系数使用式(8)计算:

$$R = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (8)$$

R_0 、 R_{45} 和 R_{90} 分别为同一块轧制金属板上沿与轧制方向成 0° 、 45° 和 90° 方向裁切下的试件的 Lankford 系数。

2 实验

为了验证双平面镜辅助的多视角 DIC 在 Lankford 系数测量中的有效性, 本文测量了 3 个 45 号钢板状单轴拉伸试件和 3 个 DP780 双相钢板状单轴拉伸试件的颈缩区域与非颈缩区的 Lankford 系数, 并将其与基于体积假设得到的结果进行对比。

2.1 45 号钢板状试样的 Lankford 系数测量实验

在 45 号钢板的 Lankford 系数测量实验中, 试件由一块厚 3mm 的轧制钢板裁切得到。如图 5 所示, 3 个试件分别与轧制方向成 0° 、 45° 和 90° , 测量段长 100mm, 宽 20mm。试件表面用酒精擦净后, 使用 0.8mm 的黑色马克笔点涂散斑。

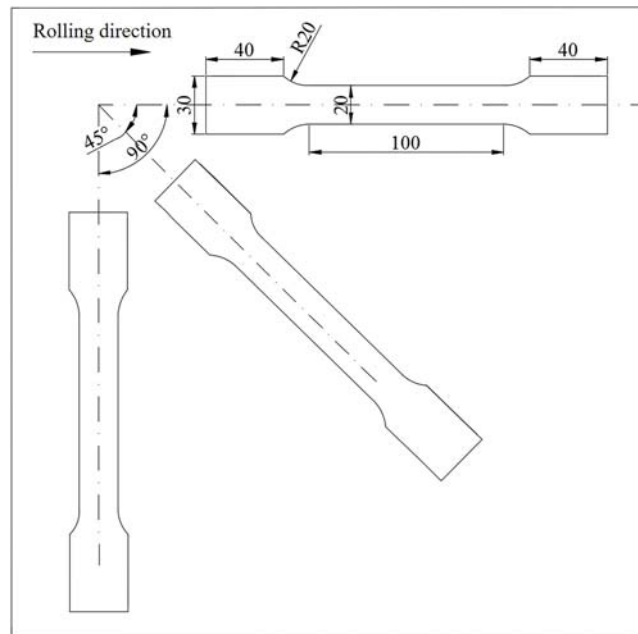


图 5 45 号钢板状单轴拉伸试件示意图(单位: mm)

Fig. 5 Schematic diagram of 45 steel uniaxial tensile specimen(unit: mm)

准备好试件后, 将其夹持在万能拉伸试验机上。实验设置如图 6(a) 所示, 为了采集实验过程中试件 2 个表面的图像序列, 将双相机 3D-DIC 系统(相机: FLIR GS3-U3-91S6M-C, CMOS, 3376pixel \times 2704pixel; 镜头: Schneider-Kreuznach, F2.8, 50mm) 以三脚架竖向固定在试件正前方。随后, 在试件后方用铝合金平台固定 2 个前表面镀铝反射镜, 并将其夹角调节为约 90° 。为了标定各平面镜的反射

变换关系,平面镜上均预制黑色随机散斑。为了保证均匀稳定的图像采集,本实验中还使用了基于蓝光的主动成像技术^[24],即使用蓝色 LED 光源(光源波长为 440nm~480nm)照射试件表面,并在镜头与相机间安装窄带通滤波片(450nm±10nm)用于过滤试件表面反射的环境光。而后,调节镜头和相机参数,以保证能够清晰地采集到试件表面以及平面镜上的散斑图像。

实验过程中,试验机加载速度设置为 1mm/min,同时成像系统按 1fps 的速率进行图像序列的连续采集,采集到的图像如图 6(b)、(c)所示。在完成双相机 3D-DIC 系统的内外参数标定后,通过平面镜辅助的多视角 DIC 分析采集到的实验图像序列,即可获得所需的面内应变场(ϵ_x)和厚度方向应变场(ϵ_z)。具体地,在 3D-DIC 计算中,对于平面镜上和试件表面的散斑区域,计算子区和步长均设置为 71pixel×71pixel 和 5pixel。测得的面内应变场(ϵ_x)和厚度方向应变场(ϵ_z)如图 7 所示。

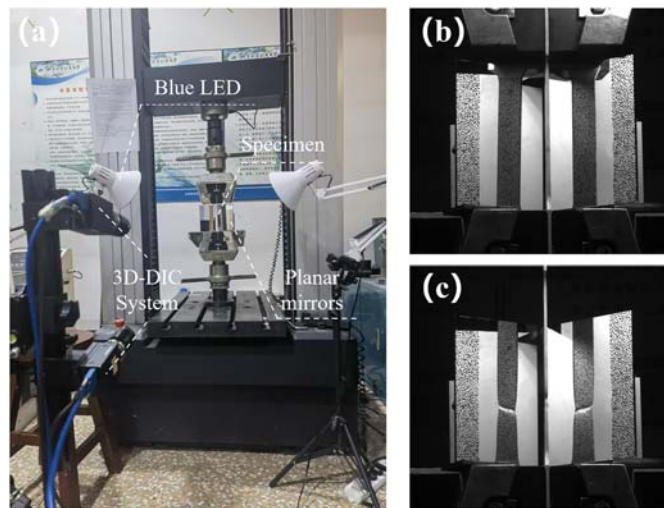


图 6 (a)45 号钢拉伸实验示意图; (b)45°试件未加载时的上相机图像;
(c)45°试件断裂后的上相机图像

Fig. 6 (a) experimental setup of the uniaxial tensile test of the 45 steel; (b) image captured by the upper camera when the 45° specimen is not loaded; (c) image captured by the upper camera after the 45° specimen fractured

如图 7 中白点所示,在试件颈缩区域和非颈缩区中选取感兴趣点用于计算 Lankford 系数。为了降低噪声对 Lankford 系数测量的影响,以该感兴趣点为中心,选取附近 7×21 点的区域,并对该区域内各点的应变求平均,滑动平均滤波(Moving Average)后绘制得到的 ϵ_x - ϵ_z 曲线如图 8 所示。对于颈缩区,45°试件的直接测量结果与基于体积假设的间接测量结果呈现了高度的一致性,而 0°与 90°的试件仅在变形的后半段与间接测量计算结果呈现了类似的斜率或数值上的一致性。对于非颈缩区,45°试件的直接测量结果依然与间接测量结果呈现了高度的一致性,而 0°试件始终处于波动状态,90°试件后半段与间接测量得到的结果类似。而后,基于最小二乘法拟合曲线斜率得到试件的 Lankford 系数。值得注意的是,由于非颈缩区直接测量值波动较为明显,我们舍去了拉伸初始和结束的一段值(取 ϵ_{yy} : 0.08~0.28)来进行拟合,所得结果见表 1。45°试件 2 种方法的 Lankford 系数测量结果几乎完全一致;90°试件 2 种方法的测量结果较为接近,偏差在 5%左右;而 0°试件测量值存在较明显的差异,但这种差异并不意味着测量方法存在问题,可能是由于 45 号钢内部的晶体排布方式导致体积守恒假设并不完全成立。综合来看,直接测量值与间接测量值总体比较接近,颈缩区加权平均 Lankford 系数差异仅有 2.62%,非颈缩区差异为 7.07%,证明了本文所提出的基于双平面镜辅助的多视角 DIC 测量 Lankford 系数的可行性与准确性。

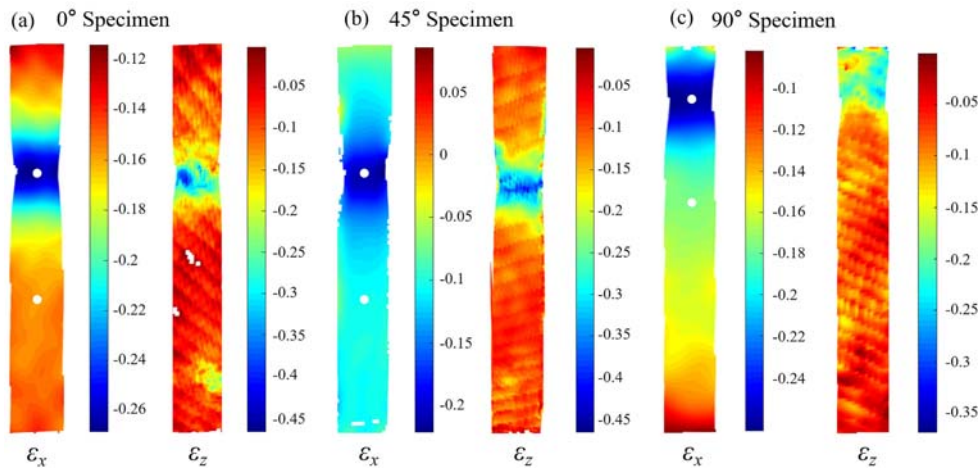


图7 (a)0°试件宽度方向应变场与厚度方向应变场(断裂前110s,总加载时长约40min);(b)45°试件宽度方向应变场与厚度方向应变场(断裂前80s,总加载时长约34min);(c)90°试件宽度方向应变场与厚度方向应变场(断裂前140s,总加载时长约44min)

Fig. 7 (a) width strain field and through-thickness strain field of the 0° specimen (110s before fracture, total loading duration is about 40min); (b) width strain field and through-thickness strain field of the 45° specimen (80s before fracture, total loading duration is about 34min); (c) width strain field and through-thickness strain field of the 90° specimen (140s before fracture, total loading duration is about 44min)

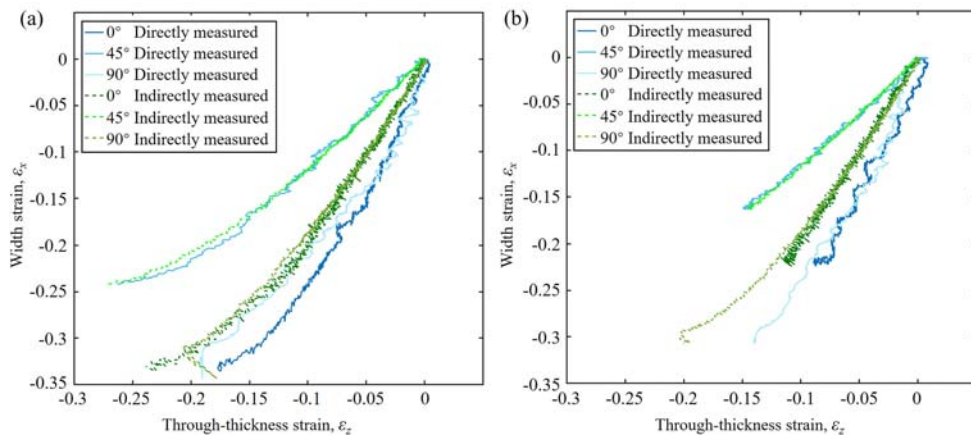


图8 3个45号钢试件(a)颈缩区和(b)非颈缩区的 $\epsilon_x-\epsilon_z$ 曲线

Fig. 8 $\epsilon_x-\epsilon_z$ curve of (a) the necking region and (b) non-necking region for the three specimens of 45 steel

表1 45号钢Lankford系数测量结果统计

Tab. 1 The Lankford coefficient measurement results of the 45 steel

	试件类型	直接测量	间接测量	偏差
颈缩区	0°试件	1.8398	1.6370	12.39%
	45°试件	1.0455	1.0203	2.47%
	90°试件	1.5264	1.6402	6.94%
	Lankford系数(R值)	1.3643	1.3295	2.62%
非颈缩区 ($\epsilon_{yy}: 0.08 \sim 0.28$)	0°试件	1.6685	1.8941	11.91%
	45°试件	1.0168	1.0593	4.01%
	90°试件	1.6784	1.7774	5.57%
	Lankford系数(R值)	1.3451	1.4475	7.07%

2.2 DP780 双相钢板状试样的 Lankford 系数测量实验

为了进一步验证所提出方法的可行性与准确性,从一块 3mm 厚的 DP780 轧制高强度钢板上沿与轧制方向成 0° 、 45° 和 90° 裁切下 3 个试件,测试区域长 100mm、宽 20mm,实验中的散斑使用黑/白哑光漆制备,平面镜上点涂白色散斑。测试系统同样基于双平面镜辅助的多视角 DIC 系统,如图 9(a)所示,双相机 3D-DIC(GRAS-50S5M-C, $2448\text{pixel} \times 2048\text{pixel}$; 镜头:Schneider-Kreuznach, F2.8, 50mm)系统以三角架竖向固定在试件正前方。双平面镜以三角架固定在试件后方,避免与试验机接触,夹角控制在约 90° 。试件的 2 个感兴趣表面通过双平面镜的反射被相机直接观测。实验过程中,加载速率设置为 1mm/min,采集帧率设置为 1fps,与 45 号钢的 Lankford 系数测量实验保持一致,采集到的图像如图 9(b)、(c)所示。

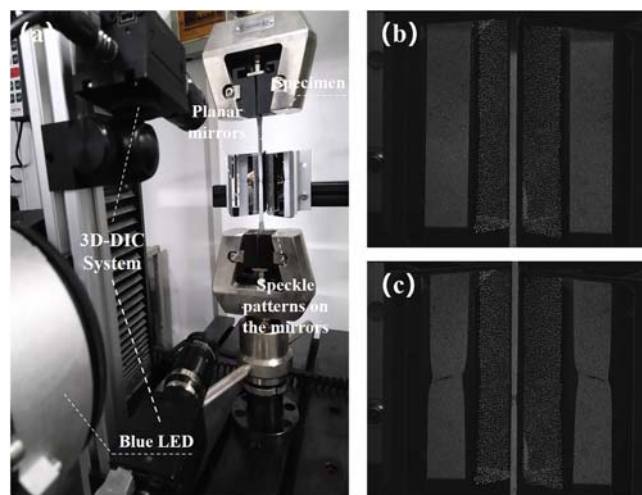


图9 (a)DP780 双相钢拉伸实验示意图; (b) 45° 试件未加载时的上相机图像; (c) 45° 试件断裂后的上相机图像
Fig.9 (a)experimental setup of the uniaxial tensile test of the DP780 dual-phase steel; (b)image captured by the upper camera when the 45° specimen is not loaded; (c)image captured by the upper camera after the 45° specimen fractured

3D-DIC 计算过程中,对于平面镜上的散斑区域,选取的计算子区和步长分别为 $81\text{pixel} \times 81\text{pixel}$ 和 7pixel ,试件表面的计算子区和步长分别为 $41\text{pixel} \times 41\text{pixel}$ 和 5pixel ,得到的面内应变场(ϵ_x)和厚度方向应变场(ϵ_z)如图 10 所示,在 3 个试件的宽度方向应变场与厚度方向应变场中均可以清晰地观察到颈缩区应变显著高于其他区域的现象。类似地,在试件颈缩区域非颈缩区选取感兴趣点(图 10 中的白点)用于计算 Lankford 系数并以该感兴趣点为中心,选取附近 7×21 点大小的区域,对该区域内各点的应变求平均以降低噪声带来的影响,滤波后绘制得到的曲线如图 11 所示。

对于颈缩区,3 个试件直接测量与间接测量得到的 ϵ_x - ϵ_z 均呈现了高度的一致性,仅在曲线后半段塑性变形较大时产生了一定的偏差,这可能是由于 DP780 钢随着塑性变形不断增大,体积假设理论产生的偏差也逐渐增大所致,反映了体积假设理论对于金属变形并不始终成立。对曲线线性较好的区域(颈缩区取值 ϵ_{xx} : $-0.15 \sim 0$)拟合得到斜率(表 2),2 种方法测得的 Lankford 系数分别为 1.3180 和 1.3235,偏差仅有 0.41%。对于非颈缩区,3 个试件直接测量与间接测量得到的 ϵ_x - ϵ_z 同样呈现了良好的一致性,直至试件断裂也没有产生显著偏差。由于非颈缩区变形较小,这种规律与颈缩区前半段是类似的。2 种方法对于非颈缩区应变测得的 Lankford 系数分别为 1.3219 和 1.3381,偏差仅有 1.21%。DP780 钢的实验结果进一步证明了提出的双平面镜辅助的多视角 DIC 在 Lankford 系数测量中的准确性。

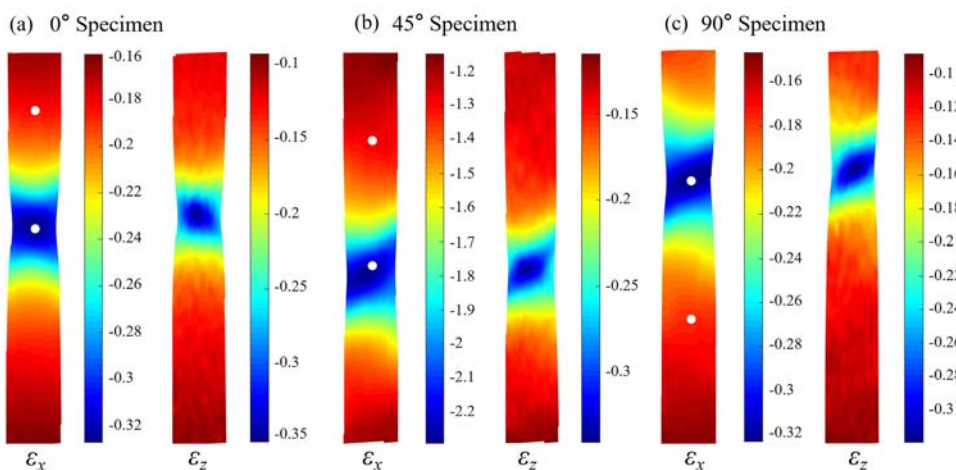


图 10 (a)0°试件宽度方向应变场与厚度方向应变场(断裂前 40s,总时长约 15min); (b)45°试件宽度方向应变场与厚度方向应变场(断裂前 40s,总时长约 13min); (c)90°试件宽度方向应变场与厚度方向应变场(断裂前 40s,总时长约 14min)

Fig. 10 (a) width strain field and through-thickness strain field of the 0° specimen (40s before fracture, total loading duration is about 15min); (b) width strain field and through-thickness strain field of the 45° specimen (40s before fracture, total loading duration is about 13min); (c) width strain field and through-thickness strain field of the 90° specimen (40s before fracture, total loading duration is about 14min)

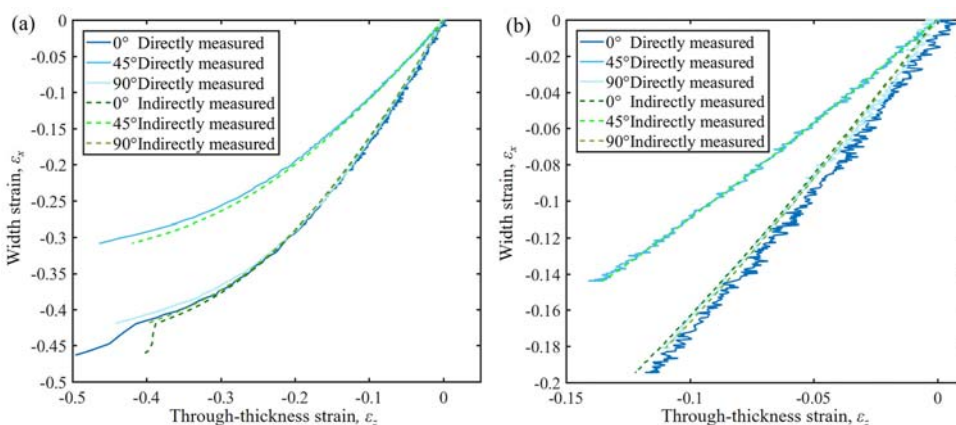


图 11 3 个 DP780 双相钢试件(a)颈缩区和(b)非颈缩区的 ϵ_x - ϵ_z 曲线

Fig. 11 ϵ_x - ϵ_z curve of (a) the necking region and (b) non-necking region for the three specimens of DP780 dual-phase steel

表 2 DP780 双相钢 Lankford 系数测量结果统计表

Tab. 2 The Lankford coefficient measurement results of the DP780 dual-phase steel

	试件类型	直接测量	间接测量	偏差
颈缩区 ($\epsilon_{xx} : -0.15 \sim 0$)	0°试件	1.598	1.5732	1.58%
	45°试件	1.0275	1.0682	3.81%
	90°试件	1.6191	1.5844	2.19%
	Lankford 系数 (R 值)	1.3180	1.3235	0.41%
非颈缩区	0°试件	1.5896	1.5911	0.09%
	45°试件	1.0453	1.0583	1.23%
	90°试件	1.6074	1.6448	2.27%
	Lankford 系数 (R 值)	1.3219	1.3381	1.21%

3 结论

本文提出了基于双平面镜辅助多视角 DIC 的板状试件 Lankford 系数的直接测量方法,对 2 种钢板状试样 Lankford 系数的直接测量结果与间接测量结果符合良好,证明了本文提出方法的可行性和准确性。与常规的基于 DIC 前表面测量与体积守恒假设的间接测量方法相比,本文方法可实现 Lankford 系数的直接测量;与已有基于多相机 DIC 的直接测量方法相比,本文方法设备简单,无需复杂的多相机同步与标定,测量系统硬件成本低,测量过程简便高效。由于本文方法仅需一套常规的双相机 DIC 系统和成本低廉的双反射镜即可实现板状试样前后表面全场变形和厚度变形场的准确测量,成本低,实施简单,因此有望在 Lankford 系数、硬化指数、杨氏模量等重要金属材料本构参数的准确表征方面具有较广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] HILL R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1948, 193(1033): 281—297.
- [2] GRAF A, HOSFORD W F. Calculations of forming limit diagrams[J]. Metallurgical Transactions A, 1990, 21: 87—94.
- [3] LANKFORD W T, SNYDER S C, BAUSHER J A. New criteria for predicting the press performance of deep drawing sheets[J]. Transactions of American Society for Metals, 1950, 42:1197—1205.
- [4] HU Q, LI X, HAN X, et al. A normalized stress invariant-based yield criterion: modeling and validation[J]. International Journal of Plasticity, 2017, 99:248—273.
- [5] RAMOS G C, STOUT M, BOLMARO R E, et al. Study of a drawing-quality sheet steel. I: stress/strain behaviors and Lankford coefficients by experiments and micromechanical simulations[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(17):2285—2293.
- [6] HUANG G, YAN B, XIA Z. Measurement of r -values of high strength steels using digital image correlation[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2011, 4(1):385—395.
- [7] GU G H, KIM Y, KWON H, et al. A new proposal for a method to measure orthogonal r -value using a single tensile test with three-dimensional digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 2022, 62(6):999—1006.
- [8] STICKELS C, MOULD P. The use of Young's modulus for predicting the plastic-strain ratio of low-carbon steel sheets[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1970, 1:1303—1312.
- [9] GHOSH M, MIROUX A, KESTENS L A I. Correlating r -value and through thickness texture in Al-Mg-Si alloy sheets[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 619:585—591.
- [10] FANG S, ZHENG X, ZHENG G, et al. A new and direct r -value measurement method of sheet metal based on multi-camera dic system[J]. Metals, 2021, 11(9):1401.
- [11] HUANG M, CHENG H. Determination of all elastic and plastic parameters for sheets of cubic metals only by uniaxial tension tests[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2015, 49:539—547.
- [12] 胡世光. 板料冷压成形原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1979:84—90 (HU Shiguang. Sheet cold pressure forming principle[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1979:84—90 (in Chinese))
- [13] 王先进, 焦书军, 魏上云. 深冲钢板 r 值在线检测技术评述[J]. 钢铁, 1995(10):75—78, 32 (WANG Xianjin, JIAO Shujun, WEI Shangyun. Review of r -value on-line measurement technology of deep-drawing sheet steel[J]. Iron and Steel, 1995(10):75—78, 32 (in Chinese))
- [14] CHU T C, RANSON W F, SUTTON M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics[J]. Experimental Mechanics, 1985, 25:232—244.

- [15] PAN B. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(8):082001.
- [16] 俞立平, 杨昊天, 马璐军, 等. 基于超灵敏视频引伸计的飞行器舵机连杆拉压刚度准确测量[J]. *实验力学*, 2022, 37(1):1-8 (YU Liping, YANG Haotian, MA Lujun, et al. Accurate tensile/compressive stiffness measurement of the connecting rod of flight vehicle steering engine based on an ultrasensitive video extensometer [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(1):1-8 (in Chinese))
- [17] 王博, 俞立平, 潘兵. 数字图像相关方法中匹配及过匹配形函数的误差分析[J]. *实验力学*, 2016, 31(3):291-298 (WANG Bo, YU Liping, PAN Bing. On the error analysis of matched and over matched shape function in digital image correlation method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(3):291-298 (in Chinese))
- [18] 叶南, 张丽艳. 基于立体视觉的板料塑性应变比测量[J]. *光学学报*, 2010, 30(12):3515-3523 (YE Nan, ZHANG Liyan. Determining plastic strain ratio of sheet metal based on stereo vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12):3515-3523 (in Chinese))
- [19] 邹宇明, 高怡斐, 马亚鑫. 基于数字图像相关方法的 IF 钢 n 值、 r 值测试[J]. *物理测试*, 2017, 35(4):27-32 (ZOU Yuming, GAO Yifei, MA Yaxin. Measurement of the n -value and r -value of IF steel based on the digital image correlation method[J]. *Physics Examination and Testing*, 2017, 35(4):27-32 (in Chinese))
- [20] XIE X, LI J, ZHANG B, et al. Direct measurement of R value for aluminum alloy sheet metal using digital image correlation[C]. *International Digital Imaging Correlation Society: Proceedings of the First Annual Conference*, 2016.
- [21] ORTEU J J, BUGARIN F, HARVENT J, et al. Multiple-camera instrumentation of a single point incremental forming process pilot for shape and 3D displacement measurements: methodology and results[J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(4):625-639.
- [22] WANG Y, LAVA P, COPPIETERS S, et al. Application of a multi-camera stereo DIC set-up to assess strain fields in an Erichsen test: methodology and validation[J]. *Strain*, 2013, 49(2):190-198.
- [23] CHEN B, PAN B. Mirror-assisted multi-view digital image correlation: principles, applications and implementations[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 149:106786.
- [24] CHEN B, PAN B. Mirror-assisted panoramic-digital image correlation for full-surface 360-deg deformation measurement[J]. *Measurement*, 2019, 132:350-358.
- [25] ZHU K, PAN B. Panoramic/Dual-surface digital image correlation measurement using a single camera [J]. *Sensors*, 2022, 22(9):3266.
- [26] PAN B, WU D, XIA Y. An active imaging digital image correlation method for deformation measurement insensitive to ambient light[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1):204-209.
- [27] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [28] PAN B, LI K, TONG W. Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53:1277-1289.
- [29] CHEN B, PAN B. Through-thickness strain field measurement using the mirror-assisted multi-view digital image correlation[J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 137:103104.
- [30] AMIDROR I. Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2002, 11(2):157-176.

The direct measurement of the Lankford coefficient of sheet metal based on the mirror-assisted multi-view digital image correlation

ZHU Kaiyu¹, CHEN Bin¹, SUN Zijie², PAN Bing¹

(1. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Beijing Satellite Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100863, China))

Abstract: The Lankford coefficient is a key parameter for evaluating the formability of sheet metal. Accurate determination of the Lankford coefficient is of significance to the application of classical yield criteria for anisotropic materials. This paper proposes a novel method for measuring the Lankford coefficient of sheet metal based on the mirror-assisted multi-view digital image correlation (mirror-assisted MV-DIC) technique. With the assistance of dual planar mirrors, the surface profile and deformation field of both the front and rear surfaces of the specimen can be simultaneously measured by a single set of three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) system based on binocular stereovision. Then, by applying reflection transformation, the full-field thickness and thickness strain of the sheet metal can be directly measured, enabling the direct measurement of the Lankford coefficient without relying on the volume conservation assumption used in existing measurement methods. A series of uniaxial tensile experiments were respectively conducted on 45 steel and DP780 dual-phase steel sheet specimens to compare the measurement accuracy of the proposed direct measurement method with existing indirect measurement methods. The results showed that the deviations of the proposed method and the volume conservation-based Lankford coefficient measurement method were 2.62% and 0.41% for the necking region, respectively, and 7.07% and 1.21% for the non-necking region, respectively. The proposed method provides a low-cost and convenient technique for measuring the dual-surface deformation fields and the thickness of sheet specimens, which has practical prospects for accurately characterizing the Lankford coefficient, hardening exponent, Young's modulus, and other constitutive parameters of metal materials.

Keywords: Lankford coefficient; multi-view digital image correlation; thickness strain; planar mirrors