

文章编号: 0253-2239(2010)12-3515-09

基于立体视觉的板料塑性应变比测量

叶 南 张丽艳

(南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要 提出一种测定板料塑性应变比的新方法。在对双相机进行离线标定以后,利用双相机动态采集板料在单向拉伸时表面变形过程的数字图像,获取在时间轴上相同步的两套图像序列;对这些图像采用立体视觉技术和数字图像相关方法重建各个变形时刻板料表面三维外形;并根据有限应变理论计算局部最大最小主应变;最后利用均匀塑性变形期间相同变形时刻局部应变近似相等的性质,换算出长度与宽度方向的应变,进而计算出板料的塑性应变比。在GB/T 5027-2007标准规定的实验条件下完成了对深冲铝板6016T4PD,硬铝2A12-T4,2A12-O等的塑性应变比测量。结果显示本文方法快速、准确。

关键词 板料成形;塑性应变比;应变测量;立体视觉;数字图像相关

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3515

Determining Plastic Strain Ratio of Sheet Metal Based on Stereo Vision

Ye Nan Zhang Liyan

(Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract A new technique for determining the plastic strain ratio of sheet metal is proposed. After off-line calibration of the two cameras, digital images of the process of sheet metal surface deformation were temporally taken by the cameras so that two sets of time-synchronization image serial were obtained, the 3D shapes of sheet metal surfaces at different deformation time were reconstructed by using stereo vision and digital image correlation methods consequently. Local major and minor strains were then evaluated in terms of finite strain theory. By exploiting the approximate equality of local strains at the same moment during uniform plastic deformation, the major and minor strain were converted into the strains in length and width directions, from which r value can finally be determined. Under the experimental conditions prescribed in GB/T 5027-2007, r values of AA6016T4PD, 2A12-T4 2 and 2A12-O were determined, and the results demonstrated the proposed technique was accurate and rapid.

Key words sheet metal forming; plastic strain ratio; strain measurement; stereo vision; digital image correlation

1 引 言

板料成形是材料加工技术中的重要分支之一,在航天、航空、船舶、汽车和电器等国民经济的各部门得到了广泛的应用。有多种描述板料成形性能的技术指标,其中板料的塑性应变比 r (又称厚向异性系数)是反映其深冲压性能的关键因素之一^[1]。 r 值是以单向拉伸中,在均匀塑形阶段宽度方向

的真实塑性应变和厚度方向的真实塑性应变之比表示的,目前确定 r 值的方法通常有以下几种:1)实验室条件下的人工测量^[2];2)在板料生产现场用X射线法或电磁超声法在线检测^[3~5];3)基于微观晶体结构的理论估算^[6]。实验室条件下的测量一般是用引伸计测量长度方向的应变,再用卡尺等工具测量宽度方向的应变;或者长宽方向都使用引伸计进行

收稿日期: 2010-02-01; 收到修改稿日期: 2010-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(50875130)、博士点基金(200802870016)和江苏省支撑计划(BK2009382)资助课题。

作者简介: 叶 南(1982—),男,博士研究生,主要从事非接触三维几何测量和板料成形应变测量等方面的研究。

E-mail: Isaac_yn@126.com

导师简介: 张丽艳(1967—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事非接触三维几何测量、机器视觉检测和逆向工程等方面的研究。E-mail: zhangly@nuaa.edu.cn

测量。该方法测量设备简单,但引伸计装夹不当会导致引伸计的刀口对试件表面有的损伤,若手动测量宽度方向的应变,还需在停机状态下完成,不容易保证相同材料的各次测量是在统一的应变/应变范围条件下进行,测量精度受人工操作影响较大。在线检测具有快速、无损等优点,但也存在明显的不足。例如,高能 X 射线有一定的放射性污染,对靶材也有特殊要求;织构分析估算中采用大量简化处理而漏失信息,检测精度不高;实验设备比较复杂,制造、使用和维护难度较大、成本较高;电磁超声法的检测精度受被测板带的振动及周围环境温度变化的影响较大等。理论估算法是建立在假定的晶体模型基础上的,但由于对同种材料进行不同的热处理方式会改变晶体构型,且多晶体材料的晶体构型往往很难准确建模,因此目前理论估算的结果精度不高。

由于厚度方向真实塑性应变由板料长、宽方向上的应变所确定,因此只要能测量得到试件表面长、宽方向的应变分布,即可获得 r 值。数字图像相关方法^[7]可用于很多场合下的物体表面位移和应变测量^[8,9]。使用二维数字图像相关技术可测量面内位移和应变,但对被测物体和光路布置有如下几点限制:1)要求测量过程中物体的离面位移或变形很小;2)摄像机光轴与物体表面垂直;3)需要确定物距和

像距的比例关系,这可通过测量物距(镜头焦距已知)或者标定空间一标准长度对应图像的像素长度两种途径来获取。由于单拉试件在夹紧过程中会产生较明显的刚体运动和离面位移,且测量的视场和物距较大,因此很难保证摄像机光轴与物体表面垂直,物距变化也无法准确确定物距和像距的比例关系,因此本文根据双相机动态采集单向拉伸过程中板料表面的数字图像对序列,采用立体视觉^[10,11]和数字图像相关方法获取在单向拉伸实验中变形板料表面三维几何外形和表面各点相对位移,并在此基础上由有限应变理论计算局部最大、最小主应变,利用均匀塑性变形阶段相同变形时刻各个局部应变近似相等的性质,换算出长度与宽度方向的应变,进而计算出板料塑性应变比 r 值。采用立体视觉与数字图像相关方法相结合的技术可以有效避免上述二维数字图像相关技术中存在的局限,因此这种新的板料塑性应变比测量技术具有简便易行、操作灵活,对实验现场环境要求不高,可实现非接触及快速准确测量等特点。

2 系统组成与方法概述

测量所需硬件主要有两个数字摄像机、一个光源、平面标定板、相机同步采集控制器、计算机以及显示设备,结构示意图如图 1 所示。

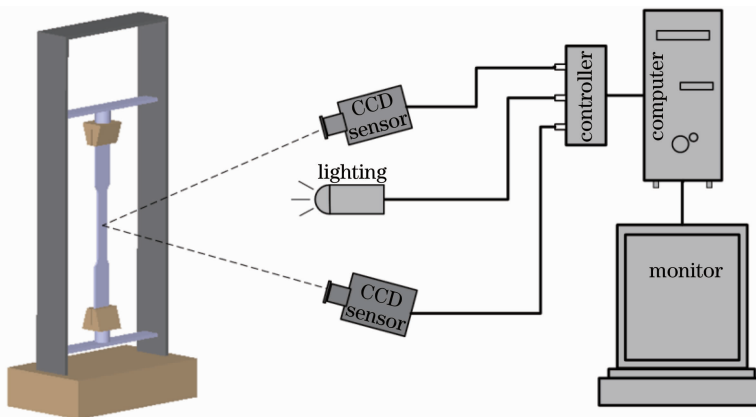


图 1 硬件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the hardware

在双相机和光源装置固定好后对该装置进行标定,以确定两相机各自的内部系统参数和两相机之间的相对空间位置;对被测试件表面进行简单的喷涂处理增加表面纹理信息,以便立体匹配和时序匹配能顺利进行;触发控制器控制两个 CCD 摄像机同步拍摄试件变形过程并启动电子万能试验机进行单向拉伸实验,以获取在时间轴上相同步的两套图像

序列;将这些图像作为软件部分的输入数据,由算法在参考图像(即未变形时刻左相机摄取的图像)上生成虚拟三角网格,用数字图像相关方法对这些网格节点进行立体匹配和时序匹配,并根据三维重建的结果获取这些网格节点在各变形时刻的三维坐标;再由变形前后三角网格顶点的三维信息计算得到应变分布,最终完成 r 值的计算和测量。图 2 所示为

不同时刻的物体表面应变分布的色温图,颜色覆盖区域系由本文方法计算得到的应变值表示,图中的

引伸计是为了进行结果的验证比较,详见本文 6.3 节。

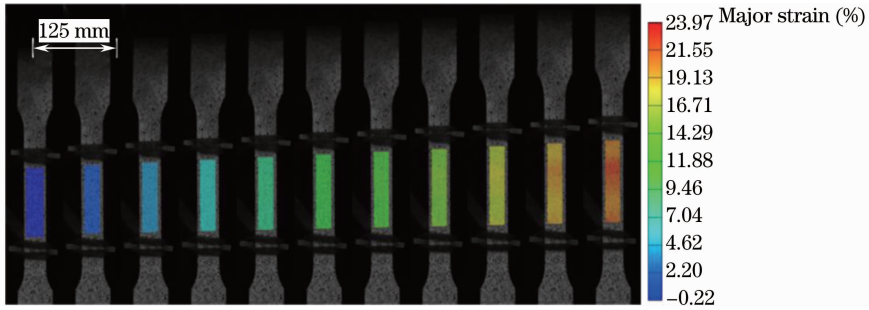


图 2 各变形时刻应变场分布

Fig. 2 Strain field at each deformation time

3 立体视觉原理

立体视觉中最常用的一种模型为双目立体视觉模型。它是在对人类视觉系统研究的基础上,通过对双目立体图像的处理,获取场景的三维信息,从而实现从二维图像到三维空间的重构。图 3 是双目立体视觉原理的简单示意图,其中 D 是待测量的三维点, I_l 和 I_r 分别是点 D 在左右相机像平面上的投影点。 O_l, O_r 分别是左右两个相机的光心。

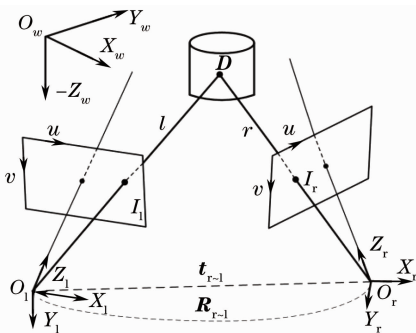


图 3 双目立体视觉模型示意图

Fig. 3 Stereo vision model

3.1 双相机模型及其标定

相机模型就是对景物成像到图像平面的物理过程的一个数学描述。通常采用针孔模型来表示,如图 3 所示。在齐次坐标下该模型可表示为

$$s_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_i [\mathbf{R}_i | \mathbf{t}_i] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \alpha_i & 0 & u_{0i} \\ 0 & \beta_i & v_{0i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中下标 $i=l$ 或 r 分别表示左相机和右相机; s 为比例系数; $[X_w, Y_w, Z_w]^T$ 为点 D 在世界坐标系下

的坐标; $[u, v]^T$ 是点 D 在图像平面上的像点转换成像素表示的坐标; \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 分别为从世界坐标系到左、右相机坐标系的旋转变换矩阵和平移变换向量; \mathbf{A} 是相机的固有成像参数矩阵; $[u_0, v_0]^T$ 为图像平面的主点坐标, α, β 表示图像在 u 轴、 v 轴的等效焦距参数。

由于镜头畸变的影响,实际成像点(用 I_d 表示)并不严格是三维点 D 和光学中心 O 的连线与图像平面的交点(用 I_u 表示),而是有了一定的镜头畸变偏移。镜头畸变呈复杂的非线性,一般可用高阶多项式模型近似。综合考虑了径向畸变和切向畸变,将畸变模型表示为

$$\begin{aligned} u_d &= u_u + u_u [k_1 r^2 + k_2 r^4] + \\ &\quad [2d_1 u_u v_u + d_2 (r^2 + 2u_u^2)] \\ v_d &= v_u + v_u [k_1 r^2 + k_2 r^4] + \\ &\quad [2d_2 u_u v_u + d_1 (r^2 + 2v_u^2)], \end{aligned} \quad (2)$$

式中下标 u 和 d 分别表示无畸变和有畸变的情况; (u_u, v_u) 和 (u_d, v_d) 分别为 I_u 和 I_d 的像素坐标; $r = \sqrt{u_u^2 + v_u^2}$; k_1, k_2 是径向畸变系数, d_1, d_2 为切向畸变参数。(1)式中的矩阵 \mathbf{A}_i 和(2)式畸变系数 k_1, k_2, d_1, d_2 统称为相机的内部参数。

如图 3 所示,用 \mathbf{R}_{r-1} 表示从右相机坐标系到左相机坐标系的旋转矩阵, \mathbf{t}_{r-1} 表示从右相机坐标系到左相机坐标系的平移向量,则有如下变换关系:

$$\mathbf{D}_l = \mathbf{R}_{r-1} \mathbf{D}_r + \mathbf{t}_{r-1}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{D}_l 和 \mathbf{D}_r 分别表示三维点 D 在左相机和右相机坐标系下的坐标。将时间坐标系设定为与左相机坐标系重合,则 $\mathbf{R}_{r-1}, \mathbf{t}_{r-1}$ 统称为相机的外参数。对于双相机系统进行标定,即是解算相机的内外参数。

双相机系统标定对于双目立体测量至关重要,对此人们做了大量研究。其中基于平面模板的标定

方法在使用便捷和标定精度方面具有综合优势。本文使用带有圆点阵列的平面标靶,采用在文献[12, 13]基础上加以改进的三步标定方法^[14]进行系统标定。该标定算法简便易行,稳定可靠,能够满足一般工业测量的精度要求。

3.2 立体匹配和时序匹配

图像匹配是视觉测量中必须要解决和最难解决的问题之一。简单来说,匹配问题就是要在已知模板图像的坐标位置情况下,求得它在待匹配图像上的对应点位置坐标。本文涉及两方面匹配,即在同一时刻左右相机采集到的图像上进行的立体匹配和在不同时刻同一相机采集到的图像上进行的时序匹配。立体匹配的目的是能够正确地建立同一空间点 D 在左右两幅图像上的像点 I_l 和 I_r 之间的对应关系;时序匹配的目的是确定物体表面同一点在序列图像上的对应关系,并根据各变形时刻三维重建结

果(见 3.3 节)获取该点在变形过程中的位移轨迹。但由于物体在变形过程中其表面形貌已经发生变化,所谓单个点的对应没有明显的物理意义,而使用子区的概念,来跟踪局部区域的变形程度,并以相邻子区中心连线建立虚拟网格,以网格的变形来近似表示局部区域的变形。

数字图像相关是一种基于局部子区的相关方法,它利用具有随机纹理的被测物体表面在数字图像上会形成随机灰度分布以致在局部区域内可以形成某种统计意义上的独一性的特点,以进行图像匹配,精度可达 $1/10 \sim 1/100$ pixel,是一种高精度亚像素匹配算法。如图 4 所示,在参考图像上取以点 $p(u_0, v_0)$ 为中心,大小为 $(2M+1)$ pixel \times $(2M+1)$ pixel 的矩形参考图像子区,则该子区在匹配图像(匹配图像可以是立体或时序图像)必然对应一个最为相似的变形子区满足相关函数的值最大^[15],即

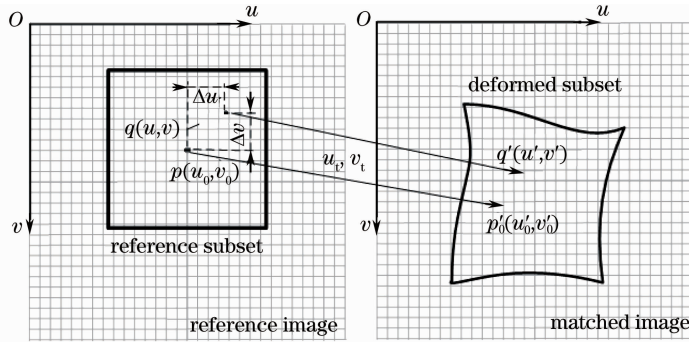


图 4 数字图像相关示意图

Fig. 4 Schematic of digital image correlation

$$C_{f,g} = \frac{\sum_{u=-M}^M \sum_{v=-M}^M | [f(u,v) - f_m] \cdot [g(u',v') - g_m] |}{\sqrt{\sum_{u=-M}^M \sum_{v=-M}^M [f(u,v) - f_m]^2} \cdot \sqrt{\sum_{u=-M}^M \sum_{v=-M}^M [g(u',v') - g_m]^2}}, \quad (4)$$

式中 $f(u, v)$ 为参考图像子区内整像素点位置处的灰度值, $g(u', v')$ 为在变形子区中与 $f(u, v)$ 相对应的灰度值。 f_m, g_m 分别为参考子区和变形子区的灰度平均值。匹配图像的变形子区会涉及两种变形: 另一种在立体匹配中因透视投影所产生的; 一种是在时序匹配中因为物体位移和变形所产生的。通常在局部范围内, 采用有限元方法中常用的一阶或二阶形函数^[15]来近似表示变形子区的几何形状。其一阶形函数的具体表达式为

$$u' = u_0 + \Delta u + u_t + \frac{\partial u_t}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial u_t}{\partial v} \Delta v,$$

$$v' = v_0 + \Delta v + v_t + \frac{\partial v_t}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial v_t}{\partial v} \Delta v, \quad (5)$$

式中 u_t, v_t 分别为参考子区中心 $p(u_0, v_0)$ 在 u, v 方向上的像素位移值; $\Delta u, \Delta v$ 分别为点 $q(u, v)$ 到点 $p(u_0, v_0)$ 的 u, v 方向上的距离; $\partial u_t / \partial u, \partial u_t / \partial v, \partial v_t / \partial u, \partial v_t / \partial v$ 为图像子区的位移梯度, 即反映变形子区的变形方式与变形程度。令 $s = [u_t, \partial u_t / \partial u, \partial u_t / \partial v, v_t, \partial v_t / \partial u, \partial v_t / \partial v]^T$, s 即为(4)式中的自变量。由于经(5)式变换后的 u', v' 为非整数解, 因此利用变形子区中整像素灰度值进行采用三次样条插值来获取 $g(u', v')$ 的具体数值。对(4)式采用非线性迭代优化(如 N-R 方法^[16])求取最大函数值, 此

时 s 所对应的子区变形在统计意义上与实际变形最为接近,其中 u_i, v_i 值在立体匹配中通常称为视差,在时序匹配中称为像素位移。

需要说明的是,大变形时仅仅靠常规的相关计算进行匹配有时很难保证其检测的可靠性和精度,一方面可通过相关系数来进行判断,一方面可采用一些补偿技术来提高图像间的相关性^[17]。在单向拉伸中,对常规塑性材料,一般试件变形至 10%~15% 已经处于均匀塑形变形阶段,此阶段的散斑图像(子区)与未变形时对应图像(子区)的相关系数很高,在实验中,对所有的测量,相关系数均在 0.9 以上。因此采用上述方法的匹配精度可以保证。

3.3 三维重建

立体视觉中三维重建即是根据相机标定和立体匹配的结果,采用三角法原理解算出实际空间点的三维坐标。设图 3 中左右图像上点 I_l 和 I_r 在各自的相机坐标系中的三维物理坐标分别为 \mathbf{I}_l 和 \mathbf{I}_r ,记原点 O_l 和 I_l 连成的射线为 $L: a\mathbf{I}_l (a \in \mathbf{R})$; 同样, O_r 和 I_r 连成的射线 r 在左相机坐标系(也是本文所取的测量系统坐标系)中可表示为 $R: b\mathbf{R}_{r-1}\mathbf{I}_r + t_{r-1} (b \in \mathbf{R})$ 。其中 a 和 b 分别为两条射线的参数。理论上,射线 L 和 R 应该相交,它们的交点即为所求的三维坐标点。但是由于图像匹配以及数值计算等误差因素的影响,它们一般不相交,因此求取连接 L 和 R 的公垂线的中点作为重建的三维坐标。设 w 表示与这两条射线都垂直的向量,即: $w = \mathbf{I}_l \times \mathbf{R}_{r-1}\mathbf{I}_r$, 那么三角法变为求解 a 、 b 和 $c (c \in \mathbf{R})$, 满足

$$D_1 a \mathbf{I}_l - b \mathbf{R}_{r-1} \mathbf{I}_r + c w = t_{r-1}, \quad (6)$$

根据(6)式得到参数 a 、 b 和 c 后,则待求的三维坐标点为

$$D_1 = a \mathbf{I}_l + c w / 2. \quad (7)$$

4 应变计算

根据立体匹配结果可由三维重建方法得到物体表面的三维坐标。再根据时序匹配的结果,可以得到物体表面一点在各个变形阶段的空间位移信息,若在参考图像上设定某三角形,则由上述方法可获得其对应的空间三角形以及该三角形在各变形时刻的顶点坐标,根据空间三角形边长的变化,即可计算三角形内部的应变信息。如图 5 所示,在参考图像上有一三角形,通过立体匹配和三维重建可获得未变形时刻的空间三角网格 $\triangle D_0 D_1 D_2$, 通过时序匹配在变形时刻的左右图像上找到对应的三角形,并进行三维重建获得变形时刻的空间三角网格

$\triangle D'_0 D'_1 D'_2$ 。以这两个空间三角网格顶点的三维坐标为基础数据,采用有限应变理论^[18]和网格应变法^[19]来计算物体表面的应变分布。

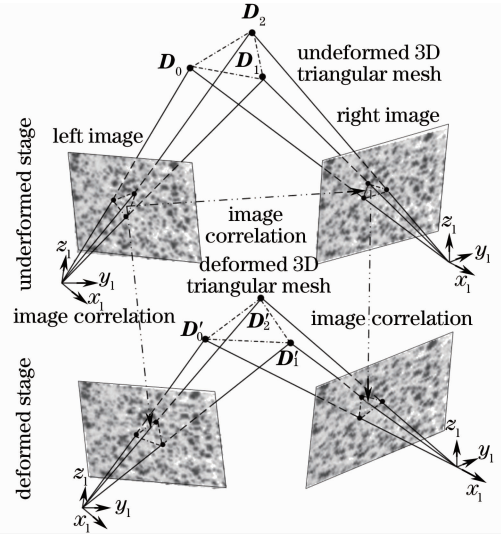


图 5 空间三角网格测量示意图

Fig. 5 Schematic of 3D triangular meshes measurement

采用面内形变梯度张量、柯西-格林张量和拉格朗日应变三者间换算关系计算三角网格内部的真实应变。具体过程如下:

将图 5 中的空间三角网格进行坐标变换,将其顶点坐标用二维向量表达,结果如图 6 所示。定义面内形变梯度张量为 F ,它是二阶张量,则根据图 6 所示的坐标对应关系,有

$$\begin{aligned} x'_1 &= F_{11}x_1 + F_{12}y_1, & y'_1 &= F_{21}x_1 + F_{22}y_1, \\ x'_2 &= F_{11}x_2 + F_{12}y_2, & y'_2 &= F_{21}x_2 + F_{22}y_2. \end{aligned} \quad (8)$$

事实上, F 可进一步分解为 $F = RU$, 其中 R 为刚体旋转矩阵, U 为形变张量,因此 F 并不具有对刚体运动的不变性。而柯西-格林张量可表示为 $C = F^T F$, 可见 C 对刚体运动具有不变性。因此,采用对空间三角形网格进行坐标变换的方式消除刚体

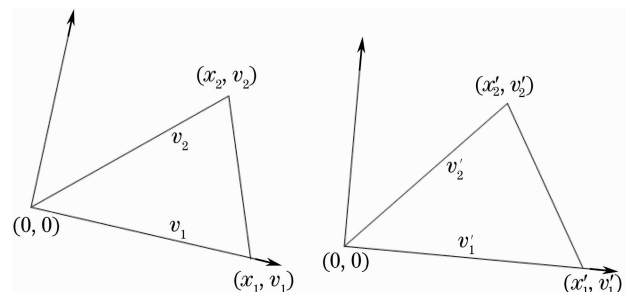


图 6 坐标变换后变形前后三角网格

Fig. 6 Triangular meshes before and after deformation with coordinate transformation

运动分量,则图 6 中的坐标可表示为

$$\begin{aligned} (x_1 = |\mathbf{v}_1|, y_1 = 0), (x_2 = (\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2) / |\mathbf{v}_1|, \\ y_2 = |\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2| / |\mathbf{v}_1|) \\ (x'_1 = |\mathbf{v}'_1|, y'_1 = 0), (x'_2 = (\mathbf{v}'_1 \cdot \mathbf{v}'_2) / |\mathbf{v}'_1|, \\ y'_2 = |\mathbf{v}'_1 \times \mathbf{v}'_2| / |\mathbf{v}'_1|) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\mathbf{v}_1 = \mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_0$, $\mathbf{v}_2 = \mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_0$, $\mathbf{v}'_1 = \mathbf{D}'_1 - \mathbf{D}'_0$, $\mathbf{v}'_2 = \mathbf{D}'_2 - \mathbf{D}'_0$.

而柯西-格林张量与拉格朗日应变的关系为 $\mathbf{C} = \mathbf{I} + 2\mathbf{E}$, 其中 \mathbf{E} 为格朗日应变张量, \mathbf{I} 为 2×2 单位矩阵。定义

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\max/\min} = (\mathbf{E}_{11} + \\ \mathbf{E}_{22} \pm \sqrt{(\mathbf{E}_{11} - \mathbf{E}_{22})^2 + (2\mathbf{E}_{12})^2}) / 2, \end{aligned} \quad (10)$$

则最大最小真实应变可表达为

$$\epsilon_{\max/\min} = \ln \sqrt{1 + 2\mathbf{E}_{\max/\min}}. \quad (11)$$

5 r 值计算

对于单拉试件, (11) 式中最大、最小真实主应变的方向分别为长度和宽度方向。由于 r 值是在均匀变形阶段测得, 因此在同一变形时刻局部各点的最大、最小真实主应变理论上应该相等(6.2 节的实测结果也证明这一点), 因此可使用各点处的最大、最小主应变的平均值来代替该变形时刻长、宽方向的真实主应变:

$$\epsilon_L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_{\max}^i, \quad \epsilon_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_{\min}^i, \quad (12)$$

式中 ϵ_L, ϵ_B 为试件长度方向和宽度方向的真实应变; $\epsilon_{\max}^i, \epsilon_{\min}^i$ 分别为第 i 个点的最大、最小主应变; n 为点的总数。再根据体积不变原理, 即可换算得到 r 值。公式如下:

$$r = - \frac{\epsilon_B}{\epsilon_L + \epsilon_B}. \quad (13)$$

由于 r 值取决于试样与轧制方向的取向和应变水平, 因此用单拉试件测量 r 值时, 只能在缩颈以前的均匀塑形延伸阶段进行, 并且一般从 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 三个方向截取试件进行测定, 并用三个方向测量结果的加权平均值表示该种材料的 r 值。即 $\bar{r} = (r_{0/y} + 2r_{45/y} + r_{90/y}) / 4$, 其中下标 0, 45, 90 表示与板料轧制方向所成的角度, y 表示测量时长度方向的均匀应变水平。

为实现数据处理的自动化, 根据均匀变形阶段与失稳阶段应变数据分布的特点, 定义阈值

$$T = - \lg[\text{std}(\{\epsilon_{\max}^i\})]. \quad (14)$$

判断某时刻的数据处于何种变形阶段。其中 $\{\epsilon_{\max}^i\}$ 表示该阶段所有最大主应变组成的集合, $\text{std}(\cdot)$ 表示数据集合的标准方差。实验表明: 当 $T > 5$ 时, 变形时刻处于均匀变形阶段; 当 $T < 4$ 时处于集中失稳阶段; 当 $T \in [4, 5]$ 时, 处于均匀变形到分散失稳再由分散失稳到集中失稳的过渡阶段(见 6.2 节)。

6 测量实例

应用本文测量方法已完成深冲铝板 6016T4PD、6181T4PD, 航空铝板 2A12-O、2A12-T4、7B04-O 材料的 r 值测定。本节给出 0.9 mm 厚度深冲铝板 6016T4PD、1.5 mm 厚度 2A12-T4 的测量实例, 以及这五种材料的测量结果。

6.1 硬件组成和试件外形

测量的实验现场如图 7 所示。实验采用 GB/

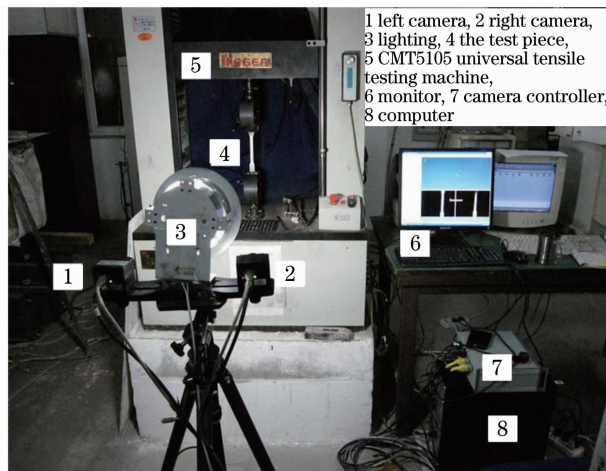


图 7 实验现场

Fig. 7 Experimental site

T5027-2007 标准制备试件和设定拉伸参数。其中试件的外形及几何尺寸如图 8 所示,为增加试件表面的纹理对比度以便测量顺利进行并避免金属高光造成数据缺失,可将试件表面经过去油处理后用强附着力的哑光黑白漆交替喷涂,形成人工散斑,如图 9 所示。实验使用的 CCD 相机为 DH1310FM 数字摄像机,其带有外同步触发接口。光学镜头使用 M5018-MP 镜头,焦距为 50 mm。

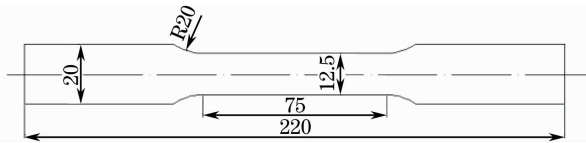


图 8 试件外形及几何尺寸示意图

Fig. 8 Geometry of the test piece



图 9 喷涂散斑后的试件外貌

Fig. 9 Appearance of the test piece with sprayed speckle

6.2 数据处理与输出

图 10、图 11 分别为两种材料试件在均匀变形阶段和失稳阶段的应变分布。两种试件的取向均为 45°。图 10 中的 6016T4PD 材料和 2A12-T4 材料的试件分别选取 16 个和 14 个不同变形时刻,计算应变点总数分别为 3968 个和 3136 个。从图中可以看出,相同变形时刻各数据点应变值比较集中,不同时刻的应变点分布没有交集,并且应变路径呈线性分布,这些时刻均处于均匀塑性变形阶段内,这与实验观察相一致。图 11 给出的 5 个变形时刻是从均匀变形阶段过渡至失稳阶段的应变分布。从应变分布可见,6016T4PD 材料和 2A12-T4 材料在应变分别发展到 0.16 和 0.14 后,相邻变形时刻的应变分布开始出现交集,而且交集的部分不断增多。交集表示所对应的试件表面区域无变形发生,交集之外对应的区域仍然有变形发生,即试件表面的应变不再均匀发展,这说明试件从均匀变形过渡到分散失稳,随着交集部分的逐渐增多,试件渐渐发展成集中失稳,这也与实验观察及板料的塑性变形拉伸失稳理论相一致。

按照 GB/T 5027-2007 规定,同种材料的三个压制方向的 r 值应在相同的应变/应变范围条件下测量。因此,在处理各变形时刻应变分布数据时,可根据 T 值大小自动设定应变条件。图 12 给出了图 10、11 中各阶段 T 值的变化曲线。

图 13 为两种材料三个方向的 r 值分布,具体数

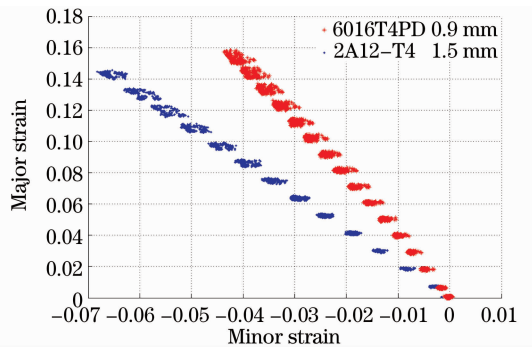


图 10 均匀塑性变形阶段应变分布

Fig. 10 Strain distribution at uniform plastic deformation stages

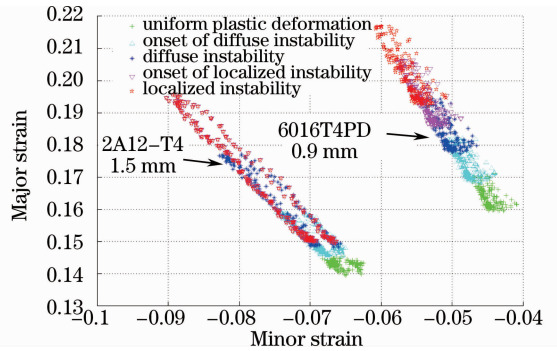


图 11 失稳阶段应变分布

Fig. 11 Strain distribution at plastic instability stages

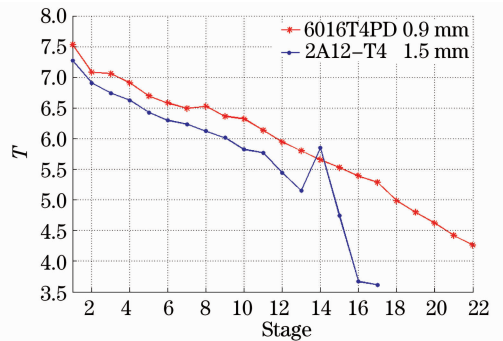


图 12 两种材料的 T 值

Fig. 12 T value of two kinds of material

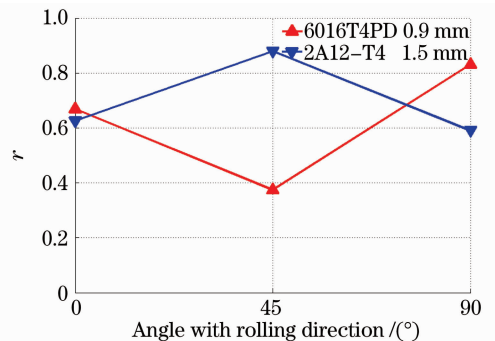


图 13 两种材料的 r 值

Fig. 13 r value of two kinds of material

值如表 1 所示,其中 6016T4PD 0.9 mm 和 2A12-T4 1.5 mm 分别在应变为 15%和 10%的应变条件下计算,对应的 T 值分别为 5.4 和 5.8。

表 2 为五种材料的 \bar{r} 值结果。每种牌号在相同的实验环境下各进行两组实验以比较结果。从表 2 的数据中可见,相同牌号的 \bar{r} 值在两组实验下的结果近似相等,实验结果表明,本文方法的复现情况较好,结果可靠。

表 2 五种材料的 \bar{r} 值结果Table 2 \bar{r} value of five kinds of material

Grade	2A12-O			2A12-T4			7B04-O			6016 T4PD 6181 T4PD	
Thickness /mm	1.0	1.2	1.5	1.0	1.2	1.5	1.0	1.2	1.5	0.9	1.2
Group 1 \bar{r}	0.736	0.699	0.670	0.748	0.768	0.744	0.619	0.539	0.632	0.562	0.525
Group 2 \bar{r}	0.736	0.682	0.670	0.755	0.779	0.750	0.612	0.545	0.625	0.547	0.535

6.3 讨论

为验证本文测量方法的可靠性,将上述两种试件各变形时刻应变分布与各自的应力应变曲线进行比较。图 14 为材料试验机所提供的试件的应力应变曲线,其中应变值是通过长度方向的引伸计获得。从图中可见,6016T4PD 曲线在应变为 0.16~0.2 区间近似水平,2A12-T4 曲线在应变为 0.14~0.15 区间近似水平,按照 Swift 分散失稳准则^[19],此时试件开始发生分散失稳。这个观察结果与图 10,11 所示的最大主应变的变化趋势吻合。

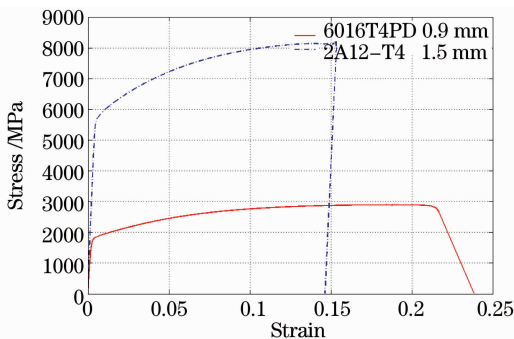


图 14 两种材料单拉试件应力应变曲线

Fig. 14 Stress-strain curve of uniaxial tension with two kinds of material

根据厚向异性板塑性变形应力应变关系的基本方程可得,对于单向拉伸,板料的应变路径呈线性分布,由(13)式可得, $r = -1/(1 + \epsilon_L/\epsilon_B)$,从图 10 中可直观地看到, ϵ_L/ϵ_B 可近似等于应变路径所在直线的斜率。因此 r 值也可由均匀阶段各变形时刻最大最小应变数据所拟合的直线斜率计算得到。这个方法与 GB/T 5027-2007 中 9.2 节提到对不均匀塑性应变材料的测量方法相吻合。

表 1 两种材料在三个轧制方向的 r 值Table 1 r value of two kinds of material in three rolling directions

6016T4PD (0.9 mm)		2A12-T4 (1.5 mm)	
$r_{0/15}$	0.669	$r_{0/10}$	0.626
$r_{45/15}$	0.374	$r_{45/10}$	0.879
$r_{90/15}$	0.831	$r_{90/10}$	0.590
\bar{r}	0.56	\bar{r}	0.74

7 结 论

综合运用双目立体相机标定技术、三维重建方法、数字图像相关原理以及有限应变理论,提出了一种测量板料的塑性应变比 r 值的方法。实验结果表明,本文的测量方法操作灵活、设备简单、对实验环境要求不高,具有较高的测量精度和计算速度。

参 考 文 献

- Liang Bingwen, Chen Xiaodai, Wang Zhiheng. Formability of sheet metal[M]. Beijing: China Machine Press, 1999. 93~111
梁炳文, 陈晓戴, 王志恒. 钣金成型性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 93~111
- Hu Shiguang. Sheet cold pressure forming principle [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1979. 84~90
胡世光. 板料冷压成形原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979. 84~90
- Wang Xianjin, Jiao Shujun, Wei Shangyun. Review of value on-line measurement technology of deep-drawing sheet steel[J]. *Iron and Steel*, 1995, **30**(10): 75~78
王先进, 焦书军, 魏上云. 深冲钢板 \bar{r} 值在线检测技术评述[J]. 钢铁, 1995, **30**(10): 75~78
- Mao Weimin *et al.*. On-line determination technology on Lankford parameter of deep drawing aluminum sheets[J]. *The Chinese J. Nonferrous Metals*, 2006, **16**(7): 1149~1154
毛卫民等. 冲压铝板塑性应变比的在线检测技术[J]. 中国有色金属学报, 2006, **16**(7): 1149~1154
- Mao Weimin. On-line r value determination of deep drawing steel sheet[J]. *Iron and Steel*, 2006, **41**(11): 37~41
毛卫民. 冲压钢板塑性应变比 r 值的在线检测技术[J]. 钢铁, 2006, **41**(11): 37~41
- Lu Qinggong *et al.*. Influence of main texture components on plastic strain ratio of deep drawing steel sheet[J]. *Research on Iron and Steel*, 2000, **5**: 40~43
吕庆功等. 深冲钢板的主要组织对塑性应变比的影响[J]. 钢铁研究, 2000, **5**: 40~43
- M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. D. Helm *et al.*. Advances in

- two-dimensional and three-dimensional computer vision[C]. P. K Rastogi, ed. Topics in Applied Physics, Springer Verlag, 2000, **77**: 323~372
- 8 Sun Wei, He Xiaoyuan, C. Quan *et al.*. Three-dimensional rigid body displacement measurement based on digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 894~901
孙 伟, 何小元, C. Quan 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): 894~901
- 9 Sun Wei, He Xiaoyuan, Zheng Xiang. Three-dimensional displacement measurement based on single CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1723~1729
孙 伟, 何小元, 郑 翔. 基于单摄像机的三维位移测试方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1723~1729
- 10 Xu Qiaoyu, Ye Dong, Che Rensheng. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 81~86
徐巧玉, 叶 东, 车仁生. 基于光学参考棒的立体视觉测量系统现场标定技术[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 81~86
- 11 E. Trucco, A. Verri. Introductory techniques for 3-D computer vision[M]. New Jersey, Prentice Hall, 1998. 139~175
- 12 Z. Y. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 13 Zhang Hui, Zhang Liyan, Chen Jiang *et al.*. Field calibration of binocular stereo system based on planar template and free snapping[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, **28**(3): 695~701
张 辉, 张丽艳, 陈 江 等. 基于平面模板自由拍摄的双目立体测量系统的现场标定[J]. *航空学报*, 2007, **28**(3): 695~701
- 14 Zhang Hui, Zhang Liyan, Wei Hu. Three-step calibration for binocular stereo system [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, **20**(16): 1899~1903
张 辉, 张丽艳, 韦 虎. 双目立体测量系统标定的三步法[J]. *中国机械工程*, 2009, **20**(16): 1899~1903
- 15 H. W. Schreier, M. A. Sutton. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions[J]. *Experimental Mechanics*, 2002, **42**(3): 303~310
- 16 H. A. Bruck, S. R. McNeil, M. A. Sutton *et al.*. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction [J]. *Experimental Mechanics*, 1989, **29**(3): 261~267
- 17 Ye Nan, Zhang Liyang. An improved fractionized displacement transfer algorithm based on digital image correlation in large deformation applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 976~983
叶 南, 张丽艳. 大变形下基于数字图像相关的改进分段位移传递法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 976~983
- 18 Li Hao, Chen Shujian. Continuum mechanics [M]. Wuhan: Press of HUST, 1982. 77~88
李 灏, 陈树坚编译. 连续体力学[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1982. 77~88
- 19 J. H. Vogel, D. Lee. An automated two-view method for determining strain distributions on deformed surfaces [J]. *J. Mater. Shaping Technol.*, 1989, **6**(4): 205~216
- 20 Liang Bingwen, Hu Shiguang. Elastic Plastic Stability Theory [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1983. 321~324
梁炳文, 胡世光. 弹塑性稳定理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983. 321~324