

剪切夹具设计及铝合金循环剪切变形行为

余海燕, 李佳旭, 王友

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: **目的** 研究金属薄板在剪切变形条件下的随动硬化行为。**方法** 设计一款金属薄板循环剪切变形试验夹具, 对夹具的强度进行数值仿真校核。采用该夹具进行 5052 铝合金板的循环剪切试验, 通过数字图像相关测量系统对剪切应变进行跟踪测量, 对变形区剪切变形的均匀性进行分析, 对 5052 铝合金的循环剪切应力应变曲线所表现出的包辛格效应进行讨论。**结果** 该夹具满足强度要求, 剪切变形区的剪切应变与等效应变比值非常稳定, 5052 铝合金板的正向剪切强度与反向剪切强度不同, 在 3.97% 和 7.1% 剪切应变时, 包辛格效应系数分别为 0.328 和 0.51。**结论** 所设计的夹具可以有效实现剪切变形, 剪切应变分布均匀; 试验所用的 5052 铝合金具有显著的包辛格效应。

关键词: 剪切变形; 夹具设计; 铝合金; 硬化行为

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.027

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0157-06

Design of Shear Fixture and Cyclic Shear Deformation Behavior of Aluminum Alloys

YU Hai-yan, LI Jia-xu, WANG You

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

ABSTRACT: In order to investigate the kinematic hardening behavior of metal sheets subject to shear deformation, a set of shear fixture was designed to provide cyclic shear deformation for metal sheets. Strength of the fixture was checked with finite element simulation. Cyclic shear deformation experiments of 5052 aluminum alloys were performed with a newly designed fixture. The shear strain in the shear deformation zone was monitored with the digital image correlation measurement system. The uniformity of the shear strain distribution in the deformation zone was analyzed. Bauschinger effect shown in the cyclic shear stress-strain curves of the 5052 aluminum alloy was discussed. The fixture met the requirement on strength. The ratio of the shear strain with the effective strain was almost constant in the deformation zone. The yield strength of AA5052 under forward shear was different with that under the reverse shear. The Bauschinger effect factor was 0.328 and 0.51 when the shear strain was 3.97% and 7.1%, respectively. The new fixture can provide a perfect shear deformation condition and the shear deformation is evenly distributed. The investigated 5052 aluminum alloy has remarkable Bauschinger effect.

KEY WORDS: shear deformation; fixture design; aluminum alloy; hardening behavior

在十三五规划和汽车轻量化发展纲要中明确规定, 到 2020 年乘用车每行驶 100 km, 油耗必须降至 5 L, 乘用车相对目前水平再减量 10%, 到 2025 年减量 25%。如此高要求的减重目标决定了汽车的轻量化必须向更高标准、更深层次进行。选用包括高强度钢板、

铝合金、镁合金以及碳纤维等轻质材料是汽车轻量化的有效途径之一^[1-2]。铝合金由于具有密度轻和耐腐蚀等优点, 是汽车轻量化材料非常好的选择^[3-4]。

研究表明, 包括钢和铝合金在内的多数金属薄板, 在塑性变形中均存在不同程度的硬化行为^[5-6]。

收稿日期: 2017-09-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51175382)

作者简介: 余海燕 (1976—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为塑性成形工艺、轻量化材料。

根据屈服轨迹的变化规律,可将硬化现象分为各向同性硬化、随动硬化和混合硬化^[7]。各向同性硬化的特征是金属材料在塑性变形中,屈服轨迹只发生尺寸的改变,没有位置的变化。随动硬化的特征是屈服轨迹只发生位置的变化而无尺寸的改变。混合硬化则同时考虑了尺寸和位置的变化。人们常以循环加载下的应力应变曲线来研究金属材料的硬化行为,如拉伸-压缩试验、剪切试验。由于薄板的压缩存在屈曲问题,拉伸易导致塑性紧缩问题,且可达到的塑性变形量较小,试验的实现存在难度,因此剪切试验就成为研究金属材料硬化行为的一个主要手段^[8]。

根据剪切变形原理,变形体在大小相等、方向相反的载荷作用下会发生剪切变形,两载荷作用点之间的区域即为剪切变形区,这是理论情况。实际中,剪切变形区受边界和加载应力集中的影响,剪切变形区大部分区域不是单纯的剪切变形,还存在着其他变形如拉伸压缩变形等,真正纯剪切变形的区域非常小,由此导致应变测量较为困难^[9-10]。

在上述背景下,文中设计了一种新型的剪切试验夹具,该夹具采用两级压齿结构,实现对试样的夹紧。采用 ABAQUS 有限元软件对夹具体进行了强度校核。采用该夹具对 5052 铝合金板进行了循环剪切试验,通过数字图像相关测量系统,对剪切试验过程中的应变进行了跟踪分析,对试样变形区剪切变形的均匀性进行了分析,最后对试验获得的剪切应力应变曲线所表现出的包辛格效应进行了讨论。

1 剪切试验

1.1 材料

试验选用西南铝业生产的冷轧 5052 铝合金板,厚度为 1 mm,含有质量分数为 94.92%的 Al, 3.41%

的 Mg, 0.49%的 Fe, 0.25%的 Si, 0.10%的 Mn, 0.10%的 Cu, 0.10%的 Zn, 0.07%的 C。

1.2 剪切试样

由于剪切夹具结构密切依赖于试样形状,试样形状必须先行确定。常见的几种试样形状见图 1。图 1a 为 Isoipescu 试样^[11],该试样的特征是在长度方向上的中间区域进行了局部减薄,在剪切载荷作用下减薄区域发生剪切变形。由于该试样发生严格意义上剪切变形的区域只是中间对称线上,剪切区域过小导致剪切变形测量不方便。图 1b 为杯形圆盘试样^[12],该试样利用了冲裁变形区剪切变形的原理,在垂直载荷作用下,中间凸出部位与四周连接区发生剪切变形。这种试样同样存在剪切变形区域小、不方便测量的问题,而且两侧的剪切变形区的大小会受载荷偏心的影响。图 1c 为拉伸型长条状试样^[13],试样中部分布有 2 条反对称的切口。该试样在单向拉伸变形中,切口中间区域发生剪切变形。该试样的优点是试验方便,常用单向拉伸试验机就可,无须设置专用夹具,但仍存在剪切变形区过小、变形测量不方便的问题。图 1d 和 e 所示为 Zillman^[14]和 Thuillier 研究的 Z 字形试样^[15],该试样变形前为标准的矩形平板试样,按几何尺寸分为左中右 3 个区域,当左右两区域分别受到方向相反的载荷作用时,中间区域就会发生剪切变形。这个试样的剪切变形区面积较大,而且可测量区域为板平面,易于变形的测量,已被广泛采用,因此文中选取这种形状的试样。

Z 字形试样剪切变形区为中间区域,见图 2,由于受两侧加载区尺寸的影响,实际能达到纯剪切变形的区域小于设计区域,为了确保后续变形测量的可靠性,采用有限元 ABAQUS 软件对宽度分别为 5, 10, 18 mm 的试样变形区内的应力应变进行了分析。采

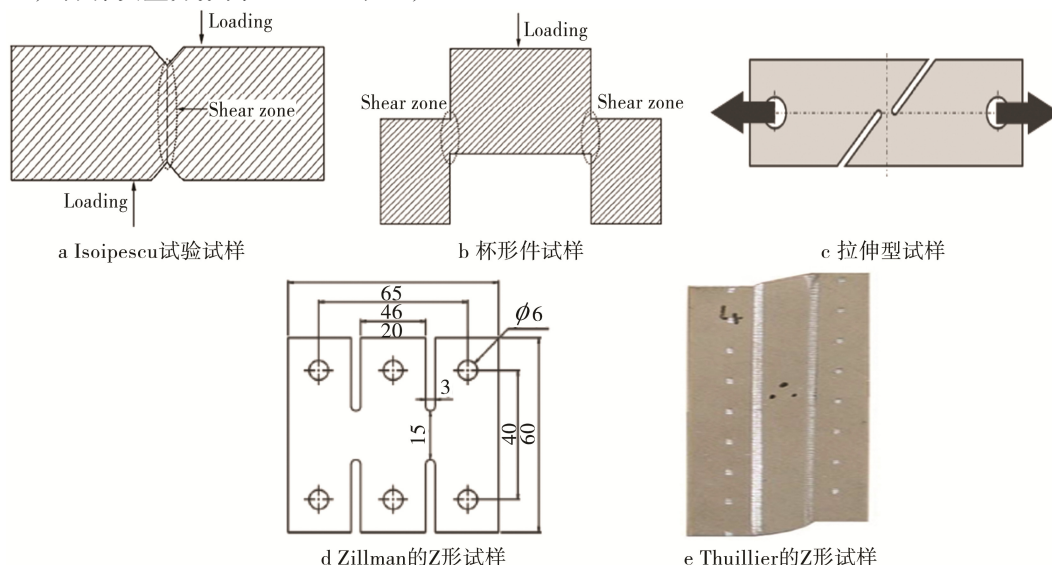


图 1 常见剪切试样

Fig.1 Commonly used specimens in shear testing

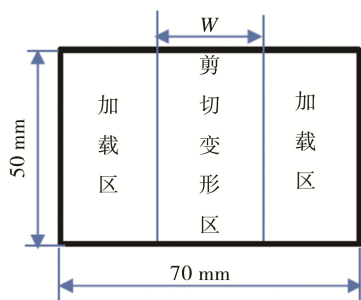


图2 剪切试样尺寸

Fig.2 Dimensions of shear specimen

用 S4 壳单元对试样进行网格划分,厚度方向为 5 个积分点,单元基本尺寸为 1 mm。试样左端非变形区所有节点的 6 个自由度全部约束,右侧加载区所示节点全部加以 1 mm/min 的 y 向速度,加载时间为 48 s。3 种宽度试样变形区剪应力分布见图 3。可以看出,在相同的载荷和约束条件下,随着宽度的增加,变形区的剪应力均匀区逐渐减小,也就是说变形区越宽的试

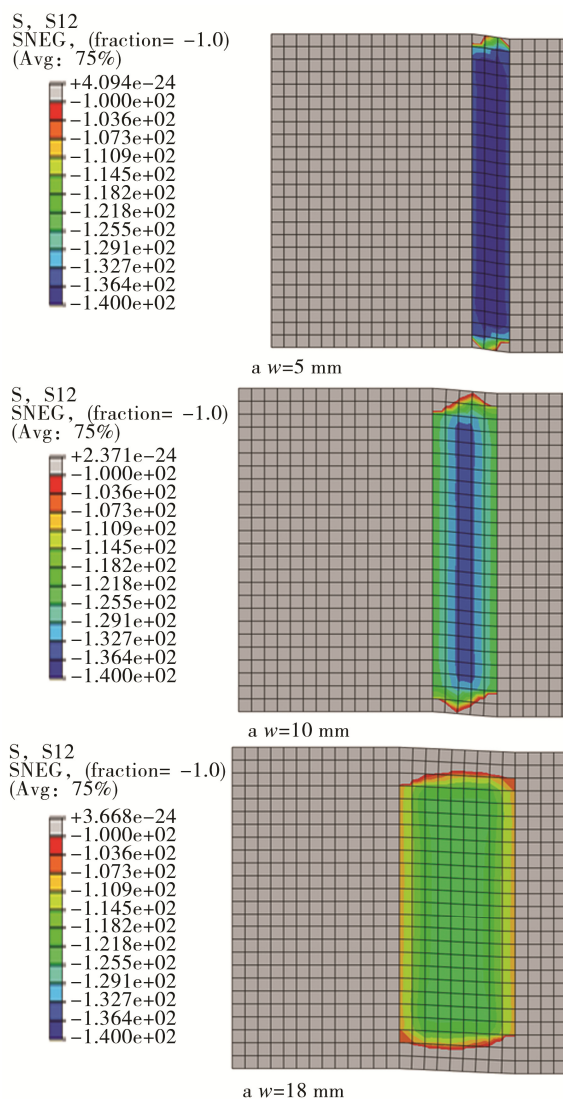


图3 不同宽度的剪切变形区剪应力分布

Fig.3 Distribution of shear stress in the deformation zone for specimens with different width

样其应力均匀性越差。从这个角度而言,应选择宽度尽可能小的试样。另一方面,考虑到应变测量仪器安装的空间,文中选择了变形区宽度 w 为 5 mm 的试样。

1.3 剪切夹具

根据图 2 所示试样形状及需要实现循环剪切的要求,文中设计了如图 4 所示的剪切试验用夹具,夹具工作状态应由图 4 示方向旋转 90°。两端的夹持块与拉伸机的夹头相连,夹持块与夹具本体通过螺栓相连,夹具本体由 2 块 L 形侧臂反对称布置,两侧臂通过导柱确保加载方向的一致性。两侧臂设计成倒钩形,以带动夹紧块沿拉伸方向运动,从而实现试样的剪切变形。两夹紧块与试样平面相接触,并通过 8 个螺栓施加夹紧力,夹紧块端部设计成台阶结构在倒钩处与 L 形侧臂吻合。



图4 剪切试验夹具

Fig.4 Jigs for shear testing

考虑到试样的剪切变形量较大,为此要求夹具在试样发生较大剪切变形时依然提供足够的夹紧力,如何提供足够的夹紧力非常关键。夹紧块的背面也就是与试样接触的表面,设计了两级高度不同的压齿,剪切试验夹具夹持部位见图 5,内侧也就是靠近试样剪切变形区域的压齿较浅,外侧压齿较深,压板的一级齿宽度与剪切试样的夹紧区宽度相同。两级压齿分别与两排大小不同的螺栓相匹配,大螺栓可以对压板施加较大的压力,而小螺栓可以对压板施加比较均匀的力。在靠近试样剪切变形区域使用小螺栓,这样可以使螺栓对夹紧块板的作用力比较均匀,有利于减小试样剪切变形区受夹持而产生的应力集中的影响。另外还在夹紧块内侧面的底部设计了一个与压齿形状相同的矩形凹槽,用来减小剪切试验过程中试样与夹具之间沿铅垂方向的打滑,见图 5b。压板与夹紧块之间的配合间隙为 0.1 mm。夹具体中 L 型侧臂和夹紧块均采用 T10A 碳素工具钢,其他部位采用高强度结构钢。为了验证该夹具的强度,采用 ABAQUS 软件对该夹具进行了应力分析。除螺栓之外,夹具体其他所有组成部分均采用体单元进行网格划分,采用刚性梁单元模拟螺栓。约束夹持块一端全部自由度,另一端施加 7500 N 的拉伸载荷。夹具体中等等效应力分布见图 6,最大等效应力为 201.2 MPa,出现在 L 形侧

臂处。最大等效应力小于工具钢 T10A 的屈服强度 780 MPa, 满足强度要求。

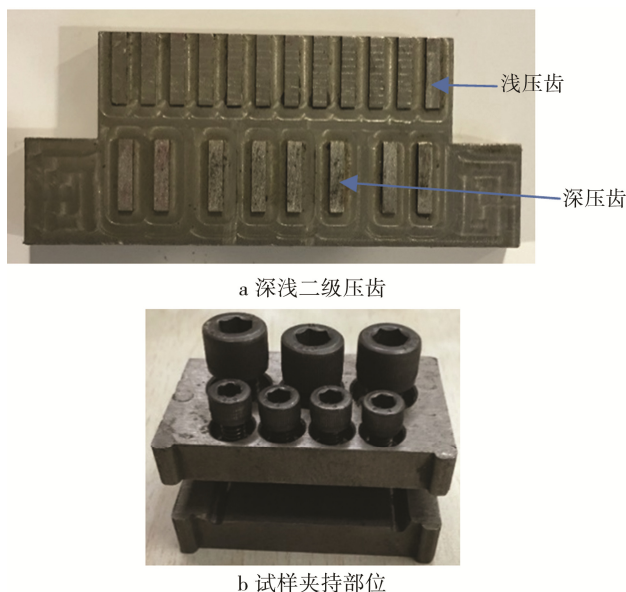


图5 剪切试验夹具夹持结构
Fig.5 Structures of shear jigs for shear testing

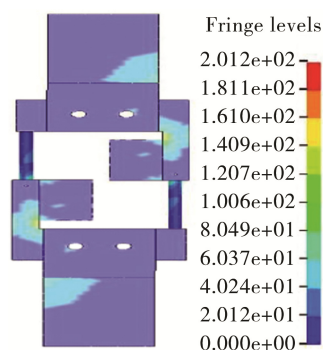


图6 剪切夹具等效应力分布(MPa)
Fig.6 Distribution of equivalent stress of the shear jigs

1.4 剪切应变和应力的测量

剪切试验中应变的测量与单向拉伸试验中伸长应变测量不同。单向拉伸应变直接通过引伸计的变形数据就可直接得到, 而剪切应变是间接获得, 通过变形区沿剪切方向的变形除以变形区宽度获得。由于铝合金比钢软, 夹紧时容易打滑, 而传统安装引伸计测量剪切方向变形量的方法无法消除打滑, 为此文中采用基于数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)的光学非接触式应变测量系统, 来测量试样上的剪切应变。DIC法最初由PETERS等^[16]提出, 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, 具有非接触、精度高、受环境影响小、自动化程度高等优点^[17]。

试验之前在试样的表面先喷涂一层白色的底漆,

然后在其上方均匀地喷黑色油漆, 让油漆颗粒在重力的作用下均匀落到白色底漆上, 形成黑白色的散斑。测量系统中两个工业相机会实时获取测量区各散斑的坐标信息, 通过图像处理从而得到变形信息。剪切应力通过剪切载荷和剪切试样的横截面面积比值来近似计算, 其中剪切力通过拉伸机载荷传感器给出。

2 分析与讨论

2.1 剪切变形的验证

为了验证文中所设计剪切试验夹具能否达到实现剪切变形的目标, 对剪切试验过程中的剪切应变水平进行了跟踪分析, 借助DIC技术记录的试样变形区的剪切应变见图7a和7b。可以看到, 当剪切应变 γ 为3%和16%时, 试样变形区中间区域的剪切应变分布非常均匀, 应变梯度均较小。对试验中不同应变水平下的剪切应变与等效应变水平的比值进行了分析, 得到如图8所示的曲线, 图8中数据点为试验测量数据, 实线为线性拟合直线, 可见测量数据点的线性较好, 且拟合直线近似平行于横坐标轴, 尤其是在剪切应变大于0.02之后, 这说明剪切应变与等效应变比值非常稳定, 由此可得, 所设计的剪切试验夹具能够保证试样变形区处于非常接近纯剪切的变形状态。

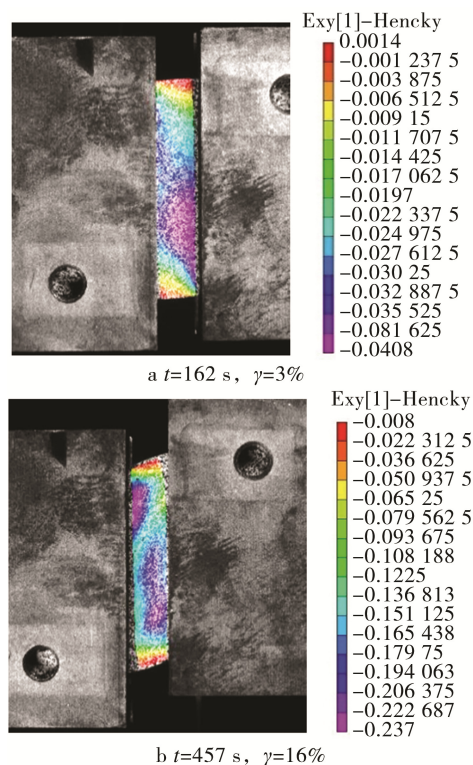


图7 剪切试验过程中试样剪切应变分布
Fig.7 Distribution of shear strain in the specimen during shear testing

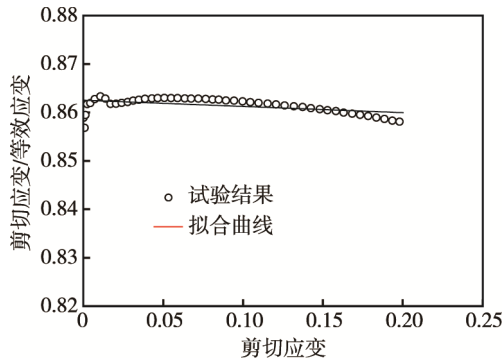


图8 剪切应变与等效应变比值

Fig.8 Ration of the shear strain with the effective strain

2.2 剪切应力应变曲线

试验获得的 5052 铝合金板的单向拉伸工程应力应变曲线见图 9。可见, AA5052 的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 172 MPa, 224 MPa 和 10%, 且各向异性较显著。

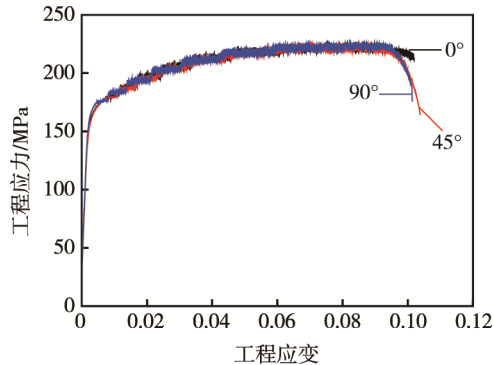


图9 单向拉伸应力应变曲线

Fig.9 Uniaxial tension stress-strain curves

试验所得的循环剪切应力应变曲线见图 10。由于 AA5052 总伸长率较低, 试验中只进行了剪切应变为 3.97% 和 7.1% 两个变形量下的循环。可见, 5052 铝合金板的正向剪切变形曲线与反向剪切曲线主要存在两方面的差异。一方面是屈服应力的差别, 反向变形下屈服应力显著低于正向变形下的屈服应力水平, 另一方面是硬化水平的差异, 反向剪切变形曲线更加平缓。这说明所试验的 5052 铝合金板均存在随动硬化现象。

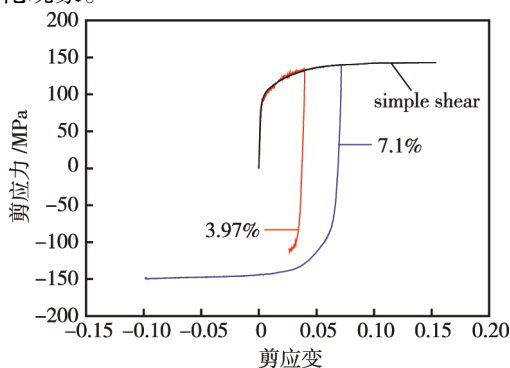


图10 5052 铝合金的循环剪切应力应变曲线

Fig.10 Shear stress-strain curves of 5052 subject to cycle shear

2.3 包辛格效应

为了更进一步分析这两种铝合金板的随动硬化水平, 参考 Abel^[18] 对包辛格效应的量化方法, 采用包辛格效应系数 β_σ 来描述包辛格效应水平。

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_f - \sigma_r}{|\sigma_f| + |\sigma_r|} \quad (1)$$

式中: σ_f 和 σ_r 分别表示正向加载停止点处的应力值和反向加载时材料进入屈服点处的应力值。从图 10 可以看到, 5052 铝合金都没有明显的屈服平台, 所以引入名义屈服应力, 即材料的塑性应变值为 0.2% 时对应的应力值称为名义屈服应力。

当应变水平为 3.97% 时, 5052 铝合金循环剪切应力应变曲线中所得到的 σ_f 和 σ_r 分别为 133.7 和 -45.37 MPa, 包辛格效应系数 β_σ 为 0.328; 当应变水平为 7.1% 时, σ_f 和 σ_r 分别为 139.98 和 -67.7 MPa, β_σ 为 0.510。可以看出, 5052 铝合金均存在显著的包辛格效应, 且包辛格效应系数随着变形水平增加而增加。

3 结论

描述了金属薄板剪切试验夹具的设计过程, 采用有限元软件对夹具体的强度进行了校核。采用该剪切夹具对 5052 铝合金板进行了循环剪切试验, 获得了不同应变水平下的剪切应力应变曲线, 对剪切应力应变曲线所体现的包辛格效应进行了分析。并采用 DIC 测量结果对剪切试验过程中试样变形区的剪切变形的稳定性进行了分析。可获得如下主要结论。

1) 数字图像相关测量系统对剪切应变的跟踪测量结果表明, 所设计的循环剪切夹具可以有效实现剪切变形。

2) 剪切试验获得的应力应变曲线表明, 试验所用 5052 铝合金板具有显著的包辛格效应, 包辛格系数随着变形量的增加而增加。

参考文献:

- [1] 张燕瑰, 邓劲松, 魏宪波, 等. 高强度钢性能及其在车身中的应用[J]. 精密成形工程, 2013, 5(4): 64—68.
ZHANG Yan-gui, DENG Jin-song, WEI Xian-bo, et al. A Study on Performance of High Strength Steel and Application in Bodywork[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(4): 64—68.
- [2] 郎利辉, 巫永坤, 陈杨镔, 等. 铝合金汽车顶盖充液成形的数值模拟[J]. 精密成形工程, 2017, 9(3): 13—18.
LANG Li-hui, WU Yong-kun, CHEN Yang-kai, et al. Numerical Investigation into the Hydroforming of Aluminum Alloy Automobile Roof Cover[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(3): 13—18.

- [3] MERKLEIM M, GEIGER M. New Materials and Production Technologies for Innovative Lightweight Construction[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 125(126): 532—536.
- [4] TANG B, LU X, WANG Z, et al. Springback Investigation of Anisotropic Aluminum Alloy Sheet with a Mixed Hardening Rule and Barlat Yield Criteria in Sheet Metal Forming[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(4): 2043—2050.
- [5] UEMORI T, FUJII K, NAKATA T, et al. Springback Analysis of Aluminum Alloy Sheet Metals by Yoshida-Uemori Model[J]. *Key Engineering Materials*, 2017, 725: 566—571.
- [6] WANG Yuan-qing, WANG Zhong-xing. Experimental Investigation and FE Analysis on Constitutive Relationship of High Strength Aluminum Alloy under Cyclic Loading[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016(1/2/3): 1—16.
- [7] YOSHIDA F, UMEMORI T. A Model of Large Strain Cyclic Plasticity Describing the Bauschinger Effect and Work-hardening Stagnation[J]. *International Journal of Plasticity*, 2002, 18: 661—686.
- [8] QING Yin, BENJAMIN Zillmann, SEBASTIAN Suttner, et al. An Experimental and Numerical Investigation of Different Shear Test Configurations for Sheet Metal Characterization[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51: 1066—1074.
- [9] PEREIRA A F G, PRATES P A, SAKHAROVA N A, et al. On the Identification of Kinematic Hardening with Reverse Shear Test[J]. *Engineering with Computers*, 2015, 31(4): 681—690.
- [10] YIN Q, SOYARSLAN C, GÜNER A, et al. A Cyclic Twin Bridge Shear Test for the Identification of Kinematic Hardening Parameters[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2012, 59(1): 31—43.
- [11] SALAVATIAN M, SMITH L V, SALAVATIAN M, et al. The Effect of Transverse Damage on the Shear Response of Fiber Reinforced Laminates[J]. *Composites Science & Technology*, 2014, 95: 44—49.
- [12] 舒大禹, 张帷, 胡庆华, 等. 高应变速率下 TC11 钛合金动态剪切行为与性能[J]. *精密成形工程*, 2012, 4(1): 1—5.
SHU Da-yu, ZHANG Wei, HU Qing-hua, et al. Dynamic Shearing Behavior and Mechanical Property of TC11[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2012, 4(1): 1—5.
- [13] MERKLEIN M, BIASUTTI M. Forward and Reverse Simple Shear Test Experiments for Material Modeling in Forming Simulations[J]. *International Conference on Technology of Plasticity, Aachen*, 2011: 702—707.
- [14] ZILLMANN B, CLAUSMEYER T, BARGMANN S, et al. Validation of Simple Shear Tests for Parameter Identification Considering the Evolution of Plastic Anisotropy [J]. *Tech. Mech.* 2012, 32: 622—630.
- [15] THUILLIER S, MANACH P Y. Comparison of the Work-hardening of Metallic Sheets Using Tensile and Shear Strain Paths[J]. *International Journal of Plasticity*, 2009, 25: 733—751.
- [16] PETERS W H, RANSON W F. Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 427—431.
- [17] 梁晋, 胡浩, 唐正宗, 等. 数字图像相关法测量板料成形应变[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(10): 77—81.
LIANG Jin, HU Hao, TANG Zheng-zong, et al. Digital Image Correlation Method for Strains Measurement of Metal Sheet Forming[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(10): 77—81.
- [18] ABEL A. Historical Perspectives and Some of the Main Features of the Bauschinger Effect[J]. *Materials Forum*, 1987, 10(1): 11—26.