

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0138

滑轨导向式静/动态双轴拉伸实验技术*

刘东升¹, 史同亚¹, 谢普初¹, 陈伟¹, 王永刚^{1,2}

(1. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 基于液压伺服高速加载系统, 发展了一种材料双轴拉伸力学性能测试技术。利用锥面接触导向驱动方法, 把加载锤垂直方向的驱动力转化为水平方向的双轴驱动力, 从而实现对十字形试样平面双轴加载。借助有限元数值模拟手段优化了锥面接触角和十字形试样尺寸。当接触锥角为 45° 时, 既有较好的水平驱动转化效率, 同时又保持较小的接触力, 确保水平驱动加载各组件在弹性变形范围内, 可多次重复使用。确定了加载臂狭缝个数、狭缝与减薄区边缘长度和标距段厚度等试样设计关键参数, 在十字形试样测试标距段内实现了均匀变形。设计了测力夹持一体化导杆和非接触光学全场应变测试系统, 准确获得了试样的应力和应变。利用此平面双轴拉伸加载装置, 开展 2024-T351 铝合金板单轴拉伸实验和激光探测同步性验证实验, 验证装置设计的可行性; 开展铝合金板材在不同加载速率下的双轴拉伸实验, 得到在双轴加载下铝合金板材应力应变曲线, 并与单轴加载下实验结果进行了对比分析。

关键词: 双轴拉伸; 十字样品; 各向异性力学性能; 2024-T351 铝合金板

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Rail-guided static/dynamic biaxial tensile test technique

LIU Dongsheng¹, SHI Tongya¹, XIE Puchu¹, CHEN Wei¹, WANG Yonggang^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education,*

Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,*

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: Based on the Zwick HTM-5020 hydraulic servo high-speed loading system, a planar biaxial tensile test technique was developed. The biaxial tensile loading device is mainly composed of a cross-shaped cone hammer head, a loading force arm, a cross guide slide rail, and a sample clamping guide rod. The driving force in the vertical direction of the loading hammer is transformed into the horizontal driving force by using the cone contact method, so as to realize the plane biaxial loading of the cruciform specimen. The contact angle of the cone surface and the cruciform specimen geometry was optimized using an Abaqus FEM code. The simulation results show that: (1) when the contact cone angle is 45°, the horizontal driving conversion efficiency is better and the contact force is smaller than those of others, so that the components loaded by the horizontal driving within the elastic deformation range can be used repeatedly; (2) the key parameters of the cruciform specimen, such as the number of the slits in the loading arm, the length of the slit edge and thinning area, and the thickness of the gauge section, are obtained, so as to realize the uniform deformation of the cruciform specimen in the gauge section. A guide rod integrated measuring force-clamping specimen and a noncontact digital image correlation technique for the measurement of strain were employed in the planar biaxial tensile test device. By using the planar biaxial tensile loading device, the uniaxial tensile test and laser detection synchronicity verification experiment of aluminum alloy plate were carried out to verify the feasibility of the

* 收稿日期: 2020-05-07; 修回日期: 2020-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(11972202); 科学挑战专题(TZ2018001);
国防科技重点实验室稳定支持科研项目(JCKYS2019212009)

第一作者: 刘东升(1993—), 男, 硕士研究生, 351974707@qq.com

通信作者: 王永刚(1976—), 男, 博士, 教授, wangyonggang@nbu.edu.cn

device design. The biaxial tensile tests of the aluminum alloy plates under different strain rates were performed, and the stress-strain curves of the 2024-T351 aluminum alloy sheet under biaxial loading were obtained, which were compared with the results under uniaxial tensile loading.

Keywords: biaxial tension; cruciform specimen; anisotropic mechanical behavior; 2024-T351 aluminum alloy sheet

通过轧制加工得到的金属板材常表现出各向异性塑性变形行为^[1]。基于单一曲线假定的各项同性金属屈服准则难以准确有效描述金属板材的塑性变形行为, 为此, 人们发展了各向异性屈服准则。然而, 基于标准单轴拉伸实验数据难以对各向异性屈服准则进行有效标定^[2]。除了金属板材, 纤维增强复合材料的力学性能也通常表现为各向异性^[3-5], 单向应力状态下复合材料力学行为研究已不能满足结构设计的需要。另外, 各种结构在加工和服役期间通常经受多轴载荷条件, 这可能导致结构处于复杂的应力状态^[6]。因此, 发展多轴加载实验技术研究复杂应力状态下材料力学性能显得尤为重要和迫切。

目前, 双轴拉伸实验技术发展相对成熟。早期发展的双轴拉伸实验技术是在单向拉伸下通过改变试样构型设计来实现双轴拉伸应力状态, 诸如平滑宽板试样(宽厚比大于 30)^[7]、板中央双轴带加固轮缘试样^[8]。后来, 人们又发展了薄膜凸胀双轴拉伸实验技术^[9]、内压薄壁圆筒^[10]或球壳双轴拉伸实验技术以及十字形试样双轴拉伸实验技术^[11]等。十字形试样双轴拉伸实验技术, 由于十字形试样制作简单, 同时容易对试样沿着不同方向施加不同比例加载, 受到人们广泛关注。任家陶等^[8]以及 Hannon 等^[12]都曾对板材平面双轴拉伸实验系统的发展进行过综述。双轴拉伸实验系统主要有两类: 独立双轴液压伺服静态试验机和基于连杆机构附加装置的双轴试验机^[13]。Makinde 等^[14]在 1992 年首先发展了独立双轴液压伺服实验系统, 在两个垂直方向上分别设置两对液压驱动器, 对十字形试样进行双轴加载, 在每个方向设置测力传感器和位移传感器。在双轴拉伸实验中, 一种重要因素是在整个实验过程中保持试样的中心不动, 这对液压伺服同步性控制提出了比较高的要求, 同时建立一套独立双轴液压伺服静态拉伸实验系统是非常昂贵的。为此, 人们尝试在常用的液压伺服万能试验机上设计一套四连杆或八连杆机构的附加装置^[15-16], 把竖直方向的单轴驱动转化为水平方向的双轴驱动, 即当液压万能试验机的压盘向下移动时, 通过四连杆或八连杆将运动转化为两个不同方向的水平运动, 从而对十字形试样施加双轴加载。针对许多金属板材和纤维增强复合材料, 人们已开展一些双轴拉伸实验研究工作, 取得了一些重要的研究成果^[17]。除了双轴拉伸加载系统, 双轴拉伸试样尺寸合理设计也是至关重要的。尽管十字形试样已被广泛应用, 由于缺乏试样几何形状的标准, 很难比较不同实验室的实验结果^[18]。在设计试样基本原则是保证试样的中心部分产生大部分变形, 尽量避免试样其他区域出现应力集中。由于板材在单轴拉伸下的变形能力远小于双轴拉伸时的变形能力, 导致断裂通常发生在试样臂上。十字形试样设计中, 人们提出了许多方法来防止这种情况, 主要方法有切割型、缩小截面型以及带槽型^[19]。

无论是在双轴加载系统, 还是在十字形试样设计方面, 都已经取得一些研究成果, 但已发展的双轴拉伸实验技术主要局限于准静态加载条件, 难以开展动态双轴加载实验^[20]。最近, 李玉龙等^[21]发明了一种基于电磁力加载的双轴分离式 Hopkinson 拉杆实验装置, 首先实现十字形试样的高应变率双轴加载。本文中基于 HTM-5 020 液压伺服高速试验机, 发展一种的具有宽广加载应变率调节能力的双轴拉伸加载系统, 利用锥面接触导向驱动方法, 把加载锤头竖直方向的驱动力通过十字形布置的高刚度加载力臂和导向滑轨联合作用转化为水平方向的双轴驱动力。利用超高速相机与数字图像相关性 (digital image correlation, DIC) 技术相结合^[22], 发展十字形试样全场应变测量技术。借助数值模拟手段, 对双轴加载实验装置和十字形试样设计进行优化。最后, 开展 2024-T351 铝合金单轴和双轴拉伸实验, 验证双轴拉伸实验技术的可行性和可靠性。

1 实验技术

1.1 双轴拉伸加载装置设计

1.1.1 结构组成及工作原理

图 1(a) 给出了锥面驱动滑槽式双轴拉伸加载装置结构组成示意图, 主要由十字形锥面锤头、加载力

臂、十字形布置的导向滑轨、试样夹持和测力连接杆、十字形试样、钢基座以及螺旋套筒组成, 其中加载力臂和导向滑轨必须具有足够的刚度, 确保加载稳定性。十字形锥面锤头与 Zwick HTM-5 020 液压伺服高速试验机的加载杆相连接, 并沿着钢导杆上下运动, 如图 2 所示。试样夹持连接杆通过加载力臂内部的套筒旋转前后移动, 从而调整锤头与滚轮接触间隙, 如图 1(b) 所示, 十字形试样与试样夹持连接杆通过自锚式固定螺栓相连接, 同时在夹持连接杆上粘贴应变片来实时测量试件受到的加载力时程。当锤头的十字形锥面与高刚度的加载力臂上滚轮相接触时, 将驱动十字形布置的加载力臂沿着导向滑轨向外运动, 从而把锤头竖直方向的单轴驱动力转化为水平方向的双轴驱动力, 实现对十字形试样同步平面双轴加载。Zwick HTM-5 020 液压伺服高速试验机可通过闭环控制和开环控制实现加载速度变化范围为 0.001~20 m/s。改变锤头运动速度, 可方便地调节试样的应变速率。改变十字形锥面锤头的锥面倾斜角度, 还可以实现不同加载路径比的非等轴双轴拉伸。为了监测十字形试件中心部分应变, 在钢基座中心处开孔, 在基座下面布置 45°反射镜, 利用水平布置的高速相机实时获取试样变形过程的散斑图像, 再借助数字图像相关性分析技术获得试样中心处全场应变。这里提出的双轴拉伸加载装置具有加载方式灵活多变, 结构紧凑且成本低的特点。

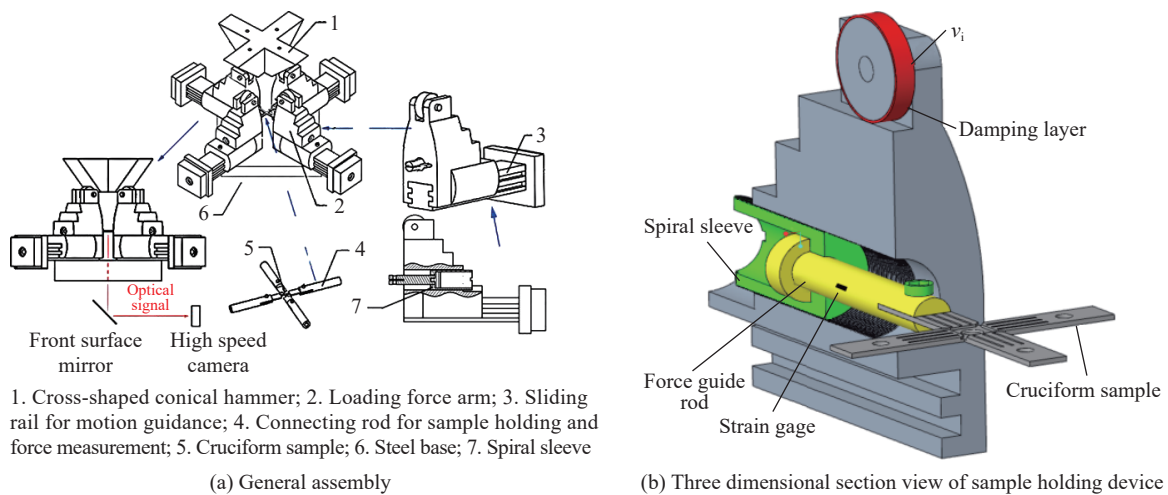


图 1 双轴拉伸加载装置结构装配图

Fig. 1 Structural assembly drawing of biaxial tensile loading device

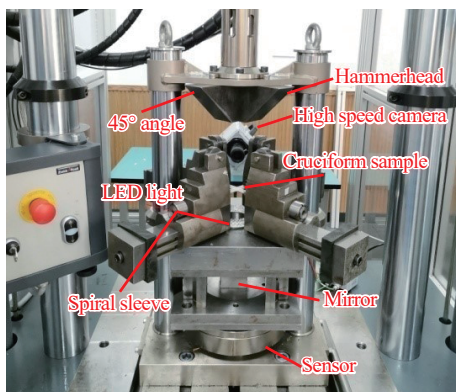


图 2 基于 Zwick HTM-5020 液压伺服高速试验机的双轴拉伸加载装置

Fig. 2 Biaxial tensile loading device based on Zwick HTM-5020 hydraulic servo high speed machine

1.1.2 结构与优化

在开展实验之前, 采用数值模拟手段, 对图 1 给出的双轴拉伸加载装置进行结构优化, 考虑到结构的对称性, 为了减少计算量, 这里利用 ABAQUS 软件建立了装置的四分之一对称有限元计算模型, 如图 3 所示。计算中, 锤头和接触滚轮材料选取 40Cr 合金钢, 屈服应力为 785 MPa; 其他结构部件的材料都是 45 钢, 屈服应力 355 MPa, 材料本构关系采用线弹性模型, 计算参数: $\rho=7\ 800\text{ kg/m}^3$, $E=210\text{ GPa}$, $\nu=0.3$; 橡胶缓冲层材料采用 Ogden^[23] 超弹性本构模型, 材料模型参数来自文献 [24]。十字形试样材料为 2024-T351 铝合金, 材料本构关系使用 Johnson-Cook 弹塑性本构模型, 本构模型介绍和材料参数详见文献 [25]。

计算中, 锤头垂直方向速度 v_y 设置为 3 m/s, 在装置设计中, 十字形锤头的锥角 α 是关键设计参量之一。在 15°、30°、45°、60°和 75°等 5 种锥角下开展数值分析, 讨论关键结构组件的运动情况和关键接触点的受力情况。在加载速度保持 3 m/s 恒定条件下, 锥角对加载力臂水平速度 v_x 有明显的影响, 如图 4 所示, 锥角越大, 加载力臂获得的速度越大, 速度转化效率越高。为了降低锤头和滚轮之间接触应力, 在接触面添加橡胶缓冲层, 图 5 给出了不同锥角条件下锤头与滚轮接触处单元最大等效应力(定义为接触应力)时程曲线, 结果显示: 随着锥角增大, 接触应力增大; 在锥角 60°时, 接触应力达到 2.4 GPa, 远大于滚轮材料 40Cr 合金钢的屈服应力; 而锥角 45°时, 接触应力约 500 MPa, 低于 40Cr 合金钢的屈服应力, 保证实验中滚轮不发生塑性变形。同时在图 5 右上角也给出没有橡胶缓冲层时 45°锥角条件下接触单元最大应力时程对比曲线, 结果显示橡胶缓冲层的缓冲效果非常好, 大幅降低了接触等效应力, 可以为锤头和滚轮提供一定保护。图 6 给出了加载力臂中最大应力单元时程曲线, 最大应力值为 80 MPa, 远低于 45 钢的屈服应力, 这表明在加载过程中加载力臂始终处于弹性阶段。图 7 给出了不同锥角条件下速度和接触应力的拟合曲线, 当锥角 15°时, 加载臂水平方向速度和滚轮接触应力有最小值, 而锥角 75°时其有最大值; 随着锥角增大, 加载力臂获得的速度和滚轮接触应力也增大, 为了避免滚轮发生塑性变形, 锥角不宜过大。基于数值分析结果与讨论, 建议十字形锤头的锥角 α 选择为 45°为宜。

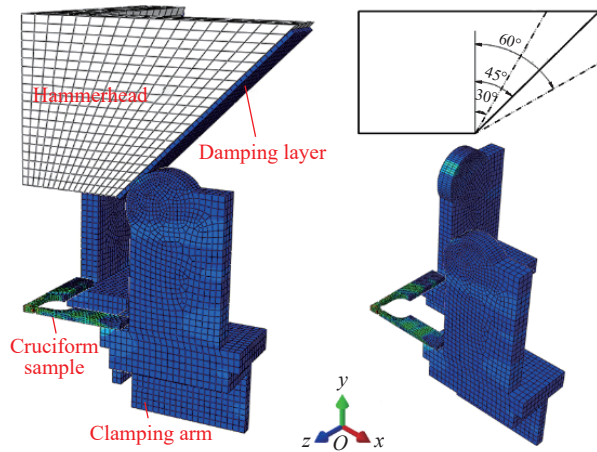


图 3 双轴拉伸加载装置的四分之一对称有限元计算模型

Fig. 3 The quarter finite element calculation model for the biaxial tensile loading device

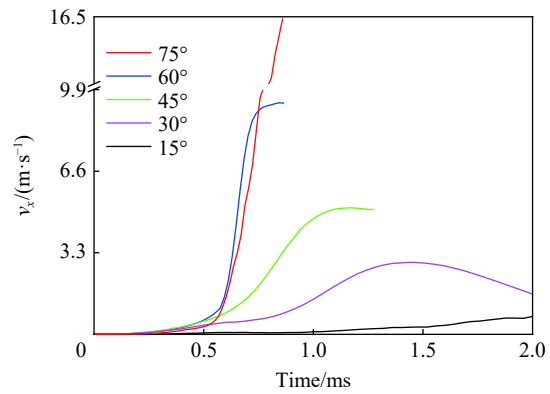


图 4 不同锥角条件下加载力臂速度时程曲线

Fig. 4 Time histories of velocity of the loading force arm at different conical angles

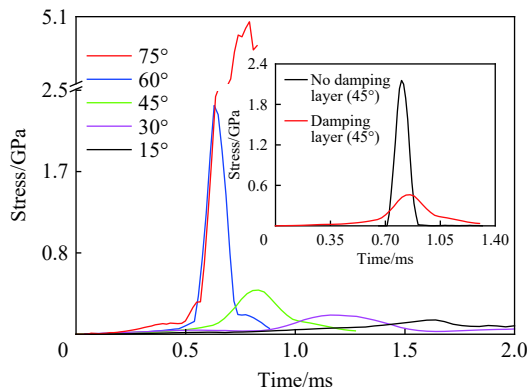


图 5 不同锥角条件下接触单元应力时程曲线

Fig. 5 Time histories of stress of contact elements at different conical angles

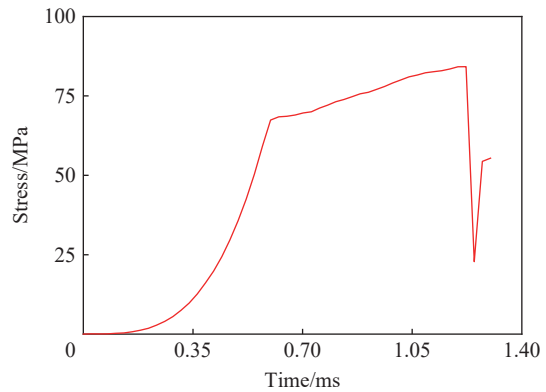


图 6 45°锥角下加载力臂上最大单元应力时程曲线

Fig. 6 Time history of the maximum element stress of the loading force arm at the conical angle of 45°

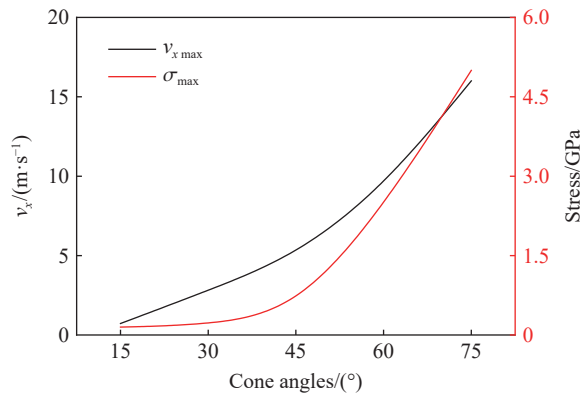


图 7 不同锥角条件下速度和接触应力的拟合曲线

Fig. 7 Fitted curves for velocity and contact stress at different conical angles

1.2 试样设计

1.2.1 几何设计

在双轴拉伸实验中试样设计也是非常重要的^[26], 试样优化目标是在十字形试样的中心区域(简称为标距段)实现均匀应变, 并尽量避免标距段之外发生过早失效。原始的十字形试样尺寸如图 8(a) 所示, 这里采用标距段减薄和加载臂上开多条狭缝两种手段来优化试样, 优化后的十字形试样几何尺寸如图 8(b) 所示。中心区域的厚度减小, 在外载荷作用下容易在标距段产生大部分变形, 同时有助于避免标距段外提早发生失效。在加载臂上开狭缝减少了双轴载荷分配对加载臂的影响, 同时这些狭缝也有助于将所施加的载荷均匀地分布到标距段。试样几何设计中的关键参数: 狭缝的条数 M 、狭缝与减薄区边缘长度 L 和标距段厚度 T 。下面仍然借助数值模拟手段, 对上述 3 个关键参数进行优化。

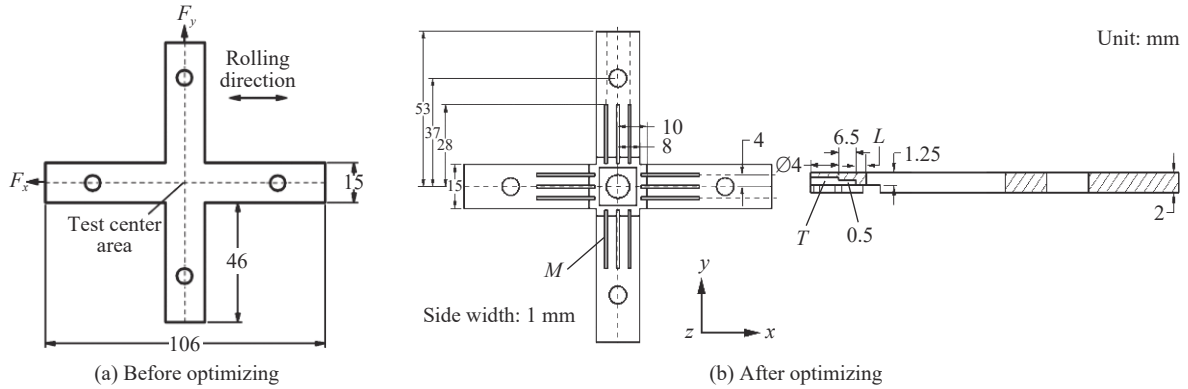


图 8 十字形试样几何尺寸

Fig. 8 Geometry sizes of cruciform sample

1.2.2 尺寸优化

有限元计算模型仍然采用 1.1.2 节给出的四分之一对称有限元计算模型, 材料本构参数和边界条件不变。首先对十字形试样加载臂上狭缝条数 M 进行优化分析, 优化目标是标距段应力均匀分布、中心区和狭缝区存在大变形。这里提出应力集中系数 r 指标^[27]、标距段平均应力和狭缝区最大应力来定量讨论标距段的应力分布情况, 从而确定最优的狭缝条数 M 、狭缝与减薄区边缘长度 L 和标距段厚度 T 。应力集中系数 r 定义为:

$$r = \frac{\sigma_{ave}}{\sigma_{max}} \quad (1)$$

式中: σ_{ave} 为标距段内所选单元平均应力, σ_{max} 为标距段所选单元中最大应力。 σ'_{max} 为狭缝内单元的最大应力, 图 9 给出了不同 M 条件下应力在不同空间点的分布曲线, 结果显示: 随着 M 增大, 应力集中系数

减小, 系数差值增大, 导致应力的均匀性变差, 当 $M=2\sim 3$ 时, 应力系数接近极限值 1, 说明均匀性较好; 当 $M=3$ 时, 狭缝区内最大应力 σ'_{\max} 在空间点分布取得最大值, 如此狭缝区域表现的应力集中, 使得标距段有大变形, 同时降低了标距段的横向刚度, 其四边获得了最大的拉伸量。因此, $M=3$ 是空间点上最合适的值。图 10 给出了不同 L 条件下应力在不同空间点的分布曲线, 结果显示: 随着 L 增大, 应力集中系数先增大后减小; 当 $L=1.5\sim 1.8$ 时, 应力系数接近极限值 1, 应力均匀性最好; 当 $L=1.5$ 时, 狭缝内最大应力 σ'_{\max} 为 560 MPa 优于 L 为 1.8 的 σ'_{\max} 为 490 MPa, 且在空间点分布取得最大值, 狭缝区表现出应力集中, 从而标距段表现出大变形。因此, $L=1.5$ 时标距段内有大变形且应力分布均匀。采用类似方法, 对标距段厚度 T 进行优化, 图 11 不同 T 条件下应力在不同空间点的分布曲线, 当 $T=0.45$ mm, 标距段有大变形且应力均匀分布。表 1 给出了优化后十字形试件的最佳尺寸, 而图 12 给出了优化前后十字形试样的等效应力分布云图对比, 结果显示: 优化后的十字形试样标距段等效应力分布更均匀, 同时加载臂的应力远小于标距段的, 这表明优化后的试样满足实验条件。

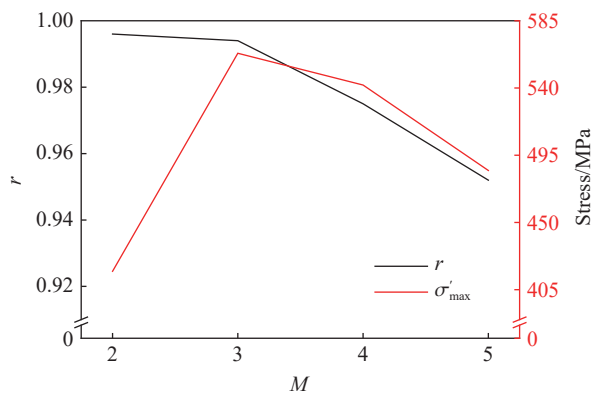


图 9 不同狭缝条数条件下应力集中系数和狭缝区最大单元应力

Fig. 9 Stress concentration factor of gauge section and maximum element stress of slit under different slit numbers

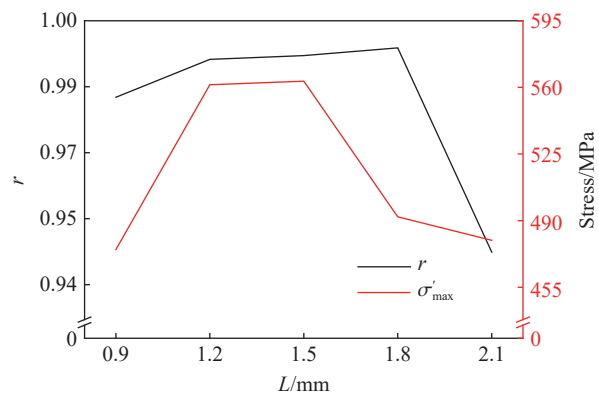


图 10 不同边缘长度条件下应力集中系数和狭缝区最大单元应力

Fig. 10 Stress concentration factor of gauge section and maximum element stress of slit under different lengths of slit edge

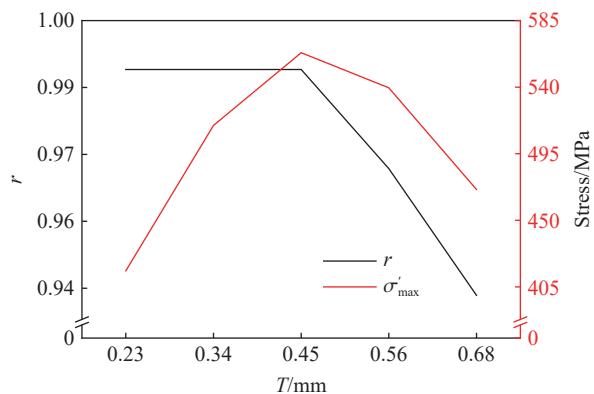


图 11 不同标距段厚度条件下应力集中系数和狭缝区最大单元应力

Fig. 11 Stress concentration factor of gauge section and maximum element stress of slit under different thicknesses of gauge section

表 1 优化后十字试件的最佳尺寸参数
Table 1 The parameters of cruciform samples after optimizing

L/mm	M	T/mm
1.5	3	0.45

1.3 测试技术

在双轴拉伸实验中, 采用在夹持导向杆表面合适位置处粘贴普通应变片来直接测量加载力时程曲线, 采用非接触光学测量技术来测量试样标距段的应变, 测试系统布置如图 13 所示。实验前需要在试样标距段喷涂黑白散斑, 如图 14 所示, 再通过基座下面布置 45° 反射镜, 把散斑图像输入到水平布置的

高速相机中, 这样就可以获取试样变形过程的系列散斑图像, 对获取的散斑图像进行数字图像相关性分析就可以得到试样标距段全场应变。最后, 借助数据采集同步器把力时程和基于数字图像相关性分析得到的应变时程同步, 消除时间参数后, 得到材料的 σ - ϵ 实验曲线。

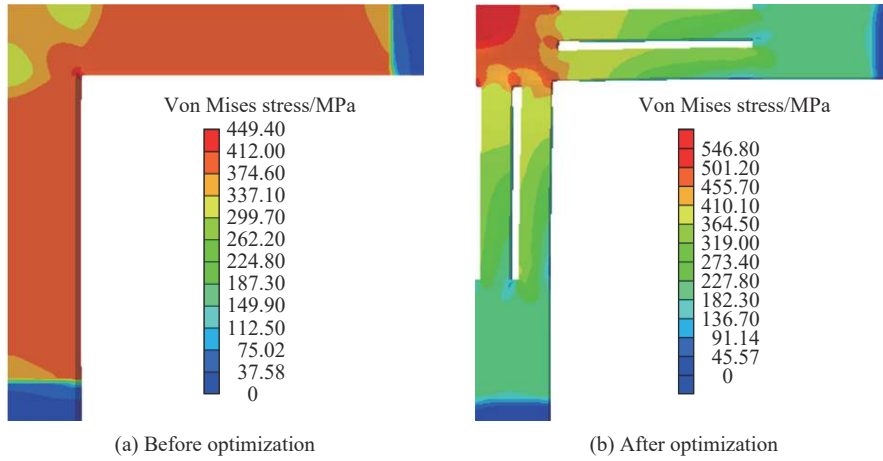


图 12 优化前和优化后十字形试样的等效应力分布云图

Fig. 12 Diagrams of equivalent stress distribution of the cruciform sample before and after optimization

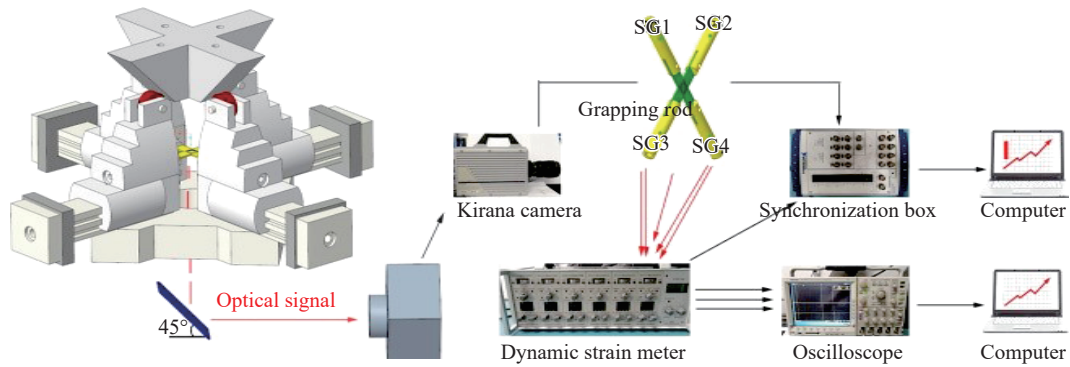


图 13 双轴拉伸实验测试技术示意图

Fig. 13 Schematic diagram of biaxial tensile test technology

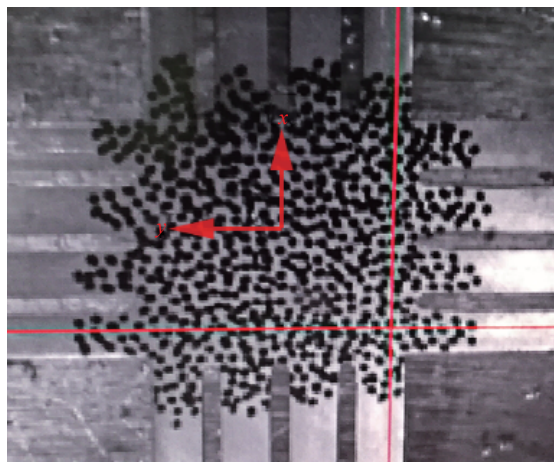


图 14 标距段喷涂散斑的试样

Fig. 14 Cruciform sample with speckles pattern on gauge section

2 双轴拉伸实验装置的可行性检验

2.1 单轴加载检验

为了进一步验证双轴拉伸实验装置的有效性, 这里基于双轴拉伸实验装置来开展准静态单轴拉伸实验, 即仅在一对加载力臂上安装普通板条拉伸试样, 如图 15 所示。在准静态加载条件下, HTM-5020 液压伺服高速试验机采用闭环控制模式, 加载应变率控制为 10^{-1} s^{-1} 。利用双轴拉伸加载装置开展单轴拉伸实验, 3 次重复性实验得到 2024-T351 铝合金板材的单轴拉伸应力应变曲线, 如图 16(a) 所示。另外, 采用 Instron5966 电子万能材料试验机对同一批 2024-T351 铝合金板材试样在相同加载应变率条件下也开展 3 次重复单轴拉伸实验, 得到的实验结果也显示在图 16(b) 中。对比分析两种实验技术得到的应力应变曲线, 发现两者之间的一致性是比较好的, 由此初步验证了双轴拉伸加载装置的有效性。

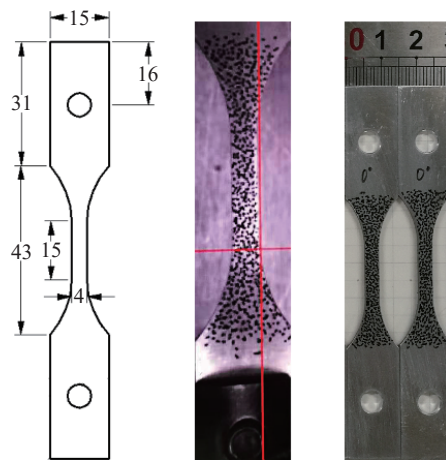


图 15 喷涂散斑的铝合金单轴试样

Fig. 15 Aluminum alloy specimen with speckles pattern

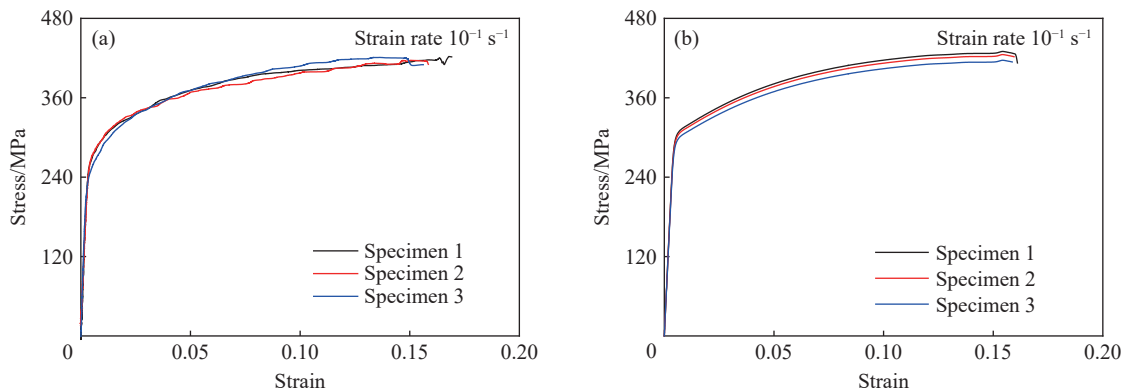


图 16 不同实验技术测得铝合金单轴应力应变实验数据对比

Fig. 16 Comparison of stress-strain curves of aluminum alloy specimens by different test techniques

2.2 双轴同步性检验

在双轴拉伸加载过程中保持试样的中心不动是实验有效的必备条件, 这就要求在十字形锥面锥头驱动下一条直线上的一对加载力臂必须同步相背运动。在上述的利用双轴拉伸装置开展单轴拉伸实验中, 同一方向两个测力连接杆测得应力时程曲线对比如图 17 所示, σ_{x1} 、 σ_{x2} 为同一方向应力, 两者的一致性很好, 验证了同一直线上的一对加载力臂相背运动的同步性很好。同时, 还需要验证在相互垂直的一对加载力臂必须同步运动, 这里, 采用双探头的全光纤激光干涉测速仪对加载力臂的运动历程进行监测^[28],

考察其同步性, 测试系统布置如图 18 所示。从两个激光探头中发射的两束激光分别聚焦于一对相邻运动的加载力臂表面, 激光在目标表面上发生反射, 部分反射光被探头收集, 反射信号激光发生多普勒频移, 利用多普勒频移 f_d 和目标运动速度 $v(t)$ 关系:

$$v(t) = \lambda f_d / 2 \tag{2}$$

式中: λ 为激光的波长。对示波器记录的激光干涉信息采用短时傅里叶变换方法进行频域分析, 提取出多普勒频移 f_d , 即可用式 (2) 计算出被测目标的运动速度。在不夹持十字形试样条件下, 锤头以 50 mm/s 速度撞击 4 个加载力臂, 图 19 给出一对相邻运动加载力臂的速度和位移时程曲线对比, d_{x1} 、 d_{y2} 为相邻方向位移, v_{x1} 、 v_{y2} 为相邻方向速度, 两者一致性很好, 实验验证了相邻加载力臂运动同步性很好。

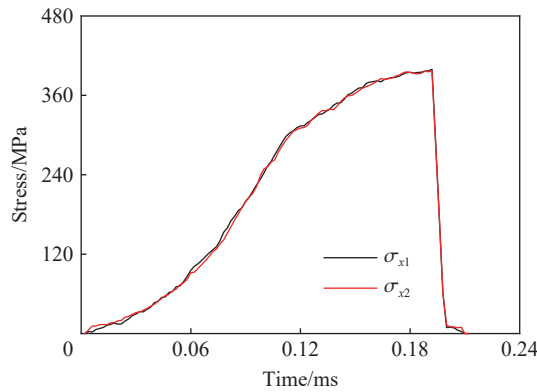


图 17 同一方向连接杆上实测的应力时程曲线

Fig. 17 Evolution of stress profiles measured on the connecting rod along the same direction

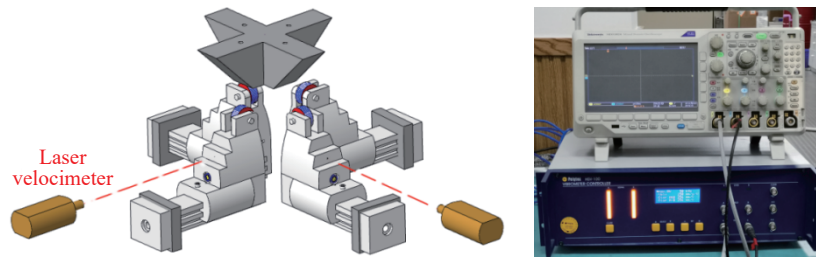


图 18 双轴拉伸加载装置同步性验证的激光干涉测试系统布置

Fig. 18 Schematic diagram of the laser interference system for verifying synchronism of the biaxial tensile loading device

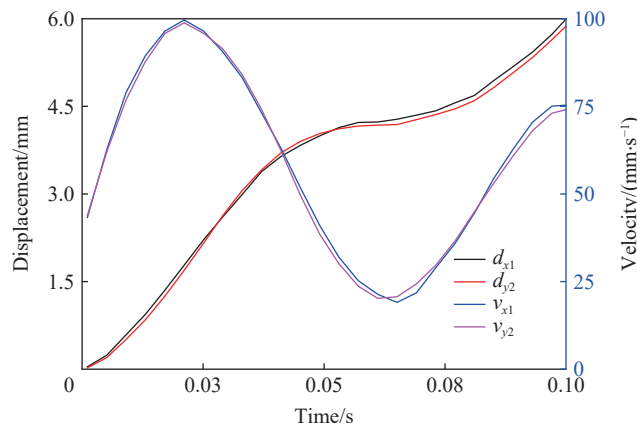


图 19 相互垂直两个方向实测的位移和速度时程曲线对比

Fig. 19 Comparison of displacement and velocity curves measured along two directions perpendicular to each other

3 双轴拉伸实验及结果讨论

3.1 2024-T351 铝合金板材静态/动态双轴拉伸实验

基于 Zwick HTM-5020 液压伺服高速试验机搭建的双轴拉伸加载平台如图 2 所示。Zwick HTM-5020 液压伺服高速试验机有闭环控制和开环控制两种模式, 闭环控制条件下最大加载速度小于 700 mm/s, 而开环控制条件下最大加载速度可达 20 m/s, 因此, 这里发展双轴拉伸加载平台既可以施加静态载荷, 也可以施加动态载荷, 从而研究不同应变率条件下板材双轴拉伸力学性能。这里, 以 2024-T351 铝合金板材为例, 双轴拉伸试样几何尺寸见图 8(b), 标距段 13 mm×13 mm, 开展了 10^{-1} 和 10 s $^{-1}$ 两种应变率条件下双轴拉伸实验。通过夹持连接杆上粘贴应变片实测试样承受载荷时程信息。采用高速相机来拍摄试样标距段内散斑, 10^{-1} s $^{-1}$ 应变率条件下, 采集帧率为 250 Hz, 而 10 s $^{-1}$ 应变率条件下, 采集帧率为 3 000 Hz。采用数字图像相关性分析软件 VIC-2D 对采集的试样散斑图像进行分析, 得到试样标距段的全场应变信息。

3.2 实验结果与讨论

3.2.1 双轴拉伸加载力和应变时程曲线

图 20 给出 10^{-1} 和 10 s $^{-1}$ 两种应变率条件下通过夹持连接杆上粘贴的应变片实测力时程曲线, 结果显示不同应变率加载下实测的 x 和 y 方向加载力实验数据几乎是一致的, 这再次验证了 4 个加载力臂对试样的作用是同步的。另外, 两种应变率条件下加载力实测曲线其波前沿和波平面较光滑, 不存在振荡, 表明了橡胶缓冲层的有效性。

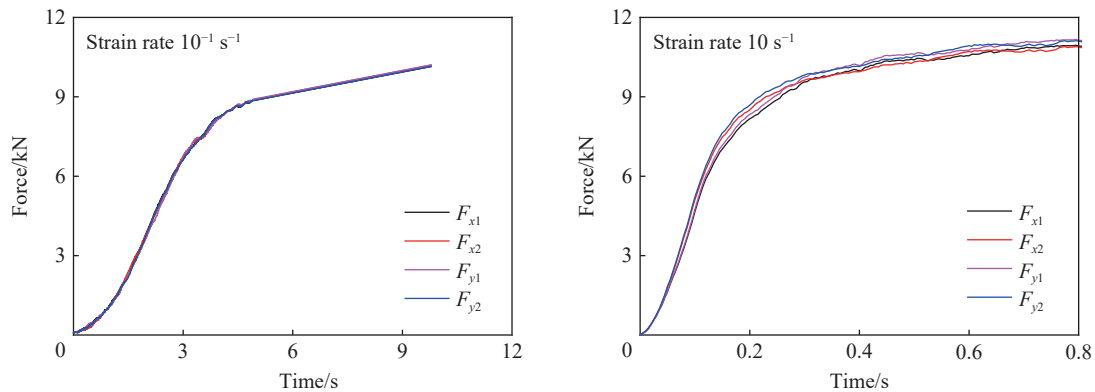


图 20 不同应变率下 4 个连接杆上应变片实测的力时程曲线

Fig. 20 Evolution of forces measured by strain gauges on four clamping guide rods at different strain rates

3.2.2 双轴拉伸应力-应变曲线

在测力连接杆实测的力时程曲线, 见图 20 和 DIC 方法实测标距段平均应变时程曲线, 见图 21, 消去时间轴后, 得到不同应变率下铝合金双轴拉伸应力应变曲线, 如图 22 所示。结果显示: 不同应变率加载下实测的 x 和 y 方向应力应变曲线在应变 0.2% 以内两者具有很好的一致性, 这时试样表现为各向同性力学性能, 而当应变超过 0.2% 后两个方向的应力应变曲线出现明显偏差, 表明轧制板材力学性能具有一定的各向异性。应变 0.2% 以内, 应力应变之间基本呈线性关系, 这时试样基本处于弹性变形阶段, 而应变超过 0.2%, 试样进入塑性变形阶段。同时发现, 两种应变率下, 双轴加载下铝合金断裂强度约等于单轴加载下的断裂强度的 2 倍, 沿轧制方向 (x 方向) 的断裂应变明显高于垂直轧制方向 (y 方向) 的。图 23 中给出 10^{-1} 和 10 s $^{-1}$ 应变率下铝合金双轴和单轴 von Mises 等效应力应变曲线对比, 结果显示: 铝合金在双轴加载下的强化效应非常明显, 双轴加载下屈服强度和弹性模量比单轴加载下屈服强度和弹性模量都提高了 1 倍多。

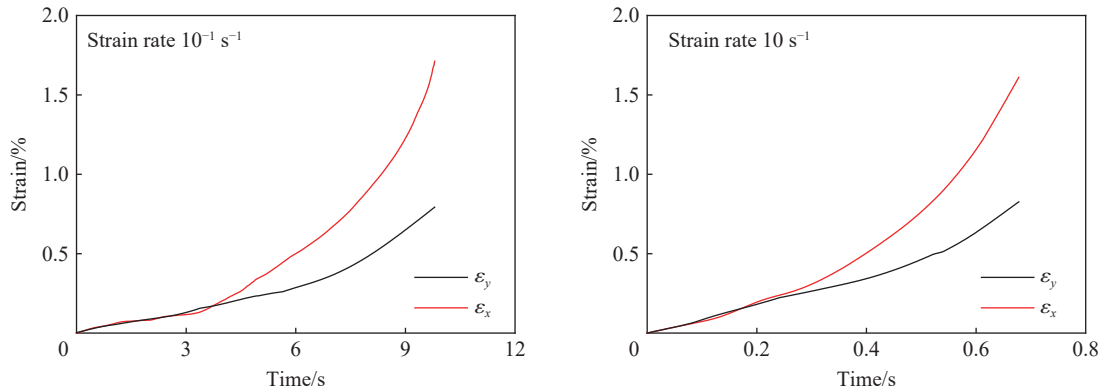


图 21 不同应变率下 DIC 实测的标距段平均应变时程曲线

Fig. 21 Average strain measured by the DIC method as a function of time at different strain rates

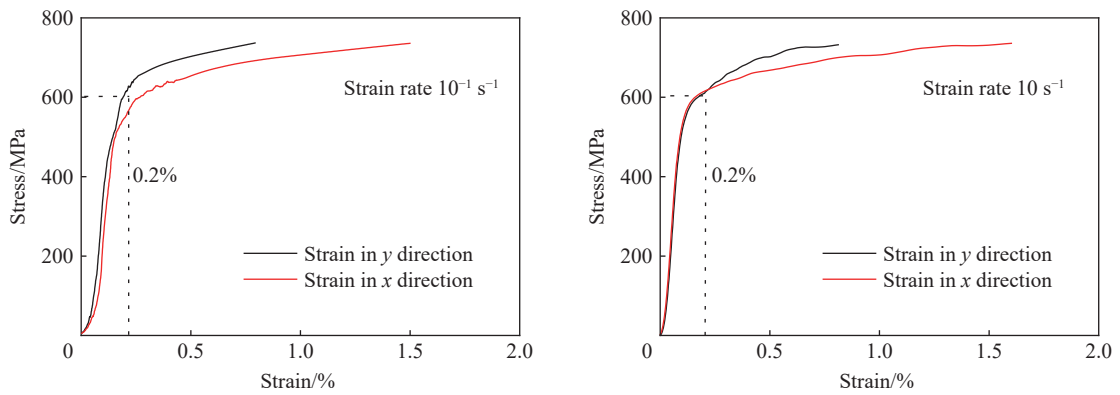


图 22 不同应变率下铝合金双轴拉伸应力应变曲线

Fig. 22 Stress-strain curves of aluminum alloy at different strain rates under biaxial tensile loading

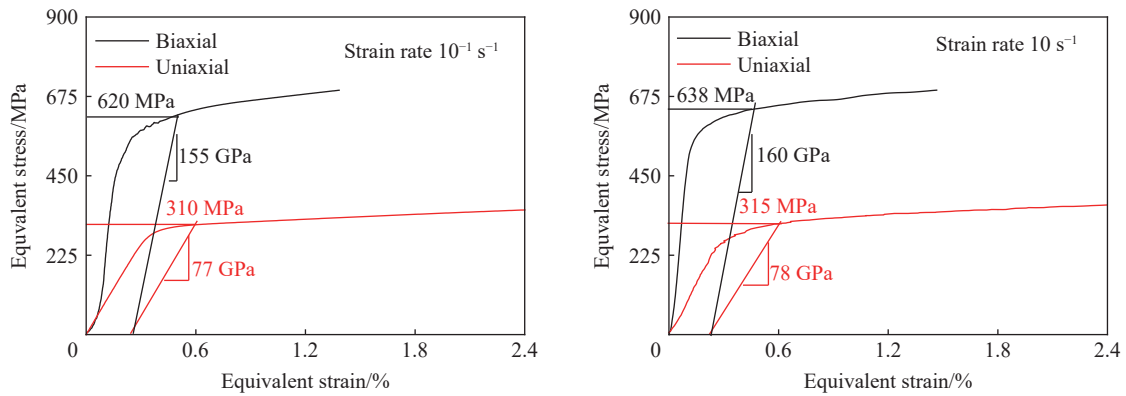


图 23 不同应变率下铝合金双轴和单轴等效应力应变曲线对比

Fig. 23 Comparison of biaxial and uniaxial equivalent stress-equivalent strain curves of aluminum alloy at different strain rates

4 结 论

基于 Zwick HTM-5020 液压伺服高速试验机, 发展了一种的具有静态和动态双重功能的双轴拉伸加载系统。采用数值模拟手段对加载系统和试样尺寸进行了设计优化。当锥面接触导向驱动的接触锥角为 45°时, 既具有较好的驱动转化效率, 也容易保证适当的接触应力, 实现加载设施重复使用; 获得了加载臂狭缝个数 M 、狭缝与减薄区边缘长度 L 和标距段厚度 T 等试样设计关键参数。通过设计单轴加载和双探头激光干涉位移同步性实验, 对双轴拉伸加载装置的加载一致性和同步性进行了实验验证, 初步

证实了双轴拉伸实验装置的可行性和可靠性。利用该双轴拉伸实验装置, 开展 2024-T351 铝合金板双轴拉伸加载实验, 获得了 10^{-1} s^{-1} 和 10 s^{-1} 两种应变率条件下材料双轴拉伸应力应变曲线, 观察到铝合金板材力学性能存在一定的各向异性, 同时与单轴加载下的应力应变数据进行了对比, 发现双轴加载下 2024-T351 铝合金的弹性模量和屈服强度都大幅度提高。

参考文献:

- [1] MA R, LU Y, WANG L, et al. Influence of rolling route on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy during asymmetric reduction rolling [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(5): 902–911. DOI: 10.1016/S1003-6326(18)64724-7.
- [2] XIAO R, LI X X, LANG L H, et al. Biaxial tensile testing of cruciform slim superalloy at elevated temperatures [J]. *Materials & Design*, 2016, 94: 286–294. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.01.045.
- [3] 陈振, 方国东, 谢军波, 等. 三维轴编 C/C 复合材料双向拉伸实验研究 [J]. *固体火箭技术*, 2015, 38(2): 267–272. DOI: 10.7673/j.issn.1006-2793.2015.02.021.
CHEN Z, FANG G D, XIE J B, et al. Experiment investigation on biaxial tensile strength of 3D in-plane braided C/C composites [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2015, 38(2): 267–272. DOI: 10.7673/j.issn.1006-2793.2015.02.021.
- [4] 吴志凯, 江五贵, 郑隆. 界面双轴纤维增强复合材料力学性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2017, 34(1): 217–223. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160322.004.
WU Z K, JIANG W G, ZHENG L. Interfacial effect on mechanical behaviors of bidirectional-fiber-reinforced composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(1): 217–223. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160322.004.
- [5] PAK S, PARK S, SONG Y S, et al. Micromechanical and dynamic mechanical analyses for characterizing improved interfacial strength of maleic anhydride compatibilized basalt fiber/polypropylene composites [J]. *Composite Structures*, 2018, 193: 73–79. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.03.020.
- [6] 万敏, 周贤宾. 复杂加载路径下板料屈服强化与成形极限的研究进展 [J]. *塑性工程学报*, 2000, 7(2): 35–39. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2000.02.010.
WAN M, ZHOU X B. Research progress on the yielding hardening and forming limit of sheet metals under complex loading paths [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2000, 7(2): 35–39. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2000.02.010.
- [7] AN Y G, VEGTER H, ELLIOTT L. A novel and simple method for the measurement of the plane strain work hardening [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155-156: 1616–1622. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.344.
- [8] 任家陶, 陈积光, 李冈陵. 双轴拉伸试验研究 [J]. *湘潭大学自然科学学报*, 1998, 20(2): 92–96. DOI: CNKI:SUN:XYDZ.0.1998-02-024.
REN J T, CHEN J G, LI G L. Experimental research on biaxial tensile test [J]. *Natural Science Journal of Xiangtan University*, 1998, 20(2): 92–96. DOI: CNKI:SUN:XYDZ.0.1998-02-024.
- [9] BRUSCHI S, ALTAN T, BANABIC D, et al. Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming [J]. *Cirp Annals Manufacturing Technology*, 2014, 63(2): 727–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.005.
- [10] KUWABAR T. Advances in experiments on metal sheets and tubes in support of constitutive modeling and forming simulations [J]. *International Journal of Plasticity*, 2007, 23(3): 385–419. DOI: 10.1016/j.ijplas.2006.06.003.
- [11] LIU W, GUINES D, LEOTOING L, et al. Identification of sheet metal hardening for large strains with an in-plane biaxial tensile test and a dedicated cross specimen [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 101–102: 387–398. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2015.08.022.
- [12] HANNON A, TIERNAN P. A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198(1): 1–13. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.015.
- [13] MERKLEIN M, BIASUTTI M. Development of a biaxial tensile machine for characterization of sheet metals [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(6): 939–946. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.12.005.
- [14] MAKINDE A, THIBODEAU L, NEALE K W, et al. Design of a biaxial extensometer for measuring strains in cruciform specimens [J]. *Experimental Mechanics*, 1992, 32(2): 132–137. DOI: 10.1007/BF02324724.
- [15] HOFERLIN E, BAEL A V, HOUTTE P V, et al. The design of a biaxial tensile test and its use for the validation of crystallographic yield loci [J]. *Modelling & Simulation in Materials Science & Engineering*, 2000, 8(4): 423–433. DOI: 10.1088/

- 0965-0393/8/4/302.
- [16] FERRON G, MAKINDE A. Design and development of a biaxial strength testing device [J]. *Journal of Testing & Evaluation*, 1988, 16(16): 253–256.
- [17] SRINICASAN N, VELMURUGAN R, KUMAR R, et al. Deformation behavior of commercially pure (CP) titanium under equi-biaxial tension [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 674: 540–551. DOI: 10.1016/j.msea.2016.08.018.
- [18] NIKHARE C P. Numerical analysis on the effect of thickness on biaxial tension limits [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(1): 37–43. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.050.
- [19] KARADOĞAN C, TAMER M E. A novel and simple cruciform specimen without slits on legs yet higher plastic strains in gauge [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 207: 1922–1927. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.962.
- [20] 王犇. 复合材料的双轴试验研究 [J]. *科技创新导报*, 2018, 15(11): 19–21. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2018.11.019.
WANG B. Research on biaxial test of composite materials [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2018, 15(11): 19–21. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2018.11.019.
- [21] 李玉龙, 金康华, 刘琛琳, 等. 一种动态双轴双向拉伸加载装置及实验方法: CN 20181012019. X [P]. 2018-07-31.
LI Y L, JIN K H, LIU C L, et al. Dynamic biaxial bidirectional stretching loading device and experimental method: CN 20181012019. X [P]. 2018-07-31.
- [22] 史同亚, 刘东升, 陈伟, 等. 激光选区熔化增材制造 GP1 不锈钢动态拉伸力学响应与层裂破坏 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(7): 52–63. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0015.
SHI T Y, LIU D S, CHEN W, et al. Dynamic tensile behavior and spall fracture of GP1 stainless steel processed by selective laser melting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(7): 52–63. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0015.
- [23] OGDEN R W. Large deformation isotropic elasticity—on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solid [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1972, 32(1575): 565–584. DOI: 10.1098/rspa.1972.0096.
- [24] 王国权, 刘萌, 姚艳春等. 不同本构模型对橡胶制品有限元法适应性研究 [J]. *力学与实践*, 2013, 35(4): 40–47. DOI: 10.6052/1000-0879-13-030.
WANG G Q, LIU M, YAO Y C, et al. Application of different constitutive models in the nonlinear finite element method for rubber Parts [J]. *Mechanics in Engineering*, 2013, 35(4): 40–47. DOI: 10.6052/1000-0879-13-030.
- [25] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1983, 21: 541–548. DOI: 10.1115/1.3225617.
- [26] XIAO R. A review of cruciform biaxial tensile testing of sheet metals [J]. *Experimental Techniques*, 2019, 43(5): 501–520. DOI: 10.1007/s40799-018-00297-6.
- [27] 蔡登安, 周光明, 曹然, 等. 双轴载荷下复合材料十字型试样几何形状对中心测试区系数的影响 [J]. *复合材料学报*, 2015, 32(4): 1138–1144. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20141022.004.
CAI D A, ZHOU G M, CAO R, et al. Influence of geometry of composite cruciform specimen under biaxial loading on coefficients of central testing zone [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(4): 1138–1144. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20141022.004.
- [28] 张振, 王永刚. 基于激光干涉测试技术的分离式 Hopkinson 压杆实验测试系统 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 1165–1171. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0116.
ZHANG Z, WANG Y G. Measurement system for split Hopkinson pressure bar apparatus based on laser interferometry technique [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 1165–1171. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0116.

(责任编辑 王易难)