

文章编号: 1001-4888(2022)06-0858-09

一种液压气动中应变率拉伸试验机 研制及其试验研究^{*}

姜雄文, 李岳, 魏宏健, 徐施佳, 张伟

(哈尔滨工业大学 高速撞击动力学实验室, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 中应变率($10^0 \text{ s}^{-1} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$)条件下材料的动态力学性能是汽车碰撞、外物对飞机和高铁的撞击、金属加工等碰撞领域的主要关注点之一,而可靠有效的试验装置是解决问题的关键。因此本文研制了一种液压气动中应变率材料拉伸试验机,并给出了其组成、运行原理以及载荷、应变的测量方法。利用该试验机进行了奥氏体不锈钢和铝合金的中应变率拉伸试验,试验结果表明:该液压气动拉伸试验装置能有效进行材料的中应变率拉伸试验,实现了载荷和应变的有效测量。

关键词: 动态拉伸性能; 液压气动试验机; 中应变率; 动态力学性能; 激光位移传感器

中图分类号: O347.3

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-21-250

0 引言

汽车碰撞、外物对飞机和高铁的撞击、金属加工等均涉及研究材料在中应变率加载条件下的动态力学响应特性,是碰撞领域的主要关注点之一,而可靠有效的试验装置是解决问题的关键。研究率敏感材料的力学性能需要进行不同应变率环境下的试验测试,不同应变率试验需要使用不同的试验设备。例如,传统的伺服试验机目前被广泛用于各类材料的低应变率力学行为响应特性研究(产生的应变率为 $10^{-3} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$);而分离式霍普金森杆技术(Split Hopkinson Bar Technique)^[1,2]被广泛用于研究材料的高应变率力学行为响应特性,霍普金森拉杆或者压杆产生的应变率一般为 $10^2 \text{ s}^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。目前,材料中应变率($10^0 \text{ s}^{-1} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$)变形行为的文献数据是非常有限的,这与中应变率试验难度大有关。中应变试验的难点在于应变率的控制:中应变率试验机测试的应变率既要比伺服拉伸压缩试验机测试的应变率大,又要比霍普金森杆测试的应变率小。在传统的伺服液压试验机或者其他的快速试验机上增加加载速率时会造成应力波信号振荡,而振荡的滤波会降低精度和重要现象的发现。对于材料的中应变率力学性能测试仍然没有比较完善的设备,为了得到一个理想的中应变率测试结果,所需的应力波脉冲很长,可达 1ms 到 10ms,若采用传统的霍普金森杆加载技术,不但杆长度过长,可能在数米的长度,而且要分离入射波和反射波所需的杆的长度也至少是杆长度的两倍,这样整个装置的长度就可能达十几米甚至几十米,采用传统的霍普金森杆装置进行中应变率加载的试验是不现实的。因此研发适宜于中应变率加载条件下材料动态力学性能研究的试验装置和方法是十分必要的。

目前在气体和机械加载原理的基础上已经研制了一些中应变率加载试验装置。Albertini 等^[3]研制了液压气动中应变率拉伸试验机,应变率为 $0.1 \text{ s}^{-1} \sim 20 \text{ s}^{-1}$ 。Tarigopula 等^[4]对 Albertini 的方案进

^{*} 收稿日期: 2021-10-24; 修回日期: 2021-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(11872021)资助

通信作者: 张伟(1964—),男,博士,教授。主要研究领域:冲击动力学。Email: zhdawei@hit.edu.cn

行了改进,应变率可达 100s^{-1} 。白春玉等^[5-8]使用美国英斯特朗公司研发的高速液压伺服试验机(INSTRON VHS 160/100-20)开展了钢、铝及塑料试样的中、高应变率拉伸试验,最大拉伸速度可达 20m/s ,但该试验机价格昂贵。Ramzi 等^[9]对液压伺服试验机进行改进,并开展了应变率可达 120s^{-1} 的拉伸试验,但信号的振荡非常大。Li 和 Liu^[10]在落锤试验机上实现了中应变率的拉伸试验,应变率可达 125s^{-1} 。张学峰和夏源明^[11]研制了中应变率试验机,应变率可达 50s^{-1} 。由于设备的普及性比较差,国内对材料在中应变率下动力学性能的研究还是比较缓慢的。

本文在国内外相关文献的基础上,采用液压气动原理设计并制造了一种与文献[3,4]相似的液压气动中应变率拉伸试验机^[12]。该试验机作动器缸体的耐压力高,采用大通径的流量控制调节阀以及与之匹配的快速响应电磁阀对其水流的排出速度进行控制,使其活塞的运动速度连续可调,压力上升更快,获得的材料加载速度更高。为了使设备的操作更加高效、便捷,试验机采用了多通道的气源分配器。本文使用该中应变率拉伸试验机进行了奥氏体不锈钢 316LN 和铝合金 2A12、2024-T351 的动态拉伸性能试验,验证了试验机采用的载荷与应变测试方法的有效性。

1 液压气动中应变率拉伸试验机的组成和工作原理

液压气动中应变率拉伸试验机的组成和工作原理采用张伟等^[12]专利中的示意图,如图 1 所示。试验机包括:输出杆(1)、应变片(2)、输入杆(3)、作动器缸体气体密封 O 型圈(4)、作动器缸体充气腔(5)、作动器活塞及 O 型密封圈(6 和 7)、高压放水手动阀(8)、作动器缸体充水腔(9)、作动器缸体(10)、大通径连续可调的流量控制阀(11)、大通径快速响应的电磁阀(12)、注水漏斗(14)、高压手动阀(13)、气源分配器(18)上的手动截止阀(15、16、17、19 和 20)、高压普通氮气瓶(21)和激光位移传感器(22)等。

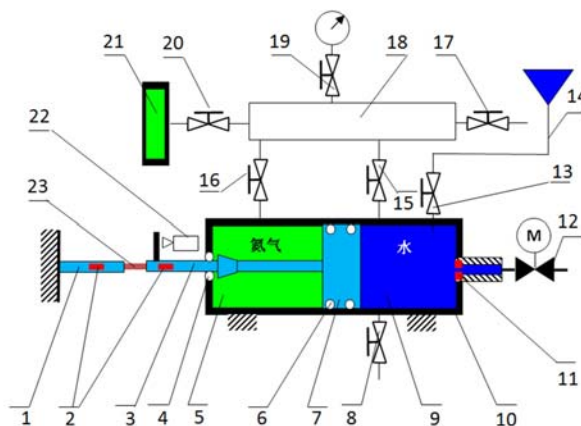


图1 液压气动中应变率拉伸试验机的组成和工作原理示意图^[12]

Fig. 1 Composition and working principle of hydraulic pneumatic intermediate strain rate tensile testing machine^[12]

由图 1 可见,作动器缸体里面的活塞通过活塞杆与输入杆、试样、输出杆连接。首先将水通过漏斗充入作动器缸体充水腔,然后打开手动阀 19、20、15 和 16,将高压普通氮气通过气源分配器充入作动器缸体充气腔,并保证活塞 7 两侧的压力相等。调整好流量控制阀的口径大小,打开电磁阀,活塞 7 在气体压力的作用下快速移动将水排出充水腔,实现对试样的拉伸加载。试样所承受的载荷通过输出杆 1 上的应变片和固定端出的环形动态力传感器测得,而试样在载荷作用下的变形通过激光位移传感器测得,这样就可获得材料在不同应变率条件下的试验数据和工程应力-工程应变曲线。

2 液压气动中应变率拉伸试验机的试验方法

根据图 1 的原理示意图,设计加工了液压气动中应变率拉伸试验机如图 2 所示。作动器缸体工作最大压力为 20MPa ,试样承受的载荷可以通过 2 种方法进行测量。第一种是由输入杆和输出杆上的应变片、超动态应变仪和数字采集波器经过计算得到;第二种是使用图 2(c)所示的动态力传感器(KD3020 系列,灵敏度为 2.09pC/N ,最大量程为 200kN)结合电荷放大器测量得到。激光位移传感器采用基恩士 LK-H150 感测头和 LK-G5000 控制器,最小采样时间间隔 $2.55\mu\text{s}$ 。试验机既可进行棒料加工的回转体试样的拉伸,又可进行板类试样的拉伸,其中哑铃型圆柱状拉伸试样和板状拉伸试样的试验安装示意图如图 3 所示。

本文中应变率拉伸试验机选用双激光位移传感器作为测量试样拉伸位移的方法,其中激光位移传

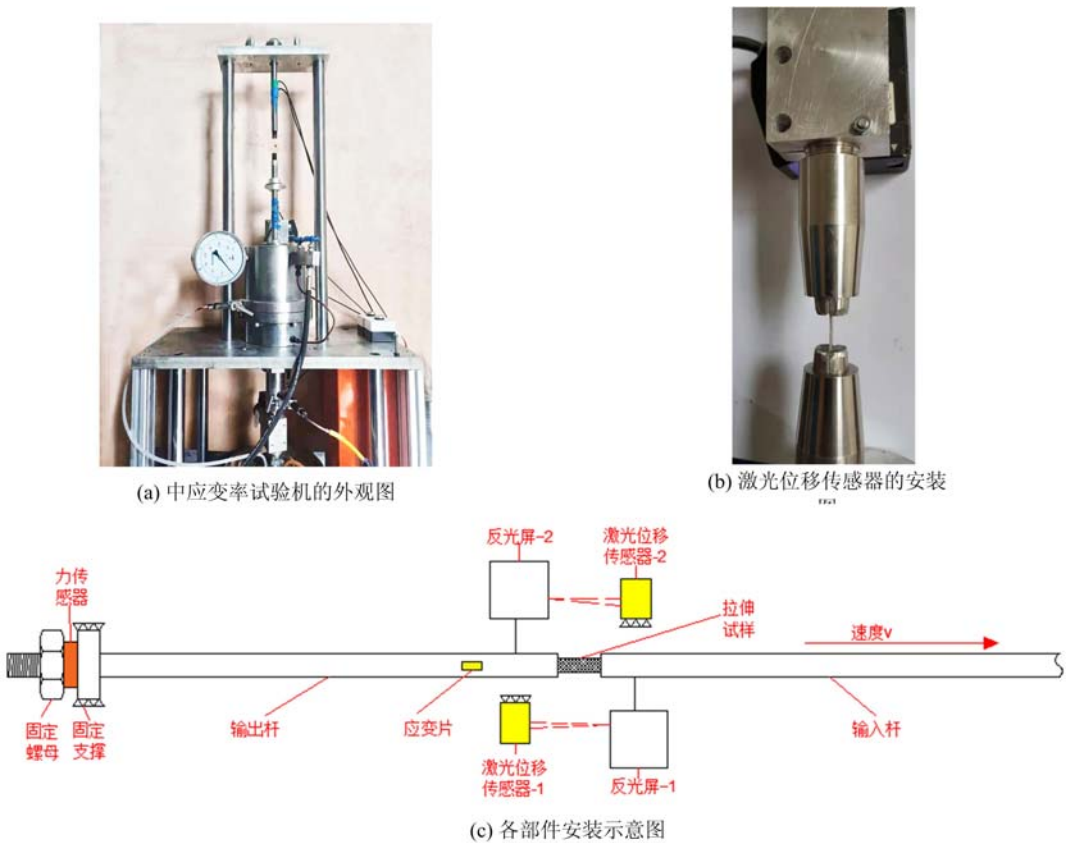


图 2 液压气动中应变率拉伸试验机及安装示意图

Fig. 2 Hydraulic pneumatic intermediate strain rate tensile testing machine and its installation diagram

感器-1 测得的位移包括试样拉伸变形位移和输出杆位移,激光位移传感器-2 获得的位移为输出杆位移。输出杆位移是由于螺纹与螺母之间的缝隙而产生的误差,因此通过激光位移传感器-1 测得的位移减去激光位移传感器-2 测得的位移即可消除这一误差。激光位移传感器安装位置如图 2 所示。

3 中应变率拉伸试验研究

奥氏体不锈钢 316LN(氮含量 0.14%)和铝合金 2A12-T4 的拉伸试样均采用圆棒状,2024-T351 铝合金材料的拉伸试样采用薄板状。其中圆棒状试样的两端具有 M8×1 的螺纹,316LN 和 2A12-T4 圆棒状试样的标距长度分别为 5mm 和 9mm;2024-T351 板状试样的标距长度为 10mm。所有试样其他尺寸和测试方案见表 1,测试后试样的断口如图 3 所示。

表 1 试样几何参数及试验测试通道设置

Tab. 1 Specimen geometric parameters and experimental test channel setting

试样 编号	材料	L /mm	D(B) /mm	D(H) /mm	试样 类型	测试 1 通道	测试 2 通道	测试 3 通道	测试 4 通道
A	316LN 不锈钢	5.00	3.00	3.00	圆棒状 拉伸	输出杆 应变片	力传感器	激光位移 传感器-1	激光位移 传感器-2
B	2A12-T4 铝合金	9.00	4.00	4.00	圆棒状 拉伸	*	力传 感器	激光位移 传感器-1	激光位移 传感器-2
C	2024-T351 铝合金	10.00	4.00	1.00	薄板状 拉伸	*	力传 感器	激光位移 传感器-1	激光位移 传感器-2

注:“*”表示没有使用该测试通道;L 为加载方向的长度;B 和 H 为拉伸截面宽和高;D 为直径。

3.1 应变验证

在拉伸试验数据处理过程中,试样的工程应变依据式(1)进行计算,试样的平均工程应变率由式(2)

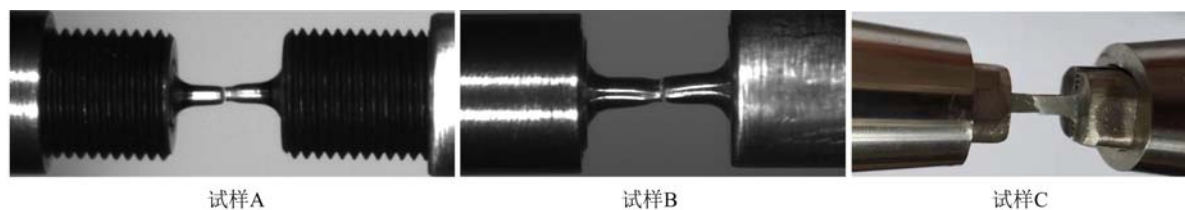


图3 各类试样的安装示意图及断口形貌

Fig. 3 Installation diagram and fracture morphology of various specimens

进行计算。根据式(1)可知,获得工程应变的前提条件是获得试样的相对拉伸位移量。对于相对拉伸位移量的测试,本文为了验证测试的准确性,共采用2种测试方法同时获取得到。方法1(激光法):采用激光位移传感器进行测量,可以得到相对拉伸位移随时间变化的激光法位移曲线,如图4所示。方法2(相机法):使用美国Phantom公司制造的V1212高速相机记录动态拉伸的试验过程,相机的记录速度为每秒40000帧,通过像素标定法,可以得到试样相对位移随时间变化的曲线,如图5所示。

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{t_{\text{loading}}} \quad (2)$$

式中: ϵ 为工程应变; ΔL 为相对拉伸位移量; L_0 为初始标距; $\dot{\epsilon}$ 为平均工程应变率; t_{loading} 为载荷达到最大峰值的加载时间。

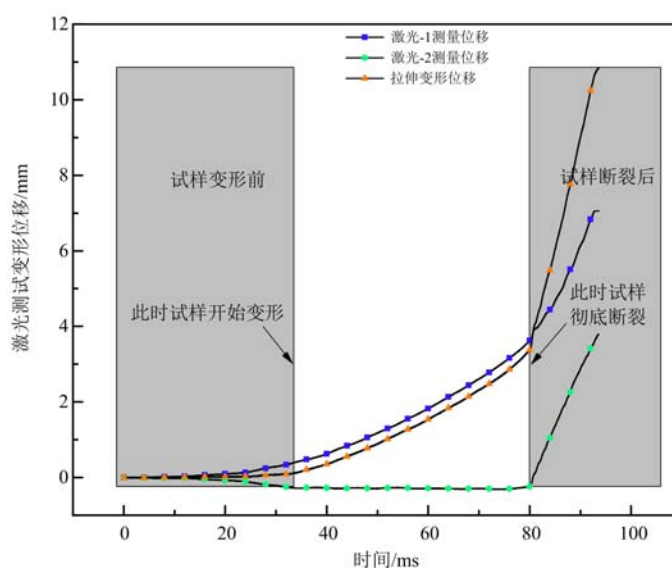


图4 激光法测量变形位移(方法1)

Fig. 4 Measurement of deformation displacement by laser method (method 1)

图4展示了2个激光位移传感器所测得的奥氏体316LN不锈钢的变形位移时间曲线。试样的相对拉伸位移等于2个激光位移传感器测试的曲线绝对值之差(见图4三角形标记的曲线)。根据图4展示的试样相对拉伸位移曲线,可以得到2个特征点:变形起始点和试样断裂点。这2个点的时间差值就是试样真正拉伸加载时长(大约53ms),对于不同含氮量的316LN金属材料,应变范围在50%~70%,其平均应变率水平为 $9.43\text{s}^{-1} \sim 13.20\text{s}^{-1}$,属于中应变率范围。如果使用霍普金森杆实现试样在这一应变率范围内的充分加载,对应霍普金森杆的脉宽时间需要53ms,那么这个加载脉宽需要发射120m~130m长的钢制霍普金森子弹杆来实现,显然对于实验室而言是不现实的,因此本文中应变率试验机成功克服了霍普金森杆所不能达到的中应变率范围的瓶颈。

使用高速相机记录了拉伸试验试样的变形过程,3个典型时刻的试样形貌通过箭头在图5中做出了标注。采用图像识别的方法识别到边界特征线的位置,然后根据像素与实际长度的标定系数,计算得

到试样变形长度 ΔL 随时间的变化曲线,如图 5 所示。

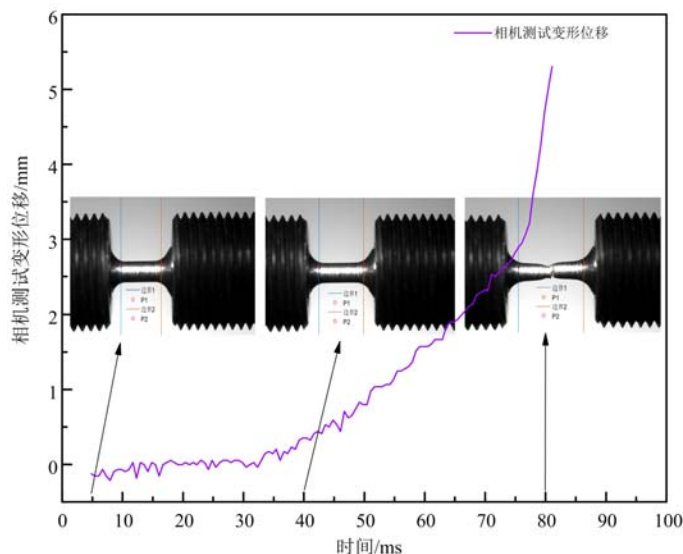


图 5 相机法测量变形位移(方法 2)

Fig. 5 Measurement of deformation displacement by camera method (method 2)

从图 6 可以看出,2 种方法测试的变形位移相比,试样断裂前的变形位移数据吻合良好。对于试样断裂时间,激光位移传感器测试方法相比真实断裂有短暂的延迟,但这并不影响试样应力与变形数据在整个加载过程中的相互对应关系。

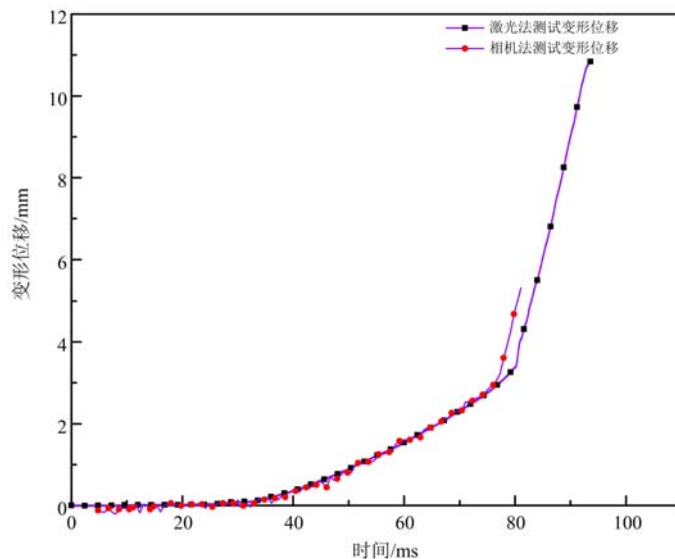


图 6 2 种方法得到的变形位移对比图

Fig. 6 Comparison diagram of deformation displacement acquired by the two methods

3.2 应力验证

试验应力是采用输出杆应变片和固定螺母处的环形动态力传感器进行测量的。在图 7 中,通道 ch1 是输出杆上的应变信号,通过输出杆弹性模量可以转化得到试样所受的拉伸合力。根据试样拉伸截面积尺寸,可以得到试样工程应力(如图 8 圆形标记的曲线所示)。另外,图 7 中通道 ch2 是环形动态力传感器所测得的力信号,使用类似的应力转化方法可以得到如图 8 三角形标记的试样工程应力时间曲线。ch3 和 ch4 是激光位移传感器传感器信号。

对比图 8 中圆形和三角形标记的工程应力时间曲线,只有一开始试样在弹性较小应力状态时,曲线有一定差异,但当应力大于 350MPa 以后,2 条曲线相似度很高。这也充分验证了 2 种方法测得的应力

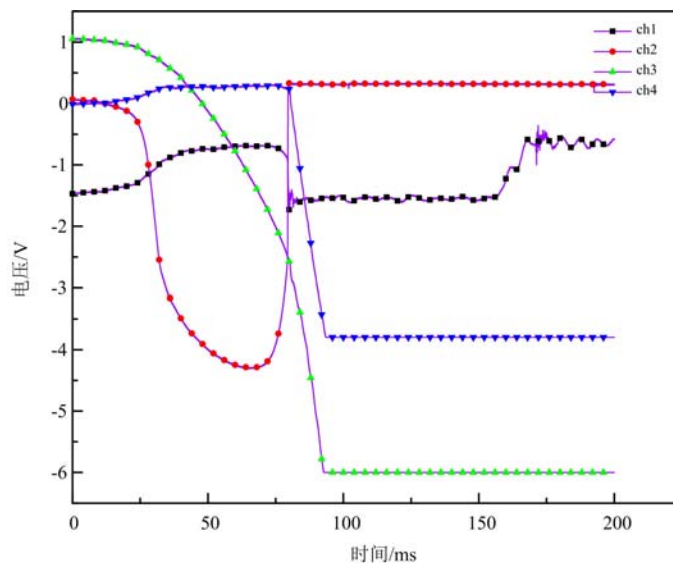


图7 316LN 不锈钢的中应变率测试信号记录图

Fig. 7 Recording diagram of medium strain rate test signal of 316LN stainless steel

是有效的。从曲线平滑角度来看,环形动态力传感器在测量应力时稳定性更好。

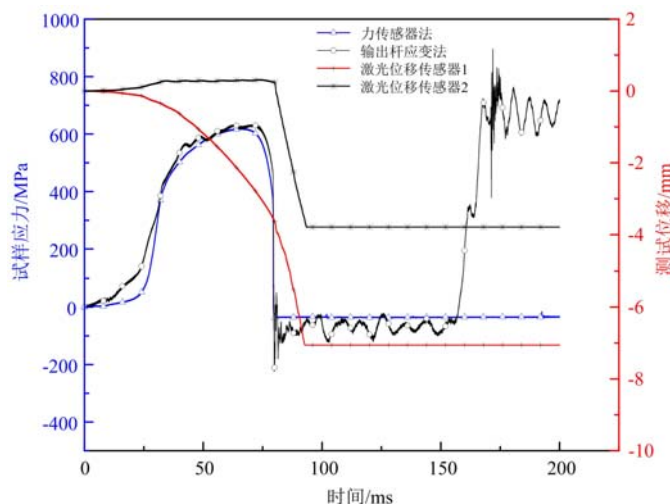


图8 316LN 不锈钢位移测试信号及工程应力时间曲线

Fig. 8 316LN stainless steel displacement test signal and engineering stress time curve

基于上述应变和应力验证两部分,最终可以根据时间对应关系得到 316LN 不锈钢的工程应力-工程应变曲线。通过图 9 曲线可以看出,该型号不锈钢试样的延伸率较高,能达到 58% 以上。这与文献 [13] 中所提到 316LN 的延伸率可以随着含氮量的增加从 66% 降低到 56% 的延伸率数据接近,因此可以证明中应变率拉伸试验机所测数据是可靠的。

3.3 不同类型试样在中应变率试验机拉伸下的工程应力-工程应变曲线

通过改变中应变率拉伸试验机的气室压力,可以实现不同材料中应变速率的加载测试。本文将中应变率试验机气室压力分别控制在 1MPa、2MPa、5MPa,完成了 3 种不同类型试样在 $5\text{s}^{-1} \sim 35\text{s}^{-1}$ 范围内的中应变率拉伸试验,共获得了 9 组工程应力-工程应变曲线(如图 10、图 11 和图 12 所示),所有工程应力-工程应变曲线的应力数据都是通过动态力传感器获取的,变形则采用激光位移传感器获得。图 10 和图 11 是棒状不锈钢 316LN 和 2A12-T4 材料的拉伸结果,图 12 是薄板状 2024-T351 材料的拉伸结果。

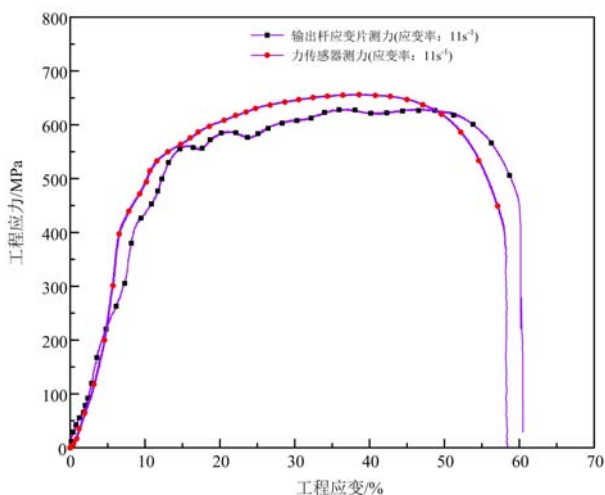


图 9 316LN 不锈钢 2 种测力方法所得
工程应力-工程应变曲线

Fig. 9 Engineering stress-strain curve of stainless steel 316LN obtained by two force measurement methods

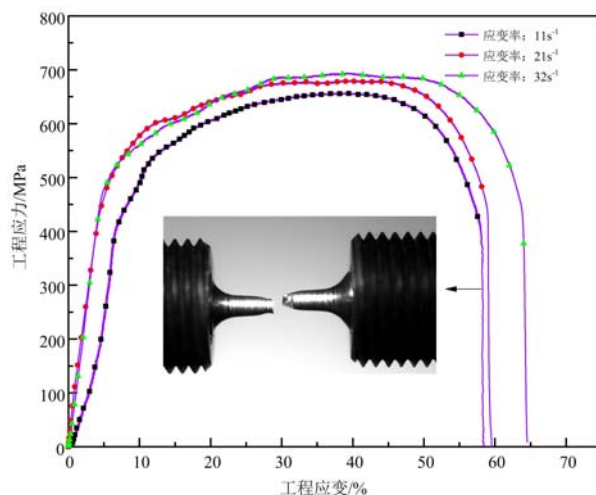


图 10 棒状 316LN 不锈钢的工程
应力-工程应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curve of rod stainless steel 316LN

为比较中应变率拉伸试验机所测材料性能的有效性,图 12 板状材料引入了准静态下(应变率为 $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) 2024-T351 的拉伸曲线作为对比组。由图 12 可以看出中应变率范围内 2024-T351 材料的屈服强度有一定提高,但最终硬化强度提高不明显。中应变率数据组和准静态数据曲线的硬化段吻合度较高,这表明本文中应变率试验数据是有效的。同时还可以发现,中应变率与准静态曲线相比,断裂失效应变有较高的提升,中应变率失效应变接近 18%。

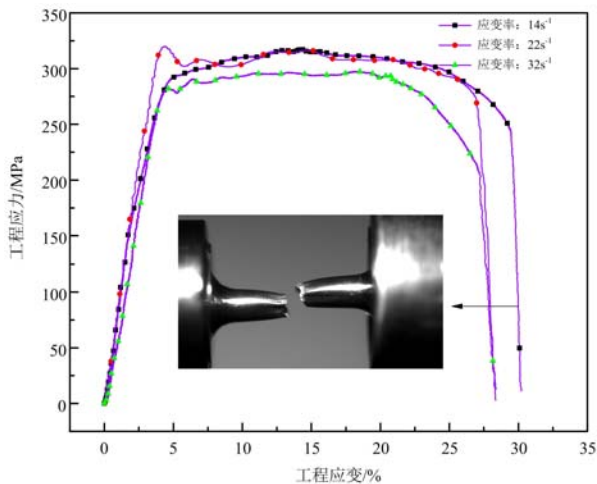


图 11 棒状铝合金 2A12-T4 试样中应变率下的
工程应力-工程应变曲线

Fig. 11 Engineering stress engineering vs strain curve under medium strain rate of rod aluminum alloy 2A12-T4 sample

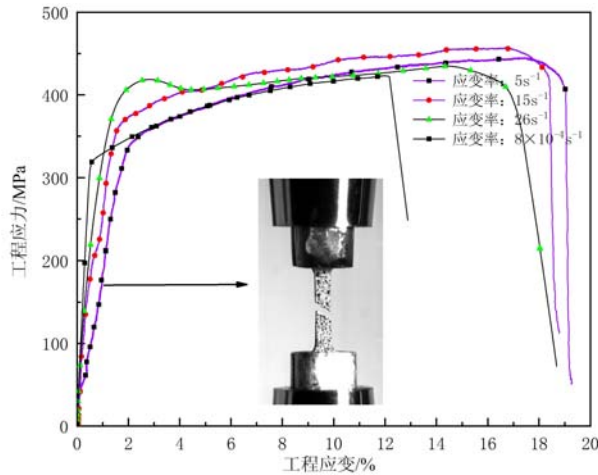


图 12 板状铝合金 2024-T351 试样准静态低、
中应变率下的工程应力-工程应变曲线

Fig. 12 Engineering stress vs engineering strain curves of plate aluminum alloy 2024-T351 under quasi-static low and medium strain rates

4 结论

通过中应变率试验机,对 3 种材料不同拉伸类型的试样进行了中应变率的拉伸试验测试及设备验证,得出以下结论:

(1) 中应变率拉伸试验采用激光位移传感器法测量的试样应变,与相机测试的应变吻合,表明激光

位移传感器可以用于中应变率下测试试样变形。

(2) 在中应变率拉伸试验中,应变部分采用激光位移传感器直接测量变形位移计算,对于常用金属的大塑性变形测试时,具有较高的测试精度。

(3) 中应变率试验机采用环形动态力传感器测量试样应力,对于中应变试验($10^0\text{ s}^{-1}\sim 10^2\text{ s}^{-1}$)的测试速率,应力测试曲线稳定,且应变率越小,测试曲线的波动性越小,测试信号越稳定;与输出杆粘贴应变片测力的结果相比,也同样具有更好的测试稳定性。总体看来,2种方法测试的应力数值接近。

(4) 中应变率拉伸试验机利用气-液压力平衡原理,缓慢泄压,将拉伸时间控制在 $1\text{ ms}\sim 100\text{ ms}$,有效实现了金属等材料的中低应变率拉伸试验。在材料的中应变率力学性能研究领域内,该拉伸试验机可作为通用设备被使用。

参考文献:

- [1] 卢芳云,陈荣. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京:科学出版社,2013 (LU Fangyun, CHEN Rong. Hopkinson rod experimental technology [M]. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese))
- [2] Chen Weinong, Song Bo. Split Hopkinson (Kolsky) Bar: design, testing and applications[M]. New York: Springer Science, 2011.
- [3] Albertini C, Montagnani M. Dynamic material properties of several steels for fast breeder reactor safety analysis [R]. External report EUR5787, 1977.
- [4] Tarigopula V, Albertini C, Langseth M, et al. A hydro-pneumatic machine for intermediate strain-rates: set-up, tests and numerical simulations[C]. DYMAT 2009, 2009:381-387.
- [5] 葛宇静,白春玉,惠旭龙,等. S580B 钢中低应变率动态拉伸试验方法及本构表征研究[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(1):125-131 (GE Yujing, BAI Chunyu, HUI Xulong, et al. Study on low and medium strain rate dynamic tensile test method and constitutive characterization of S580B steel [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(1):125-131 (in Chinese))
- [6] 白春玉,刘小川,周苏枫,等. 中应变率材料动态拉伸关键参数测试研究[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(4):507-512 (BAI Chunyu, LIU Xiaochuan, ZHOU Sufeng, et al. Material key parameters measurement method in the dynamic tensile testing at intermediate strain rates [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35 (4):507-512 (in Chinese))
- [7] 惠旭龙,白春玉,葛宇静,等. 2A16 铝合金中应变率力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(19):66-70 (HUI Xulong, BAI Chunyu, GE Yujing, et al. Dynamic properties of 2A16 aluminum alloy under intermediate strain rate[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(19):66-70 (in Chinese))
- [8] 葛宇静,白春玉,惠旭龙,等. 聚碳酸酯中低应变率范围下动态力学性能研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(9):66-70 (GE Yujing, BAI Chunyu, HUI Xulong, et al. Dynamic mechanical property of polycarbonate under Intermediate and low strain rates[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(9):66-70 (in Chinese))
- [9] Ramzi O, Pierrick G, Georges C, et al. A modified servo-hydraulic machine for testing at intermediate strain rates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36:460-467.
- [10] Li G, Liu D. Low strain rate testing based on drop weight impact tester[J]. Experimental Techniques, 2015, 39:30-35.
- [11] 张学峰,夏源明. 中应变率材料试验机的研制[J]. 实验力学, 2001, 16(1):13-18 (ZHANG Xuefeng, XIA Yuanming. Development of material testing apparatus for Intermediate strain rate test [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(1):13-18.
- [12] 张伟,姜雄文,聂洪杰,等. 液压气动中应变率拉伸试验装置[P]. 中国:ZL201921486084.9, 2019 (ZHANG Wei, JIANG Xiongwen, NIE Hongjie, et al. Hydraulic pneumatic intermediate strain rate tensile test device[P]. China: ZL201921486084.9, 2019 (in Chinese))
- [13] 淮凯文,余式昌,胡锦涛. 316L 奥氏体不锈钢的氮合金化[J]. 宝钢技术, 2007(4):9-12 (HUAI Kaiwen, YU Shichang, HU Jincheng. Nitrogen alloying of austenitic stainless steel 316L[J]. Baosteel Technology, 2007(4):9-12 (in Chinese))

The development and testing research of a hydro-pneumatic tensile experimental machine at intermediate strain rates

JIANG Xiongwen, LI Yue, WEI Hongjian, XU Shijia, ZHANG Wei

(High Velocity Impact Dynamics Lab, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: Assessing the dynamic mechanical properties of materials at intermediate strain rates ($10^0 \text{ s}^{-1} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$) is one of the major concerns in automobile crashes, foreign objects hitting planes and high-speed trains, metal-working and other impact fields. The reliable effective experimental device is the key to solve the problems of such testing. A hydro-pneumatic experimental machine for material tension test at intermediate strain rates was developed in this paper. The structures, operation principle, tensile load and strain measure methods were introduced in the following parts. The intermediate strain rate tensile tests of austenitic stainless steel and aluminum alloy were carried out by using the testing machine. The testing results indicate that the hydro-pneumatic tensile experimental machine can effectively carry out the intermediate strain rates material tensile test, and realize the effective measurement of load and strain.

Keywords: dynamic tensile property; hydro-pneumatic experimental machine; intermediate strain rates; dynamic mechanical property; laser displacement transducer