

用于软材料的中应变率 LSHPB 系统及应用*

徐沛栋¹, 倪萍¹, 杨宝¹, 蒋震宇¹, 刘逸平¹, 刘泽佳¹, 周立成¹, 汤

立群¹

(1. 华南理工大学土木与交通学院工程力学系、亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 生物软材料大多是高含水率的超软材料, 其力学性能在宽应变率范围内随着应变率提高而非线性增强。然而由于实验条件限制, 在中应变率下对超软材料进行大变形测试显得比较困难。本研究设计并建造了一个 15 米长的双子弹电磁驱动长分离式霍普金森压杆 (long split Hopkinson pressure bar, LSHPB) 系统, 可用于超软材料的大变形中应变率测试。使用该 LSHPB 系统和高速 SHPB 系统分别对硅橡胶进行了测试, 比较二者的实验结果, 验证了本套系统的可靠性。应用 LSHPB 系统测量了聚乙烯醇 (polyvinyl alcohols, PVA) 水凝胶在中应变率力学性能, 并且结合已有的低和高应变率的数据分析, 说明了中应变率动态性能测试的必要性。

关键词: 中应变率测试; LSHPB 系统; PVA 水凝胶; 动态力学行为

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标识码: A

An intermediate strain rate LSHPB system for soft materials and its application

XU Peidong¹, NI Ping¹, YANG Bao¹, JIANG Zhenyu¹, LIU Yiping¹, LIU Zejia¹, ZHOU Licheng¹, TANG Liqun¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Biological soft materials, often with high water content and ultra-softness, display mechanical properties that non-linearly enhance over a broad range of strain rates. However, existing experimental constraints make it challenging to perform large deformation tests on these materials at intermediate strain rates. This study introduces a 15-meter-long Long Split Hopkinson Pressure Bar (LSHPB) system, driven by a dual-bullet electromagnetic mechanism, designed for large deformation intermediate strain rate testing of ultra-soft materials. Comparative tests conducted using both the LSHPB and a high-speed SHPB system validated the reliability of the newly developed system. The LSHPB system was then applied to measure the dynamic mechanical performance of polyvinyl alcohol (PVA) hydrogel at intermediate strain rates. The results, combined with existing data from low and high strain rate analyses, underscore the necessity for intermediate strain rate dynamic performance testing. This work not only broadens our understanding of the mechanical behavior of ultra-soft materials like PVA hydrogel across various strain rates

*收稿日期: 2024-08-26; 修回日期: 2024-11-04;

基金项目: 国家自然科学基金 (11932007, 12372181, 12072115, 12072116)

第一作者: 徐沛栋 (1995-), 男, 博士研究生. E-mail: 201810101422@mail.scut.edu.cn

通讯作者: 汤立群 (1966-), 男, 博士, 教授. E-mail: lqtang@scut.edu.cn

but also introduces an innovative experimental technique for studying materials under intermediate strain conditions, thereby advancing the field of soft material dynamics.

Keywords: Intermediate Strain Rate Testing; LSHPB System; PVA Hydrogel; Dynamic mechanical behavior

生命软物质如脑组织、高含水率水凝胶（如聚乙烯醇，PVA 水凝胶）等都是典型的超软材料，它们具有很多独特的力学性质^[1, 2]，其中包含强非线性的应变率效应^[3, 4]，特别是在中应变率范围内（100 - 500/s），应变率增强效应发生显著变化^[5]。对超软材料，中应变率试验要求在较低的冲击速度下依然能使材料发生较大的变形，这使得现有可以开展超软材料的霍普金森压杆（SHPB）系统无法满足要求，需要开发新的 SHPB 系统。

目前，中应变率测试装置主要分为三类^[6]：高速液压伺服试验机^[7, 8]、传统 SHPB 设备及其改进型^[9-11]，以及使用霍普金森压杆作为载荷测量装置但采用入射杆之外的加载设备的测试系统^[12-14]。这些实验方法中，SHPB 在避免加载装置振动和保持恒应变率加载方面具有显著优势。

传统 SHPB 系统因其原理简单，设计和建造相对容易，改进型的系统更是能应用于多种测试^[15, 16]。但在应用于超软材料的中应变率测试时面临挑战，主要是试件的低波阻抗和加载时间不足。针对试件低模量导致的透射信号弱问题，研究者们已通过采用低波阻抗的聚合物杆^[17, 18]和电磁加载技术^[19-21]等方法有效解决^[22]。在另一方面，为了满足中应变率试验所需的加载时间，通常需要使用非常长的压杆系统。例如，Song^[9]曾经采用铝作为杆件材料，分别制造了长度为 11 米的入射杆和透射杆，组装成了一个总长度达到 27.4 米的长分离式霍普金森压杆（LSHPB）系统。这一系统能够产生持续时间长达 3 ms 的入射波，从而在 70/s 的应变率下实现 23% 的工程应变。幸运的是，适用于软材料的聚合物压杆相比金属杆具有更低的波速，使得相同长度的系统可以实现数倍长的脉冲宽度。此外，波分离技术的应用能够在相同长度的入射杆上实现接近两倍的脉冲宽度。经过评估，使用聚合物杆，可以设计一套长度不超过 15 m 的 LSHPB 系统，能够产生超过 4 ms 的入射波，在 100/s 的应变率下使试件达到 40% 以上的工程应变。

本研究旨在设计并验证一种适用于超软材料中等应变率测试的长分离式霍普金森压杆（LSHPB）系统，并以 PVA 水凝胶为实验对象进行相关研究。这一系统将填补现有研究中关于 PVA 水凝胶在中应变率下的空白，为深入理解软材料的率相关力学行为提供坚实的实验基础。

1 中应变率 SHPB 系统

在本研究中，我们搭建了一套超长分离式霍普金森压杆（LSHPB）系统，用于在中应变率下对超软材料的动态力学性能测试。针对粘弹性杆和超长入射波，采用了波传播系数法和基于两点测量的波分离法进行数据处理。

1.1 系统设计

图 1 展示了 LSHPB 系统的结构图。系统核心组件包括双子弹电磁驱动发射器^[23]、子弹、入射杆、透射杆及数据采集系统。选用聚碳酸酯作为杆件材料，其较低的波阻抗和波速有助于与超软材料匹配。子弹、入射杆和透射杆的长度分别设定为 4 m、5 m 和 5 m，直径统一为 20 mm。电磁驱动系统由主子弹、副子弹、线圈和导轨组成，主子弹由铁磁材料制成，副子弹由非铁磁材料（本研究中为聚碳酸酯）制成。初始状态下主副子弹紧贴在一起，线圈通电后的强磁场驱动主子弹并推动副子弹达到发射速度，随后主子弹在导轨尽头停下，副子弹则带着初始速度前进一段距离后撞击入射杆。与传统气体驱动装置相比，电磁驱动在控制发射速度上具有显著的精确性优势，尤其在对发射速度变化敏感的轻质聚合物杆件上。整个 LSHPB 系统固定在 16 m 长的光学实验平台上，确保了实验的准确性和重复性。图 2 展示了安装于实验平台上的 LSHPB 系统。为确保数据处理的准确性，我们预先对杆件材料

样品进行了准静态和动态测试，获得了描述其线性粘弹性行为的广义 Maxwell 本构方程参数^[24]（公式 1）。这些参数为从应变片信号计算试件的应力提供了基础，具体材料参数细节列于表 1 中。

$$\sigma = E_0 \varepsilon + \int_0^t E_1 e^{-\frac{t-\tau}{\theta_1}} d\tau + \int_0^t E_2 e^{-\frac{t-\tau}{\theta_2}} d\tau \quad (1)$$

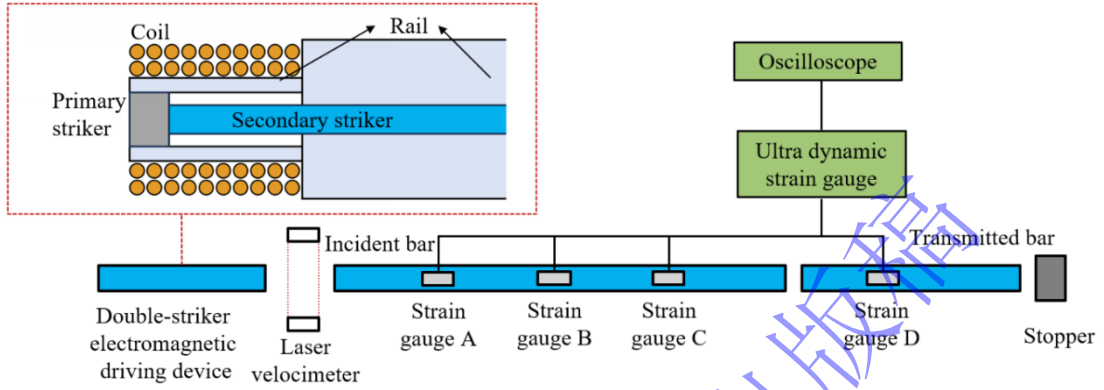


图 1 双子弹电磁驱动超长分离式霍普金森压杆示意图

Fig.1 Schematic of the double electromagnetic driving long split-Hopkinson pressure bar (LSHPB) device for intermediate strain rate testing

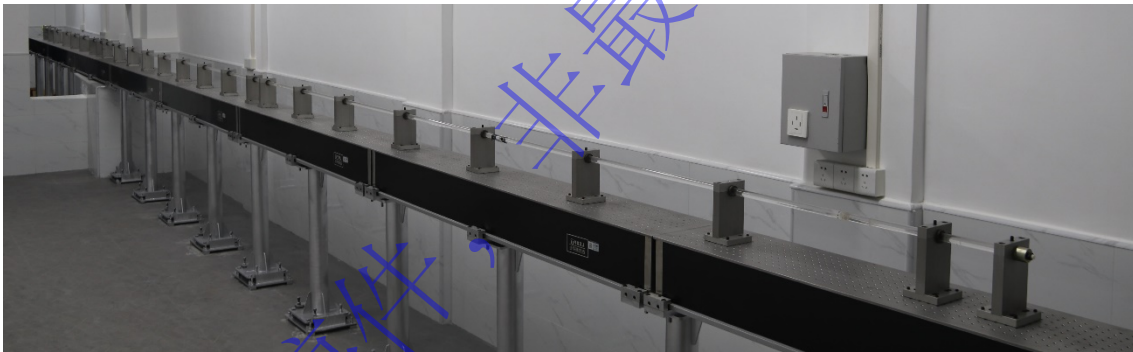


图 2 双子弹电磁驱动超长分离式霍普金森压杆实物图^[25]

Fig.2 Physical diagram of the double electromagnetic driving long split-Hopkinson pressure bar (LSHPB) device for intermediate strain rate testing^[25]

表 1 本文用到的 SHPB 系统参数

Table 1 The parameters of SHPB devices in this study

测试系统	子弹、入射杆、透射杆长度/(mm)	密度/(kg·m ⁻³)	波速/(m·s ⁻¹)	粘弹性本构参数/(MPa, s)
LSHPB	4000, 5000, 5000	1200	2165	$E_0 = 2067.8, E_1 = 267.3, E_2 = 3334.1$

$$\theta_1 = 3.7, \theta_2 = 1.23 \times 10^{-4}$$

				$E_0 = 1761.3, E_1 = 121.0, E_2 = 762.8$
SHPB	350, 995, 600	1183	1483	
				$\theta_1 = 5.0, \theta_2 = 1.24 \times 10^{-4}$

1.2 粘弹性波处理

由于聚合物杆的粘弹性及其超长长度，应力波在其中传播时会发生明显的弥散和衰减，有必要进行修正以获得试件两端的实际应变。本研究采用波传播系数法进行修正^[26]。基于应力波在杆中一维传播的假设，其在频域的传播行为可以通过公式 2 中的波动方程来描述：

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \bar{\sigma}(x, \omega) = -\rho \omega^2 \bar{\varepsilon}(x, \omega) \quad (2)$$

其中， ρ 为材料密度， x 为杆上质点位置， ω 为频率， $\bar{\sigma}(x, \omega)$ 和 $\bar{\varepsilon}(x, \omega)$ 是频域中应力和应变历史的傅立叶变换。线性粘弹性材料在频域中的一维本构关系如下：

$$\bar{\sigma}(x, \omega) = E^*(\omega) \bar{\varepsilon}(x, \omega) \quad (3)$$

其中 $E^*(\omega)$ 为频域中的模量。将传播系数 γ 定义为：

$$\gamma^2(\omega) = -\frac{\rho \omega^2}{E^*(\omega)} \quad (4)$$

γ 的实部称为衰减系数，虚部称为波数。引入传播系数后，杆中线性粘弹性波的一般解如下：

$$\bar{\varepsilon}(x, \omega) = \bar{\varepsilon}_r(\omega) e^{-\gamma x} + \bar{\varepsilon}_l(\omega) e^{\gamma x} \quad (5)$$

其中，下标 r 代表右行波，下标 l 代表左行波， $\bar{\varepsilon}_r$ 和 $\bar{\varepsilon}_l$ 分别是波在 $x = 0$ 处沿 x 轴向右和向左传播时产生的轴向应变历史的傅立叶变换。

如图 1 所示，入射杆上粘贴了三组应变片：靠近撞击端的应变片 A、杆中间的应变片 B 和靠近试件端的应变片 C。在子弹撞击入射杆后的一段时间内，只有右行波传播，被应变片 A 和 B 前后分别记录。将它们代入公式 5，即可计算传播系数 γ ，并可得到波在入射杆上传播任意距离后的波形。

1.3 基于两点测量的波分离法

由于采用了大于 0.5 倍入射杆长度的子弹，入射波和反射波会在入射杆中叠加，采用两点法波分离技术分离杆中叠加的左行波和右行波^[27, 28]。以入射杆上的应变片 A, C 为例，如图 3 所示，以子弹撞击端为空间坐标原点，撞击时刻为时间原点，当杆的左端受到撞击时产生右行波。当

$t \leq t_A = (2L - x_A) / C_0$ 时，点 A 处应变片所记录的信号 $\varepsilon_A(t)$ 就是点 A 处的右行波 $\varepsilon_{r,A}(t)$ 。其中， x_A 为

点 A 到原点的距离，L 为入射杆的长度， C_0 为杆上的纵波波速。同理，当 $t \leq t_C = (2L - x_C) / C_0$ 时，

$\varepsilon_C(t)$ 就是点 C 处的右行波 $\varepsilon_{r,C}(t)$ 。而当 $t > t_C$ 时， $\varepsilon_C(t)$ 是 t 时刻点 C 处的右行波 $\varepsilon_{r,C}(t)$ 与反射回来的

左行波 $\varepsilon_{l,C}(t)$ 的叠加：

$$\varepsilon_C(t) = \varepsilon_{r,C}(t) + \varepsilon_{l,C}(t) \quad (6)$$

其中 $\varepsilon_{r,c}(t)$ 是 $\varepsilon_{r,A}(t - \Delta t)$ 经传播 $\Delta t = (x_c - x_A) / C$ 后得到的, 可通过传播系数法定量描述它们的关系:

$$\varepsilon_{r,c}(t) = \text{FFT}^{-1}[\text{FFT}[\varepsilon_{r,A}(t - \Delta t)]e^{-\gamma(x_c - x_A)}] \quad (7)$$

其中 FFT 和 FFT^{-1} 表示傅里叶变换和反傅里叶变换。结合公式 6 和公式 7 可以得到 C 处的左行波 $\varepsilon_{l,c}(t)$:

$$\varepsilon_{l,c}(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_C \\ \varepsilon_C(t) - \text{FFT}^{-1}[\text{FFT}[\varepsilon_{r,A}(t - \Delta t)]e^{-\gamma(x_c - x_A)}] & t > t_C \end{cases} \quad (8)$$

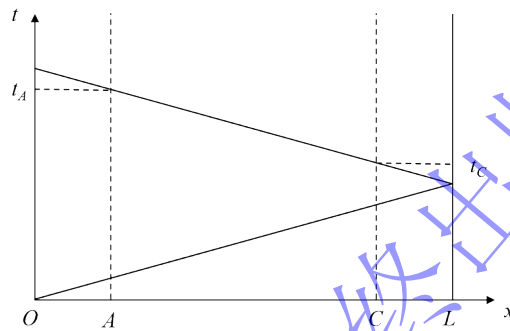


图 3 波分离示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stress wave separation

2 系统可靠性验证

为了验证 LSHPB 系统的可靠性, 同时采用本套 LSHPB 系统和另一套高速 SHPB 系统对同一种材料开展相近应变率下的动态实验。若两套系统测试结果一致, 则证明 LSHPB 系统是可靠的。

2.1 验证性实验方案

测试所采用的另一套实验系统为本实验室的高速 SHPB 系统^[23], 如图 5 所示。目标应变率为 400/s。选取硅橡胶作为验证性实验的试件材料。试件形状为圆柱形, 直径为 8 mm, 厚度为 2 mm, 如图 4 所示。两套 SHPB 系统各测试 3 个试件。

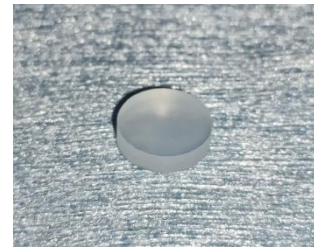


图 4 硅橡胶试件

Fig.4 Silicone rubber specimens

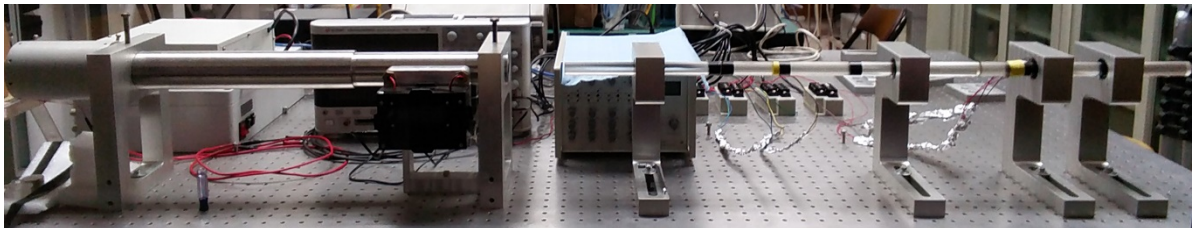


图 5 双子弹电磁驱动 SHPB 系统^[23] (谢倍欣, 汤立群, 姜锡权, 等, 2018)

Fig.5 Double-striker electromagnetic driving SHPB system^[23]

2.2 验证性实验结果

图 6 展示了使用 LSHPB 和传统 SHPB 系统获得的硅橡胶的应力-应变曲线。在控制加载速度相近且在 SHPB 系统的应变测量范围内，两个系统得到的数据具有很高的一致性，从而验证了 LSHPB 系统的可靠性。

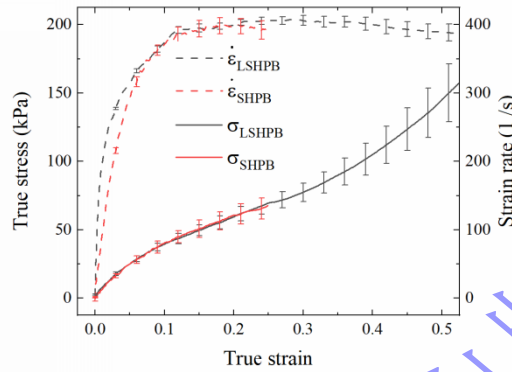


图 6 分别在 LSHPB 和 SHPB 中测得的硅橡胶应力-应变关系

Fig.6 The stress-strain relationship of silicone rubber measured in LSHPB and SHPB, respectively.

3 PVA 水凝胶的 SHPB 实验

PVA 水凝胶作为一种新型超软材料，在关节软骨替代等生物医学领域具有重要的应用前景。鉴于人体关节软骨在跌落或跳跃活动中会承受中低应变率的动态负荷，因此对 PVA 水凝胶在这些负荷下的力学响应进行深入研究具有重要意义。本研究开发的双子弹电磁驱动 LSHPB 系统，为探究 PVA 水凝胶在中应变率下的力学性能提供了一种有效的实验方法。

3.1 实验方案

PVA 水凝胶是由水和 PVA 纤维构成的复合材料，本研究所用的试件通过反复冷冻解冻法制备，饱和状态下含水率可达 85%。为了确保试件变形的均匀性并减少径向惯性效应，圆柱形试件设计为 6 mm 直径和 2 mm 厚度，如图 7 所示。利用 LSHPB 系统对 PVA 水凝胶进行了力学性能测试，目标应变率为 100/s 和 350/s，每个应变率条件下均测试了至少 4 个试件。



图 7 饱和与脱水的 PVA 水凝胶试件

Fig.7 Saturated and dehydrated PVA

3.2 实验数据及处理

一次典型的 350/s 应变率下的 PVA 水凝胶 LSHPB 实验原始数据如图 8 所示，包含应变片 A、C、D 所采集的应变信号。应用传播系数法（公式 7）可计算 C 处的右行波 $\epsilon_{r,c}$ ，应用波分离法（公式 8）可计算 C 处的左行波 $\epsilon_{l,c}$ ，此外还有 D 处直接测得的右行波 $\epsilon_{r,d}$ 。再利用传播系数，根据 C 和 D 点分别到入射杆和透射杆端面的距离，计算端面处的入射波 ϵ_{inc} 反射波 ϵ_{ref} 以及透射波 ϵ_{tra} 。图 9 展示了试件两端的入射波、反射波和透射波的绝对值。结果显示，入射波与反射波的差值与透射波吻合，表明试件满足 SHPB 实验的应力均匀基本假设。

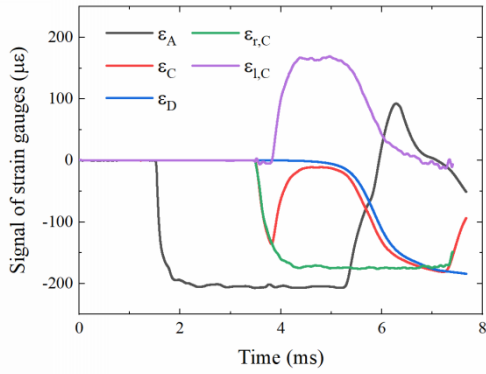


图8 典型的 350/s 下 PVA 水凝胶 LSHPB 测试的原始信号以及经过波分离得到的 C 处的右、左行波

Fig.8 The signals of a typical PVA hydrogel LSHPB test at 350/s and the right and left traveling waves obtained at point C after wave separation processing.

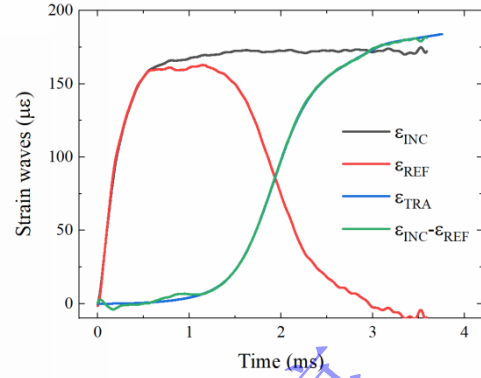


图9 端面的入射波 (INC)、反射波 (REF) 和透射波 (TRA)

Fig.9 The incident wave (INC), reflected wave (REF), and transmitted wave (TRA) at the end surface.

$$\begin{cases} \sigma_s(t) = \frac{A}{2A_s} [E_0 \varepsilon_{\text{TRA}} + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon}_{\text{TRA}} e^{-\frac{t-\tau}{\theta_1}} d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon}_{\text{TRA}} e^{-\frac{t-\tau}{\theta_2}} d\tau] \\ \dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_0}{l_s} [\varepsilon_{\text{INC}} - \varepsilon_{\text{REF}} - \varepsilon_{\text{TRA}}] \\ \varepsilon_s(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_{\text{INC}} - \varepsilon_{\text{REF}} - \varepsilon_{\text{TRA}}] dt \end{cases} \quad (9)$$

使用公式 9 计算试件的名义应力、应变以及名义应变率，其中试件的应力用透射波计算，应变用三波计算，在透射信号微弱的软材料 SHPB 测试中，这种简化的三波法比二波法或三波法更精确^[29]。式

中 A 为杆的截面积， A_s 为试件初始面积， l_s 为试件初始厚度，其余杆件参数在表 1 中列出。试件的真实应力和应变则根据体积不变假设计算。图 10 展示了试件的名义应变率、真实应变、真实应力以及应力（应变率）与应变的关系。需要指出的是，标称的 350/s 应变率来自加载平台段的名义应变率均值，且试验结果只取应变 0.7 之前的数据，在此之后试件已明显不能保持恒应变率。

此外，对于试件在加载过程中的径向惯性效应，采用 Gorham^[30]的处理方法进行修正，但计算结果表明中应变率试验过程中径向惯性产生的附加应力不超过 1 kPa，可以被忽略。

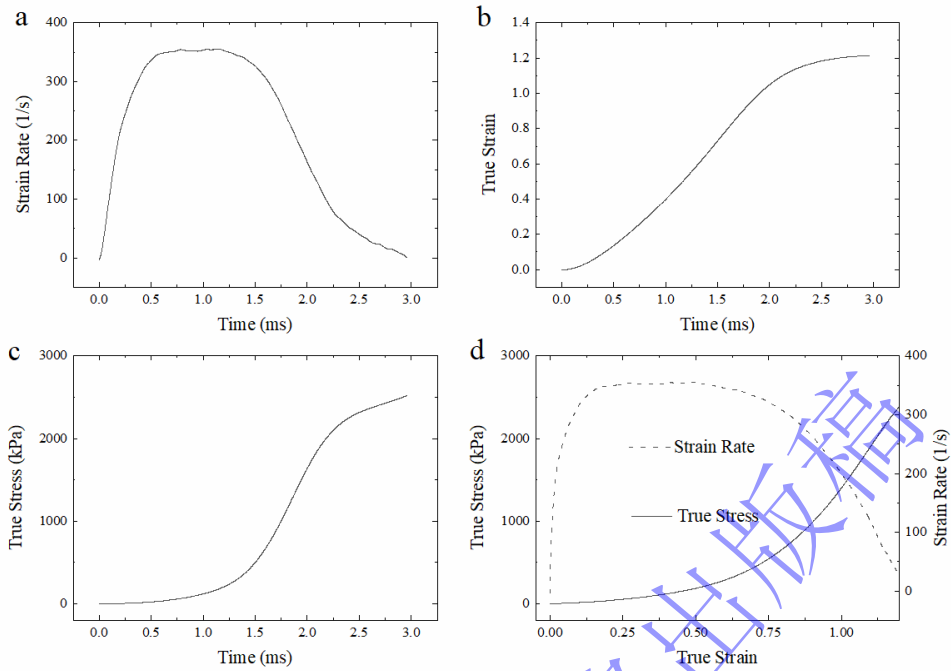


图 10 典型的 350/s 下 PVA 水凝胶 LSHPB 实验的结果: (a) 名义应变率, (b) 真实应变, (c) 真实应力, (d) 应力 (应变率) 与应变的关系

Fig.10 The results of a typical PVA hydrogel LSHPB test at 350/s: (a) nominal strain rate, (b) true strain, (c) true stress, (d) the relationship between stress (strain rate) and strain.

3.3 实验结果与分析

3.3.1 中应变率力学行为与强非线性应变率效应

图 11 描绘了 PVA 水凝胶在不同应变率条件下的应力-应变曲线以及对应的名义应变率, 这些曲线是基于 4 个试件的平均结果。观察到随着应变率的增加, PVA 水凝胶在相同应变水平下展现出更高的应力响应。进一步地, 结合相关研究^[5]中关于 PVA 水凝胶在低应变率和高应变率下的研究, 图 12 展示了在应变为 0.4 时不同应变率下的应力值, 从而揭示了 PVA 水凝胶的应力水平与应变率之间的关联。结果表明, PVA 水凝胶的应变率效应在中应变率区域并不呈现双线性特征, 而是展现出更平滑的变化趋势, 这与先前研究所预测的^[5]不同。

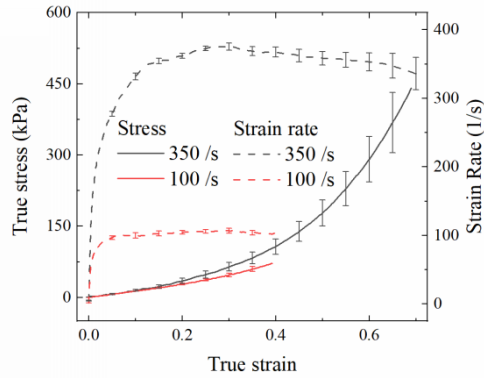


图 11 PVA 水凝胶的应力（及应变率）与应变的关系
Fig.11 The stress (and strain rate) - strain relationship of PVA hydrogel

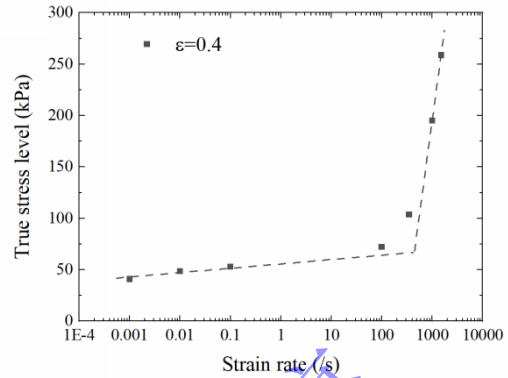


图 12 PVA 水凝胶的应变率效应
Fig.12 The strain rate effect of PVA hydrogel

3.3.2 中应变率实验优化本构方程参数

利用拟合效果出色的非线性粘弹性本构模型^[25]对数据进行分析（公式 10）：如果不纳入中应变率数据，仅凭低应变率（0.001~0.1/s）和高应变率的数据（1000~1500/s），在预测 100/s 和 350/s 应变率下的力学行为时会产生最大 18% 的误差，如图 13 所示；而如果采用低应变率（0.001~0.1/s）和部分中高应变率数据（100, 1000/s），来预测 350 和 1500/s 的数据，误差则小于 7%，如图 14 所示（相关参数列于表 2）。这些预测结果表明，纳入中应变率数据可显著提高模型的预测效果。因此，对于软材料而言，中应变率的实验数据对于理解材料的率相关力学行为至关重要。

$$\sigma = \frac{\kappa\nu T}{1-\alpha\varepsilon^\beta} (1-e^{-2\varepsilon}) + e^{-2\varepsilon} \sum_{i=1}^2 \int_0^t [G_{1i} + G_{2i}(I_2 - 3)] e^{-\frac{t-\tau}{\theta_i}} \dot{\varepsilon}_N e^{-\varepsilon} d\tau$$

$$+ (1+k\varepsilon) \left[\frac{\kappa\nu T}{1-\alpha\varepsilon^\beta} (e^\varepsilon - 1 - \alpha\varepsilon^\beta e^\varepsilon) + \frac{1}{2} (1-\alpha\varepsilon^\beta) e^\varepsilon \sum_{i=1}^2 \int_0^t [G_{1i} + G_{2i}(I_2 - 3)] e^{-\frac{t-\tau}{\theta_i}} (1-\alpha\varepsilon^\beta - \alpha\beta\varepsilon^{\beta-1}) \dot{\varepsilon}_N e^{2\varepsilon} d\tau \right] \quad (10)$$

其中， κ 为玻尔兹曼常数（ 1.38×10^{-23} J/K）， ν 为聚合物链的数量， T 为环境温度（室温 25°C）。 k 是一个反映水凝胶微观形态的系数， α 和 β 是表征水凝胶体积变化的参数。 G 和 θ 分别为粘弹性本构的弹性模量和松弛时间。

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

所用数据应变率 (s ⁻¹)	$\kappa\nu T$ (kPa)	k	α	β	G_{11}	G_{21}	θ_1	G_{12}	G_{22}	θ_2
					(kPa)	(kPa)	(s)	(kPa)	(kPa)	(μ s)
0.001 ~ 0.1, 1000 ~ 1500	16.7	6.12	0.079	0.58	17.7	0	77.6	338	228	98.9
0.001 ~ 100, 1000	16.7	6.12	0.079	0.58	17.7	0	77.6	510	261	50.4

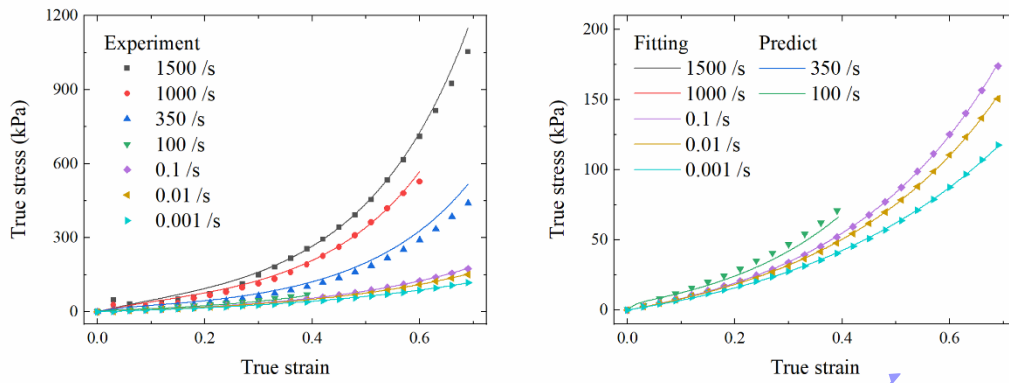


图 13 用其他数据预测 100, 350/s 应变率力学行为

Fig.13 Mechanical behavior of 100, 350/s strain rate predicted with other data

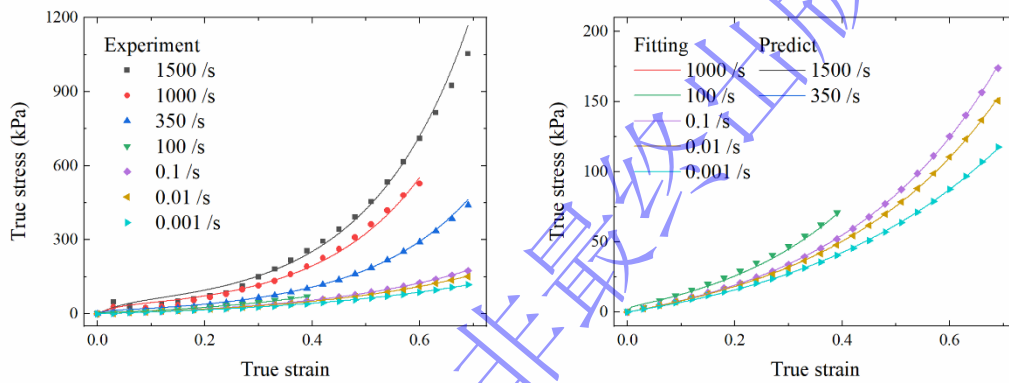


图 14 用其他数据预测 350, 1500/s 应变率力学行为

Fig.14 Mechanical behavior of 350, 1500/s strain rate predicted with other data

4 结论

本研究成功构建并验证了一种新型的双子弹电磁驱动长分离式霍普金森压杆 (LSHPB) 系统, 可用于中应变率下超软材料的动态力学性能测试。对 PVA 水凝胶进行的实验表明, 其应变率增强效应存在强非线性, 且强非线性转化区间正好处于中应变率区间, 但总体是光滑过渡的。结合已有的低和高应变率实验数据和本构模型所进行的分析表明, 中应变率数据对于模型的预测效果和理解材料的率相关力学行为至关重要。

参考文献

- [1] ZHANG Y T, ZHANG Y R, TANG L Q, et al. Uniaxial compression constitutive equations for saturated hydrogel combined water-expelled behavior with environmental factors and the size effect [J]. Mech Adv Mater Struc, 2022, 29(28): 7491-502. DOI:10.1080/15376494.2021.2000682
- [2] ZHANG Y R, XU K J, BAI Y L, et al. Features of the volume change and a new constitutive equation of hydrogels under uniaxial compression [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2018, 85: 181-7. DOI:10.1016/j.jmbbm.2018.06.004

- [3] WANG J Y, ZHANG Y R, JIANG Z Y, et al. Mechanical behavior and constitutive equations of porcine brain tissue considering both solution environment effect and strain rate effect [J]. *Mech Adv Mater Struc*, 2024, 31(10): 2115-29. DOI:10.1080/15376494.2022.2150917
- [4] WANG J, ZHANG Y, LEI Z, et al. Hydrogels with brain tissue-like mechanical properties in complex environments [J]. *Materials & Design*, 2023, 234. DOI:10.1016/j.matdes.2023.112338
- [5] XIE B, XU P, TANG L, et al. Dynamic Mechanical Properties of Polyvinyl Alcohol Hydrogels Measured by Double-Striker Electromagnetic Driving SHPB System [J]. *Int J Appl Mech*, 2019, 11(2). DOI:10.1142/S1758825119500182
- [6] BHUJANGRAO T, FROUSTEY C, IRIONDO E, et al. Review of Intermediate Strain Rate Testing Devices [J]. *Metals*, 2020, 10(7). DOI:10.3390/met10070894
- [7] SONG B, CHEN W, LU W. Compressive mechanical response of a low-density epoxy foam at various strain rates [J]. *J Mater Sci*, 2007, 42(17): 7502-7. DOI:10.1007/s10853-007-1612-z
- [8] 惠旭龙, 白春玉, 刘小川, 等. 宽应变率范围下 2A16-T4 铝合金动态力学性能 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(5): 871. DOI:10.11883/1001-1455(2017)05-0871-08
- XI X L, BAI C Y, LIU X C, et al. Dynamic mechanical properties of 2A16-T4 aluminum alloy at wide-ranging strain rates[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2017, 37(5): 871-878. DOI:10.11883/1001-1455(2017)05-0871-08
- [9] SONG B, SYN C J, GRUPIDO C L, et al. A Long Split Hopkinson Pressure Bar (LSHPB) for Intermediate-rate Characterization of Soft Materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2008, 48(6): 809-15. DOI:10.1007/s11340-007-9095-z
- [10] SHIM J, MOHR D. Using split Hopkinson pressure bars to perform large strain compression tests on polyurea at low, intermediate and high strain rates [J]. *Int J Impact Eng*, 2009, 36(9): 1116-27. DOI:
- [11] 钟东海, 郭鑫, 熊雪梅, 等. 直撞式霍普金森压杆二次加载技术 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(4): 044101-1. DOI:10.11883/bzycj-2022-0210
- ZHONG D H, GUO X, XIONG X M, et al. Direct-impact double-loading Hopkinson bar technique[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2023, 43(4): 044101. DOI:10.11883/bzycj-2022-0210
- [12] KIM J-M, PARK J-S, LEEM D-H, et al. Determination of strain rate dependence at intermediate strain rates using acceleration information [J]. *Int J Impact Eng*, 2023, 173: 104482. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104482
- [13] JIA B, CHEN P, RUSINEK A, ZHOU Q. Thermo-viscoplastic behavior of DP800 steel at quasi-static, intermediate, high and ultra-high strain rates [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 226: 107408. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107408
- [14] QIN Z, ZHU J, LI W, et al. System ringing in impact test triggered by upper-and-lower yield points of materials [J]. *Int J Impact Eng*, 2017, 108: 295-302. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.04.020
- [15] 高光发. 夹心杆系统中一维弹塑性波演化精细分析 (II): 弹塑性交界面与平台段反射衰减 [J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(8): 081442-1. DOI:10.11883/bzycj-2023-0392
- GAO G F. Meticulous analysis of one-dimensional elasto-plastic wave evolution in sandwich rod systems (part II): reflection attenuation at the elasto-plastic interface and platform section[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2024, 44(8): 081442. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0392
- [16] 舒旗, 董新龙, 俞鑫炉. 基于 Hopkinson 压杆的 M 型试样动态拉伸实验方法研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(8): 084101-1. DOI:10.11883/bzycj-2019-0433
- SHU Q, DONG X L, YU X L. A dynamic tensile method for M-shaped specimen loaded by Hopkinson pressure bar[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2020, 40(8): 084101. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0433
- [17] ZHAO H, GARY G, KLEPACZKO J R. On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar [J]. *Int J Impact Eng*, 1997, 19(4): 319-30. DOI:10.1016/s0734-743x(96)00038-3
- [18] XU P, TANG L, ZHANG Y, et al. SHPB experimental method for ultra-soft materials in solution environment [J]. *Int J Impact Eng*, 2022, 159. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2021.104051

- [19] LIU Z, CHEN X, LV X, XIE H. A mini desktop impact test system using multistage electromagnetic launch [J]. *Measurement*, 2014, 49: 68-76. DOI:10.1016/j.measurement.2013.11.029
- [20] 王维斌, 索涛, 郭亚洲, 等. 电磁霍普金森杆实验技术及研究进展 [J]. *力学进展*, 2021, 51(4): 729-54. DOI:10.6052/1000-0992-20-024
WANG W B, SUO T, GUO Y Z, et al. Experimental technique and research progress of electromagnetic Hopkinson bar. *Advances in Mechanics*, 2021, 51(4): 729-754. DOI: 10.6052/1000-0992-20-024
- [21] 杜冰, 郭亚洲, 李玉龙. 一种基于电磁霍普金森杆的材料动态包辛格效应测试装置及方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(8): 081101-1--9. DOI:10.11883/bzycj-2020-0050
DU B, GUO Y Z, LI Y L. A novel technique for determining the dynamic Bauschinger effect by electromagnetic Hopkinson bar[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2020, 40(8): 081101. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0050
- [22] 胡时胜, 王礼立, 宋力, 张磊. Hopkinson 压杆技术在中国的发展回顾 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(6): 641. DOI:10.11883/1001-1455(2014)06-0641-17
HU S S, WANG L L, SONG L, ZHANG L. Review of the development of Hopkinson pressure bar technique in China[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2014, 34(6): 641-657. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)06-0641-17
- [23] 谢倍欣, 汤立群, 姜锡权, 等. 用于软材料的双子弹电磁驱动 SHPB 系统 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(5): 054101. DOI:10.11883/bzycj-2017-0394
XIE B X, TANG L Q, JIANG X Q, et al. A double-striker electromagnetic driving SHPB system for soft materials[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2019, 39(5): 054101. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0394
- [24] LILI W, LABIBES K, AZARI Z, PLUVINAGE G. Generalization of split Hopkinson bar technique to use viscoelastic bars [J]. *Int J Impact Eng*, 1994, 15(5): 669-86. DOI:10.1016/0734-743x(94)90166-i
- [25] XU P, TANG L, WANG J, et al. Mechanical behavior of PVA hydrogels over a wide strain rate range and a new two-phase visco-hyperelastic constitutive model [J]. *Mech Adv Mater Struc*: 1-14. DOI:10.1080/15376494.2024.2386398
- [26] BACON C. An experimental method for considering dispersion and attenuation in a viscoelastic Hopkinson bar [J]. *Experimental Mechanics*, 1998, 38(4): 242-9. DOI:10.1007/bf02410385
- [27] LUNDBERG B, HENCHOZ A. Analysis of elastic waves from two-point strain measurement [J]. *Experimental Mechanics*, 1977, (17-6). DOI:
- [28] 巫绪涛, 胡时胜, 张芳荣. 两点应变测量法在 SHPB 测量技术上的运用 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(4): 309. DOI:10.11883/1001-1455(2003)04-0309-4
- [29] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, (04): 368-73. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)04-0368-06
SONG L, HU S S. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2005, 25(4): 368-373. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)04-0368-06
- [30] GORHAM D A. The effect of specimen dimensions on high strain rate compression measurements of copper [J]. *Journal of Physics D*, 1991, 24(8): 1489-92. DOI: 10.1088/0022-3727/24/8/041