

端面粘接条件下的软材料动态力学行为*

周佳銮, 张泳柔, 尹梓霁, 胡玲玲

中山大学航空航天学院, 广东 深圳 518107

摘要: 工程材料在复杂应力条件下动态力学响应的实验表征非常重要。复合加载实验中, 单轴压缩测试要求试件与加载界面间保持低摩擦状态以确保应力测量精度, 而剪切/扭转加载则需要高强度界面约束以有效传递载荷。对于具有低弹性模量、高泊松比的软质材料(如硅胶、水凝胶), 这种界面约束条件的不兼容性尤为突出, 其引起的系统误差可能达到与材料本征力学响应相当的量级。基于分离式霍普金森压杆实验平台, 研究了端面粘接约束条件对硅胶动态力学行为的影响。实验结果表明: 在端面粘接条件下, 试件的表现应力显著提高, 且该增强效应随试件长径比增大而上升。为了有效消除端面粘接引入的测量偏差, 对比了 3 种修正理论。分析发现, 3 种修正方法均能在一定应变范围内消除摩擦干扰引起的伪尺寸效应, 表现出良好的修正效果。但在大直径试件的大应变阶段, 可能由于接触界面出现材料堆积, 导致摩擦条件发生显著变化, 3 种修正方法均出现了修正偏差。

关键词: 软材料; 霍普金森压杆; 动态压缩; 端面约束; 应力修正

中图分类号: O32 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)05-0035-08

Dynamic mechanical behavior of soft materials under end-bonded conditions

ZHOU Jialuan, ZHANG Yongrou, YIN Ziji, HU Lingling

School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China

Abstract: The experimental characterization of dynamic mechanical responses under complex stress states is crucial for engineering materials. In composite loading experiments, uniaxial compression testing requires minimal interfacial friction between the specimen and the loading surface to ensure the accuracy of stress measurement, while shear/torsion loading necessitates strong interfacial constraints to effectively transmit the load. For soft materials with low elastic modulus and high poisson's ratio (such as silicone rubber and hydrogels), this incompatibility of interfacial constraint conditions is particularly prominent, and the resulting systematic errors can reach a magnitude comparable to the intrinsic mechanical response of the material. Based on the split Hopkinson pressure bar experimental platform, this paper investigates the influence of end-bonded constraints on the dynamic mechanical behavior of silicone rubber. The experimental results showed that specimens under end-bonded conditions exhibit significantly enhanced apparent stress amplitudes, with this strengthening effect intensifying as the specimen's aspect ratio increases. To effectively eliminate the measurement deviation introduced by end-bonding, three correction theories were compared. The analysis found that all three correction methods could effectively eliminate the pseudo-size effect caused by friction interference within a certain strain range and showed good correction effects. However, during large-

* 收稿日期: 2025-03-10

录用日期: 2025-03-31

网络首发日期: 2025-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(12172388)

作者简介: 周佳銮(1999年生), 女; 研究方向: 软物质力学; E-mail: zhoujluan@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 胡玲玲(1980年生), 女; 研究方向: 力学超结构; E-mail: hulingl@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20250049

strain stages of specimens with greater diameters, correction deviations occur across all three linear friction correction models, likely attributable to material accumulation at contact interfaces inducing significant changes in frictional conditions.

Key words: soft materials; split Hopkinson pressure bar; dynamic compression; end constraint; stress correction

软材料(如硅橡胶、水凝胶、生物软组织等)在冲击载荷下的动态力学表征是柔性电子器件设计、生物组织仿生工程和防护材料开发等领域的核心科学问题之一。这些材料的低弹性模量(<1 MPa)、高泊松比及黏弹性特征,在动态荷载下往往表现出复杂的非线性响应和应变率敏感性,这对实验表征手段的精确性提出了更高要求(Zhao et al., 1997; Doman et al., 2006; Song et al., 2007)。

分离式霍普金森压杆(SHPB, split Hopkinson pressure bar)是表征材料在中、高应变率($10^2 \sim 10^4$ s $^{-1}$)条件下力学性能的常用实验装置,其核心原理是通过应力波传播理论实现惯性效应与材料固有应变率效应的解耦(Kolsky, 1949)。典型SHPB系统的核心部件包括子弹、入射杆和透射杆(图1)。子弹高速撞击入射杆,产生一维弹性压缩波,沿入射杆传播至试件。入射波部分通过试件传递至透

射杆,部分反射回入射杆,试件的动态变形由应力波能量加载实现。通过粘贴在入射杆和透射杆上的应变片,可获得入射波、反射波和透射波的时程信号。基于一维应力波假设与试件应力波均匀性条件,试件的动态应力 $\sigma(t)$ 、应变 $\varepsilon(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 可由以下公式计算(卢芳云等,2013):

$$\sigma(t) = \frac{A_{\text{bar}} E}{2A_{\text{specimen}}} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)],$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{l_0} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)],$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) d\tau,$$

其中 A_{bar} 和 A_{specimen} 分别是杆件和试件的截面积; E 是杆件材料的弹性模量; ε_I 、 ε_R 和 ε_T 分别是入射波应变信号、反射波应变信号和透射波应变信号; C_0 是杆中应力波速; l_0 是试件初始长度。



图1 SHPB实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the split Hopkinson pressure bar experimental system

为了确保测试结果具有足够的准确性,必须考虑各种误差或有效消除误差的来源。针对软材料的特性,SHPB实验的误差来源主要有以下3方面:1)低波阻抗导致的透射波信号微弱;2)低弹性波速导致的试件应力均匀困难;3)显著的惯性效应与界面摩擦效应。现有研究已提出多种改进方案。针对透射波信号弱,目前已有使用空心杆件代替传统实心杆件,使用聚合物杆件代替传统金属杆件,以及使用高灵敏度系数的应变片代替普通应变片等解决方案。针对试件内部应力难平衡,可通过减小试件初始长度 l_0 来缩短应力平衡所需时间。因此,软材料的SHPB实验试件,长度一般不超过2 mm(Xie et al., 2019)。针对惯性效应与界面摩擦问题,陶俊林等(2005)在Gorham(1989;1991)的研究基础上提出了修正方案,即

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} (P_1 + P_2) \left(1 - \frac{2\mu r}{3l}\right) \\ & = -\sigma + \rho_s \left[-\left(\frac{r^2}{8} + \frac{l^2}{12}\right) \ddot{\varepsilon} + \left(\frac{r^2}{16} - \frac{l^2}{12}\right) \dot{\varepsilon}^2 \right], \end{aligned} \quad (1)$$

P_1 和 P_2 是通过入射杆和透射杆信号换算得到的试件两端端部应力, μ 是试件与杆件之间的摩擦系数, r 和 l 是试件的即时半径和即时长度, ρ_s 是试件密度。式(1)表明,试件径长比越大,摩擦的影响越明显。值得注意的是,软材料试件为满足应力均匀性假设,初始径长比已经较大,且加载过程中因大变形特性该比值将持续增加,导致软材料SHPB实验的摩擦效应通常比普通硬质材料更为显著。

事实上,即使是普通硬质材料,摩擦也通常被认为是SHPB实验中最大的误差来源(卢玉斌等,2012;叶想平等,2022;张柱柱等,2024)。摩擦限制了试件的侧向运动,该限制使试件产生了一个静水

平压力,并叠加到轴向应力上,试件实际处于三轴应力状态。因此,测得的应力-应变曲线往往夸大了材料真实的本构响应(Hartley et al.,2007)。界面摩擦的复杂性在于其受材料性质、接触形貌和润滑条件等因素的影响。在实际 SHPB 实验中,对于金属等小变形材料,接触面积变化可忽略不计;但对软材料而言,动态变化的接触状态使摩擦系数难以保持恒定。目前主流的修正方法还包括 Lu et al. (2015)提出的修正方案,即

$$\sigma = \sigma_s \left[1 - \frac{2\mu\nu r_0}{3l_0} \left(1 + (1 + \nu\varepsilon_s) + (1 + \nu\varepsilon_s)^2 \right) \right], \quad (2)$$

其中 σ_s 和 ε_s 是实验中直接测得的试件应力和应变, ν 是试件的泊松比, r_0 和 l_0 是试件的初始半径和初始长度。另外, Ni et al. (2025) 提出了修正方案,即

$$\begin{cases} \sigma = \frac{F(t)}{\pi(r')^2} + \frac{\rho_s(r')^2 \ddot{a} - a\ddot{a} + 2a^2}{4(1-a)^2} - \frac{2\mu r'}{3l} \frac{F(t)}{\pi(r')^2}, \\ a(t) = 1 - \frac{r_0}{r'(t)}, \end{cases} \quad (3)$$

$F(t)$ 是实验中直接测得的试件轴向力, r_0 是试件的初始半径, 而 r' 是试件各横截面即时半径的平均值。这些修正方法在小摩擦系数条件下表现良好,但在端面粘接等强摩擦场景中的适用性仍需验证。

实际中,软材料的失效往往发生于复杂应力状态(如冲击防护的压缩-剪切耦合应力状态),这就需要对软材料实施复合荷载实验(如压缩-剪切荷载、压缩-扭转荷载)以更好地了解材料的破坏应力面。然而,动态压缩-剪切实验需要试件与杆件端面能产生较大的摩擦力(崔云霄等,2006;Hou et al.,2011;郑文等,2012),动态压缩-扭转实验甚至要求试件与杆件端面牢固粘接(Ren et al.,2024;任清非等,2024)。因此,在研究软材料在动态复合荷载下的力学行为之前,有必要先确定轴向应力修正方法在强摩擦场景中的适用性。

本文以 0 度硅胶为实验对象,研究端面粘接条件对软材料动态压缩响应的影响,并探讨端面粘接条件下 3 种摩擦修正方案的适用性,为软材料动态复合加载实验的应力修正提供前置支撑。

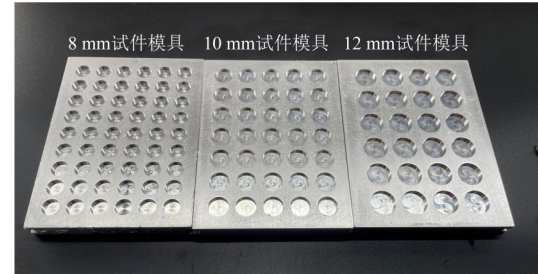
1 实验设计

1.1 试件材料

本文以购自深圳普斯顿硅胶材料有限公司的 0 度液态硅胶(A/B 胶)为研究对象,试件制备过程如下:首先按 1:1 质量比在室温环境下充分混合 A、B 组分并搅拌至均匀;随后将混合胶体置于

真空环境中持续脱气 20 min 以消除气泡;最后注入定制模具,静置固化 6 h 后脱模。圆柱形试件高度统一为 2 mm,直径设置为 8、10 和 12 mm,如图 2 所示。

(a) 试件模具



(b) 试件

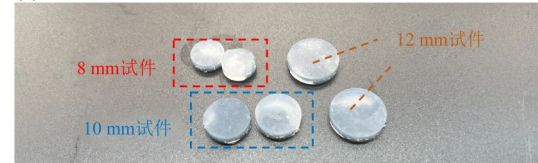


图2 模具和硅胶试件

Fig. 2 The molds and silicone specimens

1.2 实验装置

本文采用聚碳酸酯杆件的 SHPB 系统(如图 3 所示)开展硅胶动态实验,并通过准静态(0.001、0.01 s^{-1})与动态(104~343 s^{-1})压缩实验测定杆材的力学性能。测定结果如图 4 所示。准静态条件下不同应变率的应力-应变曲线在弹性阶段高度重合,动态实验中 4 种应变率的弹性段曲线同样呈现良好一致性。材料屈服应力约为 85 MPa(对应的撞击速度为 120 m/s),但本实验加载速度远低于该临界值,所以杆件全程处于弹性变形状态。尽管聚碳酸酯在准静态与动态条件下的弹性段模量存在一定差异,但该差异并不显著,同时考虑到在本文的硅胶动态实验中,杆件应变率大致在 100~350 s^{-1} 范围,故选取动态时的弹性段模量作为后续计算的杆件模量 E ,且 $E = 1870$ MPa。



图3 聚碳酸酯杆的 SHPB 实验装置

Fig. 3 The SHPB system of polycarbonate bar

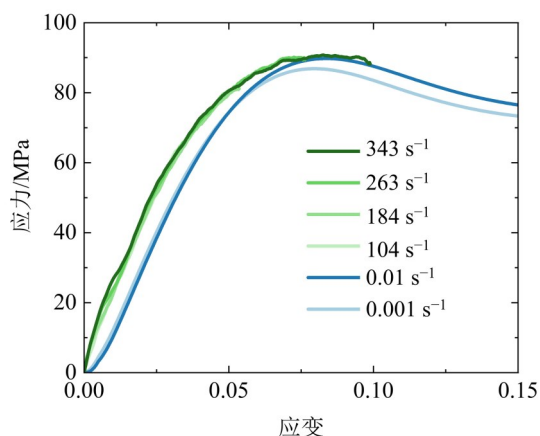


图4 SHPB杆材(聚碳酸酯)的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of SHPB bar (polycarbonate)

2 硅胶的动态压缩实验

2.1 端面润滑

端面润滑实验采用初始直径 10 mm 的硅胶试件。为降低试件与杆件端面间的摩擦,实验前对入射杆和透射杆的接触端面进行精细打磨,并均匀涂覆矿物润滑剂。由于软材料容易发生大变形,名义应力与真实应力间存在较大差异(Zhang et al., 2017),本文采用真实应力表征硅胶的响应。实验结果如图 5 所示,3 个试件的应力-应变以及应变率曲线呈现高度一致性,说明实验具有良好的可重复性,应变率大约为 $1\ 200\ \text{s}^{-1}$ 。

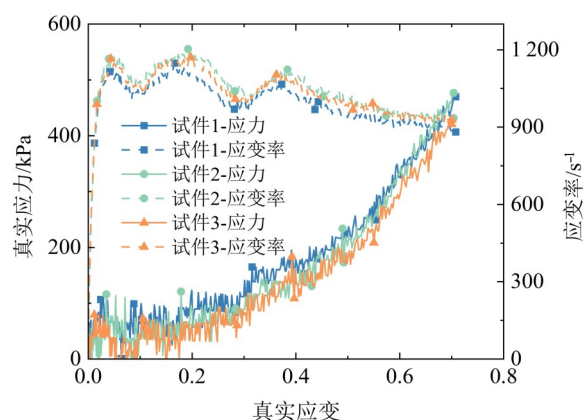


图5 端面润滑条件下硅胶的真实应力-应变以及应变率

Fig. 5 True stress-strain and strain rate of silicone specimens under end-face lubrication condition

2.2 端面粘接

实验采用初始直径为 8、10 和 12 mm 的硅胶试件。为确保实验数据的可靠性,每次实验操作前,均使用磨砂海绵对杆件端面予以打磨,以保障杆件

端面的平整度。端面处理完毕后,使用 α -氰基丙烯酸乙酯对试件进行粘接操作。操作时,需确保整个试件端面与杆件牢固粘接,同时非端面位置不涂抹胶水,防止胶水对试件力学响应产生影响。

图 6(a)~(c)分别展示了初始直径为 8、10 和 12 mm 的硅胶试件在实验中呈现的真实应力-应变以及应变率曲线。每组实验数据均展现出良好的重复性,表明实验过程具有较好的稳定性。各组实验的应变率均大致为 $1\ 200\ \text{s}^{-1}$,相对稳定的应变率使各组实验数据具有可比性。

将润滑条件和粘接条件下的各组数据分别进行平均处理,从而得到相应的平均应力-应变曲线,并绘制于图 6(d)以便进行直观的比较分析。从图 6(d)可以看出,相较于润滑条件,粘接端面这一操作使得试件的表现应力显著提升。并且,在相同的粘接条件下,试件的初始直径越大,所表现出的应力值也随之越高。这种实验现象与其他学者的实验结论相一致。例如,王晓燕等(2006)曾针对硅橡胶试件在润滑、干摩擦和粘接 3 种端面摩擦条件下的动态压缩响应进行研究,结果表明试件的表现应力随摩擦力的增加而显著增强;Ni et al.(2025)使用不同初始直径的硅胶试件在同一摩擦条件下进行实验,实验结果证实了试件表现出的应力值随初始直径增大而升高这一规律。

对于均匀连续材料而言,其本构关系在理论层面上具有尺寸无关性;在单轴压缩实验中表现出的表观尺寸效应,实际上是源于试件与实验系统接触界面的摩擦效应。当试件长度固定时,随着试件横截面积的增大,端面摩擦对试件横向变形的约束作用呈现非线性增强。摩擦约束通过试件端部形成附加应力场,导致试件内部应力分布偏离理想单轴应力状态,从而产生大直径试件表现出的强度显著上升的现象。如若修正方法合理,那么修正后的应力,应不再呈现出尺寸效应。

3 端面粘接条件下的轴向应力修正

材料的本构响应由其固有物理属性决定,具有客观性,与外部荷载作用及试件几何尺寸无关。然而,图 6(d)的实验数据显示,硅胶试件的表现应力呈现出显著的端面摩擦条件依赖性和尺寸效应,这是因为试件受到了不同的摩擦力作用,使试件实际的应力状态与预期的单轴应力并不相同。为有效消除端面摩擦对材料本构参数测试的干扰,学界相继提出了数种修正方法,如前文所提及的陶修正方法、Lu

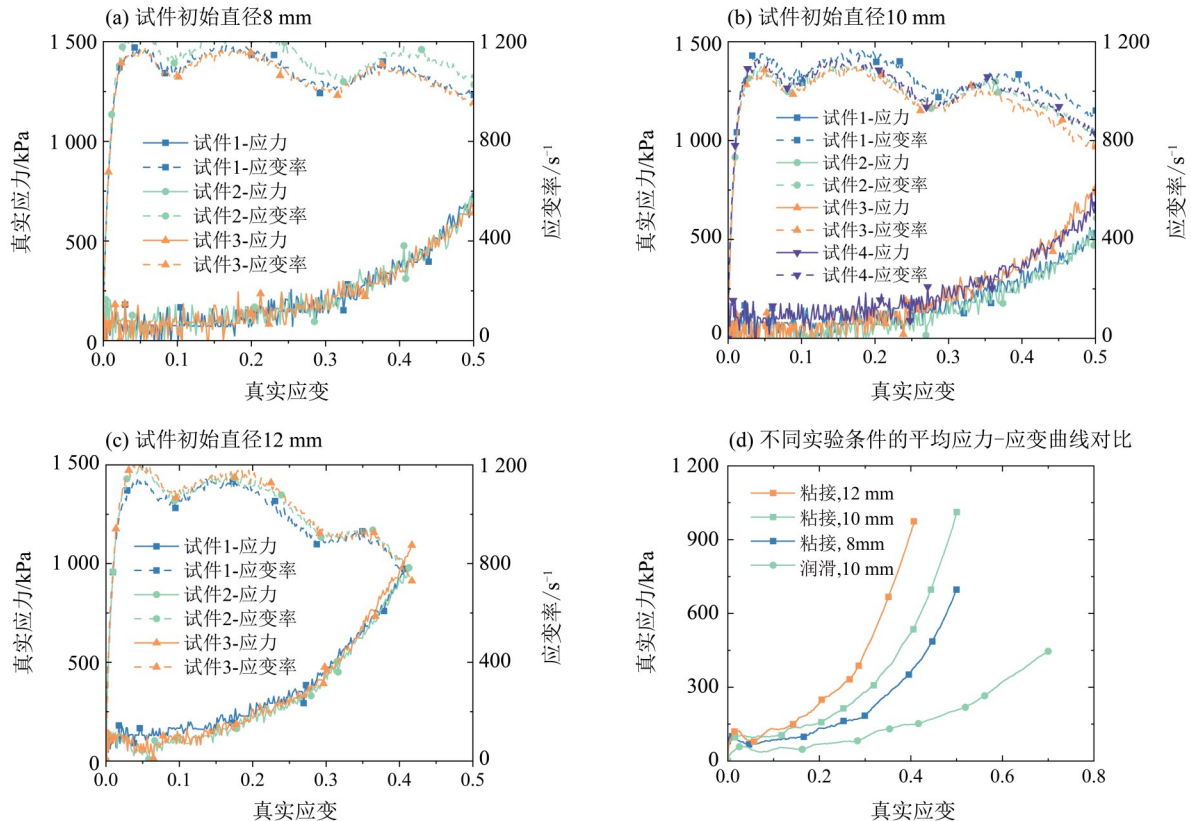


图6 端面粘接条件下硅胶的表现真实应力-应变以及应变率

Fig. 6 The apparent true stress-strain and strain rate of silicone under end-face bonding conditions

修正方法和N-T修正方法。下面将应用上述修正方法对粘接条件下的应力-应变曲线进行修正,通过对比修正后的曲线与润滑条件下的实验结果,验证各方法在强摩擦约束条件下的适用性。

需特别指出,虽然在实际实验中,润滑处理无法实现完全零摩擦的理想状态,但与粘接条件相比较而言,润滑后的端面摩擦系数可以视为一个相对非常小的值,因而在理论分析中可合理假设其趋近于零摩擦状态。

3.1 陶修正方法

陶修正方法如公式(1)所示,其中的参数 μ 表征端面摩擦约束的强度系数。为了确定其在粘接条件下的具体数值,使用初始直径为10 mm的试件在润滑条件和粘接条件下的实验数据进行拟合。拟合得到的最优摩擦参数为0.230 4。修正后的粘接实验曲线与润滑实验曲线,除末端外,大致上呈现高度一致性,其对比结果如图7(a)所示。需要说明的是,公式(1)中的 r 是试件的即时半径。为计算方便,本文简单地认为硅胶不可压缩,从而推导出 r 随应变的变化。

将标定后的摩擦参数 $\mu = 0.230 4$ 应用于不同直径试件的粘接实验数据修正,结果如图7(b)所

示。修正后,3组试件($d_0 = 8、10、12$ mm)的应力-应变曲线在大约0.38的应变前基本重合,有效消除了摩擦引起的伪尺寸效应。当应变超过0.38时,曲线呈现直径依赖的异常分离现象:直径越大,曲线下降拐点出现越早。出现这种现象可能是因为:大应变时,接触界面出现材料堆积,引发附加的界面滑移效应,也即界面的摩擦条件出现显著变化;且直径较大的试件,更易发生材料堆积。这种非线性接触行为已超出线性摩擦修正模型的适用范围。

3.2 Lu修正方法

Lu et al.提出的修正方法如公式(2)所示。为了确定方程中摩擦相关参数,同样采用初值直径为10 mm的试件在润滑条件和粘接条件下的实验数据进行拟合。当 μ 为0.240 4时,修正后的粘接实验曲线与润滑曲线达到最优匹配,其对比结果如图8(a)所示。从图中可以看出,除了曲线末端存在差异外,两条曲线在整体趋势上表现出高度的一致性,这表明Lu修正方法在很大程度上成功地消除了摩擦对实验结果的影响。然而,与陶修正方法不同的是,在曲线末端,陶方法的曲线呈现出下降趋势,其数值低于润滑实验的测量值,而Lu修正方法的曲线则呈现出上升趋势,数值高于润滑实验的测量值。

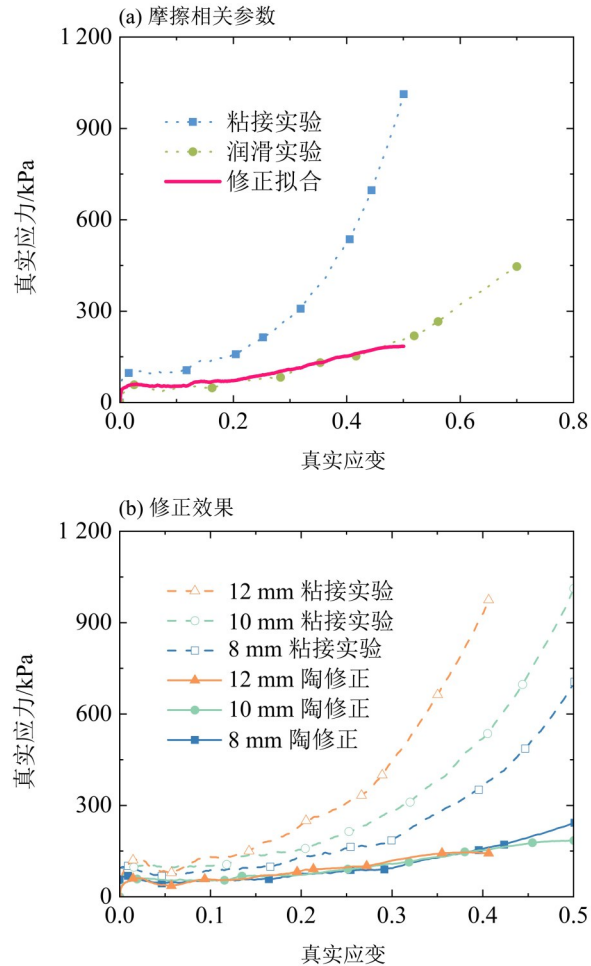


图7 陶修正方法的摩擦相关参数和修正效果
Fig. 7 Friction-related parameter and correction effect of the Tao correction method

将此摩擦参数 $\mu = 0.2404$ 应用于另外两组不同直径(8和12 mm)试件粘接实验的修正,结果如图8(b)所示。在应变约为0.35前,3组经过修正的数据曲线呈现出良好的重合性,证明了Lu修正方法在这一应变范围内能够有效地消除因摩擦而产生的伪应变效应。当应变超过0.35后,12 mm试件的曲线开始与另外两条曲线出现明显的偏差;在应变超过0.45后,10 mm试件的曲线也逐渐与8 mm试件的曲线分离,这表明修正方法在大应变时修正能力有所下降。这种现象与陶修正方法存在相似性,同样可能是因为在在大应变条件下,材料在界面处容易发生堆积,显著改变了摩擦条件所导致。

3.3 N-T修正方法

N-T修正方法如公式(3)所示。同样,采用初值直径为10 mm的试件在润滑和粘接两种条件下的数据进行拟合,发现 μ 取0.2382时拟合效果最佳,如图9(a)所示。需要说明的是,公式(3)中的 r' 是试

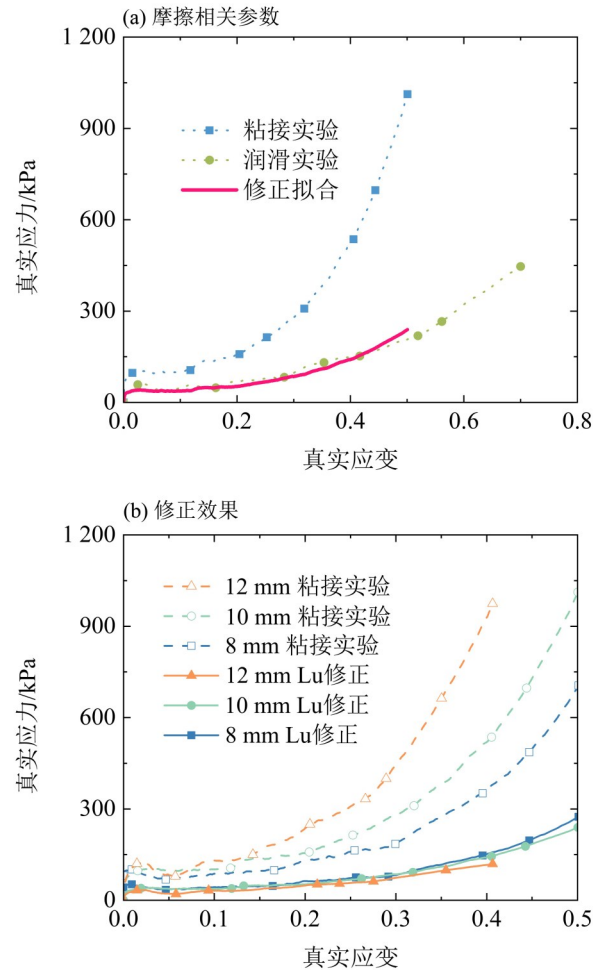


图8 Lu修正方法的摩擦相关参数和修正效果
Fig. 8 Friction-related parameter and correction effect of the Lu correction method

件的即时平均半径,理论上需要结合高速摄影图像来计算,但为简化计算过程,简单地认为硅胶不可压缩,从而直接推导出 r' 随应变的变化。

将此摩擦参数 $\mu = 0.2382$ 应用到初始直径为8和12 mm的试件实验数据的修正,结果如图9(b)所示。在应变小于0.35时,不同初值直径试件的修正曲线呈现高度一致性,证明了N-T修正方法在这一应变范围内能够有效消除摩擦对实验数据的影响。然而,当应变超过0.35后,10和12 mm试件的修正应力出现下降趋势,且直径越大,应力下降越显著。这现象与陶和Lu修正方法的结果类似,同样可能是大应变时界面摩擦条件发生了显著变化所致。

3.4 3种修正方法的对比讨论

陶、Lu和N-T3种修正方法得到的摩擦相关参数 μ 分别为0.2304、0.2404和0.2382,差异在4.3%以内,其中陶和N-T方法的参数偏差仅为0.92%。从修正效果上看,在小于0.35的应变范围内,3种方

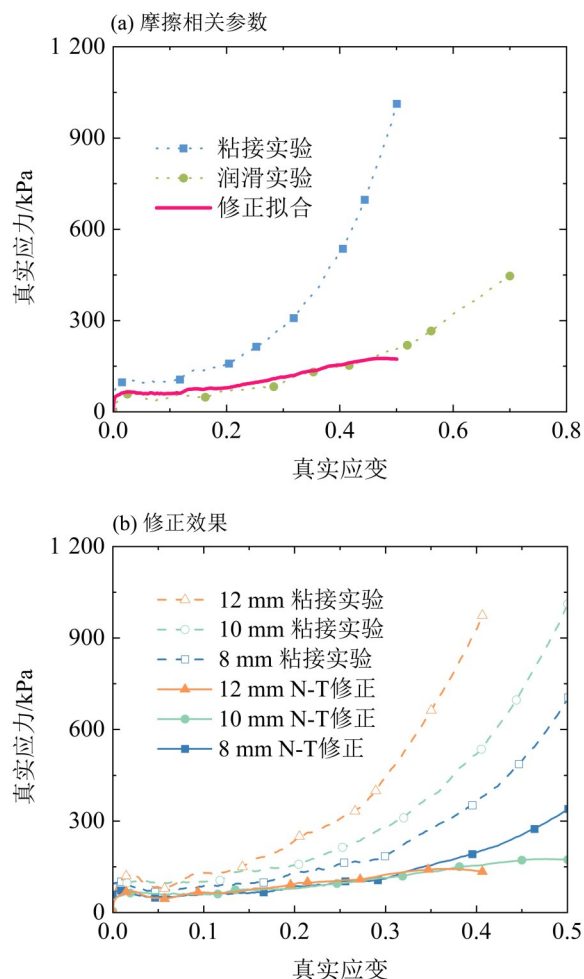


图9 N-T修正方法的摩擦相关参数和修正效果

Fig. 9 Friction-related parameter and correction effect of the N-T correction method

法均能有效消除摩擦导致的伪尺寸效应,使不同直径试件的修正应力基本重合。然而,当应变超过0.35或0.38后,均出现了与尺寸相关的偏差,且试件尺寸越大,偏差出现越早。这种受限的修正能量可能均源于3种方法共有的线性摩擦假设局限。在这种局限下,更容易出现非线性摩擦条件的大尺寸试件显然更可能出现修正偏差,因此在选择软材料试件时,最好将试件尺寸控制在10 mm以下。

在本文的研究中,对3种不同的修正方法进行

了验证,发现它们的修正效果在所研究的应变率和试件尺寸范围内并没有显著的差异。需要指出的是,本文的所有实验均在加载应变率约为 $1\ 200\ \text{s}^{-1}$ 条件下进行,并未探讨惯性效应,同时假设应变率对摩擦相关参数 μ 不存在影响。事实上,在这3种修正方法中,陶和N-T方法在构建时已经考虑了惯性效应,修正式中均有应变率相关项,这意味着它们在理论上具备同时修正摩擦效应与惯性效应的能力。为了更全面地验证这些修正方法的适用范围,将在未来开展更多不同应变率条件下的实验。

4 结论

为了给将来的软材料动态压缩-剪切或压缩-扭转实验的轴向应力修正提供前置支撑,针对0度硅胶材料,分别在润滑条件和粘接条件下进行了动态实验研究。实验结果表明,在粘接条件下,由于摩擦效应的影响,测得的表现轴向应力显著高于润滑条件下的轴向应力;且在粘接条件下,不同直径试件的应力-应变曲线表现出明显的分散性,即存在所谓的伪尺寸效应。

基于上述实验结果,分别采用了陶、Lu和N-T 3种修正方法对粘接条件下的实验数据进行了修正处理。通过对比分析,发现3种方法得到的摩擦相关参数非常接近。进一步地,在应变不超过0.35的范围内,这3种修正方法均能有效地消除因摩擦而导致的伪尺寸效应,使得不同直径试件的应力-应变曲线在这一应变范围内呈现出良好的重合性,准确反映了材料的本构响应。然而,当应变超过0.35后,3种修正方法的修正结果开始出现偏差,且试件尺寸越大,修正后的曲线偏差越显著。这种现象可能是由于在大变形条件下材料的接触条件发生了显著变化,传统的线性摩擦修正模型不再适用于描述这种复杂的非线性接触行为所导致的。因此,为了确保实验结果的准确性和可靠性,建议在对软材料进行动态实验时,优先选取较小的试件初始直径,以减少摩擦效应的影响。

参考文献:

- 崔云霄,卢芳云,林玉亮,等,2006.一种新的高应变率复合压缩实验技术[J].实验力学,21(5):584-590.
 卢芳云,陈荣,林玉亮,等,2013.霍普金森杆实验技术[M].北京:科学出版社:30-32.
 卢玉斌,宋丹路,李庆明,等,2012.分离式霍普金森压杆试验

- 中工程材料端面摩擦模型的确定[J].振动与冲击,31(3):18-22.
 任清非,张泳柔,胡玲玲,等,2024.基于超材料的动态压剪复合加载实验新技术[J].爆炸与冲击,44(10):3-20.
 陶俊林,陈裕泽,田常津,等,2005.SHPB系统圆柱形试件

- 的惯性效应分析[J]. 固体力学学报, 26(1):107-110.
- 王晓燕, 卢芳云, 林玉亮, 2006. SHPB 实验中端面摩擦效应研究[J]. 爆炸与冲击, 26(2):134-139.
- 叶想平, 南小龙, 段志伟, 等, 2022. 样品粗糙度对材料 SHPB 动态压缩性能的影响[J]. 爆炸与冲击, 42(1):53-59.
- 张柱柱, 毛海涛, 周圣林, 等, 2024. 分离式霍普金森压杆试验中金属材料端面摩擦效应误差分析[J]. 机械工程材料, 48(2):89-96.
- 郑文, 徐松林, 蔡超, 等, 2012. 基于 Hopkinson 压杆的动态压剪复合加载实验研究[J]. 力学学报, 44(1):124-131.
- DOMAN D A, CRONIN D S, SALISBURY C P, 2006. Characterization of polyurethane rubber at high deformation rates[J]. *Exp Mech*, 46(3):367-376.
- GORHAM D A, 1989. Specimen inertia in high strain-rate compression [J]. *J Phys D Appl Phys*, 22(12):1888-1893.
- GORHAM D A, 1991. The effect of specimen dimensions on high strain rate compression measurements of copper[J]. *J Phys D Appl Phys*, 24(8):1489-1492.
- HARTLEY R S, CLOETE T J, NURICK G N, 2007. An experimental assessment of friction effects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test [J]. *Int J Impact Eng*, 34(10):1705-1728.
- HOU B, ONO A, ABDENNADHER S, et al, 2011. Impact behavior of honeycombs under combined shear-compression. Part I: Experiments[J]. *Int J Solids Struct*, 48(5):687-697.
- KOLSKY H, 1949. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. *Proc Phys Soc B*, 62(11):676-700.
- LU F, LIN Y, WANG X, et al, 2015. A theoretical analysis about the influence of interfacial friction in SHPB tests [J]. *Int J Impact Eng*, 79:95-101.
- NI P, TANG L, XU P, et al, 2025. Correction method and verification of radial inertia and friction effects under a unified deformation framework in SHPB experiments on soft materials[J]. *Int J Impact Eng*, 195:105129.
- REN Q, ZHANG Y, HU L, et al, 2024. Achieving synchronous compression-shear loading on SHPB by utilizing mechanical metamaterial [J]. *Int J Impact Eng*, 186:104888.
- SONG B, CHEN W, GE Y, et al, 2007. Dynamic and quasi-static compressive response of porcine muscle [J]. *J Biomech*, 40(13):2999-3005.
- XIE B, XU P, TANG L, et al, 2019. Dynamic mechanical properties of polyvinyl alcohol hydrogels measured by double-striker electromagnetic driving SHPB system [J]. *Int J Appl Mech*, 11(2):1950018.
- ZHANG Y R, TANG L Q, XIE B X, et al, 2017. A variable mass meso-model for the mechanical and water-expelled behaviors of PVA hydrogel in compression [J]. *Int J Appl Mech*, 9(3):1750044.
- ZHAO H, GARY G, KLEPACZKO J R, 1997. On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar [J]. *Int J Impact Eng*, 19(4):319-330.

(责任编辑 王海蓉)