

文章编号: 1001-4888(2024)02-0208-15

冲击加载下材料应力应变曲线 振荡现象的研究综述*

李泊立, 王瑞丰, 陈龙洋, 郭伟国

(西北工业大学 航空学院, 陕西西安 710072)

摘要: 在冲击加载下获得的材料应力应变曲线往往具有显著的振荡, 长期以来由于很难判断振荡的真伪, 即不确定振荡是试样材料的本征特性还是纯粹的机械加载等带来的影响, 故曲线的振荡往往没有从真实应力应变曲线中直接消除。但这种振荡的存在掩盖了真实的材料响应, 导致很难准确确定材料的动态屈服强度, 也影响了材料动态本构关系的建立及本构模型参数的准确性, 这对重大装备工程在冲击载荷下的优化设计及安全可靠带来不利影响。针对这个长期困扰科研和工程技术人员的普遍性问题, 本文综述了冲击加载下材料应力应变曲线振荡现象的研究进展, 首先从加载系统设计、应力波传播、试样变形分布等方面分析了动态测试曲线中出现振荡的原因; 其次依据振荡成因重点论述了抑制或消除振荡现象的方法; 最后总结了现阶段研究的突出问题, 并对未来发展方向提出一些建议。

关键词: 冲击加载; 动态测试; 应力应变曲线; 振荡

中图分类号: O347.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-087

0 引言

在爆炸与冲击领域, 装备与结构的高性能和高可靠性是研究和设计人员长期追求的目标, 而实现目标的前提是装备与结构用材料性能的准确测试和表征。具体来说, 就是首先需要获得结构材料在复杂环境下的应力应变曲线, 以及预测力学响应曲线的本构关系和失效判据。

在中、高应变率加载下, 材料动态力学响应的测试通常基于冲击能量或应力波加载原理, 试样的冲击加载在数百微秒内完成, 与常规的准静态材料试验机相比, 这样的载荷或位移瞬态加载是开环的, 即试样的加载很难按照预想的加载历程闭环控制进行。因此, 对于像单轴高应变率加载, 特别要保证试样的动态变形均匀性和一维性。

材料载荷时间历程或应力应变曲线往往含有振荡, 这种振荡本身是冲击领域中普遍存在的问题, 且长期以来一直困扰研究者和工程技术人员。从图 1 可以看出, 中、高应变率下测试的误差相比准静态误差更大^[1], 这说明中、高应变率下的测试本身具有更多的复杂因素。

图 2(a)、(b)给出了金属钨^[2]和不锈钢^[3]的 Hopkinson 杆压缩试验结果, 这些真实应力应变曲线上的振荡现象非常明显, 直接影响了材料动态屈服强度的确定, 且这种振荡的幅度一般随材料屈服强度增高而增大。图 2(c)展示了利用伺服液压高速拉伸试验机测试不同应变率下的冷轧钢的试验结果^[4], 可以看出随着应变率上升到中、高应变率范围, 振荡会迅速强化, 并“吞没”真实响应。图 2(d)是采用

* 收稿日期: 2023-04-21; 修回日期: 2023-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12372365, 12072287, 11872051); 西北工业大学博士论文创新基金项目 (CX2021043)

通信作者: 郭伟国 (1960-), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 冲击动力学。Email: weiguo@nwpu.edu.cn

VHS8800 高恒定应变率试验系统对低密度轻质泡沫混凝土进行动态压缩测试的结果^[5], 由图可见, 相较于传统准静态试验机测试结果, 中应变率 68s^{-1} 以上的测试波形中的振荡现象非常严重。以上振荡现象中也有可能包含着动态加载或测试引起的振荡, 这给数据处理和判断真实的响应信息带来极大困扰。

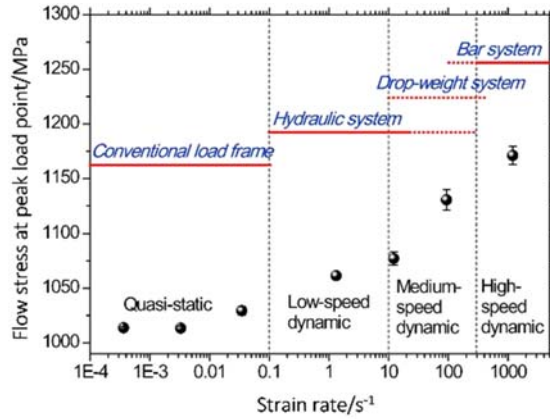


图 1 DP780 钢在不同应变率下的流动应力^[1]

Fig. 1 The flow stress of a DP780 steel at different strain rate^[1]

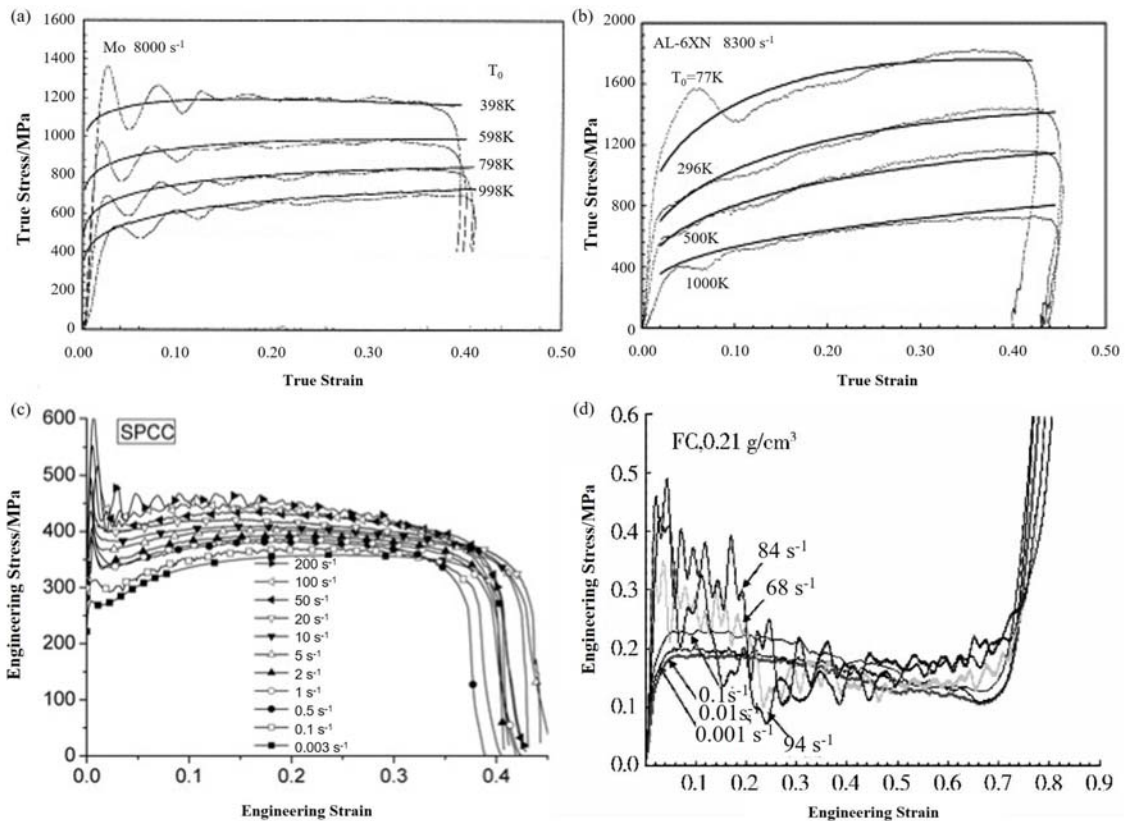


图 2 不同材料在中、高应变率力学测试中普遍出现的振荡现象：

(a) 金属钼^[2]; (b) 不锈钢^[3]; (c) 冷轧钢^[4]; (d) 泡沫混凝土^[5]

Fig. 2 Oscillation phenomenon in mechanical tests of medium and high strain rates of different materials:

(a) molybdenum^[2]; (b) stainless steel^[3]; (c) cold-rolled steel^[4]; (d) foam concrete^[5]

中、高应变率下应力应变曲线中的振荡信号通常会掩盖材料真实的变形响应, 并降低测试精度。例如动态应力应变曲线中屈服点的确定和提取 (尽管国标 GB/T 34108—2017^[6] 和 GB/T 7314—2017^[7] 明确定义了屈服强度的测定方法, 但动态曲线剧烈的振荡可能掩盖上/下屈服强度的判断^[4,8-12]), 典型

的振荡曲线如图 3(a) 所示^[9]。再如振荡信号会对应变硬化率随塑性应变演化规律的分析带来干扰^[13-15], 典型曲线如图 3(b) 所示。除此之外, 振荡信号会对可能存在的应变时效现象造成干扰, 如图 3(c) 中准静态下的 PLC (Portevin-Le Chatelier) 锯齿塑性流动现象^[16-19], 甚至导致本构关系及失效判据无法准确建立, 影响对工程及装备的安全性设计和评估等。但是应变硬化行为、PLC 动态应变时效等反常规现象属于材料的本征特性, 因此不能通过滤波等方法直接消除振荡, 否则曲线会遗失一些重要的细节特征。

综上, 本文将对冲击载荷下材料应力应变曲线振荡问题的研究进展进行系统的综述。文章主要分为 3 个部分: 一是从加载系统设计、应力波传播、试样变形分布等方面分析动态测试曲线中出现振荡的原因; 二是依据振荡成因重点论述抑制或消除振荡现象的方法; 三是总结现阶段研究的突出问题, 并对未来发展方向提出一些建议。

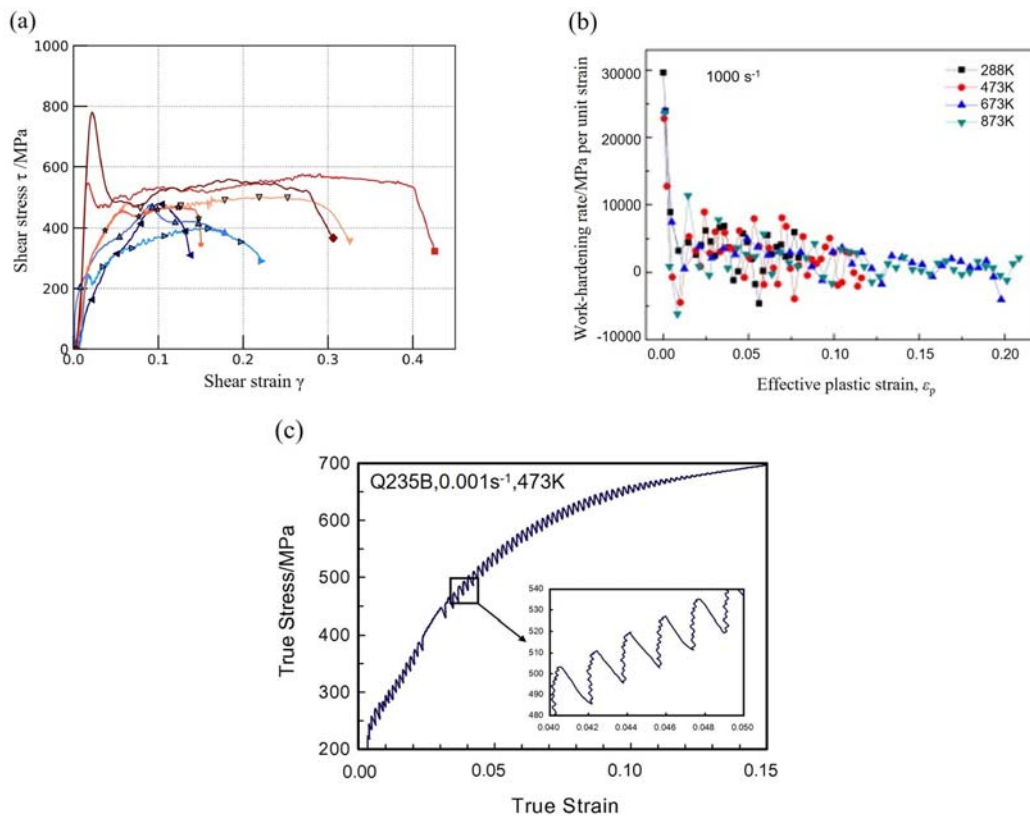


图 3 振荡信号可能引起的力学性能分析误差: (a) 屈服强度判断^[9];

(b) 应变硬化率演化^[13]; (c) PLC 动态应变时效现象^[16]

Fig. 3 Errors in the analysis of mechanical properties that may be caused by oscillating signals:

(a) judgment of yield strength^[9]; (b) strain hardening rate evolution^[13]; (c) PLC dynamic strain aging phenomenon^[16]

1 振荡现象产生原因研究现状

实际上, 中、高应变率加载下材料应力应变曲线的振荡现象早已引起国内外学者的重视, 并对这类振荡的现象开展了大量研究。根据已有研究, 本文将振荡现象的成因归纳总结为以下 3 点: (1) 系统振铃效应 (Ringing effect); (2) 应力波弥散效应; (3) 试样的惯性效应。

1.1 系统振铃效应引起的振荡

系统振铃效应导致的振荡现象在动态加载, 尤其是中应变率加载过程中非常常见。目前, 中应变率的测试设备 (例如落重试验系统) 测量载荷时大多基于静力平衡假设和有限弹性变形假设^[20-21], 但随着应变率增加, 准静态假设不再成立, 此时由于惯性 (快速加载的瞬间动态效应) 和应力波传播, 使载荷不均匀地传递到试样、夹具和载荷传感器中, 导致载荷数据出现剧烈的振荡现象^[1,4]。系统振铃效应引

起的振荡如图 4 所示,这种振铃现象导致的振荡使得测试结果偏离试样实际承受的载荷,获得的结果存在较大误差^[4,22-24]。有研究者将测试系统简化为质量-弹簧-阻尼器模型来解释系统振铃效应的机理^[1,25-28],获得一定认可,其模型如图 5 所示。根据牛顿第二定律,整个系统的运动方程为^[1]

$$F(t) = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) \tag{1}$$

式中: $F(t)$ 为试样所加载荷; m 为质量; $x(t)$ 为弹簧的变形量; t 为时间。这是典型的二阶系统,其传递函数可以写成

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{K}{(s/\omega_0)^2 + 2\zeta(s/\omega_0) + 1} \tag{2}$$

式中: $X(s)$ 和 $F(s)$ 分别为 $x(t)$ 和 $F(t)$ 的拉普拉斯变换; $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, 为系统的无阻尼固有频率; $\zeta = c/(2\sqrt{km})$, 为阻尼系数; $K=1/k$, 为静态灵敏度。

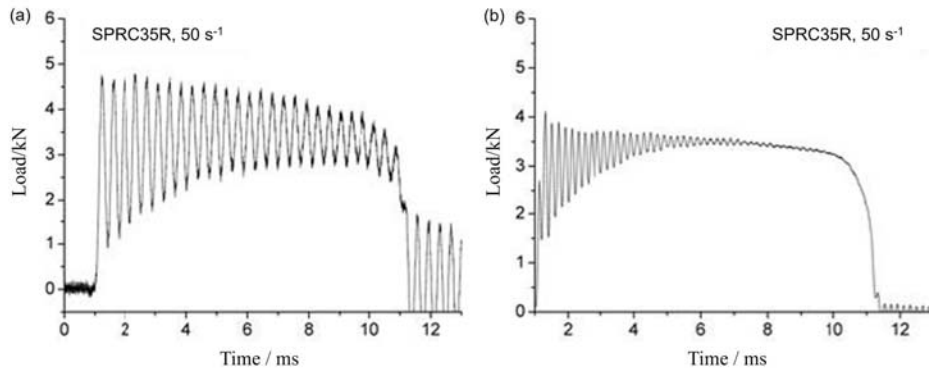


图 4 系统振铃效应引起的测试数据振荡^[4]

Fig. 4 Oscillation of test data caused by system ringing^[4]

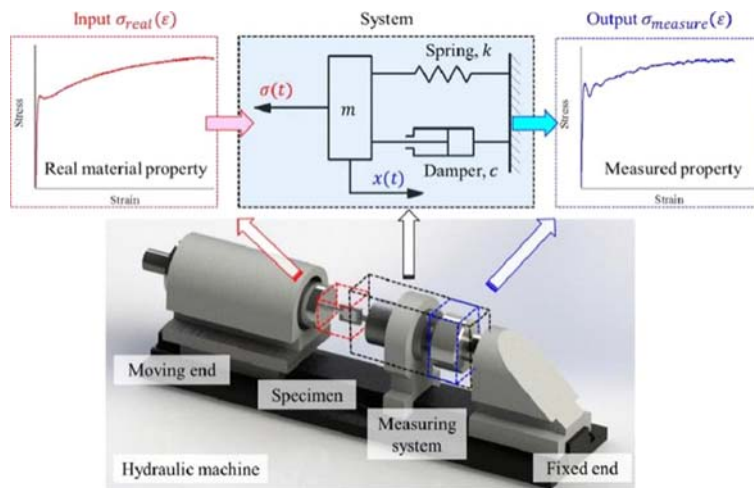


图 5 系统振铃现象的产生机理^[28]

Fig. 5 The mechanism of system ringing phenomenon^[28]

XIA 等^[1]通过有限元仿真研究了各设计变量对系统振铃效应的影响,结果表明,系统间相互配合、加载速度和载荷传感器材质及所处的应变状态是影响振铃效应的重要因素。QIN 等^[28]发现材料的应力应变关系,尤其是屈服点也会影响系统的振铃效应。

此外,更高应变率的加载设备中也发现存在系统振铃效应,从而影响测试数据的精度。SONG 等^[29]认为分离式 Hopkinson 杆试验需要很高的精度,加载杆优良的对中性对取得准确的数据至关重要。KARIEM 等^[30]全面研究了 Hopkinson 加载杆各种不对中情况对入射波信号的影响,如图 6(a)所示,并基于研究结果提出加载杆不对中引起的弯曲振动是引起信号失真并产生不可靠数据的主要原因,

图 6(b)为不对中情况下获得的典型波形。JIN 等^[31]用其开发的电磁 Hopkinson 杆系统进行高应变率试验时,发现除加载杆对中外的其他测试系统间的不当配合也会引起振铃效应,进而影响入射脉冲的形状和幅值。

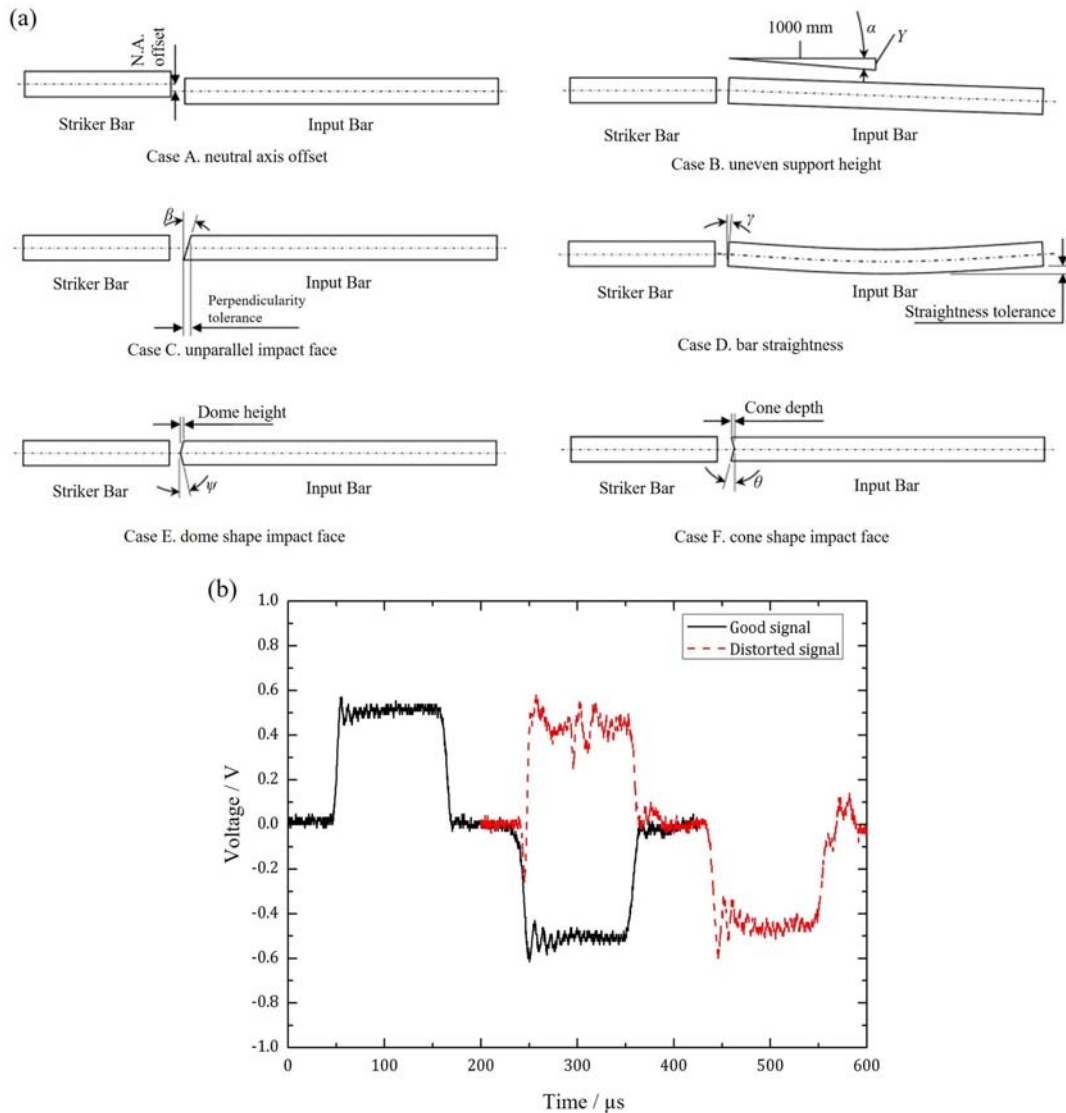


图 6 (a) Hopkinson 加载杆中存在的不对中情况^[30]; (b) 在不对中情况下获得的应力波信号^[30]

Fig. 6 (a) cases of misalignment in Hopkinson bars^[30]; (b) stress wave signals obtained under misalignment conditions^[30]

1.2 应力波弥散效应引起的振荡

应力波弥散导致的测试数据大幅振荡主要存在于高应变率下 Hopkinson 杆加载系统中。分离式 Hopkinson 杆试验技术基于一维平面应力波假设,即应力波在波导杆中传播时,截面上的轴向应力沿半径均匀分布^[21,32-33],但实际上当应力波沿波导杆传播时,由于泊松效应,杆内存在轴向应变的同时,在原来平截面上具有非均匀分布的横向质点位移、速度和加速度,也就必然产生横向变形使截面不再满足一维平面应力波假设^[21,32-34]。这种横向惯性效应使杆中的纵波产生几何弥散,从而应力波在传播过程中出现大幅振荡,且随着传播距离增加,弥散效应更加显著,即使在细长杆中几何弥散也客观存在^[35],如图 7 所示。

从分离式 Hopkinson 压杆试验的早期开始,人们就认识到横向惯性的影响,并针对弹性杆中应力波的传播特性开展了深入的理论研究工作。加载杆中的质点在任何激励下的运动都受运动方程控制,

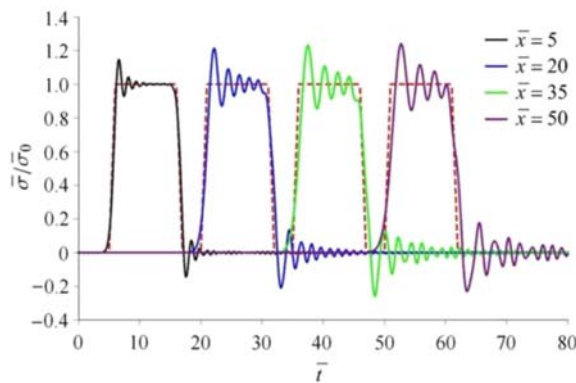


图 7 传播距离对脉冲波形的影响^[35]

Fig. 7 Effect of propagation distance on pulse waveforms^[35]

POCHHAMMER^[36]和CHREE^[37]从三维弹性动力学方程出发,将位移矢量进行 Holmholtz 分解,分别求得了正弦应力波在无限长弹性圆杆中传播的精确解,求解方程被称为非线性 Pochhammer-Chree 方程,表示为

$$u_{tt} - u_{ttxx} - u_{xx} - \frac{1}{\rho} (u^p)_{xx} = 0 \tag{3}$$

式中: u 为纵位移; t 为时间; x 为质点的初始点; u_{tt} 表示对 t 的二阶导数; u_{xx} 表示对 x 的二阶导数; u_{ttxx} 表示对 x 和 t 的混合四阶导数; $p=3$ 或 5 时,表示质点的 2 种不同结构。

Pochhammer-Chree 方程表明应力波传播速度随着波长的降低而减小。在 Hopkinson 杆试验中,加载杆中无法激发出纯正弦脉冲,撞击产生的应力波具有一定的频谱分布,且每一个频率分量都具有不同的传播速度。由于高频波(短波)的传播速度低于低频波(长波),造成初始理想应力波在传播过程中不断散开,形成波的弥散现象^[32-34],因此试验中应变片测到的脉冲波形并不是试样实际承受的应力波形,通过公式计算材料的应力应变曲线时便出现了振荡。为了得到更精确的试验数据,必须减少应力波的弥散效应。

事实上,Pochhammer-Chree 方程仅适用于无限长的圆柱杆,因此人们得到的大多是半无限长杆的端部受谐波作用时的解析解。但在实际应用中,激励信号往往具有强间断加载特征^[35],RAYLEIGH^[38]认识到杆内横向膨胀和收缩的重要性,并假设横向位移量在横截面上线性分布,计算了横向运动导致的附加动能及其对纵向振动频率的影响。LOVE^[39]基于 Rayleigh 理论进一步推导出考虑横向惯性效应的波动控制方程,形成了 Rayleigh-Love 理论。Rayleigh-Love 理论大幅提高了频谱预测的准确性,其波动控制方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu^2 \kappa^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} \tag{4}$$

式中: ν 为泊松比; κ 为横截面积对杆轴的回转半径除以质量。

DAVIES^[40]基于 Rayleigh-Love 理论,运用 Laplace 积分变换的方法,给出阶跃应力脉冲在有限长杆传播的解析解。NAITOH 等^[41]运用 DAVIES 的方法,引入一个指数因子对边界阶跃信号进行调制,研究了上升沿时间对纵波几何弥散的影响。杨洪升等^[35]运用 Rayleigh-Love 理论表征应力波弥散效应,给出了梯形入射脉冲在杆中产生的应力 $\hat{\sigma}(\bar{x}, \bar{t})/\bar{\sigma}_0$ 的解析解:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}(\bar{x}, \bar{t})/\bar{\sigma}_0 = & \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{t}) H(\bar{t}) - \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{t} - \bar{t}_r) H(\bar{t} - \bar{t}_r) \\ & - \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{t} - \bar{T} + \bar{t}_r) H(\bar{t} - \bar{T} + \bar{t}_r) + \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{t} - \bar{T}) H(\bar{t} - \bar{T}) \end{aligned} \tag{5}$$

式中: \bar{T} 为总脉宽; \bar{t}_r 为上升沿和下降沿时间; $\bar{\sigma}_0$ 为平台应力。杨洪升等^[35]还将波形振荡的幅值(式(6))作为衡量弥散效应的指标之一,定量研究了传播距离、泊松比、梯形脉冲上升时间等参数对几何弥散效应的影响。

$$\frac{\Delta \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0} = \frac{\bar{\sigma}_{\max} - \bar{\sigma}_0}{\bar{\sigma}_0} \tag{6}$$

式中 $\bar{\sigma}_{\max}$ 为弥散波的峰值应力。

综上所述,尽管研究者从能量或应力分析的角度出发,给出了惯性应力的径向分布规律,但很难从理论上获得惯性附加应力的大小。

1.3 试样的惯性效应引起的振荡

尽管有学者通过物理手段抑制了加载杆弥散效应导致的入射波形振荡^[42],从图 8(a)可以看出,入射杆上脉冲信号的振荡很小,但入射波对试样进行加载后,传递至透射杆的透射波形仍具有明显的振荡,甚至远高于入射杆脉冲,这充分说明试样本身的属性也会导致应力应变曲线的振荡。从图 8(b)和图 8(c)对比中可以发现^[43],在准静态加载条件下施加在试样上的位移或载荷是连续光滑的,且试样的应力应变响应也是连续光滑的(无振荡),而在高应变率加载条件下本应连续光滑的应力应变曲线却出现剧烈振荡。这说明应力应变曲线的振荡并不是材料黏性效应引起的非线性本构弥散^[34],而是试样的惯性效应造成的振荡。

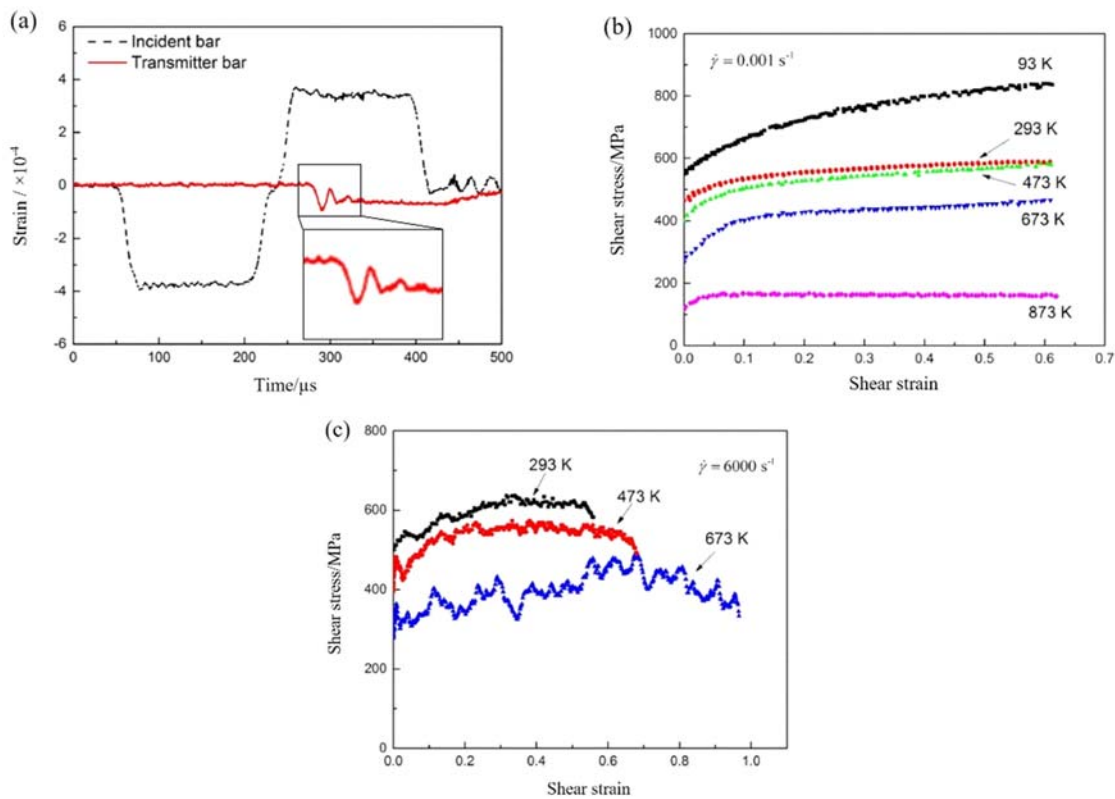


图 8 (a) Hopkinson 压杆试验中滤波后实测的代表性波形^[42];

(b) 准静态下金属材料的应力应变曲线; (c) 高应变率下金属材料的应力应变曲线^[43]

Fig. 8 (a) representative waveforms measured after filtering in the Hopkinson pressure bar experiment^[42];

(b) stress strain curves of metallic materials under quasi-static;

(c) stress strain curves of metallic materials at high strain rates^[43]

在 Hopkinson 杆试验中,试样由于质点运动所引起的惯性效应^[44-45](包括纵向惯性效应和横向惯性效应)将会导致试样上产生额外的附加应力,而这种附加应力并不是材料自身的力学特性。此外,试样中的纵向惯性也会导致试样沿加载方向出现应力梯度^[45]。尽管纵向惯性引起的纵向应力差在低应变率下可以忽略^[46-47],但在高应变率 Hopkinson 杆试验中,高速撞击将导致明显的应力波传播效应(纵向惯性效应),此时试样中应力均匀性的结论不再成立,因而这时的试样也不可能处于实际的应力均匀状态,从而导致试样产生严重的不均匀变形。如此来看,试样中任何局部的变形都将不再代表试样的整体变形,在试样应力不均匀的状态下,应力应变曲线结果将产生显著的误差。

2 振荡现象抑制或消除方法研究现状

长期以来, 科研人员和工程技术人员采取了不同的策略和方法试图抑制或削弱曲线中的振荡影响, 进而提高中、高应变率动态试验中获得数据的准确性。

2.1 信号处理方法

通过信号处理方法对得到的测试数据进行平滑或滤波处理^[8, 33, 48-52]可以有效减少振荡, 结果如图 9(a)所示。ZHU 等^[50]使用一个截止频率为 2kHz 的低通滤波器有效地消除了由于设备和试样在其固有频率处振荡而产生的噪声信号。KIMM 等^[51]应用分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)测试 42CrMo4 低合金钢动态力学性能时, 通过 SAVITZKY-GOLAY 滤波器采用多项式回归方法对采集到的应变信号进行滤波处理, 以减少透射波弥散引起的振荡。EBEK 等^[52]通过分离式 Hopkinson 杆测试并分析硬质木材弹塑性损伤行为时, 采用数据平均法对杆件上的应变信号进行预处理以消除波形的剧烈振荡。然而卢芳云团队^[33]研究发现, 滤波手段虽然可以有效地消除应力波信号的振荡, 但不恰当的滤波手段可能将有效信号和噪声信号一起消除, 造成更大的误差, 结果如图 9(b)所示。

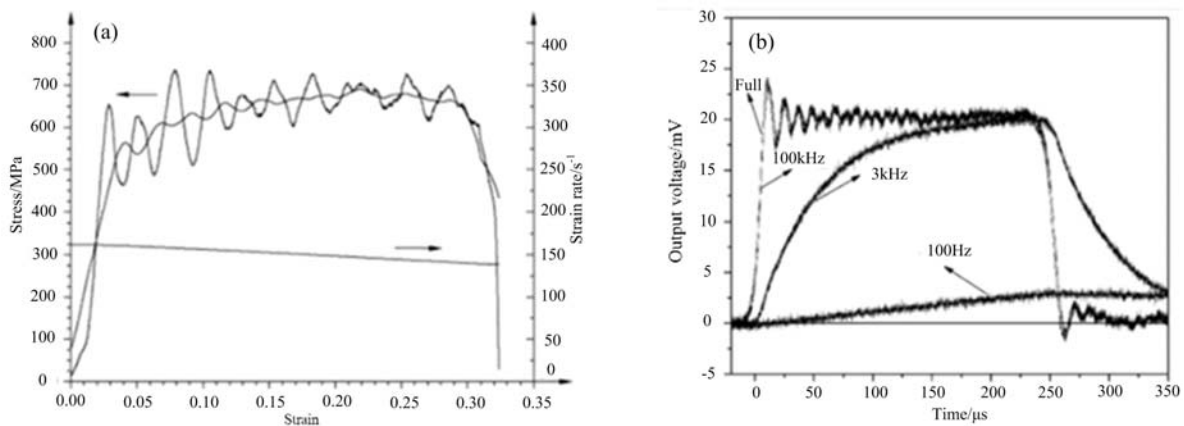


图 9 (a) 数学光滑处理前后的曲线^[8]; (b) 不同滤波参数对测试信号的影响^[33]

Fig. 9 (a) curves before and after mathematical smoothing processing^[8];

(b) the influence of different filtering parameters on the test signal^[33]

2.2 改进载荷测量系统或系统装配方式

HUH 等^[4]认为中应变率加载系统中数据的振铃效应与载荷传感器和夹具的固有频率有关, 因此通过增加夹具的固有频率或直接测量试样的载荷有效减少了测试数据的振荡。XIA 等^[1]利用质量-弹簧-阻尼系统分析了中应变率加载中的系统振铃效应, 并成功设计出一种基于应变片测量的无阻尼载荷传感器, 他们还对载荷传感器和试样的安装条件以及应变片所处的应变状态提出更高的要求。YING 等^[20]在特定的应变率水平下, 通过连接结构的刚度和质量匹配设计来规避或削减振铃效应, 对试验测试信号进行修正, 使曲线振荡减弱。KUMAR 等^[53]研究了 Hopkinson 压杆系统中撞击杆弹托对入射波形的影响, 发现弹托的形状和界面直接影响撞击产生的入射波振荡情况, 由此提出用阶梯形状的撞击杆取代传统圆柱撞击杆的方案。分离式 Hopkinson 拉杆(SHTB)与试样往往有 4 种主要连接方式^[54-55](螺纹、胶粘、销钉和钩挂连接), 在部分学者的测试结果中发现振荡的幅值与拉伸试样和加载杆的连接形式有关, 学者们分析了不同装配方式的优缺点和适用条件, 这为动态拉伸试验试样的设计提供了参考依据。

NGUYEN 等^[56]研究了 SHTB 中螺纹试样的形状对测量精度的影响, 定义了应变误差和面积误差比来评价 SHTB 的测量精度, 还研究了螺纹连接形式拉伸试样的螺纹间距、螺纹内径、试样长度和试样直径对测试精度的影响。AMIR 等^[57]将螺纹连接形式的拉伸试样转换为压缩试样加螺纹适配器结构, 利用 Hopkinson 压杆进行测试, 研究了螺纹螺距对应力应变曲线的影响, 结果如图 10 所示; 他们还通过有限元仿真计算得到了粗牙螺纹和细牙螺纹在动态加载过程中的变形, 发现在加载过程中, 螺纹在相

对较低的应力水平下发生塑性变形,进而会促进间隙的闭合。

VERLEYSSEN 等^[58]研究了 SHTB 中杆与试样通过胶粘方式固连时,试样几何尺寸对测试精度的影响。LEDFOED 等^[59]对比了胶粘连接、销钉连接以及配合连接的测试结果,结果如图 11 所示。而针对钩挂型的试样连接方式,也在文献^[60-62]中发现存在明显的曲线振荡现象,黄德东等^[63]利用神经网络与遗传网络算法对钩挂型试样的结构参数进行优化,提升了试验测试精度。

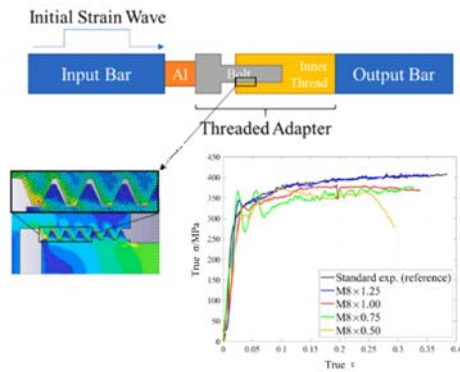


图 10 不同螺距对应力-应变曲线的影响^[57]

Fig. 10 Effect of different pitches on stress strain curve^[57]

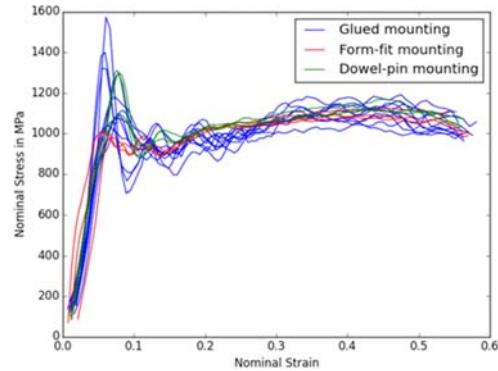


图 11 不同连接方式测试的应力应变曲线^[59]

Fig. 11 Stress strain curves tested by different connection methods^[59]

2.3 减小几何弥散效应

消除应力波传播过程中的几何弥散效应可以减小振荡。对试验设备进行优化和改进后, Hopkinson 杆试验中仍然存在波形振荡问题,几何弥散效应就是原因之一。目前抑制几何弥散的方法可分为 2 类,第一类方法是采用数学方法(傅里叶变换)对测量的脉冲波形进行弥散修正;第二类方法是考虑产生弥散效应的自然原因,通过入射波整形技术从实质上抑制弥散的形成。

2.3.1 弥散修正方法

通过应力波弥散的解析解,可以对波的弥散进行修正^[32]。近年来,基于一维应力波传播理论的修正方法已经开始被普遍接受并应用到具体的试验中,得到的结果与未修正的结果相比,应力应变曲线上的振荡大大减少。目前,研究黏弹性波传播中几何弥散的方法较多,李想等^[64]详细分析了几种应力波传播问题的研究方法以及各自的优缺点。尽管弥散修正能使应力应变曲线比原始应变片上的脉冲数据更加平滑,然而它并没有从物理性质上抑制弥散效应,且使数据处理复杂化甚至带来新的误差。

2.3.2 入射波整形技术

早在 20 世纪 70 年代,人们就已讨论了整形入射脉冲的优点和必要性。DUFFY 等^[65]提出脉冲整形思想,他们在 Hopkinson 扭杆上采用脉冲整形片来光滑爆炸加载所产生的脉冲。CHRISTENSEN 等^[66]在 Hopkinson 压杆上利用脉冲整形技术改善和提高了岩石应力应变曲线初始部分的精度和分辨率,他们认为,理想的输入应力脉冲应更像一个斜坡而不是陡峭的梯形脉冲,为实现斜坡形的加载脉冲,他们使用了锥形的子弹,而不是常规的圆柱形子弹来撞击入射杆。LOK 等^[67]亦尝试通过改变子弹的几何形状,得到一个半正弦波以减少波沿杆传播时的弥散和振荡,并保持试样中的应力均匀。ZOU 等^[68]利用数值模拟分析冲击界面和入射杆轴线上的振荡,认为冲击杆与入射杆接触界面中心处出现了最强的几何弥散效应,并设计了多种中空圆柱撞击杆消除弥散效应。

尽管通过改变撞击杆的几何形状可以改变入射脉冲的形状,减少波沿杆传播时的弥散和振荡,并保证试样中的应力均匀,但这给设计和加工专用撞击杆带来了困难,而且难以保证试样的恒应变率加载。ELLWOOD 等^[69]提出利用三杆技术进行脉冲整形,也就是在入射杆前端放置预加载杆,将一个与待测试样相同的模拟试样置于预加载杆和入射杆之间,在试验时,从模拟试样透射到入射杆的脉冲成为一个新的入射脉冲加载到待测试样上,这种技术可以有效地消除波传播过程中的弥散效应,同时可以实现试样材料的近似恒应变率加载,但这种方法需要不断调整预加载试样的尺寸实现不同应变率加载,增加了

试验难度和成本^[33,45],而且这种方法不适用于很高的应变率加载。PARRY等^[70]将预加载杆换成低强度材料对上述三杆技术进行了修正,从而不需要使用模拟试样就可以消除波形振荡。FREW等^[71]将预加载试样换成特定的材料,形成最终的整形器技术。王永刚等^[72]选取紫铜作为整形器,整形器对入射波的整形效果如图12所示。选择合适的整形器可以消除入射波形的振荡,尤其是对脆性材料或软材料而言,整形技术会延缓波形的上升沿时间,这虽然一定程度上牺牲了“动态”效应,但保证了试样的应力应变均匀性和近似恒应变率,同时也减小了入射波中的高频振荡。翟越等^[73]采用黄铜作为整形器,对花岗岩和混凝土试样进行 $10^1\text{s}^{-1}\sim 10^3\text{s}^{-1}$ 应变率下的压缩试验,有效减少了入射波的高频振荡。汪洋等^[74]采用橡胶作为整形器,对冰进行了应变率为 $500\text{s}^{-1}\sim 2000\text{s}^{-1}$ 的动态压缩试验,保证了试样在局部破坏前达到应力均匀和实现恒应变率。

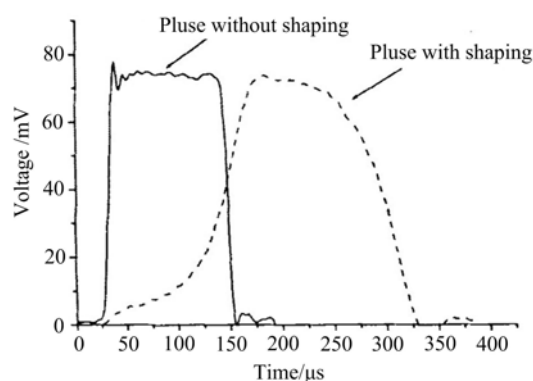


图12 入射脉冲整形前后对比^[72]

Fig. 12 Comparison between original and shaped incident pulse^[72]

截至目前,在入射杆与撞击杆之间放一个片状吸能材料作为脉冲整形器(例如纸张、铝、紫铜等)已经成为消除振荡最常用的方法。采用整形器后,碰撞产生应力波的高频分量被过滤了,从而减少了应力波长距离传播过程中的弥散失真^[32]。

2.4 减小试样惯性效应

国标 GB/T 34108—2017^[6]中规定在 SHPB 中的试样长径比为 0.5~1.0,且试样的直径要小于杆直径。杆和试样间面积失配会带来显著的二维效应^[45],同时试样与杆的端面摩擦也会增大试样中的二维效应^[75]。ZENCKER等^[75]通过数值模拟得到了不同尺寸的试样中心的轴向应力,结果表明(见图13),试样尺寸越大,曲线振荡越明显,因此,优化试样的尺寸和降低试样与杆间的摩擦可以减小惯性效应。

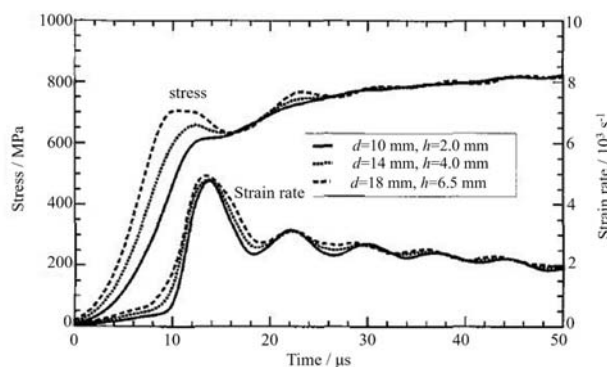


图13 试样中心轴向应力和应变率^[75]

Fig. 13 Axial stress and strain rate in the center of specimens^[75]

3 总结与展望

曲线中的振荡现象在中、高应变率的力学性能测试中普遍存在,目前还没有全面系统的研究去分析其形成的各种原因及各种因素的影响规律,同时缺乏具有针对性、可应用于中、高应变率试验技术(例如 Hopkinson 杆技术和液压快速加载技术)的抑制措施和消除这种振荡杂波的试验方法或数据处理方法。

针对中、高应变率加载,测试材料动态应力应变曲线时会出现显著的振荡,以分离式 Hopkinson 杆为例进行分析可知,撞击杆撞击入射杆产生入射波,根据应力波理论,入射波出现的起始振荡归因于杆的横向弥散效应。但是必须注意的是,对于率敏感材料,特别是高屈服强度金属,尽管通过在入射杆端加装整形器可使入射波上无振荡,而透射波仍然有振荡存在,获得的材料应力应变曲线如图 2(a)所示。依据平端面接触碰撞的应力波弥散特点,排除电学检测系统的干扰、噪声和漂移等现象,可以推测,这种应力应变曲线的振荡有可能是试样本身变形与试样-杆接触波传播的弥散现象,这时就出现 3 个关键问题:

(1) 通常,试样在中、高加载率下,经过弹性-弹塑性-塑性过程,应力应变曲线的振荡往往开始出现在弹塑性段,且随塑性变形增加而衰减。而载荷和试样响应是通过应力波传递的,试样和加载杆的广义波阻抗往往不同,试样要经历弹-塑性波,加载系统只经历弹性应力波,应力波在有限尺度的试样和加载杆表面、内部的传递是个复杂过程,因此揭示出现振荡的机理并优化加载形式,获得无振荡曲线就非常重要。

(2) 若试样动态变形过程仍处于一维和均匀变形,透射波形的振荡(一般对应应力应变曲线振荡)仅仅是在透射杆形成的,那消除透射波的振荡就是主要问题。

(3) 若试样本身动态变形过程中出现如曲线上振荡的加载过程,换句话说,振荡是否是试样材料的本征行为? 试样是否为均匀变形? 若是,则需要优化试样与加载结构形式,从物理上建立无振荡准确获得材料应力应变曲线的方法。

参考文献:

- [1] XIA Y, ZHU J, WANG K, et al. Design and verification of a strain gauge based load sensor for medium-speed dynamic tests with a hydraulic test machine[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 88:139–152.
- [2] NEMAT-NASSER S, GUO W G, LIU M Q. Experimentally-based micromechanical modeling of dynamic response of molybdenum[J]. *Scripta Materialia*, 1999, 40(7):859–872.
- [3] NEMAT-NASSER S, GUO W G, KIHIL D P. Thermomechanical response of AL-6XN stainless steel over a wide range of strain rates and temperatures[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2001, 49(8):1823–1846.
- [4] HUH H, LIM J H, PARK S H. High speed tensile test of steel sheets for the stress-strain curve at the intermediate strain rate[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2009, 10(2):195–204.
- [5] 王建军, 郭伟国, 赵融, 等. 轻质泡沫混凝土吸能特性及其压溃流动应力方程[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(6):96–102 (WANG Jianjun, GUO Weiguo, ZHAO Rong, et al. Energy-absorbing properties and crushing flow stress equation of lightweight foamed concrete [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(6):96–102 (in Chinese))
- [6] GB/T 34108–2017, 金属材料 高应变速率室温压缩试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017 (GB/T 34108–2017, *Metallic materials—high strain rate compression test method at ambient temperature* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese))
- [7] GB/T 7314–2017, 金属材料 室温压缩试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017 (GB/T 7314–2017, *Metallic materials—compression test method at room temperature* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese))
- [8] GB/T 30069.1–2013, 金属材料 高应变速率拉伸试验 第 1 部分: 弹性杆型系统[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013 (GB/T 30069.1–2013, *Metallic materials—tensile testing at high strain rates-Part 1: elastic-bar-type systems* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013 (in Chinese))

- [9] XU Y, LOPEZ M A, ZHOU J, et al. Experimental analysis of the multiaxial failure stress locus of commercially pure titanium at low and high rates of strain[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 170:104341.
- [10] TANG Z, CHEN C, LI A, et al. Temperature- and strain-rate-dependent tensile failure behavior of short-fiber-reinforced PEEK composites[J]. *Composites Part B*, 2023, 250:110455.
- [11] ZHOU J, XU Y, LOPEZ M, et al. The mechanical response of commercially pure copper under multiaxial loading at low and high strain rates[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 224:107340.
- [12] 谭学明. 镍基高温合金 GH4169 动态力学行为及抗冲击性能研究[D]. 西安:西北工业大学, 2023 (TAN Xueming. Study on dynamic mechanical behavior and ballistic impact resistance of Nickel-based superalloy GH4169 [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2023 (in Chinese))
- [13] XU Z, HUANG F. Thermomechanical behavior and constitutive modeling of tungsten-based composite over wide temperature and strain rate ranges[J]. *International Journal of Plasticity*, 2013, 40:163–184.
- [14] JIANG K, LI J, KAN X, et al. Adiabatic shear localization induced by dynamic recrystallization in an FCC high entropy alloy[J]. *International Journal of Plasticity*, 2023, 162:103550.
- [15] LONG X, SU T, LU C, et al. An insight into dynamic properties of SAC305 lead-free solder under high strain rates and high temperatures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 175:104542.
- [16] WANG J, GUO W, GAO X, et al. The third-type of strain aging and the constitutive modeling of a Q235B steel over a wide range of temperatures and strain rates[J]. *International Journal of Plasticity*, 2015, 65:85–107.
- [17] 王建军, 袁康博, 张晓琼, 等. 第三型应变时效的提出与研究进展[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(5):4–14 (WANG Jianjun, YUAN Kangbo, ZHANG Xiaoqiong, et al. Proposition and research progress of the third-type strain aging[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(5):4–14 (in Chinese))
- [18] KANG J, LIU X, WANG T. The effects of ultrasonic vibration on Portevin-Le Chatelier (PLC) effect and stress-strain behavior in aluminum alloy 2024[J]. *Scripta Materialia*, 2023, 224:115121.
- [19] PALGUNA Y, KOTLA S, KORLA R. High temperature deformation behavior of $Al_{0.2}CoCrFeNiMo_{0.5}$ high entropy alloy: dynamic strain ageing [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 930:167422.
- [20] YING P, CHEN W, GE Y, et al. Loading measurement for intermediate strain rate material test based on dynamic oscillation[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 173:104436.
- [21] 郭伟国, 李玉龙, 索涛. 应力波基础简明教程[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2007 (GUO Weiguo, LI Yulong, SUO Tao. A concise tutorial on the basics of stress waves[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007 (in Chinese))
- [22] KIM J, PARK J, LEEM D, et al. Determination of strain rate dependence at intermediate strain rates using acceleration information [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 173:104482.
- [23] SUN J, XU S, LU G, et al. Mechanical response of fibre metal laminates (FMLs) under low to intermediate strain rate tension [J]. *Composite Structures*, 2023, 305:116493.
- [24] MOUNI C, KHAN P, RAVISHANKAR C, et al. Addressing the load-ringing phenomena observed at intermediate strain rates to obtain true material response using ensemble empirical mode decomposition [J]. *Materials Letters*, 2022, 325:132778.
- [25] ZHU D, RAJAN S, MOBASHER B, et al. Modal analysis of a servo-hydraulic high speed machine and its application to dynamic tensile testing at an intermediate strain rate[J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(8):1347–1363.
- [26] XIAO X. Dynamic tensile testing of plastic materials[J]. *Polymer Testing*, 2008, 27(2):164–178.
- [27] QIN Z, WEI L, ZHU J, et al. Experimental and numerical analysis of the system ringing in intermediate strain rate tests[C]. *Asme International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, 2016.
- [28] QIN Z, ZHU J, LI W, et al. System ringing in impact test triggered by upper-and-lower yield points of materials [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 108:295–302.
- [29] SONG B, CONNELLY K, KORELLIS J, et al. Improved kolsky-bar design for mechanical characterization of materials at high strain rates[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(11):115701.
- [30] KARIEM M, BEYNON J, DONG R. Misalignment effect in the Split Hopkinson Pressure Bar technique[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 47:60–70.

- [31] JIN K, QI L, KANG H, et al. A novel technique to measure the biaxial properties of materials at high strain rates by electromagnetic Hopkinson bar system[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 167:104286.
- [32] CHEN W, SONG B. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar: design, testing and applications*[M]. New York: Springer, 2015.
- [33] 卢芳云, 陈荣, 林玉亮, 等. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013 (LU Fangyun, CHEN Rong, LIN Yuliang, et al. *Hopkinson bar techniques*[M]. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese))
- [34] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005 (WANG Lili. *Foundation of stress waves*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005 (in Chinese))
- [35] 杨洪升, 李玉龙, 周风华. 梯形应力脉冲在弹性杆中的传播过程和几何弥散[J]. *力学学报*, 2019, 51(6):1820—1829 (YANG Hongsheng, LI Yulong, ZHOU Fenghua. The propagation process and the geometric dispersion of a trapezoidal stress pulse in an elastic rod[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(6):1820—1829 (in Chinese))
- [36] POCHHAMMER L. Über die fortpflanzungsgeschwindigkeiten kleiner schwingungen in einem unbergrenzten isotropen kreiszylinder[J]. *Journal Für die Reine und Angewandte Mathematik Band*, 1876, 81:324—336 (in German))
- [37] CHREE C. The equations of an isotropic elastic solid in polar and cylindrical coordinates, their solutions and applications[J]. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1889, 14:250—369.
- [38] RAYLEIGH J W S. *The theory of sound*[M]. 2nd Edition. London: Macmillan, 1894.
- [39] LOVE A E H. *A treatise on the mathematical theory of elasticity*[M]. New York: Dover Publications, 1944.
- [40] DAVIES R M. A critical study of Hopkinson pressure bar[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1948, 240(821):375—457.
- [41] NAITOH M, DAIMARUYA M. The influence of a rise time of longitudinal impact on the propagation of elastic waves in a bar[J]. *Bulletin of JSME*, 1985, 28:20—25.
- [42] XU Z, LIU Y, HU H, et al. Thermo-viscoplastic behavior and constitutive modeling of pure copper under high-strain-rate shear condition[J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 129:306—319.
- [43] XU Z, LIU Y, HU H, et al. Determination of shear behavior and constitutive modeling of the 603steel over wide temperature and strain rate ranges[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 129:184—204.
- [44] AYHAN B, LALE E. Modeling strain rate effect on tensile strength of concrete using damage plasticity model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 162:104132.
- [45] 宋博, 姜锡权, 陈为农. 霍普金森压杆实验中的脉冲整形技术[C]. 第三届全国爆炸力学实验技术交流会论文集, 2004 (SONG Bo, JIANG Xiquan, CHEN Weinong. Pulse shaping techniques in Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) experiments[C]. *Proceedings of the 3rd National Conference of Experimental Technology in Mechanics of Explosion*, 2004 (in Chinese))
- [46] LINDHOLM U. Some experiments with the Split Hopkinson Pressure Bar[J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 1964, 12(5):317—335.
- [47] BILLINGTON E W, BRISSENDEN C. Mechanical properties of various polymeric solids tested in compression [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1971, 13:531—545.
- [48] HOLZER A. A technique for obtaining compressive strength at high strain rates using short load cells[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1978, 20(9):553—560.
- [49] RUSINEK A, CHERIGUENE R, BÄUMER A, et al. Dynamic behavior of high strength sheet steel in dynamic tension: experimental and numerical analyses[J]. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2008, 43:37—53.
- [50] ZHU D, GENCOGLU M, MOBASHER B. Low velocity flexural impact behavior of AR glass fabric reinforced cement composites[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2009, 31(6):379—387.
- [51] KIMM J, BERGMANN J, WOESTE F, et al. Deformation behavior of 42CrMo4 over a wide range of temperatures and strain rates in Split-Hopkinson Pressure Bar tests[J]. *Materials Science & Engineering, A. Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2021, 826:141953.
- [52] EBEL F, P KUBIK, TIPPNER J, et al. Orthotropic elastic-plastic-damage model of beech wood based on Split

- Hopkinson Pressure and Tensile Bar experiments[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 157: 103975.
- [53] KUMAR D, RUAN D, KHADERI S. Revisiting the effect of sabot on the incident signals of Split-Hopkinson Pressure Bar[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 177:104475.
- [54] 刘开业. 高温 Hopkinson 拉伸试验方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015 (LIU Kaiye. The study on the Hopkinson tensile experimental technology at high temperature [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015 (in Chinese))
- [55] WANG J, GUO W, LI P, et al. Dynamic tensile properties of a single crystal Nickel-base superalloy at high temperatures measured with an improved SHTB technique[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 670: 1-8.
- [56] NGUYEN K H, LEE C W, SHIN H, et al. A study on the effects of specimen geometry on measurement accuracy of dynamic constitutive properties of metals using SHTB [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21(9):1687-1695.
- [57] AMIR B, LOMNITZ A, KOCHAVI E, et al. Experimental and numerical studies on dynamic mechanical properties of threads under impact loads[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 176:104555.
- [58] VERLEYSSEN P, DEGRIECK J, VERSTRAETE T, et al. Influence of specimen geometry on Split Hopkinson Tensile Bar tests on sheet materials[J]. *Experimental Mechanics*, 2008, 48(5):587-598.
- [59] LEDFORD N, PAUL H, GANZENMULLER G, et al. Investigations on specimen design and mounting for Split Hopkinson Tension Bar (SHTB) experiments[C]. *DYMAT 2015-11th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*, 2015, 94:01049.
- [60] 朱耀, 庞宝君, 盖秉政. 一种用于动态拉伸试验装置的新型试件装卡方式[J]. *实验力学*, 2009, 24(5):433-438 (ZHU Yao, PANG Baojun, GAI Bingzheng. A new specimen fastener for dynamic tensile testing apparatus[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(5):433-438 (in Chinese))
- [61] TAN X, GUO W, GAO X, et al. A new technique for conducting Split Hopkinson Tensile Bar test at elevated temperatures [J]. *Experimental Techniques*, 2017, 41(2):191-201.
- [62] LI P H, GUO W G, YUAN K B, et al. Effects of processing defects on the dynamic tensile mechanical behavior of laser-solid-formed Ti-6Al-4V[J]. *Materials Characterization*, 2018, 140:15-29.
- [63] 黄德东, 王清华, 邢亮亮, 等. Hopkinson 拉杆平板挂钩试件结构智能协同优化[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(10): 119-131 (HUANG Dedong, WANG Qinghua, XING Liangliang, et al. Intelligent collaborative optimization of structural parameters for hook-sheet specimens used in Split Hopkinson Tensile Bar[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(10):119-131 (in Chinese))
- [64] 李想, 陈国平, 胡文军, 等. Laplace 变换法及其在黏弹性波中传播的应用[J]. *计算力学学报*, 2020, 37(5):637-645 (LI Xiang, CHEN Guoping, HU Wenjun, et al. Laplace transform and its application in viscoelastic wave propagation[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2020, 37(5):637-645 (in Chinese))
- [65] DUFFY J, CAMPBELL J, HAWLEY R. On the use of a torsional Split Hopkinson Bar to study rate effects in 1100-0 aluminum[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1971, 38(1):83-91.
- [66] CHRISTENSEN R, SWANSON S, BROWN W S. Split-Hopkinson-Bar tests on rocks under confining pressure [J]. *Experimental Mechanics*, 1972, 12(11):508-513.
- [67] LOK T S, LI X B, LIU D, et al. Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, 14:262-269.
- [68] ZOU G, SHEN X, CHANG Z, et al. A method of restraining the geometric dispersion effect on Split-Hopkinson Pressure Bar by the Modified Striker Bar[J]. *Experimental Techniques*, 2016, 40(4):1249-1261.
- [69] ELLWOOD S, GRIFFITHS L, PARRY D. Materials testing at high constant strain rates[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1982, 15(3):280-282.
- [70] PARRY D J, WALKER A G, DIXON P R. Hopkinson bar pulse smoothing[J]. *Measurement Science and Technology*, 1995, 6(5):443-446.
- [71] FREW D, FORRESTAL M, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing elastic-plastic materials with a Split Hopkinson Pressure Bar[J]. *Experimental Mechanics*, 2005, 45(2):186-195.

- [72] 王永刚, 施绍裘, 王礼立. 采用改进的 SHPB 方法对泡沫铝动态力学性能的研究[J]. 实验力学, 2003, 18(2): 257—264 (WANG Yonggang, SHI Shaoqiu, WANG Lili. An improved SHPB method and its application in the study of dynamic mechanical behavior of aluminum foams[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(2): 257—264 (in Chinese))
- [73] 翟越, 马国伟, 赵均海, 等. 花岗岩和混凝土在单轴冲击压缩荷载下的动态性能比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(4):762—768 (ZHAI Yue, MA Guowei, ZHAO Junhai, et al. Comparison of dynamic capabilities of granite and concrete under uniaxial impact compressive loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(4):762—768 (in Chinese))
- [74] 汪洋, 李玉龙, 刘传雄. 利用 SHPB 测定高应变率下冰的动态力学行为[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2):215—219 (WANG Yang, LI Yulong, LIU Chuanxiong. Dynamic mechanical behaviors of ice at high strain rates[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(2):215—219 (in Chinese))
- [75] ZENCKER U, CLOS R. Limiting conditions for compression testing of flat specimens in the Split Hopkinson Pressure Bar[J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(4):343—348.

A review on the oscillation phenomenon of stress strain curve of material under impact loading

LI Boli, WANG Ruifeng, CHEN Longyang, GUO Weiguo

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract: The stress strain curves of materials obtained under impact loading generally exhibit significant oscillations. For a long time, it has been challenging to determine the authenticity of the oscillations, that is, it is uncertain whether the oscillations are intrinsic characteristics of the sample material or the influence of pure mechanical loading. Therefore, the oscillation of the curve is often not directly eliminated from the true stress strain curve. However, the existence of the oscillation conceals the real material response, making it difficult to accurately determine the dynamic yield strength of the material. It also hampers the establishment of the dynamic constitutive relationship of the material and the accuracy of its parameters. As a result, this has a negative impact on the optimal design and safety reliability of major equipment under impact load. Considering the issue of oscillation, which has long been a problem for scientific researchers and engineering technicians, this paper reviews the progress in the study of the oscillation phenomenon of the stress strain curve of materials under impact loading. Firstly, the reasons for the oscillation in the dynamic test curve are analyzed from the perspectives of loading system design, stress wave propagation, and sample deformation distribution. Secondly, methods of suppressing or eliminating the oscillation phenomenon are discussed primarily based on the causes of oscillation. Lastly, the current research is summarized, highlighting the outstanding issues, and recommendations are provided for future development.

Keywords: impact loading; dynamic test; stress strain curve; oscillation