

一种新式压/拉一体式 Hopkinson 杆装置研究*

王 凡, 陈龙洋, 赵思晗, 吴 倩, 郭伟国

(西北工业大学航空学院 西安, 710072)

摘要 分离式 Hopkinson 杆装置常用于测量材料动态压缩、拉伸和剪切性能, 为了提高装置的高效性和经济性, 研究了可以实现材料动态压缩和拉伸的一体式 Hopkinson 杆装置。首先, 通过在 Hopkinson 压杆装置上增加 Y 字型前端构件、双侧杆和 Y 字型后端构件, 将撞击产生的压缩波转换为拉伸波加载至试样; 其次, 通过 ABAQUS 软件数值仿真, 分析各构件的几何构型、尺寸等对加载波形的影响。结果表明: 前端 Y 字型构件分岔角度越大、截面尺寸越小, 则因弯曲导致的波形失真的程度越严重, 截面尺寸和失真程度成负指数关系; 在侧杆截面边长大于 10 mm 时, 侧杆间距对波形的影响较小; 后端构件的法兰厚度越大, 拉伸加载波的平均幅值越大。最终确定了前端构件的 Y 型分岔夹角为 10° , 2 根侧杆的间距为 60 mm, 后端构件的法兰厚度为 10 mm, 构建了一种兼顾压缩和拉伸的一体式 Hopkinson 杆装置, 并对 2 种试样分别进行压缩和拉伸加载, 验证了此装置的有效性。

关键词 Hopkinson 杆; 拉/压一体; 尺寸优化; 弯曲杆; 动态性能

中图分类号 O347.3

1 问题的引出

工程结构常会受到爆炸、高速撞击等冲击载荷而发生变形甚至破坏, 因此材料在短时(毫、微秒量级)、高载荷峰值(引起材料破坏)^[1]冲击载荷下的力学行为一直是研究的重点。为了解材料在冲击加载下的特性和变形机制, 高应变率加载技术和装置成为关键^[2]。Hopkinson 杆技术是应用最广的材料动态力学性能表征试验方法。分离式 Hopkinson 压杆(split Hopkinson press bar, 简称 SHPB)主要用于表征材料在动态加载下的变形及损伤机制, 建立材料本构关系; 分离式 Hopkinson 拉杆(split Hopkinson tension bar, 简称 SHTB)常常用于测试材料拉伸变形、拉伸损伤及破坏机制, 建立材料的失效判据。从实际工程结构损伤和破坏的角度来说, SHTB 试验更能反映工程材料的变形与破坏规律。

20 世纪 60 年代, 直接拉伸式 SHTB 装置^[3-5]相继被研发并成功用于材料动态拉伸性能表征。由于加载的应力波脉冲会在加载杆中来回衰减传播, 为了准确控制材料在冲击加载下的拉伸应变, 发展了更为先进的单次直接拉伸式 SHTB^[6]。直接拉伸式 SHTB 通过撞击管对入射杆端的法兰进行撞击,

在入射杆中形成拉伸加载波。由于撞击管要沿着入射杆加速滑动达到预定的速度, 同时还要贴应变计准确测试完整的加载脉冲和反射脉冲, 往往拉伸入射杆会比较长, 例如直径为 20 mm 的入射杆的长度可达 3 m。若拉伸入射杆直径增加, 长度也要增加, 例如对于混凝土和泡沫结构等材料要采用直径为 100 mm 的入射杆, 仅入射杆长度就会超过 6 m。这就使得 SHTB 比 SHPB 装置加工装配要求更高, 其成本高, 操作和使用复杂, 空间占用大。因此, 研究人员希望在 SHPB 的基础上, 通过改造实现动态拉伸的功能。Chen 等^[7]通过在支架平台的一端设置一套电磁发射空心撞击管装置, 另一端设置另一套电磁发射撞击杆装置, 可对处于这 2 套发射装置中间的直径为 4 或 6 mm 拉杆或压杆分别加载, 实现对材料的拉伸或者压缩加载, 把拉伸和压缩功能整合在一个台架上。Mancini 等^[8]借助液压加载机构, 在入射杆前端设置过渡加载杆, 通过预拉或者预压的方式储存能量, 然后瞬间释放能量在入射杆中产生一个拉伸或压缩加载脉冲, 实现对试样的拉伸或压缩加载, 此套装置加载杆直径为 18 mm, 整个装置长度为 14.5 m。Kadhane 等^[9]将电磁驱动改为气动驱动模式, 使用 2 个独立发射气缸和发射装置, 进行

* 国家自然科学基金资助项目(11872051, 12072287)

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-04-15

拉/压试验,其杆直径为 16 mm,总长为 3.4 m,实现对生物软材料的拉伸或压缩加载。Cadoni 等^[10]对混凝土材料进行动态性能测试时,使用液压系统对预加载杆进行加载,通过破坏脆性材料来实现能量的释放,建立了大尺寸(200 mm×200 mm)方杆的拉/压一体加载装置。陈柏生等^[11]通过发射撞击杆或套筒,构件了一种拉/压一体试验装置,在加载杆产生压缩波或者拉伸波,实现对金属材料的压缩或拉伸加载。

套管式 SHTB 原理如图 1 所示,将试验杆放置在圆形套筒内,并在杆端增加 1 个法兰,以恒定速度对套管加载,套管中的压缩脉冲传入法兰,并在自由端面反射生成拉伸波,再作用在试样上对试样拉伸加载。王鹏飞等^[12]在此基础上做了改进,通过撞击杆直接撞击外围的套管在入射杆产生拉伸波,进而对试样进行拉伸加载,并通过试验进行了可行性验证。

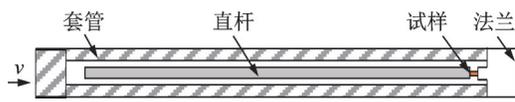


图 1 套管式 SHTB 原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of tubing type SHTB

随着试验装置中加载杆直径和长度的增加,用封闭套管完全包裹入射杆和透射杆的方式会导致加工、装配和观测难度增大,同时也不能为试样在线的高、低温环境箱提供空间,不便于弹性杆上应变片的信号输出。为了改善套管的封闭性带来的这些不足,笔者将封闭的外围套管简化为 2 根侧杆,这 2 根侧杆和入射杆、透射杆之间留有一定距离以确保试验装配方便,同时高、低温环境箱也可以在线使用,侧杆式 SHTB 原理如图 2 所示。该装置不仅保留原来的 SHPB 加载模式,还可通过前端构件、双侧杆及后端构件等实现试样的拉伸加载,在入射杆中产生理想拉伸脉冲。本研究借助 ABAQUS 软件仿真分析应力波在曲杆(或折杆)的传播规律,对辅助构件的形式和尺寸进行优化设计,以获得理想的加载脉冲,并通过试验进行了可行性验证。

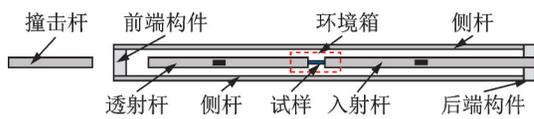


图 2 侧杆式 SHTB 原理示意图
Fig.2 Schematic diagram of side bar type SHTB

2 基于 SHPB 实现拉伸的方法

基于传统的 SHPB^[13-14]和直接拉伸式 SHTB^[15-17]的工作原理,在 SHPB 装置基础上,通过增加前端构件、侧杆和后端构件,实现动态拉伸的功能。其中,发射装置、撞击杆、透射杆和入射杆等可以与 SHPB 装置共用(但拉伸试样需要螺纹等连接)。该装置在进行材料动态压缩试验时,采用传统的 SHPB 方法;在进行材料动态拉伸试验时,借助图 2 所示的辅助构件,实现动态拉伸。为了区分压缩和拉伸试验时的入射杆和透射杆承担的作用,分别用压缩入射杆、压缩透射杆来表示动态压缩试验时的 2 根杆,分别用拉伸透射杆和拉伸入射杆表示进行动态拉伸试验时的 2 根杆。进行压缩试验时,撞击杆撞击压缩入射杆,通过试样将透射信号传递到压缩透射杆中,应变片对杆中应变信号进行测量,得到试样的应力-应变曲线。进行动态拉伸试验时,撞击杆首先撞击前端构件,产生的应力脉冲主要以压缩波的形式传递到侧杆中,经由后端构件转化为拉伸波,传递到拉伸入射杆,从而对试样进行拉伸加载。

为了便于构件的加工和装配,笔者以方截面的侧杆作为研究对象。文献[18-21]对不同直径、不同角度的弯折杆中弹性波的传播规律进行了分析,随着弯折角度的增加,梯形压缩波会出现平台段后下降,并在卸载后出现反向拉伸应力。根据弹性波传播分析,笔者将前、后端构件设计成 Y 型的形式,而后端构件使用带有法兰的 Y 型构件,将压缩加载波转换为拉伸加载波,并传递到拉伸加载杆中。实现动态拉伸方法的辅助构件形式如图 3 所示,以撞

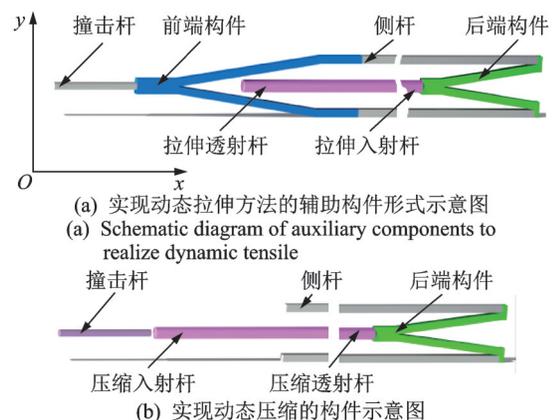


图 3 实现动态拉/压方法的构件形式示意图
Fig.3 Schematic diagram of auxiliary components to realize dynamic tensile or compression

击杆的运动速度方向为 x 轴的正方向,垂直于 x 轴的为 y 方向。

3 拉伸辅助构件的优化

3.1 前端构件的分析与优化

前端构件涉及分岔和弯折问题,并且需考虑前端构件与侧杆的端面配合。笔者利用 ABAQUS 软件对弹性波在前端构件中的传播规律进行仿真计算,模拟中所有构件均不设约束条件,采用 7075 铝合金,其弹性模量为 71 GPa,密度为 2.7 g/cm^3 ,泊松比为 0.3。

前端构件尺寸如图 4 所示。为避免压缩波在右自由端反射,影响对前端构件中应力波传播规律的分析,取 $L_1=400 \text{ mm}$, $L_2=800 \text{ mm}$,其中 N 点距离

弯折处 50 mm,截面边长为 a 。在前端构件输入一幅值为 300 MPa、脉宽为 $160 \mu\text{s}$ 、上升沿和下降沿均为 $10 \mu\text{s}$ 的梯形压缩应力脉冲。为避免弯折后在横截面中出现应力集中,输出点与弯折处需要一定距离进行过渡,使截面应力均匀。另一方面,为了避免杆中弥散效应的影响,输出点距离弯折处不宜过远。因此,取距离弯折处 50 mm 的 N 点为输出位置(本研究其他输出点与变截面处距离都为 50 mm)。前端构件尺寸对于应力波传播的影响如图 5 所示。

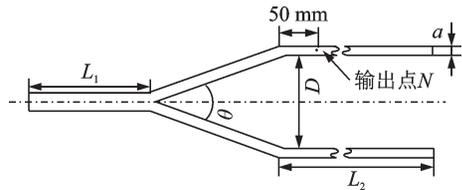


图 4 前端构件尺寸示意图

Fig.4 Diagram of dimension of front component

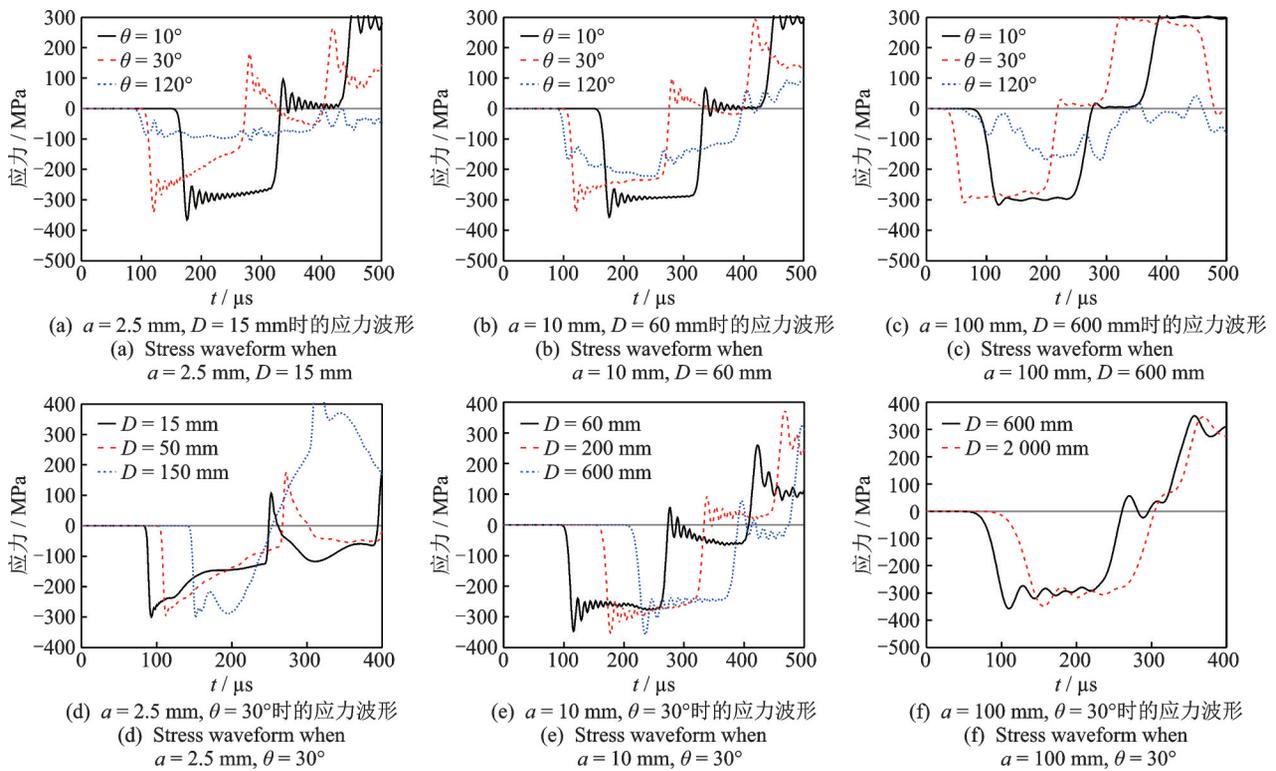


图 5 前端构件尺寸对于应力波传播的影响

Fig.5 Influence of sizes of front component on stress wave propagation

图 5(a, b, c) 分别表示截面边长 a 为 2.5, 10, 100 mm、侧杆间距 $D=6a$ 时弯曲杆夹角 θ 对波形的影响,其中每种截面下 θ 分别取 $10^\circ, 30^\circ$ 和 120° 。

1) $a=2.5 \text{ mm}$ 。当 $\theta=30^\circ$ 时,压缩波的平均应力约为 200 MPa,反射拉伸波的应力峰值约为 150 MPa;当 $\theta=10^\circ$ 时,压缩波平均应力约为 280 MPa,反射拉伸波的应力峰值为 100 MPa;当

$\theta=120^\circ$ 时,波形失真严重,其脉冲幅值仅为 100 MPa,脉宽约为 $300 \mu\text{s}$,约为入射脉冲的 2 倍。

2) $a=10 \text{ mm}$ 。当 $\theta=30^\circ$ 时,压缩波的平均应力约为 260 MPa,反射拉伸波的应力峰值约为 100 MPa;当 $\theta=10^\circ$ 时,压缩波平均应力约为 300 MPa,反射拉伸波的应力峰值为 60 MPa,此时输出点的应力波的脉宽和幅值已经与入射波几乎相

同;当 $\theta=120^\circ$ 时,波形失真严重,其脉冲平均应力幅值为150 MPa,脉宽约为300 μs 。

3) $a=100\text{ mm}$ 。当 $\theta=30^\circ$ 时,压缩波的平均应力约为290 MPa,反射拉伸波的应力峰值约为30 MPa;当 $\theta=10^\circ$ 时,压缩波平均应力约为300 MPa,反射拉伸波的应力峰值为20 MPa;当 $\theta=120^\circ$ 时,波形失真严重。

综上可知:①前端构件导致的波形失真主要表现为平台段的幅值出现前高后低的变化,且幅值最大值与入射波幅值几乎相同,均为300 MPa,在压缩脉冲结束后,都存在拉伸的应力;②如果用失真程度来表示输入脉冲和输出脉冲平均幅值的差值,或者脉冲结束后的拉伸波峰值,则在相同的夹角 θ 下,截面尺寸越大,波形失真越小,失真程度与截面边长 a 存在近似负指数关系;③在相同截面条件下,弯曲角度越大,波形的失真越严重;④模拟结果中,在3种情况下的失真较小,即 $a=10\text{ mm}$ 和 $\theta=10^\circ$, $a=100\text{ mm}$ 和 $\theta=30^\circ$, $a=100\text{ mm}$ 和 $\theta=10^\circ$ 。因此,为了后续分析和验证,前端构件选用截面尺寸 $a=10\text{ mm}$, $\theta=10^\circ$ 。

图5(d, e, f)曲线表明在相同夹角情况下,截面尺寸 a 和间距 D 对于波形传播的影响,分别取 $D=6a, 20a$ 和 $60a$ 。为使影响更加突出,取夹角 $\theta=30^\circ$ 。

1) 当 $a=2.5\text{ mm}$ 时, $D=15$ 和 50 mm 这2种前端构件输出应力波形在幅值和脉宽上几乎相同,但 $D=150\text{ mm}$ 时出现了较大的波形失真。

2) 当 $a=10$ 或 100 mm 时, D 取值在 $6a\sim 60a$ 之间的输出波形几乎相同,因此可以认为在 $a=10$ 或 100 mm 时,间距 D 对于输出的应力波基本没有影响。

因此,只有在截面边长较小、间距较大时($a=2.5\text{ mm}$, $D=150\text{ mm}$),波形才会发生较大的失真。对于中、大截面($a=10, 100\text{ mm}$)来说,间距 D 取值在 $6a\sim 60a$ 之间变化对应应力波传播基本没有影响。不同夹角的前端构件上 N 点脉冲与侧杆截面边长的关系如图6所示。

前端构件选用 N 处截面边长 $a=10\text{ mm}$,可以有更灵活的间距,便于根据试验要求增加加载杆在线的环境箱,且装置不至于太大。根据图5中的仿真结果以及分析,选用夹角 $\theta=10^\circ$,可以保证应力波在经过前端构件后波形失真程度较低。在此基础上,考虑前端构件中的 L_2 和间距 D 对于侧杆中波形的影响。模拟采用的长度 $L_2=1, 50, 100\text{ mm}$,间距

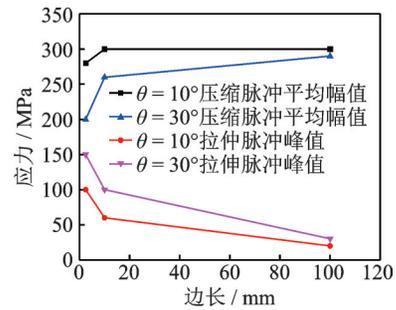


图6 不同夹角的前端构件上 N 点脉冲与侧杆截面边长的关系
Fig.6 Stress pulse at point N with different angle and section length of side bar

$D=15, 30, 60\text{ mm}$,侧杆长度均取1 000 mm以避免应力波在侧杆端面反射,影响应力输出,应力输出位置为距离前端构件和侧杆的接触面50 mm处横截面的中心。

不同尺寸的前端构件传递到侧杆中的应力波如图7所示。当前端构件 $L_2=1\text{ mm}$ 时,侧杆上采集的应力波平台段的幅值略低于 L_2 为50和100 mm时的应力幅值,该幅值差值约为5 MPa,而间距 D 在15~60 mm范围内的改变对于应力波形的影响不大。这说明前端构件间距 D 和长度 L_2 对 x 方向的压缩脉冲的传播影响很小,可以根据具体的使用条件,灵活设计前端构件的尺寸。

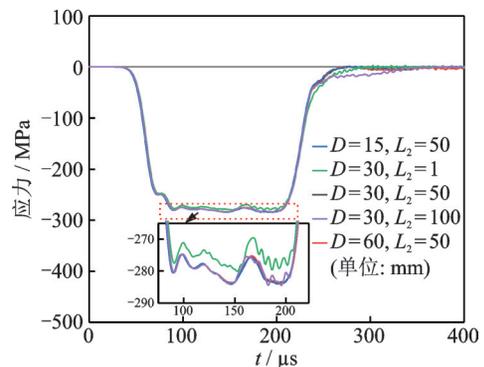


图7 不同尺寸的前端构件传递到侧杆中的应力波
Fig.7 Stress waves in side bars of different sizes of front component

x 方向的压缩波在经过前端构件分岔和弯折后,会产生额外的弯曲应力和剪力。在压缩脉冲从前端构件传至侧杆的过程中,前端构件的右端面会产生 y 方向的位移,侧杆的左端面受弯矩作用也可能存在 y 方向位移,但两者存在一定的端面位移差 Δy 。在实际使用中,过大的 Δy 可能会影响端面的配合,并引起应力集中问题。脉冲传递过程产生的端面位移差如图8所示,通过对5种不同尺寸的前端构件进行比较,输出压缩脉冲传播过程中前端构件

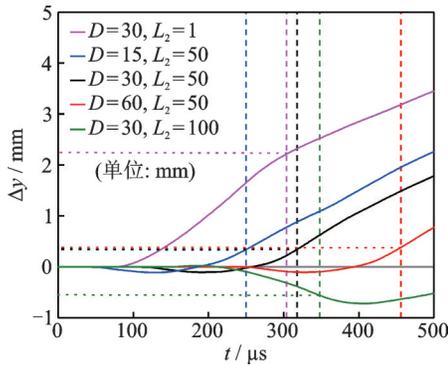


图8 脉冲传递过程产生的端面位移差

Fig.8 Displacement difference of different sizes of front component

与侧杆的端面位移差,其中竖虚线对应的是压缩波传递的结束时间。压缩波传递后,端面的位移差仍会增加,但并不会对脉冲的传播造成影响。

1) 当 $D=30$ mm 时, $L_2=50$ mm 的端面位移差 Δy 最小,为 0.35 mm; $L_2=1$ mm 的端面位移差 Δy 最大,为 2.25 mm; $L_2=100$ mm 的端面位移差 Δy 为 0.52 mm,介于最大值和最小值之间。

2) 当 $L_2=50$ mm 时,间距 $D=15, 30, 60$ mm, Δy 均为 0.35 mm,即 D 不会影响端面的配合情况。

在前端构件的 L_2 段中,存在 3 种应力:①沿 x 方向传播、截面均匀分布的 x 方向压应力;②弯矩的存在会导致在构件中产生沿 x 方向传播、在截面上不均匀分布的 x 方向弯曲应力;③剪力的存在会导致构件中存在沿 x 方向传播、质点沿 y 方向运动产生的剪切应力。其中,剪力和弯矩在传播过程中会相互耦合,使 L_2 段出现振动,导致 Δy 和 L_2 产生非线性关系。采用模拟结果中 Δy 取最小值时, $L_2=50$ mm。间距 D 在波形传播时的影响可以忽略,只需保证加载杆与侧杆之间留下环境箱的空间即可,取 $D=60$ mm。

3.2 后端构件对波传递的影响

后端构件将侧杆传入的压缩波转换为拉伸波,并传递到拉伸入射杆之中,该过程与压缩波从前端构件传播到侧杆的过程相反。后端构件需要进行分析的尺寸主要有法兰厚度 L_3 和后段长度 L_4 。压缩波转化为拉伸波的过程主要与法兰厚度 L_3 有关,拉伸波传递到后端构件的斜杆段的过程主要与 L_4 长度有关。

后端构件尺寸如图 9 所示,尾端外侧带法兰。根据一维应力波理论,法兰的截面积是侧杆的 2 倍,使侧杆与后段构件 L_4 段的截面积相同,满足波阻抗

匹配的要求。将图 6 中 $D=60$ mm, $L_2=50$ mm 输出点处的脉冲输入到侧杆中,侧杆与后端构件 L_4 段之间预留 0.5 mm 的间隙,以避免振动和弯曲变形引起的侧面碰撞。输出点 M 位于后端构件距开口 50 mm 的矩形截面中心, M 点 x 方向正应力见图 10。

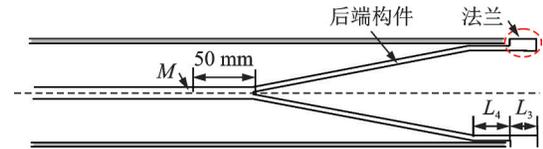


图9 后段构件尺寸示意图

Fig.9 Diagram of dimension of back component

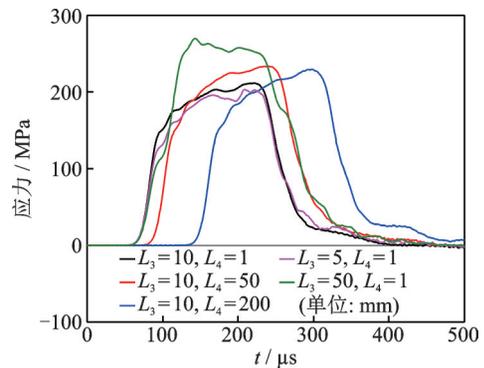


图10 不同尺寸的后端构件M点的拉伸加载波

Fig.10 Tensile wave at M point of different sizes of back component

1) 当 $L_4=1$ mm 时, M 点拉伸波的平台段出现凹坑,下降幅值约为 15 MPa~30 MPa,因此尾段长度 L_4 不可取为 1 mm。当 $L_3=10$ mm 时,尾端长度 $L_4=50$ 和 200 mm 的拉伸波几乎相同,此时拉伸波平均幅值约为 200 MPa,为入射压缩波脉冲的 67%,且平台段的应力幅值会出现前低后高的现象,这种在平台段缓慢上升的加载脉冲波更有利于实现递减硬化材料的恒应变率加载。

2) 当 $L_3=5, 10, 50$ mm 时,平均应力幅值分别为 180, 200, 250 MPa。 M 点的拉伸波幅值均会小于输入的压缩波幅值(300 MPa),且随着法兰厚度的增加,拉伸波幅值会略微增加。

3) 对于法兰厚度 $L_3=50$ mm 的后端构件, M 点输出波形在上升沿出现抖动。这是由于在较厚的法兰受到冲击时,一部分能量从后端构件的撞击界面以拉伸波的形式向左传播,剩下的能量在法兰中以压缩波的形式向右传播,并在自由端反射成拉伸波向左传播。这 2 种拉伸波在到达 M 点时存在较大时间差,两者叠加导致的 M 点应力波形的上升沿出现

抖动。

因此, L_3 过大会导致波形上升沿抖动, L_3 过小会导致强度和应力幅值降低, 需要适中的法兰厚度, 取 $L_3=10\text{ mm}$ 。 L_4 过小会导致波形平台段出现下凹, 过大的 L_4 又会增加装置的长度, 因此取 $L_4=50\text{ mm}$ 。

3.3 构件间的接触讨论

3.3.1 撞击杆和前端构件

拉伸/压缩波传递界面和尺寸如图11所示。图11(a)中的前端构件前段为 $10\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的矩形截面, 矩形截面的撞击杆在沿炮管滑行加速时容易发生旋转, 导致碰撞时撞击端面不能完全重合, 可能会产生扭转现象。因此, 考虑使用 $\varphi=10\text{ mm}$ 的撞击杆, 且与前端构件同轴。当材料相同时, 撞击时撞击杆速度为 v_1 , 根据撞击截面位移连续和力平衡的条件, 在Y型构件中产生的质点速度 v_2 和应力 σ 满足

$$v_2 = \frac{\rho_0 c_0 A_1 v_1}{\rho_0 c_0 A_1 + \rho_0 c_0 A_2} = \frac{A_1 v_1}{A_1 + A_2} \quad (1)$$

$$\sigma = \rho_0 c_0 A_1 v_1 / (A_1 + A_2) \quad (2)$$

其中: ρ_0 为材料密度; c_0 为材料一维波速; A_1 为撞击

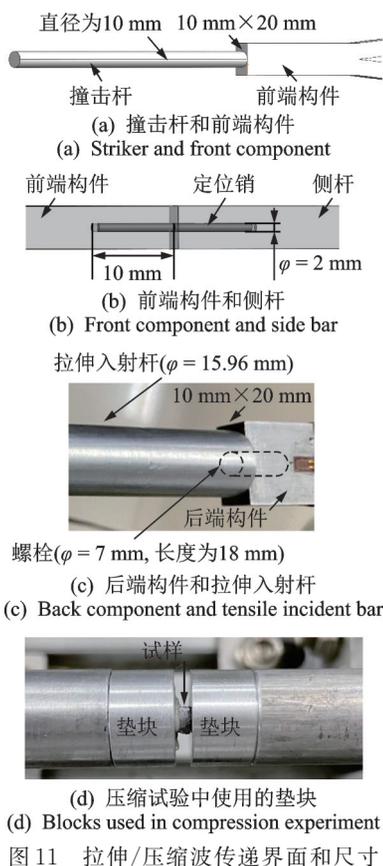


Fig.11 Tensile/compression wave transfer interfaces and dimensions

杆截面积; A_2 为前端构件截面积; v_1 为撞击杆的宏观速度。

对于本研究中使用的撞击杆和前端构件形式, 有

$$v_2 = \frac{\pi}{8 + \pi} v_1 \approx 0.282 v_1 \quad (3)$$

3.3.2 前端构件和侧杆、侧杆和后端构件

根据对前端构件和侧杆接触面上位移差 Δy 的分析, 加载过程中, 前端构件和侧杆端面会存在 0.35 mm 左右横向偏差。为了保证装配和脉冲传递时的接触质量, 在构件的接触面中心处设置深为 10 mm 、直径为 2 mm 的定位孔, 如图11(b)所示, 并使用钢制定位销进行定位。

3.3.3 后端构件和拉伸入射杆

侧杆间距 $D=60\text{ mm}$, 截面边长 $a=10\text{ mm}$, 则后端构件在 y 方向的高度为 80 mm , 而拉伸入射杆直径仅为 16 mm 。因此, 后端构件和拉伸入射杆加工成一体存在更大的加工误差, 并造成材料浪费。另外, 常用的SHTB试样为骨棒形式^[17], 通过螺纹连接到入射杆和透射杆中, 圆截面的拉伸杆更有利于试验操作, 且可以避免矩形截面对信号采集造成的影响。如图11(c)所示, 使用一端带有螺柱的圆截面直杆, 与后端构件左端面的内螺纹紧密连接。为保证截面的波阻抗相同, 拉伸入射杆的圆截面与后端构件矩形截面的面积相同。

3.3.4 进行动态压缩时使用的垫块

拉伸入射杆和拉伸透射杆端面中心存在内螺孔, 用来进行动态拉伸试验。在进行动态压缩试验时, 为避免螺孔的影响, 需要使用带有螺纹的垫块, 垫块的截面、材料与加载杆相同, 通过螺纹紧密连接到2根加载杆中, 如图11(d)所示。

本研究的装置示意图和实物图对照见图12。

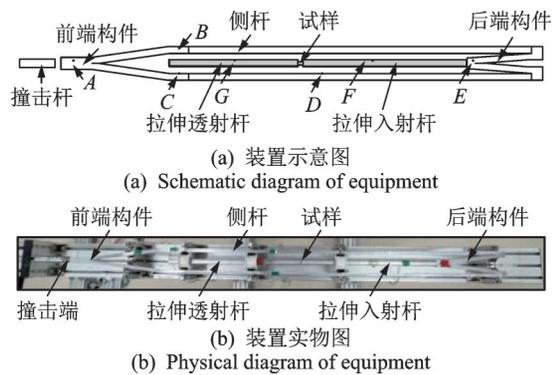


Fig.12 Schematic diagram and physical diagram of equipment

4 拉/压一体拉伸特性的可行性验证

4.1 应力脉冲在构件上的传播分析

在实际使用中,撞击杆和前端构件端面的接触可能会存在误差,撞击端的装配误差如图13所示,偏心撞击导致两侧应力不同。当两侧杆上传播的应力脉冲不同时,输入到后端法兰构件的应力不对称,会导致拉伸入射杆中存在弯矩,影响材料性能的测试结果。距离自由端均为20 mm的应变片在A、B和C处输出应变信号,比较在两侧杆上脉冲的对称性,前端构件上的应变原始信号如图14所示。撞击产生的压缩脉冲在经过前端构件传播到 L_2 段的过程中,波形几乎没有变化。通过比较B、C处的应变可知,前端构件两侧上的压缩波起止时间、幅值等相同,可认为压缩波可以对称传播到2根侧杆之中,不会在拉伸入射杆中产生额外的偏心载荷。

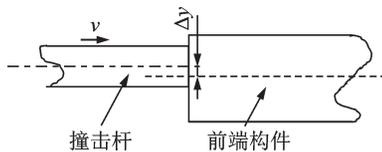


图13 撞击端的装配误差

Fig.13 Assembly error at impact end

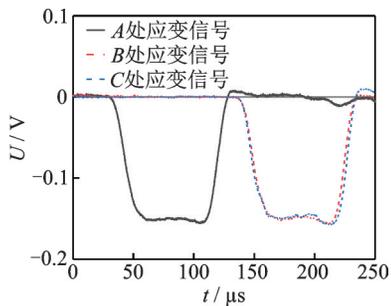
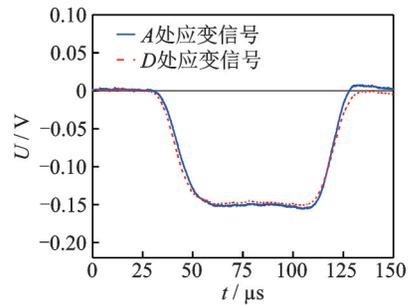


图14 前端构件上的应变原始信号

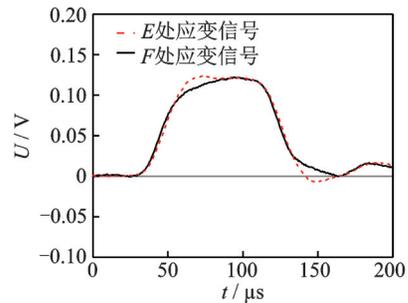
Fig.14 Original signals of front component

压缩脉冲传播时构件上采集的原始信号如图15所示。由于前端构件与侧杆存在y方向的端面位移差,使用定位销可以减小该位移差,但是此过程会引入额外的约束。分别采集图12(a)中A点与侧杆的中部位置D点的应变信号,比较脉冲在构件中过渡时的失真,输出信号见图15(a)。结果表明,进行尺寸分析优化后的前端构件可以减小应力波的传播失真,保证应力波稳定地传播到侧杆之中。同时,定位销可以提高端面配合的稳定性,不会对应力波的传播造成很大影响。

后端构件和拉伸入射杆采用图11(c)的螺纹连



(a) 前端构件上的A点和侧杆上的B点
(a) A on front component and B on side bar



(b) 后端构件上的E点和拉伸杆上的F点
(b) E on back component and F on tensile bar

图15 压缩脉冲传播时构件上采集的原始信号

Fig.15 Original signals in the process of wave propagation and transformation

接方式,拉伸加载波通过螺纹从后端构件传递到拉伸入射杆中,该传递过程存在截面的变化,因此需要分析该过渡形式对于拉伸波传播的影响。分别采集图12(a)中后端构件E点和拉伸加载杆F点的应变,输出信号见图15(b)。结果表明,应力波在波阻抗相同的截面之间过渡时,使用螺纹进行连接会导致拉伸入射波上升沿变缓,平台段存在上升趋势,但是总体的脉宽和幅值基本保持不变。

不同发射气压下前端构件和拉伸入射杆的应力如图16所示。图16(a)为前端构件A处的输入压缩波信号,图16(b)为拉伸入射杆上F点的拉伸加载波信号。当撞击杆速度加大后,接触端面y方向位移差增大,构件之间接触面可能会出现夹角,从而使拉伸加载波的平台段出现轻微抖动。在撞击杆发射速度较小时,拉伸加载波的上升沿较缓,有利于脆性材料早期应力平衡。在撞击杆发射速度较大时,平台段内的抖动也会加大,其数值约为 ± 10 MPa。整体来说,加载波仍具有较为平缓的平台段,且平台段幅值有抬高趋势。3种发射气压下,拉伸加载波的幅值均小于前端构件上的输入压缩波幅值,约为压缩波幅值的65%~70%,这与图10中对于透射杆应力输出的模拟结果相吻合。根据试验结果并结合式(3),可大致推断出拉伸加载波的应变幅值和撞击杆速度的关系,有

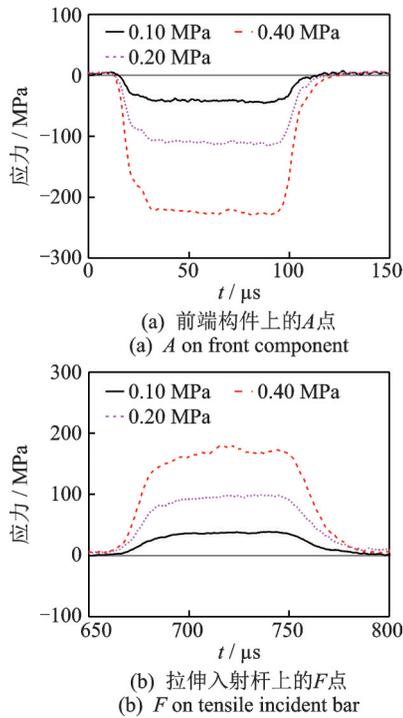


图 16 不同发射气压下前端构件和拉伸入射杆的应力
Fig.16 Stress of front component and tensile incident bar under different emission pressure

$$\epsilon_1 = \frac{\pi \rho_0 c_0 v_1}{3(8 + \pi) E} \quad (4)$$

其中: E 为杆材料的弹性模量; ϵ_1 为拉伸加载波引起杆中的应变。

4.2 材料试验验证

本研究采用铅材试样进行动态压缩验证,使用 7075 铝合金进行拉伸试验验证。试验共用一套数据采集、数据处理设备和相同的应变计,通过双应变计半桥接法,分别采集拉伸透射杆 G 处和拉伸入射杆 F 处的应变信号。动态压缩试样为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的铅材,动态拉伸试验采用的是标距段长为 2 mm 、直径为 2 mm 的骨棒状 7075 铝合金试样,存在 1 mm 倒角。2 种材料进行动态试验验证的原始信号及应力-应变曲线分别如图 17, 18 所示。结果表明,该装置可以对不同材料进行不同应变率下的动态拉伸、压缩试验,并具备满足试验要求加载的波形,验证了该试验装置的有效性。

5 结 论

1) 该装置总长为 $2\,500 \text{ mm}$,比常规的 SHPB 设备稍长。该装置包括平台支架、撞击杆、发射装置、加载杆和测试系统等,通过装卸前端构件,可分别实

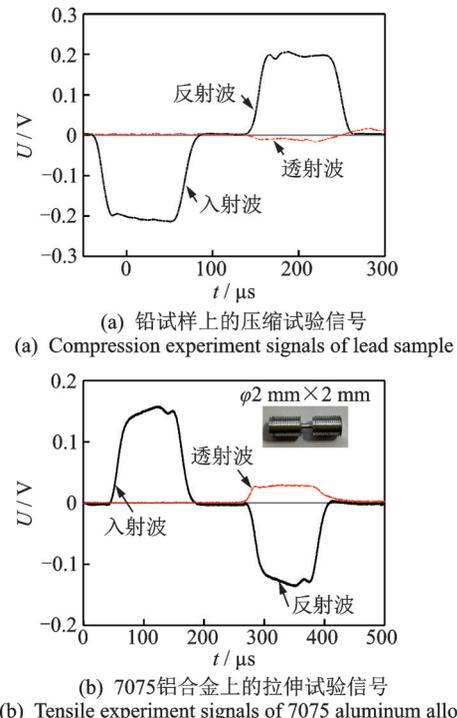


图 17 2 种材料进行动态试验验证的原始信号
Fig.17 Original signals of dynamic experiments verification of two materials

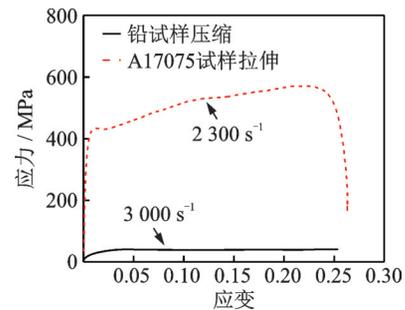


图 18 2 种材料的应力-应变曲线
Fig.18 Stress-strain curves of two materials

现材料的动态拉伸和压缩试验功能。

2) 梯形波经过 Y 型前端构件,平台段的幅值会出现前高后低的变化,并存在拉伸的拖尾应力。前端构件弯曲角度 θ 越大(Y 型的夹角)、截面尺寸越小,则弯曲导致的波形失真越小。失真程度与截面边长 a 存在负指数关系,当 $a=10 \text{ mm}$, $\theta < 10^\circ$ 或 $a=100 \text{ mm}$, $\theta < 30^\circ$ 或 $a > 10 \text{ mm}$, $\theta = 10^\circ$ 时,波形几乎无失真。 $a=10$ 或 100 mm 时,侧杆间距对应力波的传播几乎没有影响。后端构件的法兰厚度为 10 mm ,拉伸加载波幅值约为撞击产生的压缩波的 67% ,且随着法兰厚度的增加,拉伸加载波幅值略微增加。

3) 该装置产生的拉伸加载波上升沿较缓,有利于试验早期的应力平衡;平台段幅值前低后高,有利于面心立方晶格、六方最密堆积晶格和黏弹性等递

减硬化材料的恒定应变率加载。该装置可以满足不同材料、不同应变率的动态性能测试。

参 考 文 献

- [1] 郭伟国. 应力波基础简明教程[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2007:1-10.
- [2] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:1-20.
- [3] HARDING J, WOOD E O, CAMPBELL J D. Tensile testing of materials at impact rates of strain[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1960, 2:88-96.
- [4] STAAB G H, GILAT A. A direct-tension split Hopkinson bar for high strain-rate testing[J]. *Experimental Mechanics*, 1991, 31:232-235.
- [5] NEMAT-NASSER S, ISAACS J B. Direct measurement of isothermal flow stress of metals at elevated temperatures and high strain rates with application to Ta and Ta-W alloys [J]. *Acta Metallurgica*, 1997, 45: 907-919.
- [6] NEMAT-NASSER S, GUO W G, LIU M. Experimentally-based micromechanical modeling of dynamic response of molybdenum[J]. *Scripta Materialia*, 1999, 40:859-872.
- [7] CHEN X M, LIU Z W, HE G, et al. A novel integrated tension-compression design for a mini split Hopkinson bar apparatus[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(3):035114.
- [8] MANCINI E, SASSO M, ROSSI M, et al. Design of an innovative system for wave generation in direct tension-compression split Hopkinson bar[J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2015, 1:201-213.
- [9] KADHANE S H, WARHATKAR H N. Design and development of an integrated compressive-tensile polymeric split Hopkinson pressure bar setup[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 173:702-709.
- [10] CADONI E, SOLOMOS G, ALBERTINI C. Mechanical characterisation of concrete in tension and compression at high strain rate using a modified Hopkinson bar [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2019, 4(61):221-230.
- [11] 陈柏生, 肖岩. Hopkinson 拉压一体杆实验设备的研制 [C]//第六届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. [S.l.]:中国力学学会爆炸力学实验技术专业组, 2014:110-113.
- [12] 王鹏飞, 罗斌强, 胡时胜. 套管式冲击拉伸实验装置的研制[J]. *实验力学*, 2009, 24(6):513-518.
- WANG Pengfei, LUO Bingqiang, HU Shisheng. Development of the casing type impact tension experimental device[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(6):513-518. (in Chinese)
- [13] WANG J J, GUO W G, GAO X S, 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.
- [14] WANG J J, GUO W G, SU Y, et al. Anomalous behaviors of a single-crystal Nickel-base superalloy over a wide range of temperatures and strain rates[J]. *Mechanics of Materials*, 2016, 94:79-90.
- [15] ZHANG B, WANG Y. Tensile behavior of Ti-5Al-2.5 Sn alloy at low temperatures and high strain rates[C]// *Key Engineering Materials*. [S. l.]: Trans Tech Publications Ltd, 2019, 794:135-141.
- [16] WANG Y, ZHOU Y X, XIA Y M. A constitutive description of tensile behavior for brass over a wide range of strain rates [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 372:186-190.
- [17] 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-4 V[J]. *Materials Characterization*, 2018, 140:15-29.
- [18] WALSH S J, WHITE R G. Vibrational power transmission in curved beams[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 233:455-488.
- [19] WU C M, LUNDBERG B. Efficiency of percussive drilling of rock with a bent drill rod [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(6):735-747.
- [20] WU C M, LUNDBERG B. Reflection and transmission of the energy of harmonic elastic waves in a bent bar [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 190(4):645-659.
- [21] BECCU R, WU C M, LUNDBERG B. Reflection and transmission of the energy of transient elastic extensional waves in a bent bar [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 191(2):261-272.



第一作者简介:王凡,男,1995年12月生。硕士生。主要研究方向为动态测试技术及动态破坏。
E-mail:15991723214@163.com