

DOI: 10.11883/bzycj-2025-0243

# 基于电磁 Hopkinson 杆系统的恒应力比动态拉伸/压缩-扭转复合试验装置及方法\*

杜冰, 岳一凡, 刘震, 丁翼, 王维斌, 刘琛琳, 郭亚洲, 李玉龙  
(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 为解决材料动态复合加载过程中实现稳定应力比的难题, 基于电磁 Hopkinson 杆 (electromagnetic Hopkinson bar, ESHB) 平台开发了一种新型装置, 实现了单边同步动态拉/压-扭复合加载。阐述了装置的构型与加载原理, 该装置可以独立产生梯形拉伸/压缩应力波和扭转应力波。通过精度达  $0.1 \mu\text{s}$  的数字延时发生器确保了加载的同步性, 可将不同类型波到达试样的时间差控制在  $5 \mu\text{s}$  内, 克服了波速不同带来的挑战。此外, 还分析了同步控制方法及波的传播历程。为验证该装置, 对 CoCrFeMnNi 高熵合金试样进行了动态拉-扭实验。实验结果证明了该装置的高可靠性和有效性, 加载过程中可以实现试样达到约 1.7 的稳定应力比。更重要的是, 实验证明梯形波加载能显著提升动态复合加载中的应力比稳定性, 效果远超正弦波加载。该实验方法使研究材料在复杂应力状态 (高应变率、多轴加载) 下的动态力学响应成为可能, 稳定应力比加载的成功实现, 为精准表征动态多轴条件下材料的屈服准则与失效机制开辟了新途径。

**关键词:** 电磁 Hopkinson 杆; 动态加载; 多轴加载; 恒定应力比

中图分类号: O347.3 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

## Constant stress-ratio dynamic tension/compression-torsion testing device and method based on electromagnetic Hopkinson bar system

DU Bing, YUE Yifan, LIU Zhen, DING Yi, WANG Weibin, LIU Chenlin, GUO Yazhou, LI Yulong  
(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

**Abstract:** In the field of material dynamic mechanical properties research, it is significant to obtain reliable data of materials under complex stress states. To address the challenge of achieving a stable stress ratio during combined loading, this work developed a novel device based on the electromagnetic Hopkinson bar (ESHB) platform. This device uniquely enables unilateral synchronous tension/compression-torsion combined dynamic loading. The paper detailed the device's configuration and loading principles. The core innovation of this device is the independent generation of trapezoidal tensile/compressive and torsional stress waves. A multi-circuit pulse shaper produced tensile/compressive waves, while shear waves were generated using an electromagnetic clamp with torque storage. Crucially, a high-precision digital delay generator (DDG) ensured wave synchronization. With triggering accuracy within  $0.1 \mu\text{s}$ , it controlled the arrival time difference of these distinct waves at the specimen to within  $5 \mu\text{s}$ . This overcame the challenge posed by their different propagation velocities. Additionally, it described the synchronization control methodology and the wave propagation analysis essential for timing calculations. To validate the apparatus, dynamic tension-torsion experiments were conducted on CoCrFeMnNi high-entropy alloy specimens. The results show that the device is highly reliable and effective. It successfully achieved a stable stress ratio of approximately 1.7

\* 收稿日期: 2025-08-10; 修回日期: 2025-11-04

基金项目: 国家重大科技专项 (J2019-VIII-008-0169); 国家自然科学基金 (U2241274, 12261131505); 高等学校学科创新引智计划 (BP0719007)

第一作者: 杜冰 (1996—), 男, 博士研究生, [daniel\\_dubing@mail.nwpu.edu.cn](mailto:daniel_dubing@mail.nwpu.edu.cn)

通信作者: 李玉龙 (1961—), 男, 博士, 教授, [liyulong@nwpu.edu.cn](mailto:liyulong@nwpu.edu.cn)

throughout the loading duration. Furthermore, the experiments conclusively showed a key finding. Trapezoidal wave loading significantly enhances stress-ratio stability during combined dynamic loading. This improvement contrasts with the effect of traditional sinusoidal wave loading. This advancement offers a robust and controllable experimental method. It enables the study of materials' dynamic mechanical responses under complex stress states. These states involve high-strain rates and multiaxial loading. This capability is especially valuable for aerospace, impact engineering, and materials science applications. The successful implementation of constant stress-ratio loading opens avenues for more accurate characterization of material yield criteria and failure mechanisms under dynamic multiaxial conditions.

**Keywords:** electromagnetic Hopkinson bar; dynamic loading; multiaxial loading; constant stress-ratio

霍普金森杆技术被广泛用于测试材料高应变率下的一维应力状态响应,包括拉伸<sup>[1]</sup>、压缩<sup>[2-3]</sup>和扭转<sup>[4]</sup>等。该技术的提出和发展经历了较长的历史,并最终由 Kolsky<sup>[5]</sup>设计定型为今天经典的分离式 Hopkinson 杆 (split Hopkinson bar, SHB) 模式。SHB 装置包括分离的入射杆和透射杆,实验时试样放置在两杆中间,并由撞击杆产生的拉伸/压缩波对试样进行加载,通过入射和透射杆上的应变信号,可以计算得到试样的应力-应变响应。目前,霍普金森杆技术已被广泛用于测定材料在高应变率 ( $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ ) 下的动态力学性能<sup>[6]</sup>。在霍普金森杆实验技术的发展过程中,有许多学者<sup>[7-12]</sup>对该技术的创新与发展做出了重要贡献,不仅优化了设备结构,也拓展了其应用范围。分离式 Hopkinson 扭杆 (split Hopkinson torsion bar, SHT<sub>or</sub>B) 被设计用来测定材料一维应力状态动态剪切力学响应的实验装置,其基本设计与 SHB 装置类似,区别在于经典的 SHT<sub>or</sub>B 采用储能-释放的方式<sup>[13]</sup>产生扭转波。Hopkinson 扭杆是一种能有效测定材料动态剪切力学性能的实验装置,众多研究者对高应变率剪切试验进行了大量探索与实践<sup>[14-18]</sup>。在动态剪切实验中, Hopkinson 扭杆试验技术相对比较复杂,对设备要求较高,其中加载装置和夹具对试验装置有很大影响。加载装置主要提供稳定可靠的扭矩,夹具不仅要能够起到夹紧的作用,而且还要能够在短时间内释放扭矩,这也导致了目前高应变率剪切试验技术发展较为缓慢。

上述 Hopkinson 拉/压/扭杆装置,共同构成了 SHB 系统。基于该系统, Huang 等<sup>[19]</sup>提出了一种可以对薄壁圆筒试样进行压缩-扭转耦合加载的实验装置,该装置通过在储能段同时储存压缩与扭转两种能量并瞬间释放,可在入射杆中同步产生压缩与扭转两列应力波,并对试样进行耦合加载以获得动态复合响应。然而,需要注意的是,该装置存在如下缺点:由于拉伸/压缩和扭转波是同时释放的,且释放位置相同,这使得两列应力波实际从同一起点同时向试样传播加载,由于纵波(压缩波)与剪切波(扭转波)的波速存在固有差异<sup>[20]</sup>,二者无法同时到达试样端面,因此难以实现理想的同步耦合加载。

李玉龙等<sup>[21]</sup>提出了一种基于电磁能量装置转换技术开发的电磁力转化为应力波的实验装置,即电磁霍普金森杆实验装置 (electromagnetic split Hopkinson bar, ESHB)。该装置不仅具备传统霍普金森杆的全部功能,在同步性与可控性方面亦有显著提升,能够对试样进行多轴同步动态加载<sup>[22]</sup>。其基本原理是,通过电路控制供电电路向电容器供电后,放电瞬间脉冲电流向主线圈供电,主线圈与次级线圈之间产生应力波,应力波沿与次级线圈贴紧的波导杆传播,完成对试样的加载。其主要的技术原理和成果见文献<sup>[10, 21]</sup>。在此基础上,研究人员进一步拓展其应用, Liu 等<sup>[23]</sup>针对传统霍普金森扭杆实验技术的一些弊端,开发出了电磁霍普金森扭杆 (electromagnetic Hopkinson torsion bar, ESHT<sub>or</sub>B) 实验装置。该装置的应力波发生原理与传统的霍普金森扭杆类似,均为储能式霍普金森扭杆。实验前,夹持装置夹紧波导杆,通过扭矩机转动波导杆的储能段,使得储能段预存一定的内能。实验时,夹持装置瞬间释放,应力波从储能段产生并沿波导杆传播,对试样进行加载。电磁霍普金森扭杆有别于传统霍普金森扭杆的特点在于,采用电磁解锁装置替代了原有的销钉解锁-加持装置,使用高强度弹簧为加持装置提供预紧力。其核心改进在于采用电磁解锁装置替代了传统的机械销钉。该装置利用通电主、次级线圈间产生的巨大电磁斥力瞬间推开夹持装置,大幅提升了装置的控制性能,实现了剪切波的按需生成与精确控制。前述的 ESHT<sub>or</sub>B 装置可以配合 ESHB 装置,构成电磁霍普金森拉/压-扭杆 (ESHT/P-T<sub>or</sub>B) 系统,实现材料的动态拉伸/压缩-扭转同步复合加载,具体内容见文献<sup>[23-24]</sup>。需要指出的是,在该装置开发初期, ESHB 平台

产生的拉伸/压缩波为正弦波, 而扭转波为梯形波。尽管能实现同步加载, 但 2 种波形的形态差异使其难以形成有效的比例加载, 从而导致试样在复合响应中的应力比不够稳定。而应力比不稳定会使得获取的材料在复杂应力状态下的力学性能数据出现偏差, 无法准确反映材料的真实性能, 影响对材料动态响应的研究分析。Wang 等<sup>[25]</sup> 基于 ESHB 平台和傅里叶变换的原理, 创造性地提出了一种波形叠加方案, 并成功开发出了基于 ESHB 平台的梯形应力波装置, 该装置可以产生梯形拉伸/压缩应力波, 这为获得稳定应力比的目标提供了一种解决方案。

基于 ESHB 平台, 开发一种可实现单侧同步拉伸/压缩-扭转复合加载的电磁 Hopkinson 杆装置。该装置能够在试样受载过程中实现稳定的应力比, 为研究材料在复杂应力状态下的动态响应提供更清晰、直观的特征手段。

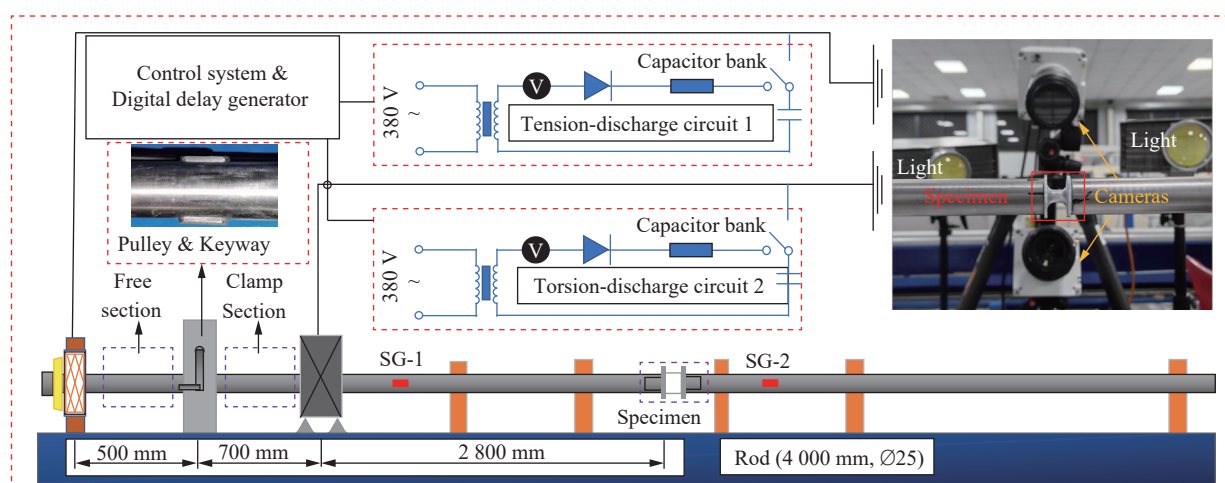
## 1 电磁霍普金森杆装置

本文提出的复合加载装置是基于电磁霍普金森杆系统进行的二次开发。该系统经历了多轮改进和优化, Nie 等<sup>[21]</sup> 奠定了 ESHB 装置的基础; Liu 等<sup>[23]</sup> 在此基础上研制出电磁霍普金森扭杆 (electromagnetic Hopkinson torsion bar, ESHT<sub>o</sub>B), 并进一步集成为电磁霍普金森拉-扭杆 (electromagnetic Hopkinson tension-torsion bar, ESHT-T<sub>o</sub>B), 拓展了装置的拉-扭复合加载能力; Wang 等<sup>[25]</sup> 则基于傅里叶叠加原理, 在 ESHB 平台上实现了梯形拉伸/压缩应力波, 为获得稳定应力比提供了关键技术支撑。

### 1.1 动态拉伸/压缩-扭转联合加载电磁霍普金森杆

在电磁霍普金森杆技术的发展过程中, Liu 等<sup>[23]</sup> 与 Huang 等<sup>[19]</sup> 提出的加载方案颇具代表性。Liu 等<sup>[23]</sup> 的方案采用双侧分别加载实现拉/压-扭复合加载。使用 2 根分离的波导杆, 一根主要传递拉/压入射波, 另一根则主要传递扭转波。由于固体介质中的纵波与剪切波传播相互独立<sup>[20]</sup>, 负责传递扭转波的波导杆也可同时承担拉/压透射波的传递。通过精确的延时控制, 可确保 2 种载荷同时到达试样, 从而实现复合加载。与之不同, Huang 等<sup>[19]</sup> 提出了一种单侧同步产生压缩与扭转波的方案, 但受限于拉伸波与扭转波的波速差异, 二者无法真正实现同步加载。

本文中提出一种基于电磁霍普金森杆的动态同步拉/压-扭复合加载实验装置, 其结构如图 1 所示, 主要包括充放电电路、应力波发生器、扭矩机、电磁解锁装置、波导杆及数据采集系统等。本装置的核心特点是能分别通过独立的子系统产生梯形应力波, 拉伸/压缩梯形波由应力波发生器产生, 而扭转梯形波则由电磁扭转系统产生。通过高精度延时控制系统, 可将 2 种应力波到达试样的时间差控制在  $5 \mu\text{s}$  以内。基于一维应力波理论<sup>[20]</sup>, 通过精确计算并设计扭转系统的位置与延迟时间, 可确保 2 种应力波同步作用于试样, 实现真正的动态同步拉/压-扭复合加载。如图 1(a) 所示, 在应力波发生器与



(a) Schematic of the device

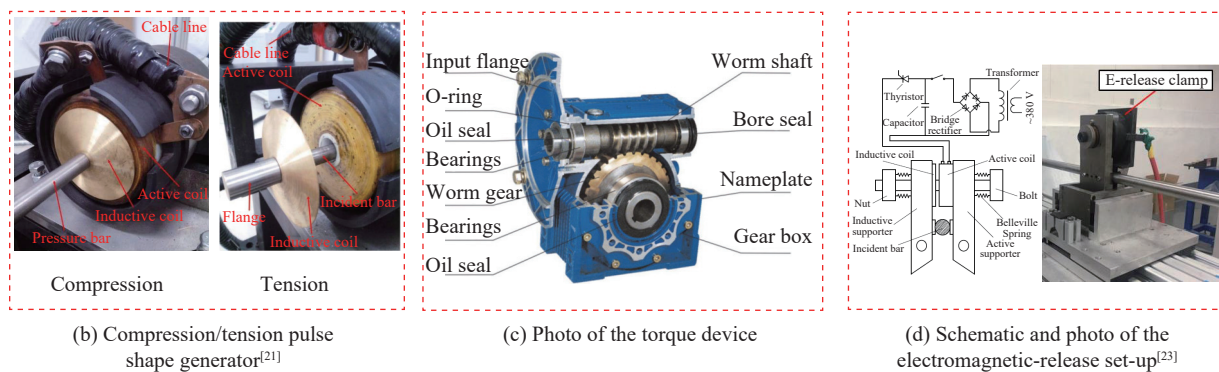


图 1 电磁霍普金森拉/压-扭杆

Fig. 1 Electromagnetic Hopkinson tension/compression-torsion bar (ESHT/C-T<sub>or</sub>B).

扭矩机之间的为波导杆的自由段, 拉伸/压缩波由应力波发生器<sup>[21]</sup>产生。如图 1(b) 所示, 波导杆贯穿扭矩机并与应力波发生器连接, 由此可产生脉宽与幅值均可精准调控的拉/压梯形波。该梯形波沿波导杆传播并对试样进行加载, 其具体生成原理将在下文中详述。装置的扭转波由图 1(c) 中的扭矩机、图 1(d) 中的电磁解锁装置与波导杆的夹持段(位于扭矩机与解锁装置之间)协同产生。其基本工作原理与传统储能式霍普金森扭杆相似<sup>[13]</sup>, 但电磁释放机构显著提升了控制的精确性与实验的重复性<sup>[23]</sup>。具体过程为: 扭矩机通过波导杆上的金属键施加扭矩, 同时电磁解锁机构锁紧波导杆的夹持端, 从而在夹持段储存扭转势能。系统接收到触发信号后, 解锁机构迅速张开, 释放储存的势能, 产生扭转波并使其沿波导杆传播至试样。基于上述设计, 入射杆可分别产生并传递拉/压波与扭转波, 使其共同对试样进行复合加载。通过处理粘贴在波导杆表面的应变片所采集的信号, 即可获得试样的应力-应变响应。

## 1.2 拉伸/压缩梯形波形成原理

在 Liu 等<sup>[23]</sup>的研究中, 拉伸/压缩加载采用的是 ESHB 系统中经典的正弦应力波。然而, 由于正弦波在动态加载过程中难以维持稳定的拉/压-扭应力比例, 导致材料的力学响应可能出现偏离预期的行为。为解决该问题, Wang 等<sup>[25]</sup>提出了一种基于多电路连续放电的改进装置, 该装置通过构建多个 RLC 充放电电路, 并采用延时触发与顺序放电策略, 基于傅里叶变换原理, 将 ESHB 系统中先后产生的多个半正弦应力波合成为一个双线性波(如梯形波)。相比于传统正弦波加载, 这种梯形波加载方式能够有效提升复合加载过程中应力比例的稳定性, 从而更准确地表征材料在复杂动态载荷下的力学行为。

## 1.3 同步加载方案与波传播分析

装置的电路系统由拉伸/压缩电路、扭转电路及同步控制系统组成, 其结构如图 2 所示, 其中  $L_a$ ,  $C$  和  $R$  分别为 RLC 电路的电感, 电容和电阻,  $I$  是电路中的电流,  $t_0$  和  $t$  分别为初始触发时刻和延迟时间, 拉伸/压缩梯形波由应力波发生器电路产生。扭转波由扭矩机-夹持段-电磁解锁装置构成的电路系统共同产生, 其工作机制可参考文献 [23]。拉伸/压缩波的脉宽与幅值分别由电路中的电容值与充电电压控制, 而扭转波的脉宽取决于夹持段的长度, 其幅值由夹持段预存的扭矩大小决定。此外, 电磁解锁机构的动作速度决定了扭转波上升沿的宽度, 而该速度受其驱动电路的电容值和电压值调控。基于电磁霍普金森杆的基本原理<sup>[21]</sup>, 各电路在完成储能后, 一旦接收到触发信号即可迅速放电并产生相应应力波。本装置采用数字延时发生器来产生高精度触发信号, 该器件可按预设时序依次触发不同电路, 使装置生成所需的应力波, 其时间控制精度优于  $0.1 \mu\text{s}$ 。下面重点分析如何协调上述两列应力波, 以实现其对试样的同步加载。

根据应力波理论<sup>[20]</sup>, 波导杆中的压缩/拉伸波波速  $v_c$  和扭转波波速  $v_s$  分别为:

$$v_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

式中:  $E$  和  $G$  分别为材料的弹性模量和剪切模量,  $\rho$  为材料密度。

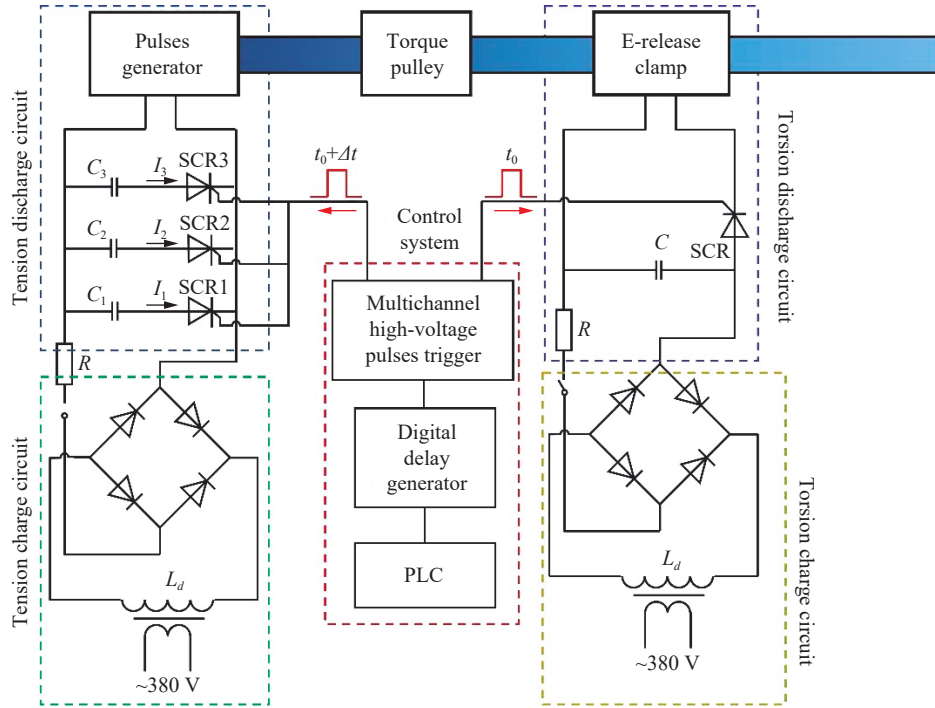


图 2 电路同步方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the synchronized method in T-Tor SHB

根据材料力学理论<sup>[26]</sup>,  $E$  和  $G$  满足如下关系:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

式中:  $\nu$  为材料的泊松比, 本文中取  $\nu = 0.33$ 。

将上述三式联立, 可得:

$$v_e \approx 1.631v_s \quad (4)$$

下面基于 1.1 节中的布置方案, 进行波传播分析。

如图 3 所示, 压缩/拉伸波由应力波发生器产生, 而扭转波在解锁装置处产生, 控制系统中的延时发生器被用于协调两列波抵达试样的时间, 拉伸/压缩波抵达试样所需的时间  $t_1$  为:

$$t_1 = \frac{L}{v_e} \quad (5)$$

式中:  $L$  为波导杆的总长度。

扭转波到达试样的时间为:

$$t_2 = \frac{(L - L_1 - L_2)}{v_s} \quad (6)$$

式中:  $L_1$  和  $L_2$  分别为自由段和夹持段的长度。

需要指出的是, 电磁解锁装置处于夹紧状态时, 其效果类似于刚性壁, 会同时影响弹性波和扭转波的传播, 因此, 波开始传播解锁装置需要处于释放状态。另一方面, 扭转波的产生也依靠解锁装置的瞬间释放。

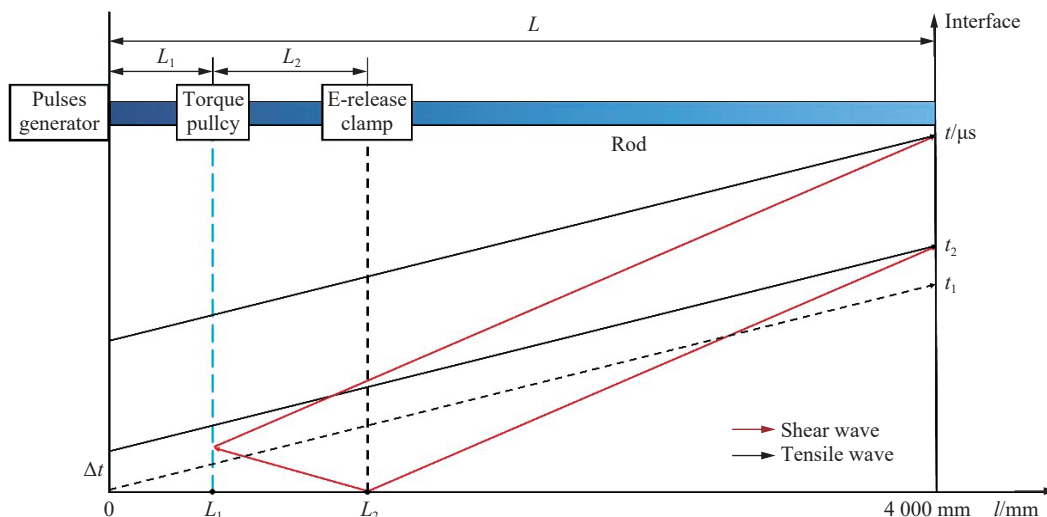


图3 拉伸/压缩波和扭转波的波传播时间-历程关系图

Fig. 3 Time-distance diagram of wave propagation for both tensile/compressive stress wave and torsional stress wave

综上所述,如图3所示,  $t_1$  与  $t_2$  之间存在如下关系。

当  $t_1 = t_2$  时,结合式(5)~(6)可得:

$$\frac{L}{v_e} = \frac{(L - L_1 - L_2)}{v_s} \quad (7)$$

将式(4)代入式(7),可得:

$$0.384L = L_1 + L_2 \quad (8)$$

这就说明,当  $t_1 = t_2$  时,整个加载段,即自由段和夹持段需要占波导杆总长度的约40%。此时,如果自由段和夹持段相比整个装置过长,即:

$$0.384L > L_1 + L_2 \quad (9)$$

$$t_1 < t_2 \quad (10)$$

此时,为保证两列加载波仍然能同时抵达试样,对拉伸/压缩波延时  $\Delta t$  同样可以实现两列加载波同时抵达试样:

$$\Delta t = \frac{(L - L_1 - L_1)}{v_s} - \frac{L}{v_e} = \frac{0.384L - L_1 - L_2}{v_s} \quad (11)$$

本文中使用的波导杆为TC4钛合金杆,其弹性波波速  $v_{\text{elastic}} = 4961$  m/s,剪切波波速  $v_{\text{shear}} = 3041$  m/s,波导杆长度  $L = 4000$  mm。拉伸-扭转实验条件下,设置  $L_1 = 500$  mm,  $L_2 = 800$  mm,此时  $\Delta t \approx 77.6$   $\mu\text{s}$ 。如此设置后,就可以使得弹性波和扭转波同时抵达试样端。

此外,该装置具备高度的参数灵活性,可根据具体实验需求对各关键参数进行独立调节。应力波在入射杆中的传播过程如图3所示。通过精确设定延迟时间  $\Delta t$ ,可确保原本相互独立的拉伸/压缩波与扭转波同步抵达试样,实现对试样的同步起载。进一步,通过分别设定两种应力波的脉宽,能够保证在试样的整个变形过程中,动态拉伸/压缩与扭转加载持续同步进行,从而获得稳定的复合应力状态。

## 2 材料与实验方法

### 2.1 材料与试样

实验选用CoCrFeMnNi高熵合金作为测试对象,其材料组分如表1所示,具体的材料制备过程等参考文献[27],本实验设定为测试其动态加载下拉伸-扭转的联合响应。

实验采用前文中介绍的动态拉伸-扭转联合装置进行,使用两根直径 25 mm 的 TC4 钛合金杆作为波导杆,两根杆的长度均为 4000 mm。波导杆的弹性模量为 110 GPa。试样形状和尺寸如图 4 所示<sup>[28]</sup>,采用螺纹连接的方式与波导杆连接。通过对称粘贴在波导杆上的应变片测定实验所需的应变信号。拉伸条件下使用单向应变片和半桥电路进行拉伸变形的测量,而扭转条件下则使用 $\pm 45^\circ$ 的应变花配合全桥电路进行测量<sup>[23]</sup>。

表 1 高熵合金组分

Table 1 Chemical compositions of the HEAs

元素	摩尔比/%
Cr	19.91 ± 0.11
Mn	20.07 ± 0.13
Fe	19.91 ± 0.13
Co	20.29 ± 0.15
Ni	19.81 ± 0.15

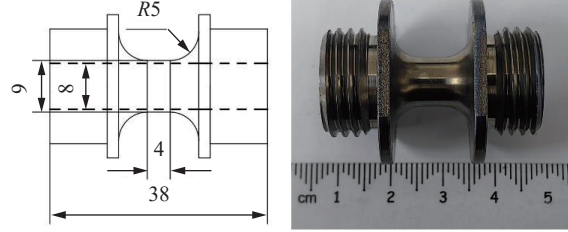


图 4 试样的几何尺寸和实物图(单位: mm)

Fig. 4 Geometry and photo of the specimens (unit: mm)

为了保证实验结果的可靠性,每组实验均保证重复 3 次。所有实验均使用高速摄像机记录试样的变形过程,相机帧率设置为  $10^5 \text{ s}^{-1}$ ,分辨率为  $320 \times 240$ 。在试样标距段均匀布置散斑,采用三维数字图像相关(three dimensional digital image correlation, 3D-DIC)技术对试样变形进行分析,用于修正试样的应变:

$$\varepsilon_{\text{DIC}}(t) = k\varepsilon_{\text{exp}}(t) \quad (12)$$

式中:  $\varepsilon_{\text{DIC}}(t)$  和  $\varepsilon_{\text{exp}}(t)$  分别为采用 DIC 和实验结果计算得到的应变,  $k$  为平均应变修正系数。

## 2.2 波形分析

动态拉伸-扭转复合加载实验所获得的原始波形如图 5 所示。与第 1.3 节中的理论分析相符,尽管拉伸波与扭转波在产生时存在一定的时间差,但通过精确设置的延时控制,两者能够同时抵达试样并实现同步加载。从原始波形中可清晰辨识拉伸与扭转加载过程中的入射波、反射波及透射波。基于一维应力波理论对这些信号进行处理和计算,即可得到试样在动态拉-扭复合载荷下的应力-应变响应。

如图 6 所示,实验中产生的拉伸波与扭转波均呈现为幅值可调的梯形波,这与第 1.1 节设计的加载方案相符。本文中采用 3 组电容值均为 2 mF 的 RLC 电路来产生拉伸/压缩波。通过分别设置各组电路的充电电压与放电延时,可生成脉宽相同而幅值不同的拉伸/压缩梯形波,结果如图 6(a) 所示。扭转波则源于夹持段所储扭矩的瞬间释放。实验中通过改变预存扭矩的大小与电磁解锁时的放电电压,可有效调节扭转波的幅值,如图 6(b) 所示。

根据一维应力波理论<sup>[20]</sup>,由于拉伸/压缩波和扭转波在传播过程中互不影响,因此,拉伸/压缩和扭转加载中试样的应力、应变和应变率曲线可以由下式计算得到。

动态拉伸/压缩时的数据处理方法:

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{c_b}{l_s} \dot{\varepsilon}_r \quad (13)$$

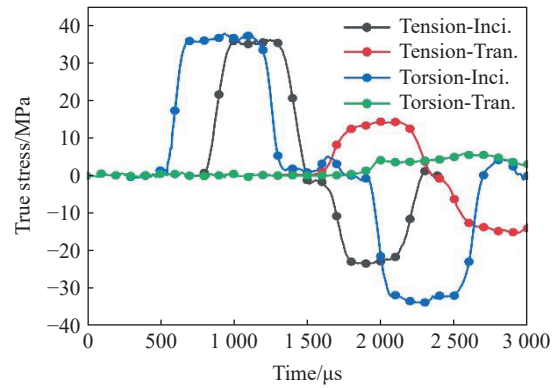


图 5 动态同步拉伸-扭转联合加载的典型信号

Fig. 5 Typical signals of combined dynamic tension-torsion loading

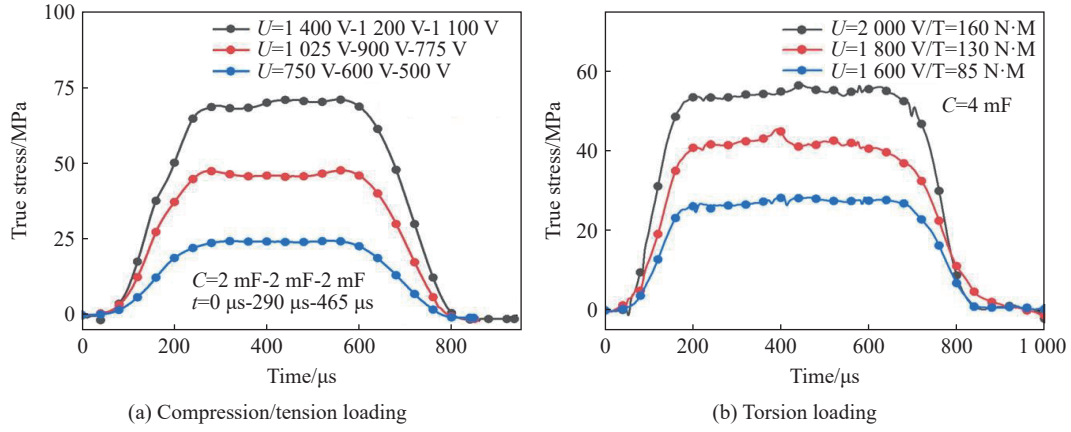


图 6 不同加载条件下加载波的时间-应力曲线

Fig. 6 Stress-time curves of loading wave with respect to different loading conditions

$$\varepsilon_s = \frac{c_b}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (14)$$

$$\sigma_s = \frac{A_b}{A_s} E_b \varepsilon_t \quad (15)$$

式中:  $\varepsilon_r$  和  $\varepsilon_t$  分别为左右两侧波导杆上拉伸应变片测得的反射与透射应变信号,  $t$  为入射波脉宽,  $c_b$  和  $E_b$  分别是波导杆的弹性波速与弹性模量,  $A_b$  为波导杆截面积,  $A_s$  和  $l_s$  分别为试样标距段的截面积与长度。

动态扭转时的数据处理方法:

$$\dot{\gamma}_s = \frac{2r_s c_s}{r_b l_s} \gamma_r \quad (16)$$

$$\gamma_s = \frac{2r_s c_s}{r_b l_s} \int_0^t \gamma_r dt \quad (17)$$

$$\tau_s = \frac{r_s J_b G_b}{r_b J_s} \gamma_t \quad (18)$$

式中:  $\gamma_r$  和  $\gamma_t$  分别为左右两侧波导杆上扭转应变片测得的反射与透射应变信号,  $c_s$  为波导杆的剪切波波速,  $G_b$  为波导杆材料的剪切模量,  $J_b$  为波导杆的截面极惯性矩,  $r_b$  波导杆半径,  $r_s$  和  $l_s$  分别为试样标距段的中径与长度,  $J_s$  为试样标距段的截面极惯性矩。

根据塑性力学理论<sup>[29]</sup>, 试样上的应力比  $C$  被定义为等效拉伸应力和等效扭转应力的比值, 由下式计算得到:

$$C = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}\tau_s} \quad (19)$$

对于本文所研究的对象, 试样在拉伸/压缩-扭转耦合加载时的等效应力  $\bar{\sigma}_s$  和等效应变  $\bar{\varepsilon}_s$ <sup>[29]</sup> 为:

$$\bar{\sigma}_s = \sqrt{\sigma_s^2 + 3\tau_s^2} \quad (20)$$

$$\bar{\varepsilon}_s = \sqrt{\varepsilon_s^2 + \frac{1}{3}\gamma_s^2} \quad (21)$$

根据应力波理论<sup>[20]</sup>, 当入射杆和透射杆的界面上应力相等, 则试样达到应力平衡。如图 7 所示, 拉伸和扭转实验在材料进入塑性后, 其应力平衡参数  $R(t)$  均保持在  $\pm 5\%$  内, 因此, 可以证明实验过程是应力平衡的, 实验方法和装置可靠。

$$R(t) = \frac{|\sigma_i(t) - \sigma_r(t) - \sigma_t(t)|}{[\sigma_i(t) - \sigma_r(t) + \sigma_t(t)]/2} \times 100\% \quad (22)$$

式中:  $\sigma_i(t)$ 、 $\sigma_r(t)$  和  $\sigma_t(t)$  为波导杆上获得的入射、反射和透射应力波信号。

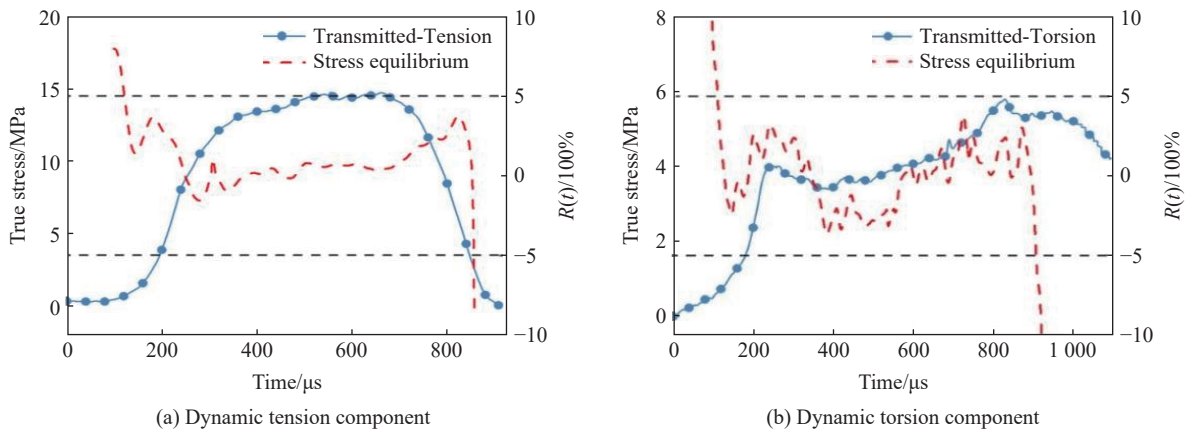


图 7 动态同步拉伸-扭转联合加载的应力平衡性分析

Fig. 7 Stress equilibrium analysis of combined dynamic tension-torsion loading

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 力学响应

以 CoCrFeMnNi 高熵合金为研究对象, 其在动态拉伸-扭转复合加载下的应力-应变响应如图 8 所

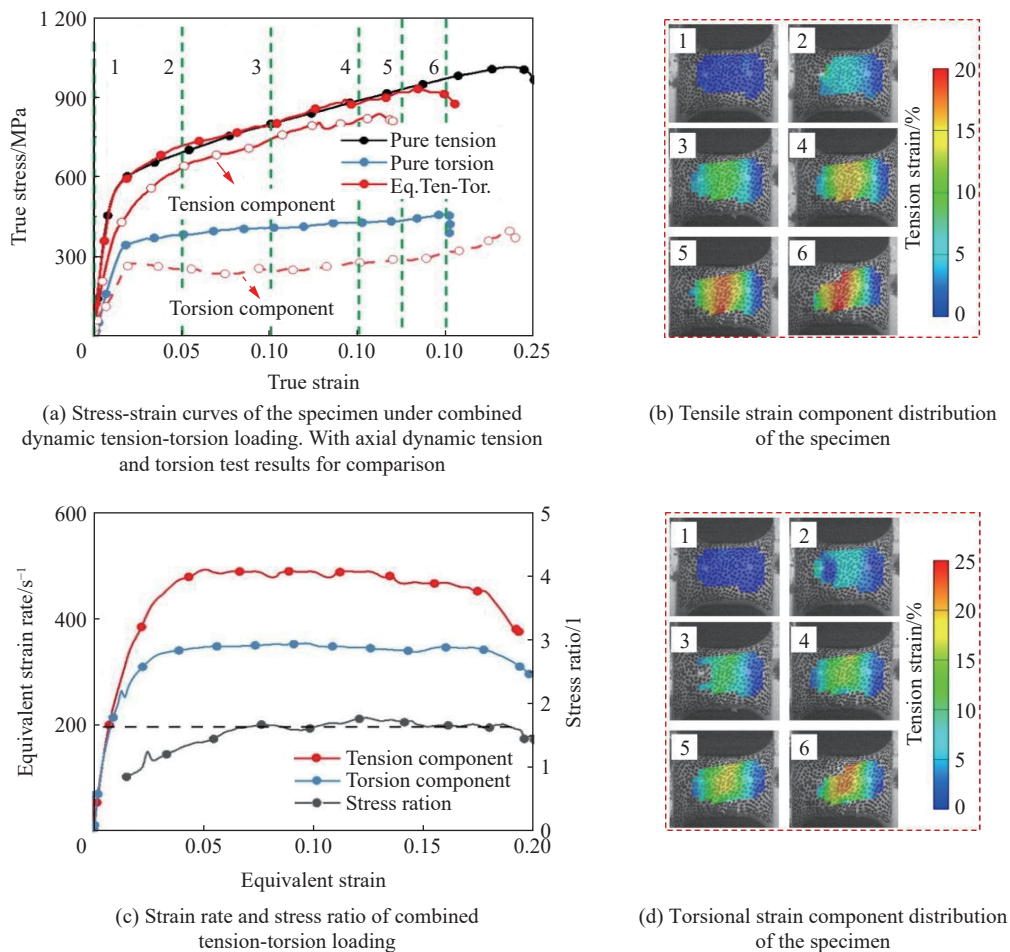


图 8 应力比  $C = 1.7$  时的典型拉伸-扭转实验结果

Fig. 8 Typical tension-torsion experimental results with the stress ratio of 1.7

示。在等效应变率为  $500 \text{ s}^{-1}$  的加载条件下, 经 DIC 校正后的试样等效应力-应变曲线如图 8 (a) 所示, 图中同时给出了拉伸与扭转方向的应力-应变分量。作为对比, 试样在动态纯拉伸与纯扭转作用下的应力-应变响应也一并呈现。从图 8 (c) 可以看出, 试样在拉伸与扭转分量上所对应的等效应变率分别稳定保持在约  $500$  和  $350 \text{ s}^{-1}$ , 表明在整个加载过程中应变率基本恒定。根据式 (19) 计算得到的拉-扭应力比约为  $1.7$ , 且该比值在变形过程中基本保持稳定, 说明本装置能够实现较为稳定的应力比加载。图 8 (b)、(d) 分别展示了拉伸与扭转方向对应的 DIC 应变分布结果, 可见试样变形主要集中于标距段, 并表现出梯度分布特征。此外, 本装置亦可用于动态单轴拉伸或单轴扭转实验。由于此类实验方法已属成熟技术<sup>[6-7, 10]</sup>, 因此此处不再展开讨论。

### 3.2 加载同步性分析

在拉伸/压缩-扭转复合加载实验中, 加载同步性对实验结果的准确性至关重要。如 1.3 节所述, 根据式 (11) 可计算出由应力波发生器产生的拉伸波与电磁解锁机构产生的扭转波分别到达试样所需的时间差  $\Delta t = 76 \mu\text{s}$ 。该时间差源于拉伸波与扭转波在装置中产生位置的不同以及二者传播速度的差异。需要说明的是, 拉伸应变片与扭转应变片在波导杆上的粘贴位置距杆端的距离分别为  $2100$ 、 $2000 \text{ mm}$ 。因此, 在拉伸波延时  $\Delta t$  的基础上, 结合式 (5)~(6), 可进一步精确计算得到拉伸波与扭转波到达各自应变片的时间, 分别为  $t_1 = 459 \mu\text{s}$  与  $t_2 = 230 \mu\text{s}$ 。基于上述时间参数, 对图 9 (a) 中的原始入射波形进行平移处理, 平移后的结果如图 9 (b) 所示。可以看出, 在将波形平移  $230 \mu\text{s}$  后, 两列入射波的上升沿基本对齐, 表明加载过程具有较好的同步性。

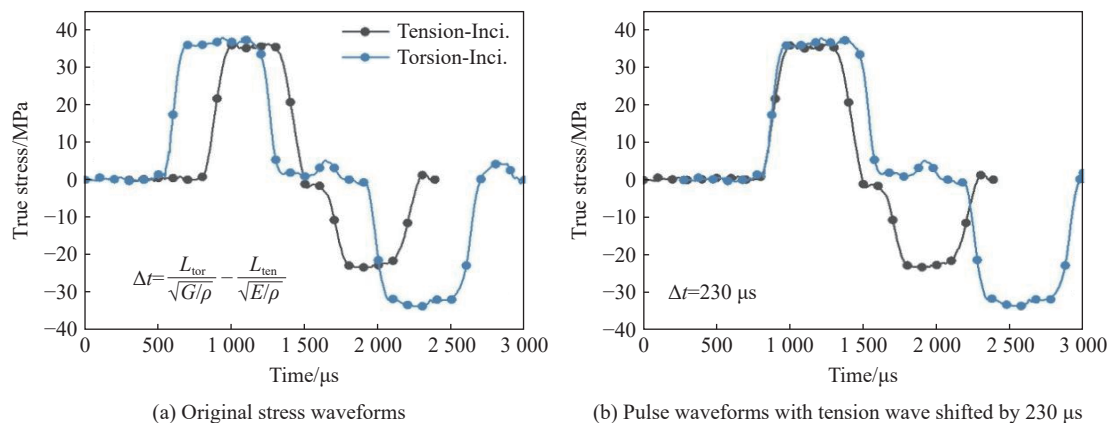


图 9 典型动态拉伸-扭转实验的入射波

Fig. 9 Typical tension-torsion incident pulse waves

### 3.3 加载波形对应力比的影响

在先前基于电磁 SHB 装置的拉-扭实验研究<sup>[24, 28]</sup>中, 所采用的加载波形组合为拉伸正弦波与扭转梯形波。由于正弦波具有周期性振荡特性, 而梯形波在平台阶段幅值基本恒定, 二者形态差异显著, 导致试样在加载过程中受力状态复杂且难以保持稳定。这种不匹配的波形组合使得试样无法实现恒定的应变率与稳定应力比。在本装置设计中, 基于 Wang 等<sup>[25]</sup>的研究, 采用梯形拉伸波与梯形扭转波相结合的加载方式。该组合通过在加载阶段维持波形平台, 旨在为试样提供恒定的应变率与稳定应力比环境。如图 10 (a) 所示, 当扭转入射波 (橙色) 为梯形波时, 对比红色所示的正弦拉伸波与蓝色所示的梯形拉伸波可见, 二者与扭转波的上升沿基本同步。然而, 正弦波在达到峰值后迅速衰减, 引起应力与应变的剧烈波动, 无法维持稳定加载状态。而梯形拉伸波在达到峰值后, 可维持约  $300 \mu\text{s}$  的平台阶段, 同时扭转波的平台宽度约为  $420 \mu\text{s}$ 。较长的平台阶段意味着试样在相应时间段内处于相对稳定的应力与应变环境中, 有利于实现均匀可控的变形过程。

如图 10 (b) 所示, 当拉伸入射波为正弦波时, 应力-应变曲线的扭转分量呈现复杂的变化趋势。材料

屈服后,该分量迅速下降,这主要源于正弦波应力变化的特点,即其在峰值后迅速衰减,对材料扭转应力产生显著影响,致使扭转分量急剧减小。然而,当应变达到约 0.07 时,扭转分量出现反转,开始逐步回升,并持续至加载结束。相比之下,当拉伸入射波为梯形波时,扭转分量的变化相对平稳,未出现明显下降。随着应变逐渐增大,该分量呈稳步上升趋势。进一步对比两种加载方式下的应力比变化可见,在正弦波加载过程中,应力比从 1 逐渐上升至 1.5,但当应变达到 0.1 时却转而下降。而在梯形波加载中,应力比从 1 稳步上升至 1.7,并在应变为 0.05 左右即进入稳定阶段,此后始终保持恒定,直至加载结束。

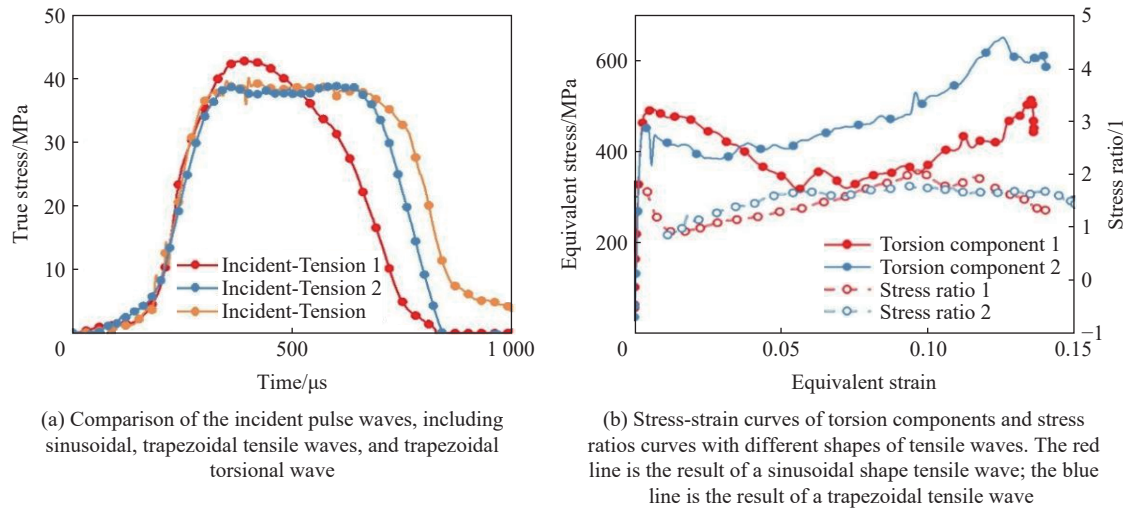


图 10 不同形状拉伸波作用下实验结果的对比

Fig. 10 Comparison of experimental results under tensile waves with different shapes

## 4 结 论

提出了一种改进型电磁霍普金森拉/压-扭复合加载装置,可用于实现金属材料在动态单轴拉/压-扭复合载荷下的力学测试,以获取其在高应变率复杂应力状态下的响应。基于该装置的实验研究,主要有以下结论。

(1) 所开发的单侧拉/压-扭复合加载装置能够分别产生拉伸波与扭转波,并利用高精度延时控制技术实现两列应力波对试样的同步加载。

(2) 以 CoCrFeMnNi 高熵合金为对象的实验验证了装置的可靠性。在动态拉-扭复合加载中,装置可实现约 1.7 的稳定应力比,且试样变形集中于标距段并呈现梯度分布特征。

(3) 理论与实验结果表明,该装置具有良好的加载同步性。根据计算得到的波到达时间对原始入射波进行平移处理后,两列入射波上升沿基本对齐,满足同步加载的实验要求。

(4) 与正弦波加载相比,梯形波加载能显著提升应力比的稳定性。本装置采用梯形拉-扭波组合的加载方式,通过维持恒定加载速率,实现了稳定的应变率与应力比,而正弦波加载则会导致应力比显著波动。

综上所述,该改进型电磁霍普金森拉/压-扭复合加载装置为研究材料在复杂应力状态下的动态力学行为提供了有效实验手段,在材料动态性能研究领域具有重要的应用价值。

## 参考文献:

- [1] 周伦, 苏兴亚, 敬霖, 等. 6061-T6 铝合金动态拉伸本构关系及失效行为 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(9): 091407. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0154.  
ZHOU L, SU X Y, JING L, et al. Dynamic tensile constitutive relationship and failure behavior of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(9): 091407. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0154.

- [2] 周刚毅,董新龙,付应乾,等.不同加载状态下TA2钛合金绝热剪切破坏响应特性[J].*力学学报*,2016,48(6):1353–1361. DOI:10.6052/0459-1879-16-198.  
ZHOU G Y, DONG X L, FU Y Q, et al. An experimental study on adiabatic shear behavior of TA2 titanium alloy subject to different loading condition [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(6): 1353–1361. DOI: 10.6052/0459-1879-16-198.
- [3] 李海峰,门建兵,金文,等.Ta-Hf-Nb-Zr体系高熵合金J-C模型及应用试验[J].*爆炸与冲击*,2025,45(3):033103. DOI:10.11883/bzycj-2024-0069.  
LI H F, MEN J B, JIN W, et al. J-C model of high-entropy alloy Ta-Hf-Nb-Zr system and its application test [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(3): 033103. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0069.
- [4] MIYAMBO M E, VON KALLON D V, PANDELANI T, et al. Review of the development of the split Hopkinson pressure bar [J]. *Procedia CIRP*, 2023, 119: 800–808. DOI: 10.1016/j.procir.2023.04.010.
- [5] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1949, 62(11): 676–700. DOI: 10.1088/0370-1301/62/11/302.
- [6] 胡时胜,王礼立,宋力,等.Hopkinson压杆技术在中国的发展回顾[J].*爆炸与冲击*,2014,34(6):641–657. DOI:10.11883/1001-1455(2014)06-0641-17.  
HU S S, WANG L L, SONG L, et al. 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.
- [7] YIN J P, MIAO Y G, WU Z B, et al. A novel Hopkinson tension bar system for testing polymers under intermediate strain rate and large deformation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2025, 198: 105197. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.105197.
- [8] MIAO Y G, DU B, MA C B, et al. Some fundamental problems concerning the measurement accuracy of the Hopkinson tension bar technique [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(5): 055009. DOI: 10.1088/1361-6501/ab01b5.
- [9] NEMAT-NASSER S, ISAACS J B, STARRETT J E. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1991, 435(1894): 371–391. DOI: 10.1098/rspa.1991.0150.
- [10] 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):729–754. 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 [J]. *Advances in Mechanics*, 2021, 51(4): 729–754. DOI: 10.6052/1000-0992-20-024.
- [11] 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. 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.
- [12] 许泽建,丁晓燕,张炜琪,等.一种用于材料高应变率剪切性能测试的新型加载技术[J].*力学学报*,2016,48(3):654–659. DOI:10.6052/0459-1879-15-445.  
XU Z J, DING X Y, ZHANG W Q, et al. A new loading technique for measuring shearing properties of materials under high strain rates [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(3): 654–659. DOI: 10.6052/0459-1879-15-445.
- [13] CAMPBELL J D, DOWLING A R. The behaviour of materials subjected to dynamic incremental shear loading [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1970, 18(1): 43–63. DOI: 10.1016/0022-5096(70)90013-X.
- [14] BAKER W E, YEW C H. Strain-rate effects in the propagation of torsional plastic waves [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1966, 33(4): 917–923. DOI: 10.1115/1.3625202.
- [15] NICHOLAS T, LAWSON J E. On the determination of the mechanical properties of materials at high shear-strain rates [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1972, 20(2): 57–62. DOI: 10.1016/0022-5096(72)90030-0.
- [16] ELEICHE A M, CAMPBELL J D. Strain-rate effects during reverse torsional shear [J]. *Experimental Mechanics*, 1976, 16(8): 281–290. DOI: 10.1007/bf02324016.
- [17] NIE X, PRABHU R, CHEN W W, et al. A Kolsky torsion bar technique for characterization of dynamic shear response of soft materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(9): 1527–1534. DOI: 10.1007/s11340-011-9481-4.

- [18] CLAUS B J, NIE X, MARTIN B E, et al. A side-impact torsion Kolsky bar: development of interfaces and a pulse-shaping technique [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(7): 1367–1374. DOI: 10.1007/s11340-015-0032-2.
- [19] HUANG H, FENG R. A study of the dynamic tribological response of closed fracture surface pairs by Kolsky-bar compression-shear experiment [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(11/12): 2821–2835. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2004.01.005.
- [20] 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.
- [21] NIE H L, SUO T, WU B B, et al. A versatile split Hopkinson pressure bar using electromagnetic loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 116: 94–104. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.02.002.
- [22] NIE H L, SUO T, SHI X P, et al. Symmetric split Hopkinson compression and tension tests using synchronized electromagnetic stress pulse generators [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 122: 73–82. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.08.004.
- [23] LIU C L, WANG W B, SUO T, et al. Achieving combined tension-torsion Split Hopkinson Bar test based on electromagnetic loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 168: 104287. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104287.
- [24] LIU C L, YANG X, DING Y, et al. The yielding behavior of TU00 pure copper under impact loading [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 245: 108110. DOI: 10.1016/j.ijmecs.2023.108110.
- [25] WANG W B, WANG J B, DU B, et al. The achievement of constant strain rates in electromagnetic Hopkinson bar test [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2025, 195: 105121. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.105121.
- [26] 束德林. 工程材料力学性能 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [27] DU B, DING Y, BAI X, et al. Tensile behavior of CoCrFeMnNi high-entropy alloy with intermediate strain rate included [J]. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2024, 108: 105412. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2024.105412.
- [28] YANG X, LIU C L, DING Y, et al. Dynamic yielding and plastic flow behavior of Ti-6Al-4V under complex loading [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, 283: 112476. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2023.112476.
- [29] 余同希, 薛璞. 工程塑性力学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2010.

(责任编辑 曾月蓉)