文章编号: 1001-1455(2014)06-0641-17 **DOI**: 10.11883/1001-1455(2014)06-0641-17

Hopkinson 压杆技术在中国的发展回顾*

胡时胜[1],王礼立[2],宋 力[2],张 磊[3]

(1. 中国科学技术大学近代力学系,安徽 合肥 230027;
2. 宁波大学力学和材料科学研究中心,浙江 宁波 315211;
3. 总参工程兵科研三所,河南 洛阳 471023)

摘要: 简要回顾了 Hopkinson 压杆实验技术在中国的发展历程及推广应用。系统介绍了关于金属、高聚物、复合材料、脆性材料、混凝土及软材料、泡沫材料等材料的 SHPB 实验技术研究,并对相关材料的实验结果进行简要讨论。

关键词: 固体力学;霍普金森压杆;实验技术;金属;高聚物;复合材料;脆性材料;混凝土;软材料;泡沫

中图分类号: O347.1 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

J. Hopkinson 和 B. Hopkinson 父子俩在爆炸/冲击动力学领域中的工作具有里程碑意义。1872 年,J. Hopkinson[1] 提出的铁丝冲击拉伸实验(图 1)揭示了冲击动力学中的 2 个基本效应:惯性(应力波)效应和应变率效应。1914 年,B. Hopkinson[2] 设计了一套 Hopkinson 压杆实验装置(图 2),把测量冲量的弹道摆的长杆分成一长一短,从而可用于实测冲击(爆炸)载荷随时间变化的实际波形,这在当初尚无示波器等测试仪器的情况下是一种创新。

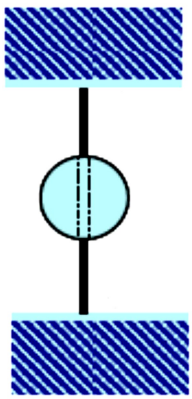

图 1 J. Hopkinson 的实验[1]
Fig. 1 The experiment by J. Hopkinson[1]

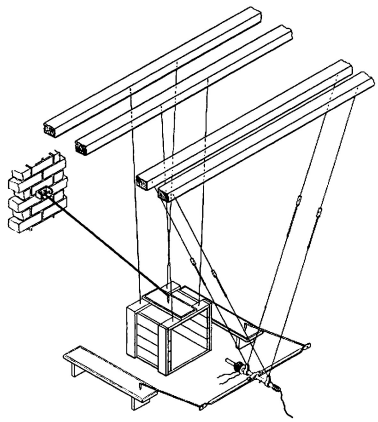

图 2 B. Hopkinson 的实验[2]
Fig. 2 The experiment by B. Hopkinson[2]

到 20 世纪 40 年代后期,Hopkinson 压杆技术进一步发展到研究材料的高应变率行为,被称为分离式 Hopkinson 压杆,简称 SHPB,如图 3 所示。不能不提到的开拓性人物主要有:G. I. Taylor[3]、E. Volterra[4]、R. M. Davies[5] 和 H. Kolsky[6]。籍此可实测材料在冲击加载条件下的动态应力应变曲线,这是一种更大的创新。SHPB 实验装置,设计原理新颖,测量方法巧妙,装置结构简单,操作使用方便,是冲击动力学领域中研究材料动态力学性能最基本的手段。

Hopkinsin 压杆实验装置的提出已经到了纪念其百年诞辰的日子了,SHPB 实验装置的提出也有 65 年了,但在中国起步较晚[7-12]。1980 年,段祝平等[7] 报道了中国的第一套 SHPB 实验装置。杨桂通等[11] 报道了中国的第一套分离式 Hopkinson 扭杆,宋顺成等[12] 报道了中国的第一套分离式 Hopkinson 拉杆。目前,中国拥有 SHPB 实验装置及其推广型实验装置的高校科研单位已有百余家之多,研究材料从最初的金属扩展到高聚物、复合材料、岩石、混凝土及软材料和泡沫材料等,Hopkinson 实验技术

* **收稿日期**: 2014-09-10; **修回日期**: 2014-10-13
作者简介: 胡时胜(1945—),男,教授,博士生导师。

在中国得到飞速发展。除此之外，Hopkinson 实验技术还推广应用于层裂、动态断裂、冲击压剪及火工品安全性等方面的实验研究，也不断面临新的挑战。

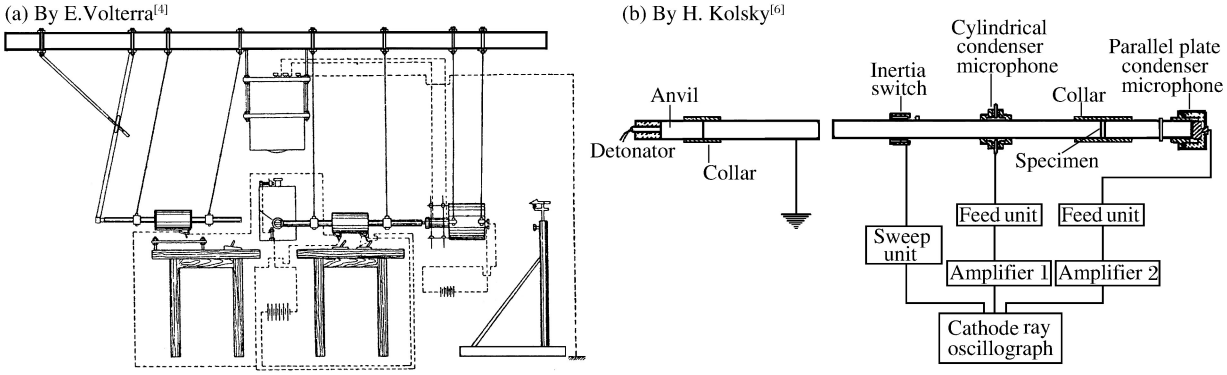

图 3 原始的 Kolsky 杆

Fig. 3 The original Kolsky bar

1 SHPB 实验技术及其面临的挑战

SHPB 实验装置作为研究材料动态力学性能最基本的实验手段虽已获得广泛应用，但随着装置的普及化，如何保证实验技术的正确掌握及实验结果的有效可靠就成为应用过程中的重要问题。为了更好地发挥其作用：(1)要加深对 SHPB 实验技术涉及的基础理论的了解，特别是对 SHPB 实验技术 2 个基本假定的理解；(2)要开拓和加强对于动态测试技术的掌握。

SHPB 实验技术的基础理论主要涉及高应变率实验中的惯性效应(应力波理论)和应变率效应(材料动力学)。相对于传统的准静态固体力学，这 2 种效应不仅显得新颖，而且其难点还在于两者又是相互耦合的。刚接触 SHPB 的力学工作者：一方面，需要对弹塑性波、黏弹性波和黏弹塑性波等的传播特性及相互作用，以及对材料的应变率效应及本构失稳(绝热剪切)等材料动力学基本概念重新学习和了解；另一方面，要洞察应力波传播特性的分析取决于材料的应变率效应，而研究材料动态力学性能又离不开波的传播效应。

SHPB 实验技术建立在 2 个基本假定上：一维应力波假定和试件应力均匀分布(动态平衡)假定。这 2 个基本假定可使 SHPB 实验过程中的惯性效应和应变率效应解耦，从而使问题得以简化。一维应力波假定意味着应力波在压杆和试件中传播时的二维弥散等效应可以忽略不计，又由于压杆本身是线弹性材料而无需考虑其应变率效应；均匀假定则可将试件在高应变率下按准静态过程处理，忽略试件本身的惯性(应力波)效应。然而随着研究材料的扩展，相当部分材料的 SHPB 实验已不能很好满足上述 2 个基本假定，如果仍采用常规的 SHPB 实验技术，就难以获得可靠有效的实验结果。当前，不断涌现的新挑战包括：(1)复合材料，其均质性较差，试件尺寸大，压杆的二维效应及试件状态的不均匀性都会影响其 SHPB 实验结果的有效性；(2)脆性材料，其破坏应变很小，试件内部尚未实现应力均匀，材料就可能破损，由此测得的实验结果不可靠；(3)混凝土材料，不仅均质性差，其破坏应变又很小，其 SHPB 实验的难度最大，实验结果的可靠性也最成问题；(4)软材料，其应力波波速很低，试件在整个变形过程中很难达到内部应力分布状态均匀化；(5)泡沫材料，其泡孔的尺寸效应、泡孔分布的不均匀性以及变形过程的惯性效应等都会影响 SHPB 实验结果的可靠性。

1.1 SHPB 实验技术的基本要点

典型的 SHPB 实验装置如图 4 所示。基于 SHPB 实验技术的第 1 个基本假定(一维应力波假定)所获得的 SHPB 实验数据处理公式为：

$$\dot{\varepsilon}=\frac{c_0}{l_s}[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_r(t)-\varepsilon_t(t)] \tag{1}$$

$$\varepsilon=\frac{c_0}{l_s}\int_0^t[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_r(t)-\varepsilon_t(t)] \tag{2}$$

$$\sigma=\frac{A_0}{2A_s}E_0[\varepsilon_i(t)+\varepsilon_r(t)+\varepsilon_t(t)] \tag{3}$$

式中：$\varepsilon_i(t)$、$\varepsilon_r(t)$ 和 $\varepsilon_t(t)$ 分别为杆中入射、反射和透射的应变波形；A_0 为杆的横截面积；E_0 和 c_0 分别为压杆材料的杨氏模量和弹性波波速；A_s 和 l_s 分别为试件的原始横截面积和长度。式(1)～(3)即所谓的三波法基本公式。

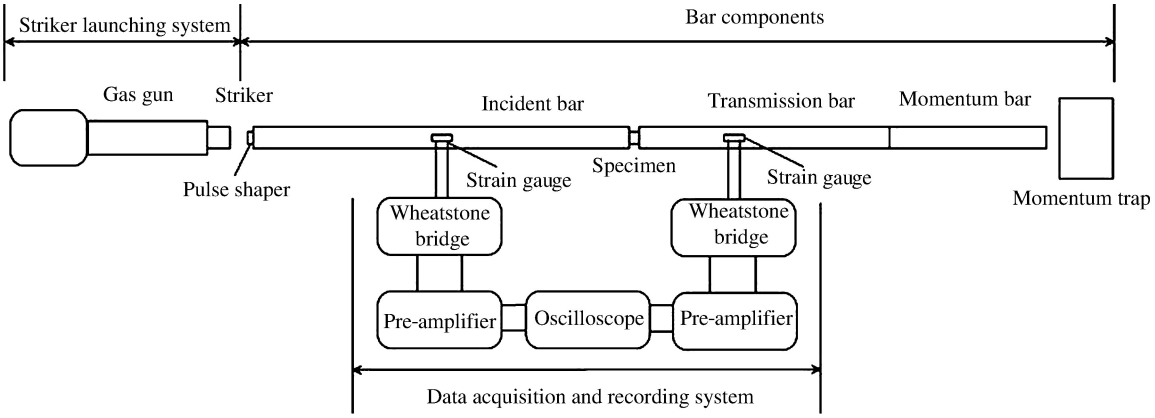

图 4　常规的分离式 Hopkinson 压杆装置

Fig. 4　The general split Hopkinson pressure bar apparatus

基于 SHPB 实验技术的第 2 个基本假定(试件应力均匀分布假定)，即有：

$$\varepsilon_i(t)+\varepsilon_r(t)=\varepsilon_t(t) \tag{4}$$

将式(4)代入式(1)～(3)后，则可进一步简化为：

$$\dot{\varepsilon}=-2\frac{c_0}{l_s}\varepsilon_r(t),\qquad \varepsilon=-2\frac{c_0}{l_s}\int_0^t\varepsilon_r(t),\qquad \sigma=\frac{A_0}{A_s}E_0\varepsilon_t(t) \tag{5}$$

此即所谓二波法基本公式。

然而，即使同样地采用常规的 SHPB 实验装置，仍会由于一些不为人们所注意的问题，得出有差别的实验结果。2007 年 11 月，中国爆炸力学实验技术专业组组织了一次常规 SHPB 实验结果比对活动。专业组事前选用了同一根棒料分发给参加这一比对活动 5 个单位的专业组成员，要求大家按照各自的 SHPB 规格大小，自行安排试件加工并进行实验测试。图 5 即为各单位给出的平均应变率为 1 500 s^{-1} 的应力应变曲线。由图 5 可以看出：不同单位给出的应力应变曲线差异较大，尤其是实验曲线的初始加载部分。究其原因，除需要有个统一的实验规范外，尚有几个基本问题需要注意。

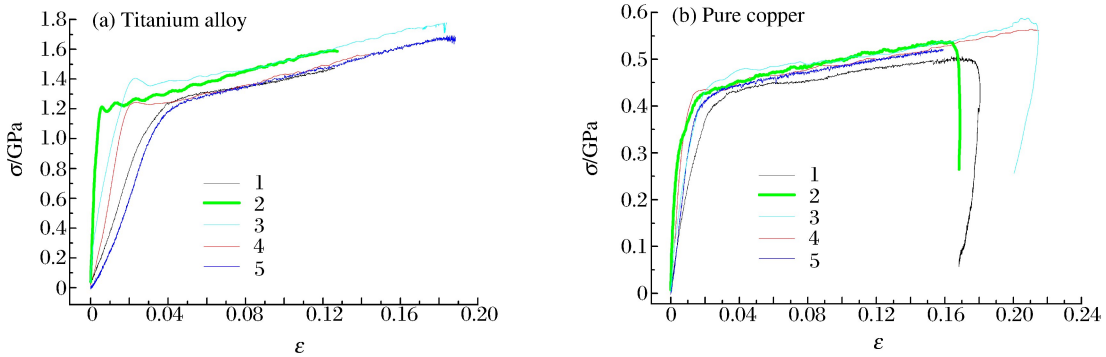

图 5　5 个单位给出的钛合金和紫铜的动态应力应变曲线

Fig. 5　Compressive stress-strain curves for titanium alloy and pure copper by five units

首先，实验结果对入射波形是敏感的。圆柱形子弹(打击杆)撞击输入杆时，理论上产生的应是一矩形脉冲，其幅值与弹速相关，而历时与弹长相关。但由于受弹-杆实际接触情况、波形采集仪的频响限制以及波传播过程中的弥散效应等影响，实际采集到的是既有上升沿又有叠加振荡的梯形波。在梯形主

波形上叠加的震荡波形则主要为横向惯性引起的弥散,因而与杆径相关。杆径粗,弥散效应明显,杆径细,弥散效应不明显。虽然细杆中测得的波形能更真实地反映加载波的实际状况,但其波形中的上升沿及振荡都会直接影响数据的处理结果,影响应力应变曲线初始弹性段的斜率和塑性段的平整度,影响试件材料表观动态弹性模量、屈服强度及流动应力的确定。为了减小入射波波形振荡的影响,我们在 20 世纪 70 年代末就曾采用医用胶布直接贴在输入杆的撞击端,这可看作后来被广泛关注的“波形整形(pulse shaping)”技术的前驱。朱兆祥 1983 年去美国访问时曾就这一技巧进行了交流,引起美国同行们的兴趣。

其次,试件-压杆界面接触情况也会影响实验结果,特别是动态应力应变曲线的初始弹性段。常规 SHPB 实验中,变形初始(弹性)段除试件内部尚未达到均匀状态外,小直径试件对大直径压杆端部造成的弹性凹陷会影响试件的弹性变形量,进而影响应力应变曲线初始弹性段的测试。试件愈硬,这种影响愈明显,因此开展常规的 SHPB 实验很难准确测得硬质试件材料应力应变曲线的弹性段和弹性模量。宋力等[13]通过数值计算对端面凹陷进行修正,获得了准确的弹性模量,但其过程繁杂,难以推广。

此外,前面提到的 2 种处理方法中,二波法更简单,常被采用。然而,由于实验开始阶段没能严格满足试件均匀假定,这 2 种方法不等价,三波法更有效,二波法会出现一些误差,尤其在曲线初始段[14]。

还有一个不常被注意的问题,即所谓的时间不同期性。通常,将 3 个波形(入射波、反射波和透射波)的波头直接对齐进行数据处理。事实上,作用于试件另一端的透射波比入射波和反射波晚一个时间差,当试件中的波速比压杆中的波速低得多时,这种影响也是应该考虑的[15]。

最后,试件的横向惯性效应、端面的摩擦效应等都会对实验结果产生影响。只有对上述问题有所了解,才有可能利用常规的 SHPB 实验获得可靠有效的实验结果。

1.2 大直径的 SHPB 实验技术

常规的 SHPB 实验技术涉及到的金属和高聚物材料因质地均匀、变形量大,所以对于 SHPB 的 2 个基本假定容易满足。然而尚需研究大量非均质的复合材料,岩石、砂浆等脆性材料,混凝土,泡沫材料及软材料等,这些材料动态应力应变曲线的测定将对 SHPB 实验技术提出严峻挑战。

非均质复合材料可以看作由“基体”和广义的“夹杂物”(包括短纤维、颗粒等)组成。由于试件尺寸(直径和厚度)均应比“夹杂物”尺寸大一个量级,因此不得不采用大直径(∅30 mm~∅40 mm,甚至更大)的 SHPB。相应的技术挑战是:不再满足一维应力假定;试件内部状态的均匀性也会受到影响。

解决第 1 个问题可从 2 个方面着手:(1)采用反分析法,即根据测点的波形通过数学的方法反演到试件两端[16];(2)采用波形整形技术,滤去原始波形中的高频分量,以减少原始波形在传播过程中的弥散影响。采用各种反分析方法是有成效的,但不易被实验研究人员熟练掌握,目前还没有获得广泛推广。采用波形整形技术,方法简单有效,更易于推广应用。解决第 2 个问题的有效方法还是采用波形整形技术,延长上升时间,滤去高频振荡。虽然不少文献借助数值计算提出了很多方案,但所有的计算都基于试件呈弹性状态,事实上试件早已进入塑性状态。

脆性材料体内含有较多初始空穴和裂纹,因此其试件尺寸也要大些,需采用大直径 SHPB。然而它与非均质复合材料最主要的差异是,脆性材料的破坏应变很小(小于 0.5%),因此满足试件均匀假定的难度很大,其最大应变速率也会受到限制。以岩石为例,若试件尺寸设定为∅30 mm×15 mm,弹性波波速约为 4 km/s,试件内部状态均匀以弹性波 3 个来回为准,再设定状态均匀的时间段不应少于载荷作用总时间的 1/2,则其加载波的作用时间不宜少于 45 μs,因此其最大应变率只有 100 s^{-1}左右。

常规 SHPB 实验的加载波形前沿都是很陡的,大直径(∅37 mm)SHPB 实验装置产生的加载波波头升时也只有 20 μs,因此脆性材料的 SHPB 实验最需要进行波形整形。在早期,李夕兵等[17]选用梭型子弹以产生升时较缓的加载波形。之后,更多的是采用波形整形器(薄片)[18]。

混凝土材料的 SHPB 实验技术比上面 2 种材料的技术更复杂,因为混凝土既属于非均质复合材料,又属于破坏应变很小的脆性材料。首先,混凝土内部的主要成分骨料(碎石)的尺寸远大于其他成分,需要采用超大直径(~∅100 mm)的 SHPB 实验装置,实验装置本身已无法保证一维假定的有效

性。其次，混凝土的破坏应变（小于 0.5%）很小，在大尺寸混凝土试件内部实现状态均匀的难度比岩石、砂浆等更大。

由于混凝土的 SHPB 实验装置压杆直径很大，一维应力波假定严重失实，因此除采用波形整形技术外，还需考虑波形的弥散修正以及试件端面处入射波、反射波和透射波 3 个波头的对齐等。由于混凝土材料很脆，引入了万向头技术[19]，以确保试件端面与压杆之间的平面接触状态，减小应力集中对试件破坏的影响。又由于试件尺寸太大，均匀假定难以保证，还采用了直接贴电阻应变片测试件应变[20]，直接用 PVDF 应力计测试件两端应力[21]，即采用直接测量方法得到混凝土材料动态应力应变曲线。

尽管对混凝土的 SHPB 实验进行了各方面的改进，但是其 Hopkinson 压杆的超大直径、试件的超大尺寸以及材料的很小破坏应变，已不可能满足 SHPB 实验技术所要求的一维应力波假定和均匀假定，因此也不可能获得可靠有效的混凝土材料动态压缩应力应变曲线，必须更换思路，提出新的办法。Wang Li-li 等提出的采用拉氏分析法和 Hopkinson 压杆实验技术相结合的办法[22]已用于混凝土材料动态应力应变曲线的测定。

1.3　特种材料的 SHPB 实验技术

比较前面的几种复杂材料，（硬质）泡沫材料和柔性软材料因其结构或力学性能特殊，其 SHPB 实验技术又有其特殊性。泡沫材料具有一些与常规材料不同的特性：（1）泡孔尺寸较大，要求采用大直径 SHPB；（2）质地较软，其弹性波波速约比基体材料小一个量级，因而实现试件均匀化的时间明显增加；（3）有些泡沫材料制备工艺不成熟，泡孔分布不均匀，容易产生局部失稳；（4）基体的惯性效应导致其变形模式的多样性（准静态模式、冲击模式和过渡模式）[23]。前面 2 点影响的是 SHPB 实验技术的 2 个基本假定；后面 2 点，尤其是第 4 点则导致实验难度大，结果很分散。以致学术界至今对泡沫铝动态力学性能中最重要的应变率效应没有一个统一的认识。软材料的 SHPB 实验存在 2 大问题：（1）透射波信号太弱，需要采用灵敏度很高的石英晶体压电压力传感器[24]，或者采用低波阻抗的压杆，如聚合物压杆[25]；（2）软材料的波速很低，通常只与试件的变形速度相当，实现软试件内部的状态均匀根本不可能，其变形过程的高速摄影照片（图 6[26]）也显示了这一点。因此，开展软材料的 SHPB 实验，只能要求其试件的厚度尽可能小，但前提是界面摩擦效应仍可忽略。

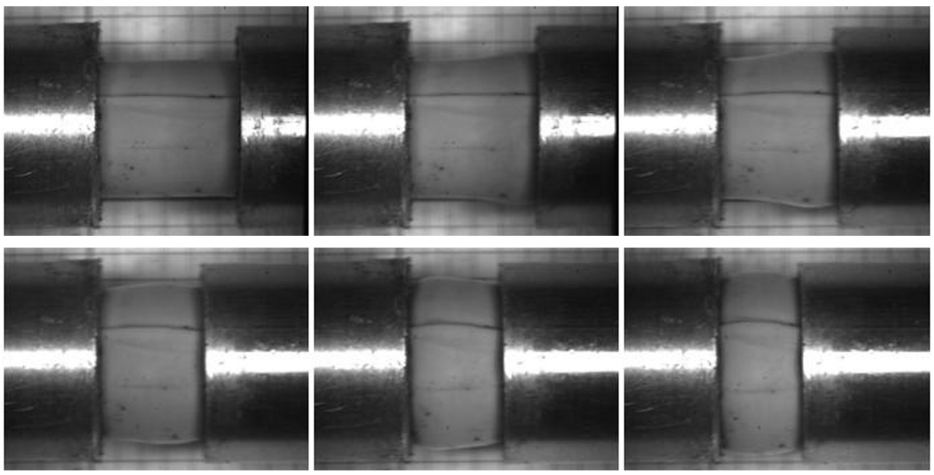

图 6　RTV630 橡胶试件变形过程[26]

Fig. 6　High-speed deformation of an RTV630 rubber[26]

1.4　恒应变率的 SHPB 实验技术

在传统的 SHPB 实验中，动态应力应变曲线的应变率均是指试件加载过程的平均应变率。近年来人们提出了恒应变率 SHPB 实验的问题，一方面是由于工程师们的某些实际需要，另一方面是为了方便本构关系的拟合，因此这对 SHPB 实验技术提出了更高的要求。然而，实现恒应变率不仅与加载波形有关，还与试件材料的力学性能（应力、应变及应变率之间关系）有关，因此如何实现恒应变率实验也是 SHPB 实验技术中引起过关注的一个问题。

对于常规的 SHPB 实验技术，其二波法公式（5）显示，试件变形的应变率与反射波成正比，因此若

能在实验中得到一个峰值较平坦的反射波形,则可认为该实验已实现了试件变形的恒应变率。据此 S. Ellood 等[27]提出了比较容易实施的三杆法实验,即在原有的二杆(输入杆和输出杆)情况下再在前面增加一根长杆和作为垫块用的试件。由于透过垫块的波形与垫块材料特性相关,因此透射到输入杆中的输入波与进一步透射到输出杆的输出(透射)波十分相像,只是幅值相应减小,这样返回输入杆的则为峰值较平坦的反射波(输入波和输出波之差)。三杆法方法简单,但是需要增添一根长杆。事实上,去掉前面的那根长杆,子弹(打击杆)直接撞击端部所加垫块,也可达到类似的效果。现在则大多采用波形整形技术,即在输入杆端部贴上波形整形片,经过多次调试,也可获得峰值较平坦的反射波。

然而,这一调试过程与波形整形片的材料和规格(直径及厚度)有关,还与子弹撞击速度有关,采用如此复杂的调试过程是否必要,值得商榷。其一,寻求平缓反射波的方法是建立在试件均匀假定基础上的,然而对于很多较复杂材料,试件状态均匀和反射波波形平缓难以同时实现,即使实现了,平缓部分往往也只占反射波的一部分。其二,对金属类材料虽然可以较方便地实施恒应变率实验,但由于不论按照位错动力学的热激活机制还是根据大量实验结果,金属类材料的应变率效应是在应变率发生量级性变化时才表现的,即是与应变率的对数($\ln\dot{\varepsilon}$)关联的。换句话说,其动态($10^3\ \mathrm{s}^{-1}$)和准静态($10^{-3}\ \mathrm{s}^{-1}$)之间的应变率相差 6 个量级,但其强度(应变率效应)只相差百分之几十,采用常规 SHPB 实验所产生的影响很小,因此金属类材料无需采用专门的恒应变率实验。高聚物虽然具有很强的应变率敏感性,也仍然表现为 σ-$\ln\dot{\varepsilon}$)的形式[28]。其三,更值得强调的是,从当前实验数据的处理和拟合技术角度看,即使研究的材料是应变率效应十分敏感的,完全可以将实验结果中的应力、应变和应变率逐点代入本构关系进行拟合,再利用获得的拟合参数直接得到工程中所需要的恒应变率应力应变曲线。鉴于以上分析,无需对曾经比较关注的恒应变率实验技术进行更多的讨论。

人们曾经试图通过波形整形技术来达到 3 个目的:(1)降低横向惯性效应引起的入射波形的弥散震荡,(2)有利于及早实现试件中应力分布的均匀化,(3)有利于实现恒应变率实验。

综合上述分析,不难看到:(1)通过波形调节减少了高频分量,确实可以降低横向惯性效应引起的入射波形的弥散震荡,但该实验的应变率则相应地有所降低;(2)早期认为升时延长的“坡形波”有利于试件中应力分布的均匀化,但经过进一步深入研究发现,这是一种缺乏依据的误解,对于黏弹性试件的分析表明“坡形波”甚至不利于试件中应力分布的均匀化[29-31];(3)采用常规 SHPB 实验,只要改进实验数据的处理和拟合技术,已无必要实施复杂的恒应变率实验。

1.5 不同环境下的 SHPB 实验

为了讨论环境温度及围压等载荷环境条件对材料动态力学性能的影响,国外同行先后设计研制了各种不同样式的相应装置,中国科学工作者也在这方面做了探索。

目前,在 SHPB 实验装置中配置的环境温度箱主要有 2 类:第 1 类是压杆和试件被同时加/降温,这就需要对压杆的相关参数及数据处理进行修正[32];第 2 类是仅对试件进行温度控制,然后迅速夹入入射杆和透射杆之间进行实验,这就需要冲击加载过程与 2 杆夹入试件过程尽可能实现同步,以尽可能减少热传导的影响[33]。这类方法除用于金属材料不同温度下的 SHPB 实验研究,还用于对环氧树脂在 10～100 ℃下的动态力学行为及率-温等效关系[34]、PMMA 在 −60～100 ℃下的动态力学行为及率温等效关系[35]以及对钛合金在低温(−90, −100 和 −190 ℃)下的高速变形特性和绝热剪切[36]进行 SHPB 实验研究

围压装置是很多岩石和混凝土材料的 SHPB 实验研究中所必需的。这也是把一维应力下材料动态力学行为的研究推广到三维应力状态下的重要一步。目前,围压装置可分为主动围压装置[37]和被动围压装置[38]2 类。通常的围压装置提供的是环向围压,还不是各向等轴意义上的球量压力,另外实验过程中还存在围压波动。最近,张磊等[39]已在∅100 mm SHPB 实验装置上配置了能同步实施轴向压力的围压装置,并且还克服了实验过程中的压力波动,如图 7 所示。

随着研究工作的深入,试件呈现的许多宏观现象需要进行细观和微观的镜像分析。例如,金属材料的绝热剪切破坏通常与材料内部的绝热剪切带形成有关,脆性材料的软化或破坏与其内部损伤的形成

演化有关。为确保宏观现象与微细观镜像的对应，在 SHPB 实验装置上实现单次加载十分必要[40]。

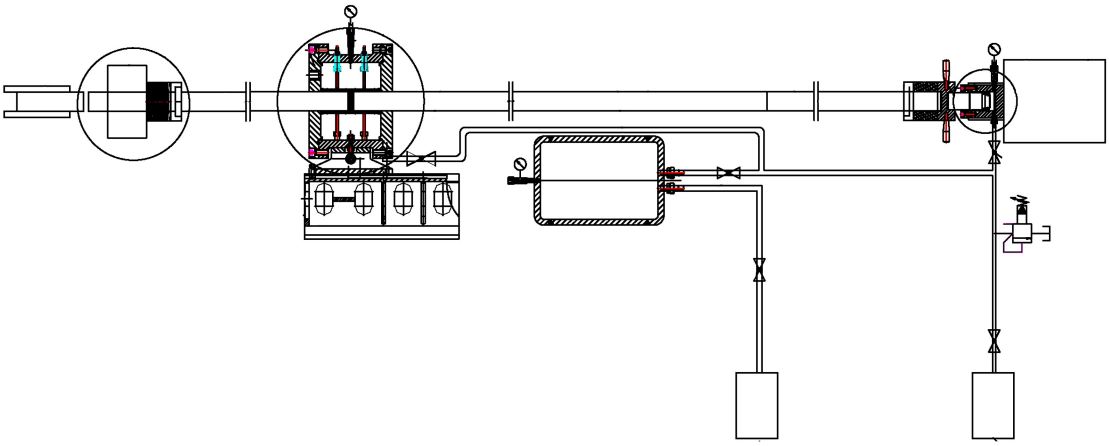

图 7　三向同步受压的围压装置[39]

Fig. 7　The confining pressure device for synchronous compression in three directions[39]

2　各类材料的 SHPB 实验

利用 SHPB 实验技术可以研究几乎所有固体材料在相当应变率范围内的动态力学性能（动态应力应变曲线），具体包括金属、高聚物等均质性好、可塑性强的韧性均质材料，以及复合材料、脆性材料、混凝土等材质较复杂的非均质材料及软材料、泡沫材料等特种材料。

2.1　金属材料

如前面所说，对金属材料通常可采用常规的 SHPB 实验装置进行研究。我们采用的压杆直径为∅14.5 mm，如果原材料尺寸小，还可以选用杆径更细的压杆。对压杆材料，大多选用高强度合金钢。

金属材料动态力学性能实验研究中除采用 SHPB 实验装置实测冲击加载条件（几组不同高应变率）下的压缩应力应变曲线，还需要实测一组典型的准静态条件下的应力应变曲线进行比对。田杰等[41]在利用 MTS 试验机实测材料准静态应力应变曲线时，采用应变片准确测定试件材料的弹性模量，采用夹式位移计扣除弹性凹陷对试件变形量的影响。据此所得的准静态应力应变曲线才可与动态应力应变曲线进行比较。金属材料的应变率效应主要表现为：随着应变率量级的提升，其流变应力/强度提高，至于韧性则可能降低（冲击脆化）也可能提高（冲击韧化）。其中纯金属、软金属以及 fcc 金属的应变率敏感性强些，合金、高强金属或 bcc 金属的应变率敏感性差些。然而，金属材料的应变率敏感性通常与应变率的对数关联，即使其应变率跨越 6 个量级（由准静态 10^{-3} s^{-1}到动态 10^{3} s^{-1}），金属材料的强度也只有百分之几十的提高。还需注意的是，在金属的 SHPB 实验中，还观察到了负应变率效应，即流变应力/强度随应变率的增加反而降低的反常现象，这与损伤演化或相变有关[42]。

除应变率效应，金属材料的温度效应也是大家十分关注的问题。相应的实验研究需要实测金属材料在各种环境温度下的动、静态应力应变曲线。

用于描述金属材料应变（硬化）效应、应变率（强化）效应和温度（软化）效应的简单而常用的热黏塑本构关系为经验型的 J-C 模型[43]。需要注意的是，J-C 模型中的温度参量乃是环境温度，而非试件材料本身的温度，即尚未考虑金属材料高速变形引起的绝热温升。其他类型的还有基于热激活势垒与作用应力之间存在双曲型非线性函数关系的热黏塑性本构方程[44]和基于位错动力学理论的半经验型的 ZA 模型[45]等。

绝热剪切是金属材料动态力学性能研究中的又一重要内容。绝热剪切破坏不同于常规的剪切破坏，它是由于金属材料在高速变形过程中热黏塑性失稳所造成的。这里的热不是环境温度造成的，而是绝热温升。绝热剪切可归结为由材料的应变硬化、应变率强化和温度软化三者此消彼长的相互竞争所

导致的热黏塑性失稳。在实测钛合金材料的冲击压缩应力应变曲线时，通过宏观-微观相结合的途径，观察到了与准静态压缩实验的常规剪切破坏明显不同的绝热剪切破坏现象[8]，进而开始系统研究钛合金的绝热剪切特性[36,46-47]。绝热剪切带的产生与演化同时与应变、应变率和温度有关，提出了所谓产生绝热剪切失稳的三变量准则[36]。绝热剪切破坏的敏感程度依赖于材料的综合参量 $A(K/c_p)$，其中 K 为热传导系数，c_p 为质量定压热容。另外，绝热剪切破坏还与金属材料内部的晶体结构[48]和复合受力状态[49]有关。由于产生绝热剪切破坏的机理是高速变形过程中的热黏塑性失稳，因此只要其应变率、温度和应变的组合满足绝热剪切准则，原则上任何金属材料都有可能产生绝热剪切破坏，除非材料较脆。肖大武等[50]在研究纯锆材料动态力学性能时，利用这一观点，在 SHPB 实验中首次实现了该材料的绝热剪切破坏，见图 8。相反的，胡昌明等[51]在研究镁铝合金动态力学性能时，因该材料的破坏应变较小，其试件先于热黏塑性失稳而发生了类似于准静态压缩实验的常规剪切破坏，见图 9。

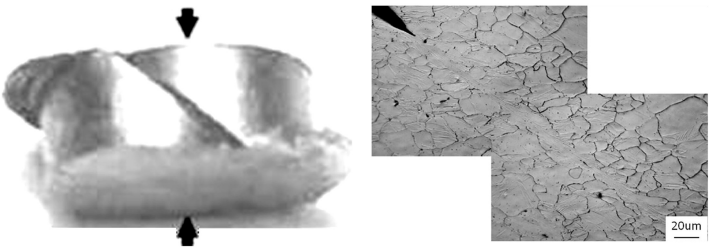

图 8 纯锆材料的绝热剪切破坏及剪切带[50]

Fig. 8 Adiabatic shearing bands of pure zirconium[50]

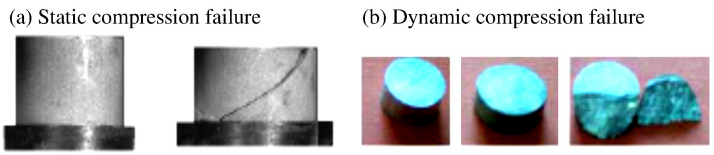

图 9 镁铝合金的剪切破坏现象[51]

Fig. 9 Shearing failure of magnesium-aluminum alloy[51]

在绝热剪切热黏塑性失稳研究的基础上，Wang Li-li 等[52]进一步利用 SHPB 实验技术研究了裂纹与剪切带的相互关系，发现在 II 型裂纹裂尖前方先形成绝热剪切带，然后裂纹沿剪切带传播；并将热黏塑性绝热剪切准则用于裂尖塑性区，得到了 II 型裂纹发生绝热剪切起裂的“应力强度因子-应力强度因子率”双变量准则。

2.2 高聚物材料

高聚物材料是典型的黏弹性材料，但其强度及波阻抗比金属材料的低，因此在研究高聚物材料时，可采用波阻抗较小的材料制作的压杆，如高强度合金铝。

由于高聚物材料明显的黏性效应，表现在透射波历时往往比入射波历时长，而且即使应力下降了，应变还会继续增大，因此在处理其整个变形阶段（包括卸载阶段）时要更精细，选择系列实验的应变率跨度也相应小一些。

在准静态实验基础上发展起来的高聚物本构关系，包括 Maxwell 模型、Kelven-Voigt 模型以及三单元线性固体模型，虽然是描述高聚物材料黏弹特性最基本的本构模型，但限于线性黏弹性特性的描述，不再适用于高聚物冲击大变形特性的描述。为此，唐志平等提出了一类弱非线性黏弹性本构方程（ZWT 模型）[53]，揭示出其本构非线性仅来自纯弹性响应，而所有的黏弹性响应，或即速率（时间）相关的响应，则本质上是线性的。对于这类 ZWT 材料，不难把成熟的线性黏弹性理论推广到处理其率相关响应。ZWT 本构模型既有其明确的物理含义，又便于借助 MTS 及 SHPB 系列实验结果拟合确定其相关参数，所得本构方程除能较好描述大多数高聚物材料的非线性黏弹特性[28]，还能够描述复合材料[54]、泡沫材料[55]、水泥砂浆[56]以及船桥相撞防护装置中钢丝绳圈[57]等的冲击响应，并且还进一步发展到计及率相关动态损伤演化的含损伤非线性黏弹性本构方程[58]。

高聚物的力学行为不仅对应变率敏感，而且对温度敏感。朱兆祥等[59]、施绍裘等[35]还在 ZWT 方程的基础上发展了计及率-温等效效应的非线性热黏弹性本构方程。

2.3 复杂材料

如前面所分析的，非均质复合材料，岩石、砂浆等脆性材料，以及混凝土等属于复杂材料。因此，对这些材料进行 SHPB 实验研究，既要面对 SHPB 实验技术的严峻挑战，又要分析这些材料复杂的动态

力学性能、应变率效应及其微细观机理。

小颗粒、短纤维等复合材料，其均匀性和变形能力都很好，因此开展这类复合材料的 SHPB 实验研究，从实验技术角度来说，与金属材料类似，没有特殊要求。但是其小颗粒、短纤维等细观结构会影响其宏观力学性能，因此对这些材料的试件取向，小颗粒、短纤维等细观物的破损情况需要进行镜像分析。例如，钨结构增强 Zr-基非晶合金是一种新型的金属基复合材料，其结构均质性好但存在方向性。研究这类复合材料在不同温度下动态力学性能的军事工程背景十分明显，研究其内部钨结构的增强效应对新材料设计也很有意义。谭子翰等[60]在实测其不同环境温度、不同应变率条件下的动态应力应变曲线时，还利用损伤冻结实验并结合细微观察，研究了钨结构的增强机理。

刘剑飞等[61]、薛志刚等[62]利用∅37 mm 的 SHPB 实验装置对花岗岩和水泥砂浆等脆性材料进行了冲击压缩实验研究。

冻土材料的细观均匀性与岩石、水泥砂浆类同，但其变形量较大，抗压强度低得多，因此选用的是∅37 mm 的铝合金压杆。又由于冻土内部的含水量及环境温度对其力学性能的影响十分明显，因此冻土材料的试件制备及实验时的环境温度控制十分重要[63]。实验结果表明，冻土材料不仅具有温度效应，还具有应变率效应，2 种效应反映出冻土材料的时温等效性。另外这种时温等效性在分析冻土材料的破坏过程时还体现在它的冻脆性和动脆性。冻土材料动态应力应变曲线的汇聚现象和振荡现象均起源于这种冻脆性和动脆性。

A95 陶瓷致密性(细观均匀性)好，强度高，因此李英雷等[64]采用的是∅14.5 mm 的高强度合金钢压杆，并需在试件两端放置硬质合金垫块。由于陶瓷材料的破坏应变很小，一方面在试件上贴应变片直接测应变，另一方面采用整形技术调整加载波形，延长加载时间。研究得到了 A95 陶瓷呈线性的压缩应力应变曲线，杨氏模量为 293 GPa，与准静态结果一致。

混凝土是一种均质性差、破坏应变小、难以进行 SHPB 实验研究的复杂材料。胡时胜等率先利用改装后的∅74 mm SHPB 装置，开展了混凝土的动态力学性能研究[65]，讨论了其损伤演化及应变率效应，提出了含损伤的非线性黏弹性(ZWT 模型)本构方程[66]。之后，巫绪涛等[67]系统研究了钢纤维高强度混凝土的动态力学性能，讨论了其短纤维的增强机理及应变率效应。胡俊等[68]对 FPS(聚苯乙烯)泡沫混凝土进行了动、静态应力应变曲线测试，讨论了 FPS 泡沫的增韧吸能机理及应变率效应。

如前面所说，由于混凝土材料的复杂性，混凝土材料的 SHPB 实验已不可能满足该实验技术所要求的 2 个基本假定，因此也不可能获得可靠有效的混凝土材料动态压缩应力应变曲线。为此，朱珏[69]已采用前面提到的拉氏分析法和 Hopkinson 压杆实验技术相结合的新方法[22]来反解试件的本构关系，并成功获得了 C30 混凝土材料的动态应力应变曲线。

2.4　特种材料

硬质聚氨酯泡沫材料因其孔径小，密度及泡孔结构均匀性好，其试件加工无特殊要求。对其开展 SHPB 实验研究时，胡时胜等[70]除选用∅37 mm 的铝合金杆及换用灵敏度高的半导体应变片，尚无更多要求。该材料实验数据稳定可靠，其动、静态应力应变曲线及拟合的本构方程可参见文献[70]。

泡沫铝材料的情况有很大不同。由于其成型工艺差，孔径尺寸偏大，密度分布及泡孔结构均匀性都较差，因此在泡沫铝原材料选择、试件制备以及实验结果稳定性等方面都远不及硬质聚氨酯泡沫。为了解决上面这些问题，王鹏飞等[71]首先引入正态分布的方法选择制作工艺及密度分布均较好的泡沫铝原材料加工试件，并采用石英晶体应力计实测试件两端应力状态来确定其合适的厚度。为了保证试件变形的准静态模式，通过“两次撞击”的实验方案，确定了合适的打击速度[72]。以上 2 点确保了泡沫铝材料 SHPB 实验结果的有效性，进而确认了泡沫铝材料的应变率效应。王鹏飞等[73]还将“两次撞击”的实验方案延伸到高温情况，成功实现了泡沫铝材料在高温下的 SHPB 实验。

橡胶、肌肉等软材料，质地柔软，弹性模量很小，因此其弹性波波速远小于金属等硬质材料(相差 2 个量级)。早期，胡时胜等[74]在做泡沫硅橡胶 SHPB 实验时，只能尽可能减小试件的厚度，并采用灵敏度高的薄膜型应力计直接测量试件两端的应力。王宝珍等除开展了常温下橡胶的动态力学性能及本构

模型研究,还测定了 CR 橡胶在不同温度(−20～50 ℃)、不同应变率(5×10^{-3}～3 000 s^{-1})条件下的应力应变曲线,结果表明 CR 橡胶具有温度敏感性和应变率敏感性,且两者有一定的时温等效性[75]。王宝珍等[76]还对肌肉材料进行了动态力学性能测试,测得了肌肉在不同加载方向、不同应变率下的压缩应力应变曲线,沿纤维方向压缩时,纤维易压缩失稳,其强度比垂直纤维方向的低。所有实验结果都呈现了明显的应变率效应。为了实测肌肉材料的动态拉伸应力应变曲线,王宝珍等[77]采用直接(套管)式 Hopkinson 拉杆装置[78],设计了肌肉拉伸专用夹具,采用低阻抗的尼龙透射杆,并对杆中黏弹性波的弥散和衰减进行修正,再结合高灵敏度的半导体应变片间接测定肌肉的拉伸应力。结果表明:无论是沿纤维方向还是垂直于纤维方向,其拉伸强度都具有很高的应变率效应。又,不同加载方向的力学性能与肌肉组织的结构有关,沿纤维方向主要依靠纤维承受拉力,垂直纤维方向则主要依靠纤维间组织来承拉。

3 Hopkinson 实验技术的推广应用

Hopkinson 实验技术除可用于测试固体材料动态应力应变曲线,还可用于开展其他多方面的实验研究工作。分离式 Hopkinson 拉杆(SHTB)实验装置仅次于分离式 Hopkinson 压杆实验装置被广泛应用,主要用于测试固体材料的动态拉伸应力应变曲线。SHTB 实验装置主要有 2 种类型:直接式[78]和间接式[79],前者通过直接撞击进行加载,后者利用反射的拉伸波进行加载。

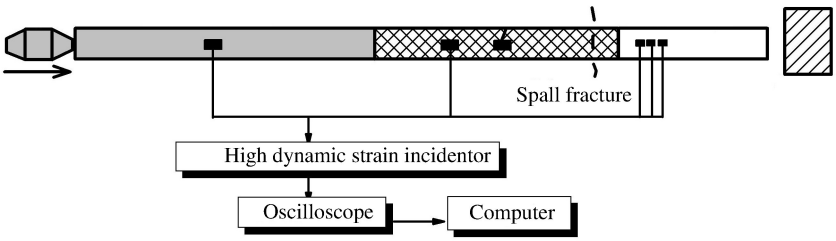

图 10 测量混凝土层裂强度的实验方案[80]

Fig. 10 Schematic experimental setup measuring spalling strength of concrete[80]

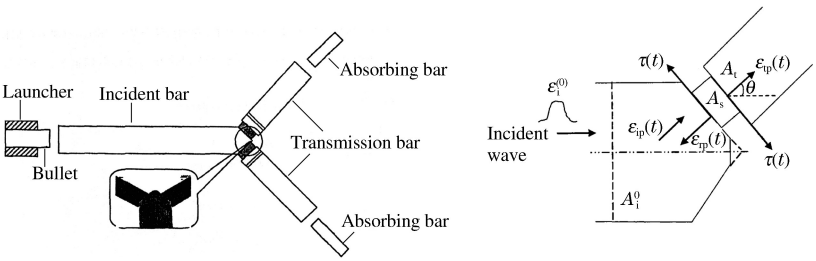

图 11 冲击压剪实验装置示意图及试件界面受力分析[83]

Fig. 11 Schematic apparatus of compression shear experiment and analysis on stress at the specimen's interface[83]

层裂现象是材料动态破坏的一种主要形式。金属材料层裂强度的实验研究大多采用气炮实验装置,试件处于一维应变状态。然而混凝土材料的均质性太差,无法在气炮上进行层裂强度测试,利用改进的 Hopkinson 压杆能够很好地实现混凝土材料层裂强度的实验研究,见图 10[80]。

利用改进的 Hopkinson 压杆装置还可开展材料动态断裂韧性研究。它既可用于测量Ⅰ型裂纹的动态断裂韧性[81],又可用于测量Ⅱ型裂纹的动态断裂韧性[82]。

基于 SHPB 实验装置的复合压剪实验技术如图 11[83]、图 12[84]所示。此外,利用 Hopkinson 压杆实验装置还可对高 G 值加速度传感器进行标定[85-86],对火工品的安全性和可靠性进行评估[87]。

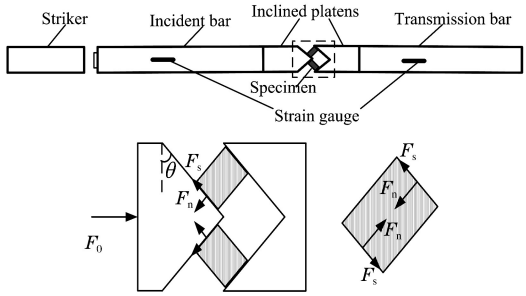

图 12 冲击压剪实验装置示意图及试件界面受力分析[84]

Fig. 12 Schematic apparatus of compression shear experiment and analysis on stress at the specimen's interface[84]

随着工业技术的发展,许多测量新技术得以开发,从而推动着 Hopkinson 测量技术的新发展。例如,常规的 SHPB 实验,通常采用的是间接方法,无需直接测量试件材料的应力和应变,然而这种方法是基于 2 个基本假定的基础上的。当能引入新的测量技术,例如采用石英薄膜应力计直接测量软试件(肌肉)两端

的冲击应力(图 13[24])时，对 2 个基本假定的要求就可大大放松。又如，利用高速 CCD 可以直接观察到混凝土试件多处层裂的产生次序(图 14[88])，这为准确分析层裂机理提供基本图像。又，可采用高速 CCD＋散斑数据处理方法获得泡沫铝试件变形过程的应变场(图 15[89])。因此，测量新技术在 Hopkinson 压杆实验中的推广应用，可为进行更深入的机理分析，提供更多信息。

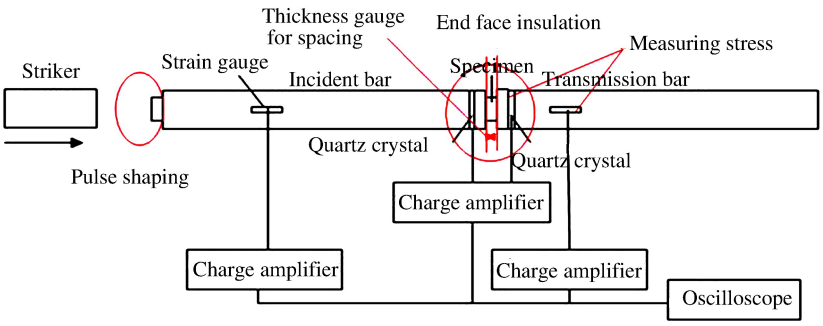

图 13　改进的 SHPB 装置简图[24]

Fig. 13　Schematic of the modified SHPB setup[24]

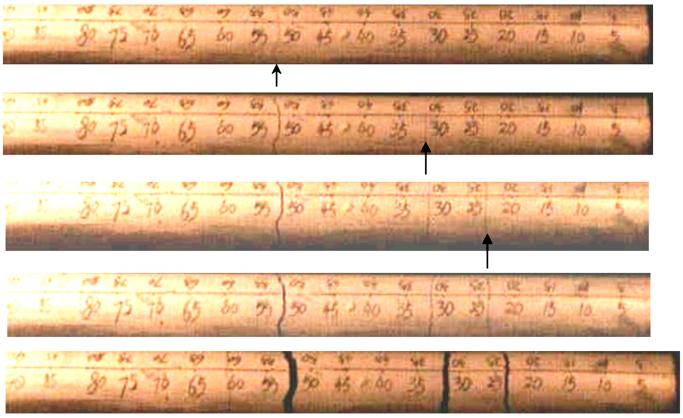

图 14　在 11 m/s 的撞击速度下，C60-0 素混凝土自由面反射的高速摄影结果[88]

Fig. 14　High-speed photographies for C60-0 concrete specimen subjected to the striker velocity of 11 m/s[88]

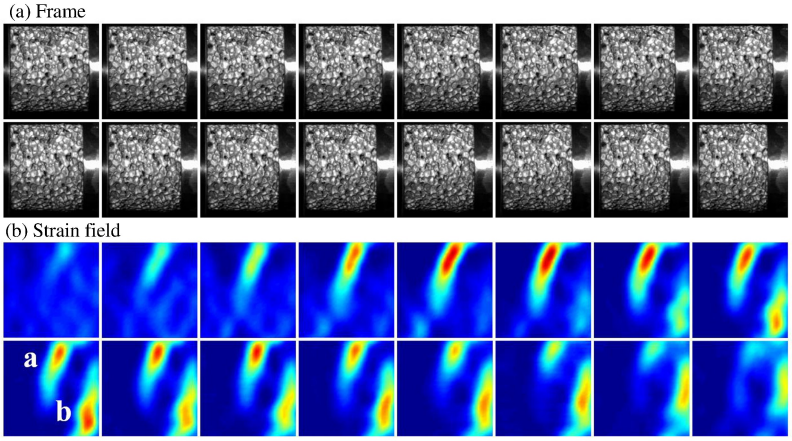

图 15　局部变形带发展过程[89]

Fig. 15　Development process of localized deformation band[89]

4　结 束 语

100 年来，Hopkinson 压杆实验技术能获得持续发展，其主要原因是它的思想创新。Hopkinson 压杆实验装置简单，但是其工作原理新颖，测试方法巧妙，因此这一实验技术在冲击动力学领域及其他与冲击过程相关的科技领域都得到了广泛应用。为了使这一实验技术得到进一步发扬光大，需要做的，仍然是思想创新，进一步拓宽该实验技术的改革思路。具体包括以下几点：(1)一维应力波假定和试件应力均匀假定是 SHPB 实验技术的 2 个最基本假定，但不应完全受其限制。当研究对象涉及到一些复杂材料时，上述一维应力波假定或试件应力均匀假定已很难保证，必须要有新的思路。例如，Wang Li-li 等[22]将 Hopkison 压杆实验技术与 Lagrenge 方法结合起来，从而可较好地解决混凝土材料 Hopkinson 压杆实验研究。又如，反分析法[16]是通过数值模拟的方法去消除一维应力波在粗杆中的弥散影响，但是这样的方法不易为实验人员推广应用。若将反分析法编写成子程序，固化到常规的 SHPB 数据处理程序中，从而可方便地用于直径、长度不一的 SHPB 实验装置。类似的，还可考虑将其他方法应用到 Hopkison 压杆实验技术中，进而可解决更多其他复杂问题。(2)电阻应变片技术曾因方法巧妙(无需直接测量试件材料的应力和应变)，测试技术成熟，使 SHPB 实验技术得以推广应用。然而，这一间接测量方法受 2 个基本假定的制约，而且能提供的只是试件的平均应力和平均应变。随着科学技术的进步，一些新的测试技术

能提供更多、更直观的信息。又例如,高速摄影能提供试件全场(整体)的变形/破坏全过程,这不仅为新的实验技术提出创造条件,也可利于试件材料变形/破坏的机理分析。

Hopkison 压杆实验技术发展及材料研究在中国大地上方兴未艾,愿这一实验技术能为今后的冲击动力学等研究领域发挥更好的作用。

参考文献:

[1] Hopkinson J. On the rupture of iron wire by a blow[C]// Proceedings of the Literary and Philosophical Society of Manchester, 1872,11:40-45.

[2] Hopkinson B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets[C]// Containing Papers of a Mathematical or Physical Character. London: Philosophical Transactions of the Royal Society, 1914,A213:437-456.

[3] Taylor G I. James Forrest lecture 1946: The testing of materials at high rates of loading[J]. Journal of the ICE, 1946,26(8):486-519.

[4] Volterra E. Alcuni risultati di prove dinamiche sui materiali[J]. Rivista del Nuovo Cimento, 1948(4):1-28.

[5] Davies R M. A critical study of the Hopkinson pressure bar[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1948,240(821):375-457.

[6] 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.

[7] 段祝平,孙琦清,杨大光,等.高应变率下金属动力学性能的实验与理论研究:一维杆的实验方法及其应用[J].力学进展,1980,10(1).

[8] 王礼立,胡时胜.钛合金 TB-2 在高应变率下的动态应力应变关系[J].爆炸与冲击,1985,5(1):9-15.
Wang Li-li, Hu Shi-sheng. The dynamic stress-strain relation of Ti-alloy TB-2 under high strain-rates[J]. Explosion and Shock Waves,1985,5(1):9-15.

[9] 羡梦梅.聚合物复合材料在高应变率下的力学性能[J].工程塑料应用,1989(3):46-53.
Xian Meng-mei. Dynamic mechanical properties of the high polymer and composite materials at high strain rates [J]. Engineering Plastics Application, 1989(3):46-53.

[10] 杨道明,于捷,李紫桐,等.高应变率下三种钢材性能及损伤机理的实验研究[J].兵工学报,1992(3):65-73.
Yang Dao-ming, Yu Jie, Li Zi-tong, et al. An experimental study on the tensile properties and damage mechanism of three alloy steels at high strain rate[J]. Acta Armamentarii, 1992(3):65-73.

[11] 杨桂通,宋育兆.固体材料在高应变率条件下的 TSHB 实验技术[J].应用数学和力学,1985,6(5):383-388.
Yang Gui-tong, Song Yu-zhao. The TSHB technique for material testing at high rates of strain[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1985,6(5):383-388.

[12] 宋顺成,田时雨.Hopkinson 冲击拉杆的改进及应用[J].爆炸与冲击,1992,12(1):62-67.
Song Shun-cheng, Tian Shi-yu. Dynamic tensile testing of materials using the hollow Hopkinson bars instead of the solid Hopkinson bars[J]. Explosion and Shock Waves, 1992,12(1):62-67.

[13] 宋力,胡时胜.SHPB 实验中的端面凹陷修正[J].爆炸与冲击,2010,30(2):203-208.
Song Li, Hu Shi-sheng. Correction of end-face indentation in SHPB test[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(2):203-208.

[14] 宋力,胡时胜.SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J].爆炸与冲击,2005,25(4):368-373.
Song Li, Hu Shi-sheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(4):368-373.

[15] 周风华,王礼立,胡时胜.高聚物 SHPB 试验中试件早期应力不均匀性的影响[J].实验力学,1992,7(1):23-29.
Zhou Feng-hua, Wang Li-li, Hu Shi-sheng. On the effect of stress nonuniformness in polymer specimen of SHPB tests[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1992,7(1):23-29.

[16] 王志华,马宏伟,赵隆茂,等.反分析法在泡沫金属材料动态性能实验中的应用[J].爆炸与冲击,2006,26(5):410-415.
Wang Zhi-hua, Ma Hong-wei, Zhao Long-mao, et al. Application of the inverse analysis to the experimental study

on dynamic behavior of metallic foam materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(5):410-415.

[17] 李夕兵,刘德顺,古德生.消除岩石动态实验曲线振荡的有效途径[J].中南工业大学学报:自然科学版,1995,26(4):457-460.
Li Xi-bing, Liu De-shun, Gu De-sheng. Effective method of elimilating the oscillation of rock dynamic stress-strain-strain rate curve[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 1995,26(4):457-460.

[18] 卢芳云, Chen W, Frew D J. 软材料的 SHPB 实验设计[J].爆炸与冲击,2002,22(1):14-19.
Lu Fang-yun, Chen W, Frew D J. A design of SHPB experiments for soft materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(1):14-19.

[19] 孟益平,胡时胜.混凝土材料冲击压缩试验中的一些问题[J].实验力学,2003,18(1):108-112.
Meng Yi-ping, Hu Shi-sheng. Some problems in the test of concrete under impact compressive loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003,18(1):108-112.

[20] 巫绪涛,胡时胜,孟益平.混凝土动态力学量的应变计直接测量法[J].实验力学,2004,19(3):319-323.
Wu Xu-tao, Hu Shi-sheng, Meng Yi-ping. Strain gauge measurement method of dynamic behavior for concrete [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004,19(3):319-323.

[21] 巫绪涛,胡时胜,田杰.PVDF 应力测量技术及其在混凝土冲击实验中的应用[J].爆炸与冲击,2007,27(5):411-415.
Wu Xu-tao, Hu Shi-sheng, Tian Jie. Stress-measurement method by PVDF gauge and its application to impact test for concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(5):411-415.

[22] Wang Li-li, Hu Shi-sheng, Yang Li-ming, et al. Development of experimental methods for impact testing by combining Hopkinson pressure bar with other techniques[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2014,27(4):331-344.

[23] 刘耀东,虞吉林,郑志军.惯性对多孔金属材料动态力学行为的影响[J].高压物理学报,2008,22(2):118-124.
Liu Yao-dong, Yu Ji-lin, Zheng Zhi-jun. Effect of inertia on the dynamic behavior of cellular metal[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008,22(2):118-124.

[24] 王宝珍.胡时胜.猪后腿肌肉的冲击压缩特性实验[J].爆炸与冲击,2010,30(1):33-38.
Wang Bao-zhen, Hu Shi-sheng. Dynamic compression experiments of porcine ham muscle[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(1):33-38.

[25] Wang L L, Labibes K, Azari Z, et al. Generalization of split Hopkinson bar technique to use viscoelastic bars[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994,15(5):669-686.

[26] Chen W, Lu F, Frew D J, et al. Dynamic compression testing of soft materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 2002,69(3):214-223.

[27] Ellwood S, Griffiths L J, Parry D J. Materials testing at high constant strain rates[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1982,15(3):280-282.

[28] 王礼立,杨黎明.固体高分子材料非线性黏弹性本构关系[C]//王礼立.余同希.冲击动力学进展.合肥:中国科技大学出版社,1992:88-116.

[29] Yang L M, Shim V P W. An analysis of stress uniformity in split Hopkinson bar test specimens[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(2):129-150.

[30] Zhu Jue, Hu Shi-sheng, Wang Li-li. An analysis of stress uniformity for viscoelastic materials during SHPB tests [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2006,3(2):125-148.

[31] Zhu Jue, Hu Shi-sheng, Wang Li-li. An analysis of stress uniformity for concrete-like specimens during SHPB tests[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(1):61-72.

[32] 周国才,胡时胜,付峥.用于测量材料高温动态力学性能的 SHPB 技术[J].实验力学,2010,25(1):9-15.
Zhou Guo-cai, Hu Shi-sheng, Fu Zheng. SHPB technique used for measuring dynamic properites of material in high temperature[J]. Chinese Journal of Experimental Mechanics, 2010,25(1):9-15.

[33] 李玉龙,索涛,郭伟国,等.确定材料在高温高应变率下动态性能的 Hopkinson 杆系统[J].爆炸与冲击,2005,25(6):487-492.
Li Yu-long, Suo Tao, Guo Wei-guo, et al. Determination of dynamic behavior of materials at elevated tempera-

tures and high strain rates using Hopkinson bar[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(6):487-492.

[34] Chu Chao-hsiang, Wang Li-li, Xu Da-ben. A non-linear thermo-viscoelastic constitutive equation for thermoset plastics at high strain rates[C]// Chien Wei-Zang. Proceedings of the International Conference on Nonlinear Mechanics. Beijing: Science Press, 1985:92-97.

[35] 施绍裘,干苏,王礼立. 国产航空有机玻璃在冲击载荷下的热黏弹性力学响应[J]. 宁波大学学报:理工版,1990,3(2):66-75.
Shi Shao-qiu, Gan Su, Wang Li-li. The thermo-viscoelastic mechanical behavior of an aeronautical PMMA under impact loading[J]. Journal of Ningbo University: Natural Science and Engineering Edition, 1990,3(2):66-75.

[36] Wang Li-li, Bao He-sheng, Lu Wei-xian. The dependence of adiabatic shear banding on strain-rate, strain and temperature[J]. Journal de Physique, 1988,49(9):207-214.

[37] 薛志刚 胡时胜. 水泥砂浆在主动围压下的动态力学性能[J]. 爆炸与冲击,2008,28(6):561-564.
Xue Zhi-gang, Hu Shi-sheng. Dynamic behavior of cement mortar under active confinement[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(6):561-564.

[38] 施绍裘,王礼立. 材料在准一维应变下被动围压的 SHPB 试验方法[J]. 实验力学,2000,15(4):377-384.
Shi Shao-qiu, Wang Li-li. Passive confined pressure SHPB test method for materials under quasi-one dimensional strain state[J]. Chinese Journal of Experimental Mechanics, 2000,15(4):377-384.

[39] 张磊,徐可立,刘瑞朝,等. 一种霍普金森压杆主动围压实验的围压缸装置:中国,CN202837089U[P]. 2013-3-27.

[40] 陈荣,卢芳云,林玉亮,等. 单脉冲加载的 Hopkinson 压杆实验中预留缝隙确定方法的研究[J]. 高压物理学报,2008,22(2):187-191.
Chen Rong, Lu Fang-Yun, Lin Yu-Liang, et al. Investigation of the pre-fixed gap in single-pulse loading technique of Hopkinson pressure bars[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008,22(2):187-191.

[41] 田杰,胡时胜. 准静态压缩应力-应变曲线测量方法的探索[J]. 实验力学,2005,20(2):265-269.
Tian Jie, Hu Shi-sheng. Investigation on the method of measuring quasi-static compression stress-strain curve[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005,20(2):265-269.

[42] Wang Li-li, Dong Xin-long. Positive and negative strain-rate effect for materials with damage and/or phase transformation at high strain rates[C]// Staudhammer K P, Murr L E, Meyers M A. Fundamental Issues and Applications of Shock-wave and High-strain-rate Phenomena. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 2001:193-200.

[43] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain rates and high temperatures[C]// Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. The Hague, The Netherlands, 1983:541-548.

[44] Wang Li-li. A thermo-viscoplastic constitutive equation based on hyperbolic shape thermo-activated barriers[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1984,106(4):331-336.

[45] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation mechanics based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. Journal of Applied Physics, 1987,61(5):1816-1825.

[46] 徐天平,王礼立,卢维娴. 高应变率下钛合金 Ti-6Al-4V 的热-黏塑性特性和绝热剪切变形[J]. 爆炸与冲击,1987,7(1):1-8.
Xu Tian-ping, Wang Li-li, Lu Wei-xian. The thermo-viscoplasticity and adiabatic shear deformation for a titanium alloy Ti-6Al-4V under high strain rates[J]. Explosion and Shock Waves, 1987,7(1):1-8.

[47] 包合胜,王礼立,卢维娴. 钛合金在低温下的高速变形特性和绝热剪切[J]. 爆炸与冲击,1989,9(2):109-119.
Bao He-sheng, Wang Li-li, Lu Wei-xian. The high velocity deformation and adiabtic shearing of a titanium alloy at low temperature[J]. Explosion and Shock Waves, 1989,9(2):109-119.

[48] 张磊,胡时胜,吴家俊. α-钛合金 TA6 的动态力学性能和绝热剪切现象分析[J]. 实验力学,2005,20(4):567-572.
Zhang Lei, Hu Shi-sheng, Wu Jia-jun. Analysis of adiabatic shearing phenomenon and dynamic mechanical performance on TA-6 of α- titanium alloy[J]. Chinese Journal of Experimental Mechanics, 2005,20(4):567-572.

[49] 魏志刚,李永池,李剑荣,等. 冲击载荷作用下钨合金材料绝热剪切带形成机理[J]. 金属学报,2000,36(12):1263-1268.
Wei Zhi-gang, Li Yong-chi, Li Jian-rong, et al. Formation mechensim of adiabatic shear band in tungsten heavy

alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000,36(12):1263-1268.

[50] 肖大武,李英雷,胡时胜,等.纯锆的压缩变形行为[J].稀有金属材料与工程,2008,37(12):2122-2124.
Xiao Da-wu, Li Ying-lei, Hu Shi-sheng, et al. Compression deformation behavior of puer zirconium[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008,37(12):2122-2124.

[51] 胡昌明.镁铝合金的动态力学性能研究[D].合肥:中国科学技术大学,2003:.

[52] Wang L, Dong X, Hu S, et al. A macro- and microscopic study of adiabatic shearing extension of mode-II crack at dynamic loading[J]. Journal de Physique IV, 1994,4:465-470.

[53] 唐志平,朱兆祥,王礼立,等.高应变率下环氧树脂的力学性能[C]//第二届全国爆炸力学会议论文集.扬州,1981.

[54] 杨黎明.王礼立.用 Eshelby 理论研究复合材料线黏弹性本构关系[J].爆炸与冲击,1991,11(3):244-251.
Yang Li-ming, Wang Li-li. An investigation on the linear viscoelastic constitutive relation for a composite on the basis of Eshelby's theory[J]. Explosion and Shock Waves, 1991,11(3):244-251.

[55] Yang L M, Shim V P W. A visco-hyperelastic constitutive description of elastomeric foam[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004,30(8/9):1099-1110.

[56] Wang L L, Shi S Q, Chen J Y, et al. Influence of strain-rate and stress-state on dynamic response of cement mortar[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamic, 2003,3(3):419-433.

[57] 王礼立,张忠伟,黄德进,等.船撞桥的钢丝绳圈柔性防撞装置的冲击动力学分析[C]//洪友士.应用力学进展:祝贺郑哲敏先生八十华诞.北京:科学出版社,2004:172-180.

[58] 周风华,王礼立,胡时胜.有机玻璃在高应变率下的损伤型非线性黏弹性本构关系及破坏准则[J].爆炸与冲击,1992,12(4):333-342.
Zhou Feng-hua, Wang Li-li, Hu Shi-sheng. A damage-modified nonlinear visco-elastic constitutive relation and failure criterion of PMMA at high strain-rates[J]. Explosion and Shock Waves, 1992,12(4):333-342.

[59] 朱兆祥,徐大本,王礼立.环氧树脂在高应变率下的热黏弹性本构方程和时温等效性[J].宁波大学学报:理工版,1988,1(1):58-68.
Zhu Zhao-xiang, Xu Da-ben, Wang Li-li. Thermoviscoelastic constitutive equation and time-temperature equivalence of epoxy resin at high strain rates[J]. Journal of Ningbo University, 1988,1(1):58-68.

[60] 谭子翰,徐松林,章超,等.不同温度下两种钨结构增强 Zr-基非晶合金动态压缩性能研究[J].爆炸与冲击,2013,33(3):225-230.
Tan Zi-han, Xu Song-lin, Zhang Chao, et al. Dynamic compressive properties of two tungsten structure reinforced Zr-based metallic glass composites at different temperatures[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(3):225-230.

[61] 刘剑飞,胡时胜,胡元育,等.花岗岩的动态压缩实验和力学性能研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5):618-621.
Liu Jian-fei, Hu Shi-sheng, Hu Yuan-yu, et al. Research on dynamic compressive testing and mechanics properties of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(5):618-621.

[62] 薛志刚,胡时胜.水泥砂浆在主动围压下的动态力学性能[J].爆炸与冲击,2008,28(6):561-564.
Xue Zhi-gang, Hu Shi-sheng. Dynamic behavior of cement mortar under active confinement[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(6):561-564.

[63] 陈柏生,胡时胜,马芹永,等.冻土动态力学性能的实验研究[J].力学学报,2005,37(6):724-728.
Chen Bai-sheng, Hu Shi-sheng, Ma Qin-yong, et al. Experimental research of dynamic mechanical behaviors of frozen soil[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005,37(6):724-728.

[64] 李英雷,胡时胜,李英华.A95 陶瓷材料的动态压缩测试研究[J].爆炸与冲击,2004,24(3):233-239.
Li Ying-lei, Hu Shi-sheng, Li Ying-hua. Research on dynamic behaviors of A95 ceramics under compression[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(3):233-239.

[65] 胡时胜,王道荣,刘剑飞.混凝土材料动态力学性能的实验研究[J].工程力学,2001,18(5):115-118.
Hu Shi-sheng, Wang Dao-rong, Liu Jian-fei. Experimental study of dynamic mechancial behavior of concrete[J]. Engineering Mechanics, 2001,18(5):115-118.

[66] 胡时胜,王道荣.冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系[J].爆炸与冲击,2002,22(3):242-246.

Hu Shi-sheng, Wang Dao-rong. Dynamic constitutive relation of concrete under impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(3):242-246.

[67] 巫绪涛,胡时胜,陈德兴,等.钢纤维高强混凝土冲击压缩的试验研究[J].爆炸与冲击,2005,25(2):125-131.
Wu Xu-tao, Hu Shi-sheng, Chen De-xing, et al. Impact compression experiment of steel fiber reinforced high strength concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(2):125-131.

[68] 胡俊,巫绪涛,胡时胜.EPS 混凝土动态力学性能研究[J].振动与冲击,2011,30(7):205-209.
Hu Jun, Wu Xu-tao, Hu Shi-sheng. Dynamic mechanical behavior of EPS concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(7):205-209.

[69] 朱珏.混凝土类材料冲击本构特性的 SHPB 技术及 Lagrange 反解法的研究[D].合肥:中国科学技术大学,2006.

[70] 胡时胜,刘剑飞,王梧.硬质聚氨酯泡沫塑料本构关系的研究[J].力学学报,1998,30(2):151-156.
Hu Shi-sheng, Liu Jian-fei, Wang Wu. Study of the constitutive relationship of rigid polyurethane foam[J]. Acta Mechanica Sinica, 1998,30(2):151-156.

[71] 王鹏飞,胡时胜.轴向尺寸对泡沫铝动静态力学性能的影响[J].爆炸与冲击,2012,32(4):393-398.
Wang Peng-fei, Hu Shi-sheng. Mechanical properties of foam aluminum with different sizes[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(4):393-398.

[72] 王鹏飞,徐松林,郑航,等.变形模式对多孔金属材料 SHPB 实验结果的影响[J].力学学报,2012,44(5):928-932.
Wang Peng-fei, Xu Song-lin, Zheng Hang, et al. Influence of deformation modes on SHPB experimental results of cellular metal[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2012,44(5):928-932.

[73] 王鹏飞,徐松林,李志斌,等.高温下轻质泡沫铝动态力学性能实验[J].爆炸与冲击,2014,34(4):433-438.
Wang Peng-fei, Xu Song-lin, Li Zhi-bin, et al. An experimental study on dynamic mechanical property of ultra-light aluminum foam under high temperatures[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(4):433-438.

[74] 胡时胜,王正道,赵立中.泡沫硅橡胶动态力学性能的实验研究[J].高分子材料科学与工程,1999,15(2):113-115.
Hu Shi-sheng, Wang Zheng-dao, Zhao Li-zhong. Experimental study of dynamic mechanical behaviors of sllicone rubber foam[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 1999,15(2):113-115.

[75] 王宝珍,胡时胜,周相荣.不同温度下橡胶的动态力学性能及本构模型研究[J].实验力学,2007,22(1):1-6.
Wang Bao-Zhen, Hu Shi-sheng, Zhou Xiang-rong. Research of dynamic mechanical behavior and constitutive model of rubber under different temperatures[J]. Chinese Journal of Experimental Mechanics, 2007,22(1):1-6.

[76] 王宝珍,胡时胜.猪后腿肌肉的冲击压缩特性实验[J].爆炸与冲击,2010,30(1):33-38.
Wang Bao-zhen, Hu Shi-sheng. Dynamic compression experiments of porcine ham muscle[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(1):33-38.

[77] 王宝珍,郑宇轩,胡时胜.猪后腿肌肉的动态拉伸性能[J].爆炸与冲击,2010,30(5):449-455.
Wang Bao-zhen, Zheng Yu-xuan, Hu Shi-sheng. Dynamic tensile properties of porcine ham muscle[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(5):449-455.

[78] 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 Peng-fei, Luo Bin-qiang, Hu Shi-sheng. Development of the casing type impact tension experiment device [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009,24(6):513-518.

[79] 胡时胜,邓德涛,任小彬.材料冲击拉伸实验的若干问题探讨[J].实验力学,1998,13(1):9-14.
Hu Shi-sheng, Deng De-tao, Ren Xiao-bin. A study on impact tensile test of materials[J]. Journal of Experimenal Mechanics, 1998,13(1):9-14.

[80] Zhang Lei, Hu Shi-sheng, Chen De-xing, et al. An experimental technique for spalling of concrete[J]. Experimental Mechanics, 2009,49(4):523-532.

[81] 李玉龙,郭伟国,贾德新,等.40Cr 材料动态起裂韧性 $K_{Id}(\dot{\sigma})$的实验测试[J].爆炸与冲击,1996,16(1):21-30.
Li Yu-long, Guo Wei-guo, Jia De-xin, et al. Experimental measurement of dynamic fracture initiation toughness of 40Cr steel[J]. Explosion and Shock Waves, 1996,16(1):21-30.

[82] 董新龙,虞吉林,胡时胜,等.高加载率下Ⅱ型裂纹试样的动态应力强度因子及断裂行为[J].爆炸与冲击,1998,18(1):62-68.
Dong xin-long, Yu Ji-lin, Hu Shi-sheng, et al. Stress intensity factor and fracture behavior for mode Ⅱ crack

specimen under high shear loading rate[J]. Explosion and Shock Waves, 1998,18(1):62-68.

[83] 崔云霄,卢芳云,林玉亮,等.一种新的高应变率复合压剪实验技术[J].实验力学,2006,21(5):584-590.
Cui Yun-xiao, Lu Fang-yun, Lin Yu-liang, et al. A new combined compression-shear loading technique at high strain rates[J]. Journal of Experimenal Mechanics, 2006,21(5):584-590.

[84] 郑文,徐松林,蔡超,等.基于 Hopkinson 压杆的动态压剪复合加载实验研究[J].力学学报,2012,44(1):124-131.
Zheng Wen, Xu Song-lin, Cai Chao, et al. A study of dynamic combined compression-shear loading technique based on Hopkinson pressure bar[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012,44(1):124-131.

[85] 李玉龙,郭伟国,贾德新,等.高 g 值加速度传感器校准系统的研究[J].爆炸与冲击,1997,17(1):90-96.
Li Yu-long, Guo Wei-guo, Jia De-xin, et al. An equipment for calibrating high shock acceleration sensors[J]. Explosion and Shock Waves, 1997,17(1):90-96.

[86] 王文军,胡时胜.高 g 值加速度传感器的标定[J].爆炸与冲击,2006,26(6):568-571.
Wang Wen-jun, Hu Shi-sheng. Calibration of high shock acceleration sensors[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(6):568-571.

[87] 张学舜,沈瑞琪.火工品动态着靶模拟仿真技术研究[J].火工品,2003(4):1-4.
Zhang Xue-shun, Shen Rui-qi. Study on dynamic tough-target analog simulation technique for initiating explosive devices[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2003(4):1-4.

[88] 张磊,胡时胜,陈德兴,等.混凝土材料的层裂特征[J].爆炸与冲击,2008,28(3):193-199.
Zhang Lei, Hu Shi-sheng, Chen De-xing, et al. Spall characteristics of concrete materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(3):193-199.

[89] 章超,徐松林,王鹏飞.基于数字图像相关方法对冲击载荷下泡沫铝全场变形过程的测试[J].实验力学,2013,28(5):629-634.
Zhang Chao, Xu Song-lin, Wang Peng-fei. Test of aluminum foam deforming process under impact load based on digital image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013,28(5):629-634.

Review of the development of Hopkinson pressure bar technique in China*

Hu Shi-sheng[1], Wang Li-li[2], Song Li[2], Zhang Lei[3]

(1. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *Anhui*, *China*;
2. *Mechanics and Materials Science Research Center, Ningbo University, Ningbo* 315211, *Zhejiang*, *China*;
3. *The Third Engineering Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Luoyang* 471023, *Henan*, *China*)

Abstract: This paper briefly reviews the development and application of the Hopkinson pressure bar experimental technique in China. The research works on the SHPB experimental techniques related to metal, polymer, composite, brittle material, concrete, soft material and foam material are presented. The results of the SHPB tests are discussed.

Key words: solid mechanics; Hopkinson pressure bar; experimental technique; metal; polymer; composite material; brittle material; concrete; soft material; foam material

* Received 10 September 2014; Revised 13 October 2014
Corresponding author: Hu Shi-sheng, sshu@ustc.edu.cn

(责任编辑　张凌云)