DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0881-07

波形整形技术在 Hopkinson 杆实验中的应用*

果春焕[1],周培俊[1],陆子川[1],常云鹏[1],邹广平[2],姜风春[1]

(1.哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院超轻材料与表面技术教育部重点实验室,哈尔滨 黑龙江 150001;
2.哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院,哈尔滨 黑龙江 150001)

摘要:由于波形整形技术可减小 Hopkinson 杆实验在撞击过程中产生的高频振荡以及实现试样在受载过程中的恒应变率加载,因此,波形整形技术越来越受到关注。本文中详细介绍了波形整形技术在 Hopkinson 杆的动态压缩、拉伸、巴西圆盘、弯曲断裂等实验中的研究进展,并给出了该技术在应用中需注意的问题。

关键词:固体力学;Hopkinson 杆;恒应变率;波形整形技术;动态应力平衡;动态断裂韧性

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

Hopkinson 杆实验技术最初是为了测量金属材料的动态压缩力学性能而提出的,现已延伸到拉伸[1-4]、扭转[5]、弯曲[6]等实验。测试的材料也从最初的金属材料扩展到高分子材料、陶瓷、复合材料、岩石、混凝土、火工品、生物材料、冰、液体材料、泡沫材料等。利用 Hopkinson 杆实验技术可测量工程材料的许多力学性能,例如应力应变响应(压缩、拉伸和剪切)、抗弯强度、动态硬度、动摩擦因数、动态载荷下的裂纹传播、起裂韧性、扩展韧性、止裂韧性、裂纹扩展速度等。但采用传统的 Hopkinson 杆实验技术[7-10]测试材料的力学行为时遇到了麻烦,如原始应力波形上常存在较严重的高频振荡,致使弥散效应对测试结果产生较大影响;对具有应变强化能力高的韧性材料进行实验时,得到的应变率历程是从高到低,导致试样在非恒应变率加载下变形等,这些都将会降低由 Hopkinson 杆测试系统上确定材料性能指标的可信度。因此,近年来人们在 Hopkinson 杆测试过程中引入了改变加载波形的波形整形技术,通过该技术已成功地获得了包括金属、合金、陶瓷、岩石、复合材料、聚合物和泡沫材料在动态载荷作用下的应力应变曲线。本文中将对 Hopkinson 杆实验技术中波形整形技术在动态压缩、动态拉伸、动态断裂等实验中的应用进行系统的归纳和分析,并提出了波形整形技术目前存在的局限性以及需要深入开展的工作。

1　波形整形技术的应用

1.1　动态压缩实验中的应用

采用波形整形技术的目的是获得特定的入射波特征(脉冲上升沿时间、脉冲持续时间、脉冲的幅值等),减小传统 Hopkinson 杆中加载脉冲的弥散效应、实现加载过程的恒应变率条件等局限性,从而为测量不同材料的力学行为提供所需要的加载脉冲,这个思想的理论基础是冲击波理论中采用多次冲击过程实现等熵加载的斜波设计思想[7]。目前,该技术已成熟地应用到了 Hopkinson 压杆加载的动态压缩实验中[11]。

1.1.1　改变撞击杆形状的方法

早在 20 世纪 70 年代,人们就开始讨论入射波形的整形对实验结果的影响。J. Duffy 等[5]首先提出了整形器的思想。其后,R. J. Christensen 等[12]在 Hopkinson 压杆上通过改变撞击杆的形状来改善岩

* **收稿日期**:2014-05-16;**修回日期**:2014-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(11172074,11402060);
中央高校基本科研业务费专项基金项目(HEUCFD15010)

第一作者:果春焕(1980—　),女,博士,讲师;**通讯作者**:姜风春,fengchunjiang@hrbeu.edu.cn。

石的应力应变曲线的初始部分。但这种改变撞击杆形状的方法只能改善试样内的应力均匀性，为确保试样在恒应变率条件下变形，S. Ellwood 等[13]在 Hopkinson 压杆实验中采用三杆加载法（如图 1 所示），比传统的 SHPB 系统多一根预加载杆和虚拟试样（整形器），其中预加载杆和虚拟试样的材料和尺寸分别与入射杆和试样的一致。理论和实验结果表明，模拟试样最好采用与真实试样相同的材料，这样它们就具有相同的屈服和流动行为，以致于相对于真实试样的入射脉冲具有与透射脉冲相近的形状，从而可获得近似平台的反射波，实现恒应变率加载的条件。针对这种方法虽实现了恒应变率加载条件的效果，但是对于消除高频振荡方面则存在一定的局限性。因此，在 S. Ellwood 等研究成果的基础上，D. J. Parry 等[14]采用了一种强度比入射杆强度要低的预加载杆，并取消了虚拟试样，从而简化了整个实验装置，获得了可基本消除振荡的入射波，但这种方法最大的不足是不能保证试样在恒定应变率加载条件下变形。在上述研究结果的基础上，人们尝试通过改变撞击杆的形状来大幅度改变入射波的形状。T. J. Cloete 等[15]利用锥形撞击杆实现对牛骨头恒应变率加载条件下的动态压缩实验。R. J. Christensen 等[12]用锥形撞击杆成功地实现了对脆性材料（岩石）的恒应变率加载过程。X. B. Li 等[16-17]对撞击杆两端均设计成锥形，用其对岩石进行加载，可消除加载波的振荡和实现恒应变率加载。T. S. Lok 等[18]采用 2 种长短不同的锥形撞击杆研究其对钢纤维混凝土材料冲击响应的影响。

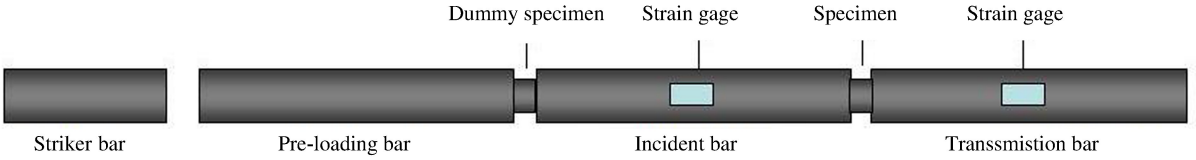

图 1 带有预加载杆和虚拟试样的 Hopkinson 压杆装置系统[13]

Fig. 1 Hopkinson pressure bar apparatus with pre-loading bar and dummy specimen[13]

波形整形技术逐渐被应用到 Hopkinson 杆加载系统上，为获得合理有效的波形整形效果，不仅从实验的角度开展了大量的工作，也有人通过数值模拟的方式研究整形器的材料、几何尺寸等方面开展工作。P. Baranowski 等[19]通过改变撞击杆的形状研究其对入射波峰值形状的影响，试图找到合适的撞击杆形状。R. Naghdabadi 等[20]分别从改变整形器的厚度、直径、撞击杆的长度以及撞击速度等方面研究其对加载波形的影响，结果表明，若测试加工硬化的材料，则需要用相对直径较大的整形器；对于不同的撞击速度，则需要按照整形器厚度和横截面积正比于撞击速度的情况来确定整形器的形状。通过一系列的测试和模拟结果，得到了上述对实验具有指导意义的规律。S. Nemat-Nasser 等[2]考虑了整形器塑性变形的模型，利用幂指数关系模拟铜合金作为整形器条件下产生的入射波形状。D. J. Frew 等[21-22]对 S. Nemat-Nasser 的模型进行了扩展，将其应用到 2 种材料的整形器上，结果表明，当整形器的几何尺寸和撞击速度改变时可获得较宽范围的入射波形。H. Ramirez 等[23]模拟了整形器的材料类型和尺寸对入射波的影响。李夕兵等[24]将撞击杆设计成变截面的圆柱体，采用数值模拟的方法，得到了适于测试岩石的大直径 Hopkinson 杆对应的撞击杆。由此可见，这种改变撞击杆形状的方法虽可改善加载波形状，但需加工不同形状的撞击杆，使撞击杆重复使用率下降，进而增加了测试过程的复杂性。

1.1.2 整形器的方法

C. E. Franz 和 P. S. Follansbee 等[25-26]讨论了入射波整形的必要性和优越性，研究 Ellwood 的整形方法发现，真正对波形有影响的是整形器。S. C. Woo 等[27]用铜作为整形器研究了装甲结构材料的动态压缩行为。陶俊林等[28]采用整形器的材料和尺寸与试样一致的方法，获得了恒应变率加载的过程。K. S. Vecchio 等[29]选择采用高强度、高加工硬化率的材料作为整形器，得到了针对高强度和加工硬化行为较高材料合适的整形器尺寸。由此可见，采用波形整形的 Hopkinson 压杆可用来获得金属材料的动态压缩行为，由于大部分金属材料都表现为近似双线性的弹塑性硬化特性，Hopkinson 杆实验中理想的入射脉冲形状也应保持类似的双线性硬化特性以使试样在恒应变率加载下变形。

脆性材料的力学响应常表现出近似线弹性的应力应变力学行为，因此，入射脉冲的形状应近似于线

性的斜坡脉冲，才可确保试样在恒应变率加载条件下变形，同时，为使试样在最短时间内达到应力均匀状态，该线性斜坡脉冲的上升沿时间不能太短。由此，针对脆性材料在冲击载荷作用下的变形行为，开展了相应的测试技术方面的研究工作。O. S. Lee 等[30]采用纯铜作为整形器，实现了牛股骨试样的动态平衡状态，给出了入射波上升沿时间与整形器厚度之间的关系，但该关系式并不能推广应用到其他材料的测试。W. M. Li 等[31]通过分析整形器直径对混凝土测试结果的影响指出，采用合理的整形器尺寸可实现恒应变率加载过程；并得到实现不同应变率，需设计不同几何尺寸的整形器。汪洋等[32]采用整形器消除了加载波形的振荡且对冰试样实现了恒应变率加载的过程。W. Chen 等[33]采用了两撞击杆的方法研究装甲用陶瓷材料的损伤演化过程，在两次撞击的过程中实现了恒应变率加载，这主要依赖于选用了两个合适的整形器，其中一个是粘贴在入射杆的撞击端，而另一个管状的则安放在两撞击杆中间。对于整形器在脆性材料动态变形行为的研究中所发挥的作用可见，需根据测试材料和应变率的不同，设计不同的整形器几何尺寸。

对低阻抗材料而言，试样内的应力均匀性成为 Hopkinson 压杆实验中的重要问题。此外，这类材料对应变率非常敏感，因而确保在整个 Hopkinson 压杆实验过程中的恒应变率加载也是必须的，上述是获得可靠的软材料 Hopkinson 压杆实验数据的基本条件。T. Yokoyama 等[34]采用锥形撞击杆测试环氧树脂和甲基丙烯酸酯胶黏剂材料的动态压缩行为，实现了恒应变率加载的过程，但无法实现试样的应力平衡状态。W. Chen 等[35]利用整形器增加了入射波的上升沿时间以保证低阻抗和低强度的试样在加载过程中应力平衡和均匀变形。B. Song 等[36]在超长 Hopkinson 压杆上采用整形器，实现了周期为 3ms 的加载波形，可对 PMDI 泡沫材料实现量级为 10 s^{-1} 的应变率条件下的加载过程，从而填补了准静态和动态加载之间的中应变率加载条件空白。因此，对于这类低阻抗材料动态力学行为测试，需特别注意是否可满足试样在恒应变率条件下加载和其受力状态的平衡性。

波形整形技术已广泛应用于 Hopkinson 压杆测试材料动态力学行为，但从上述的介绍可知，针对不同的被测材料，需开展大量的实验工作获取相应的整形器材料和几何尺寸，若整形器选材不当，将使其在受载过程中产生大量的塑性变形，导致入射脉冲宽度过宽，从而致使无法获取完整的加载波形。因此，S. Nemat-Nasser 等[2]首先提出了整形器的理论模型，D. J. Frew 等[22]和赵习金等[37-38]深入研究了作用于软材料的波形整形技术，应用一维应力波的理论知识，建立了不可压缩材料作为整形器条件下入射波形的理论模型

$$\sigma_i(t)=\begin{cases}\dfrac{\sigma_0 a_0 f(\varepsilon_p)}{A\left[1-\varepsilon_p(t)\right]} & \text{加载时}\\ \dfrac{a_0}{A\left[1-\varepsilon_p(t)\right]}\left[\sigma_p^*-E_p(\varepsilon_p^*-\varepsilon_p(t))\right] & \text{卸载时}\end{cases} \tag{1}$$

式中：$\sigma_i(t)$ 为入射应力，σ_0 为整形器材料常数，a_0 为整形器的初始横截面积，$\varepsilon_p(t)$ 为整形器的应变，σ_p^*、ε_p^* 为整形器卸载时的应力和应变，A 为入射杆和撞击杆的横截面积。

由式(1)给出的入射应力与整形器变形情况之间的关系，可根据实验过程中所选择的整形器材料及几何尺寸理论计算得到入射杆上的应力大小，这种预估入射脉冲的方法，可尽量减少为获得合适的整形器几何尺寸而开展的尝试性实验。

综上所述可知，波形整形技术已在动态压缩实验中得到了广泛应用，但在动态拉伸实验中的应用相对较少。B. Erzar 等[39]通过改变撞击杆形状获得合适的加载波形来测试混凝土材料高应变率加载条件下的拉伸强度。R. Gerlach 等[1]在实验过程中同时采用 2 种不同形状(圆形和凸台式)的整形器，从而改善了动态拉伸实验过程中波形的情况。后来他们设计了一种新颖的 Hopkinson 拉伸设备[3]，不仅拉长了入射波的周期，还可同时采用不同形状的整形器。M. Shazly 等[40]在测试 Gamma-Met PX 材料的拉伸性能时，仅仅是采用该技术实现试样在恒应变率加载条件下的变形。W. Chen 等[4]用 Hopkinson 拉杆中运用波形整形技术测试 Epon828/T-403 和有机玻璃的动态拉伸响应，但其结果的有效性和可靠性还有待进一步验证。对波形整形技术在动态拉伸实验中的应用还需进一步深入地开展相关工作。

1.2 巴西圆盘实验中的应用

作为间接拉伸实验技术，巴西圆盘实验已越来越多地用于测试脆性材料的拉伸强度，但是由于脆性材料的变形和断裂时间短，材料的变形和断裂易在应力不平衡的状态下完成，因此，为提高测试结果的有效性和可靠性，人们逐渐把波形整形技术应用到巴西圆盘实验中。T. Saksala 等[41]利用橡胶作为整形器通过数值模拟和实验相结合的方法研究了花岗岩的巴西圆盘实验，结果表明，橡胶作为整形器未起到减少加载波形振荡的效果。R. Chen 等[42]运用巴西圆盘的方法测试脆性材料拉伸性能时，采用整形器对加载波形进行修正，结果则表明，由于整形器选材上的问题，使得在记录波形的应变片粘贴位置不变的情况下，入射波形和反射波形之间有一定的叠加，这种现象的存在为后期处理实验数据带来了不必要的麻烦。

S. Dong 等[43]进行的两杆/巴西圆盘断裂实验的有限元分析也表明，延长入射脉冲上升沿时间有利于试样内达到应力平衡状态。这些结果表明，具有相对较长上升沿时间的入射脉冲对减少应力波弥散十分有效；波形整形也有助于试样内达到应力平衡状态。F. Dai 等[44-45]在运用半圆形弯曲技术测试动态断裂韧性实验中使用了整形器，通过粘贴在试样上的应变片和激光间歇式的应变片观测试样受载过程，结果表明，利用波形整形技术实现了试样受载过程中的应力平衡状态，使试样的起裂时间与载荷的峰值相对应，并用有限元计算的断裂韧性值与采用准静态下的计算方法得到的结果一致。由此可见，在巴西圆盘动态断裂实验中使用整形器，不仅可以减小加载波形的振荡，还可以实现受载试样的应力平衡状态，进而可以采用准静态分析方法研究材料在动态加载下的性能，从而简化了动态断裂的测试过程。

1.3 动态弯曲断裂实验中的应用

为将入射脉冲整形到满意的特征，在 Hopkinson 杆实验中通过使用具有一定形状的撞击杆[12,15-19]和整形器[1-2,20-24,28-29,31-32,35-36,46]来整形入射脉冲。无论是哪种类型的整形技术，其目的是实现恒应变率加载的条件，确保待测材料在应力平衡状态下变形。迄今为止，在 Hopkinson 杆的动态断裂实验中关于波形整形技术方面的工作还较少[47-58]。K. Ogawa 等[48]在两杆/3PB(three-point bending)实验中首次提出采用波形整形技术，短的柱状锌作为整形器用于测量复合弯曲试样的弯曲强度。在此基础上，T. Kusaka 等[49]扩展了该技术，在三杆/3PB 断裂实验中用锡箔作为整形器来测量模式 II 下复合材料的层间断裂韧性。在后续工作中[50]，他们采用有限元方法研究了锡箔对裂纹尖端附近剪切应力区分布的影响，表明当入射脉冲具有足够大的振幅和较长上升沿时，试样的应力状态和变形模式与在准静态加载条件下的基本一致。对 PMMA 材料在三杆/3PB 弯曲的 Hopkinson 装置上采用了厚度为 10 mm 的硅橡胶板开展 I 型的断裂韧性测试[51]，表明试样裂纹尖端区域的应力状态可达到准静态加载下的状态，对于动态断裂韧性可运用准静态断裂力学公式来计算。但 M. Todo 等[52]的有限元分析表明在波形整形的断裂实验中，运用准静态应力状态下的公式计算动态应力强度时，应考虑加速度的影响。F. Jiang 等[53]在两杆/3PB 实验中采用了 1 层纸质脉冲整形器，得到了试样两个断面处的载荷。结果表明，在无波形整形和有波形整形实验中各自达到应力状态平衡所需的时间分别约 50 μs 和约 16 μs，可见达到应力状态平衡所需的时间可以通过整形器来改变；并且有无整形器得到的载荷曲线上的振荡性说明了整形器的存在减小了应力波的弥散效应。

此外，正如在单杆/3PB 断裂实验中 C. Bacon 的数据和实验结果[58]所证实的那样，由入射杆非均匀端区域产生的波的弥散影响可以通过采用具有相对较长上升沿时间的入射脉冲来降低。这类优化入射脉冲的另一个重要作用还表现在它可以避免试样在冲击过程中发生脱离现象[58]，综上所述，虽然整形器在动态断裂韧性实验中的应用主要是增加入射脉冲的上升沿时间，并有利于试样内的应力状态达到准静态加载下对应的应力状态，但对于整形器对应力波传播行为的影响规律以及对动态断裂测试中实验结果的处理方式等方面的研究工作甚少。

综上所述，波形整形技术已广泛应用于 Hopkinson 压杆测试材料动态力学行为，不同实验材料和类型，所采用的整形器类型和材料均不同，需开展大量的实验工作获取相应的整形器材料和几何尺寸，若整形器选材不当，将使其受载过程中产生大量的塑性变形，导致入射脉冲宽度过宽，从而致使无法获

取完整的加载波形。目前，虽建立了针对整形器材料为不可压缩均匀变形条件下的波形整形技术理论模型，但对于该技术之所以可改变波的形状、实现恒应变率加载以及应力平衡的物理本质，还是未知。因此，彻底分析和弄清波形整形（整形器方法）的机理，需进一步深入开展这方面的工作。

2 结 束 语

重点阐述了近年来整形器在 Hopkinson 杆系统上不同类型实验中的应用，即动态压缩、拉伸、巴西圆盘、动态断裂等实验中的应用以及对测试结果的影响，对其进行了深入的分析与评价。而对波形整形技术在动态断裂实验中的应用较少，对动态断裂性能指标的影响规律研究还需继续深入开展。

参考文献：

[1] Gerlach R, Sivasubramaniam K, Sathianathan C S, et al. A novel method for pulse shaping of split Hopkinson tensile bar signals [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011,38(12):976-980.

[2] 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 Physical and Engineering Sciences, 1991,435(11):371-391.

[3] Gerlach R, Kettenbeil C, Petrinic N. A new split Hopkinson tensile bar design[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012,50(12):63-67.

[4] Chen W, Lu F, Cheng M. Tension and compression tests of two polymers under quasi-static and dynamic loading[J]. Polymer Testing, 2002,21(2):113-121.

[5] Duffy J, Campbell J D, Hawley R H. On the use of a torsional split Hopkinson bar to study rate effects in 1100-O aluminum[J]. Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics, 1971,38(1):83-91.

[6] Jiang F, Vecchio K S. Hopkinson bar loaded fracture experimental technique: A critical review of dynamic fracture toughness tests [J]. Applied Mechanics Reviews, 2009,62(060902):1-39.

[7] Chuban V D, Ivanteyev V I, Chudayev B J, et al. Numerical simulation of flutter validated by flight-test data for TU-204 aircraft [J]. Computer Structure, 2002,80(32):2551-2563.

[8] Saeedi M A, Barkhordari M A. Dynamic behaviour of space structures using models of different pattern density[J]. Computing Developments in Civil and Structural Engineering, 1999:59-63.

[9] Sinha G, Mukhopadhyay M. Transient dynamic response of arbitrary stiffened shells by the finite element method[J]. Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME, 1995,117(1):11-16.

[10] Ghoshal A, Harrison J, Sundaresan M J, et al. Damage detection testing on a helicopter flexbeam[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2001,12(5):315-330.

[11] 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. 合肥，2004:1-70.

[12] Christensen R J, Swanson S R, Brown W S. Split-Hopkinson-bar tests on rocks under confining pressure[J]. Experimental Mechanics, 1972,12(11):508-513.

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

[14] Parry D J, Walker A G, Dixon P R. Hopkinson bar pulse smoothing[J]. Measurement Science & Technology, 1995,6(5):443-446.

[15] Cloete T J, Westhuizen A V, Kok S, et al. A tapered striker pulse shaping technique for uniform strain rate dynamic compression of bovine bone[J]. DYMAT International Conferences, 2009,1:901-907.

[16] Li X B, Lok T S, Zhao J, et al. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000,37(7):1055-1060.

[17] Li X B, Lok T S, Zhao J. Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005,38(1):21-39.

[18] Lok T S, Asce M, Zhao P J. Impact response of steel fiber-reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004,16(1):54-59.

[19] Baranowski P, Malachowski J, Gieleta R, et al. Numberical study for determination of pulse shaping design variables in SHPB apparatus[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2013,61(2):459-466.

[20] Naghdabadi R, Ashrafi M J, Arghavani J. Experimental and numerical investigation of pulse-shaped split Hopkinson pressure bar test[J]. Material Science and Engineering: A, 2012,539(3):285-293.

[21] Frew D J, Forrestal M, Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. Experimental Mechanics, 2002,42(1):93-106.

[22] Frew D J, 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.

[23] Ramirez H, Gonzalez R C. Finite-element simulation of wave propagation and dispersion in Hopkinson bar test[J]. Materials and Design, 2006,27(1):36-44.

[24] 李夕兵,周子龙,王卫华.运用有限元和神经网络为SHPB装置构造理想冲头[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23):4215-4218.
Li Xi-bing, Zhou Zi-long, Wang Wei-hua. Construction of ideal striker for SHPB device based on FEM and neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(23):4215-4218.

[25] Franz C E, Follansbee P S, Wright J. New experimental techniques with the split Hopkinson pressure bar[C]//Berman I, Schroeder J W. 8th Internatinal Conference on High Energy Rate Fabrication, Pressure Vessel and Piping Division, ASME. San Antonio, TX, 1984.

[26] Follansbee P S. Mechanical testing and evaluations[M]. ASM Handbook, ASM, Materials Park, OH, 1985.

[27] Woo S C, Kim J T, Cho C H, et al. The dynamic compressive behavior of armor structural materials in split Hopkinson pressure bar test[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2013,48(7):420-4369.

[28] 陶俊林,田常津,陈裕泽,等.SHPB系统试件恒应变率加载实验方法研究[J].爆炸与冲击,2004,24(5):413-418.
Tao Jun-lin, Tian Chang-jin, Chen Yu-ze, et al. Investigation of experimental method to obtain constant strain rate of specimen in SHPB[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(5):413-418.

[29] Vecchio K S, Jiang F. Improved pulse shaping to achieve constant strain rate and stress equilibrium in split Hopkinson pressure bar testing[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2007,38(11):2655-2665.

[30] Lee O S, Jin S P. Dynamic deformation behavior of bovine femur using SHPB[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011,25(9):2211-2215.

[31] Li W M, Xu J Y. Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009,513-514(7):145-153.

[32] 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 Yu-long, Liu Chuan-xiong. Dynamic mechanical behaviors of ice at high strain rates[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(2):215-219.

[33] Chen W, Luo H. Dynamic Compressive responses of intact and damaged ceramics from a single split Hopkinson pressure bar experiment[J]. Experimental Mechanics, 2004,44(3):295-299.

[34] Yokoyama T, Nakai K, Yatim N H M. High strain-rate compressive behavior of bulk structural adhesives: Epoxy and methacrylate adhesives[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2012,6(2):131-143.

[35] Chen W, Lu F, Zhou B. A quartz-crystal-embeded split Hopkinson pressure bar for soft materials[J]. Experimental Mechanics, 2000,40(1):1-6.

[36] Song B, Syn C J, Grupido C L, et al. A long split Hopkinson pressure bar (LSHPB) for intermediate-rate characterization of soft materials[J]. Experimental Mechanics, 2008,48(6):809-815.

[37] 赵习金,卢芳云,王悟,等.入射波整形技术的实验和理论研究[J].高压物理学报,2004,18(3):231-236.
Zhao Xi-jin, Lu Fang-yun, Wang Wu, et al. The experimental and theoretical study on the incident pulse shaping technique[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004,18(3):231-236.

[38] 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.

[39] Erzar B, Forquin P. An experimental method to determine the tensile strength of concrete at high rates of strain[J]. Experimental Mechanics, 2010,50(7):941-955.

[40] Shazly M, Prakash V, Draper S. Mechanical behavior of Gamma-met PX under uniaxial loading at elevated temperatures and high strain rates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004,41(22/23):6485-6503.

[41] Saksala T, Hokka M, Kuokkala V, et al. Numerical modeling and experimentation of dynamic Brazilian disc test on Kuru granite [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013,59(4):128-138.

[42] Chen R, Dai F, Qin J, Lu F. Flattened Brazilian disc method for determining the dynamic tensile stress-strain curve of low strength brittle solids[J]. Experimental Mechanics, 2013,53(7):1153-1159.

[43] Dong S, Wang Y, Xia Y. A finite element analysis for using Brazilian disk in split Hopkinson pressure bar to investigate dynamic frac-ture behavior of brittle polymer materials[J]. Polymer Testing, 2006,25(7):943-952.

[44] Dai F, Chen R, Xia K. A semi-circular bend technique for determining dynamic fracture toughness[J]. Experimental Mechanics, 2010,50(6):783-791.

[45] Dai F, Chen R, Iqbal M J, et al. Dynamic cracked chevron notched Brazilian disc method for measuring rock fracture parameters [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010,47(4):606-613.

[46] Évora V M F, Jain N, Shukla A. Fabrication, characterization, and dynamic behavior of polyester/TiO_2 nanocomposites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003,361(1/2):358-366.

[47] Jiang F, Vecchio K S, Rohatgi A. Analysis of modified split Hopkinson pressure bar dynamic fracture test using an inertia model [J]. International Journal of Fracture, 2004,126(2):143-164.

[48] Ogawa K, Higashida F. Impact three-point bending tests by applying ramped incident wave[J]. Reinforced Plastics, 1990,36:123-129.

[49] Kusaka T, Yamauchi Y, Kurokawa T. Effects of strain rate on mode Ⅱ interlaminar fracture toughness in carbon-fibre/epoxy laminated composites[J]. Journal de Physique Ⅳ: C, 1994,4(8):671-676.

[50] Kusaka T, Kurokawa T, Hojo M, et al. Evaluation of mode Ⅱ interlaminar fracture toughness of composite laminates under dynamic loading[J]. Key Engineering Materials, 1998,141/142/143:477-500.

[51] Todo M, Takahashi K. Measurement of dynamic fracture toughness of polymeric materials using impact bend test[J]. Engineering Science Reports, Kyushu University, 1998,20:267-273.

[52] Todo M, Tanaka A, Arakawa K. Examination of SHPB type impact fracture toughens testing method by dynamic finite element analysis[J]. Society of Materials Science of Japan, 2006,55(9):813-818.

[53] Jiang F, Vecchio K S. Dynamic effects in Hopkinson bar four-point bend fracture[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2007,38(12):2896-2906.

[54] Nakamura T, Shih C F, Freund L B. Elastic-plastic analysis of a dynamically loaded circumferentially notched round bar[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985,22(3):437-452.

[55] Wang Q Z, Jia X M. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic, modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: Analysis and numerical results[J]. International Journal of Rock Mechanics and Minner Science, 2004,41(2):245-253.

[56] Wang Q Z, Li W, Song X L. A method for testing dynamic tensile strength and elastic modulus of rock materials using SHPB[J]. Pure and Applied Geophysics, 2006,163(5):1091-1100.

[57] 张盛,王启智.采用中心圆孔裂缝平台圆盘确定岩石的动态断裂韧度[J].岩土工程学报,2006,28(6):723-728.
Zhang Sheng, Wang Qi-zhi. Method for determination of dynamic fracture toughness of rock using holed-crack flattened disc specimen[J]. Chinese Journal of Geotechical Engineering, 2006,28(6):723-728.

[58] Bacon C, Färm J, Lataillade J L. Dynamic fracture toughness determined from load-point displacement[J]. Experimental Mechanics, 1994,20(1):217-223.

Application of pulse shaping technique in Hopkinson bar experiments

Guo Chun-huan[1], Zhou Pei-jun[1], Lu Zi-chun[1], Chang Yun-peng[1],
Zou Guang-ping[2], Jiang Feng-chun[1]

(1. *Key Laboratory of Superlight Materials and Surface Technology, Ministry of Education, College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *Heilonhjiang, China*;
2. *College of Aerospace and Civil Engineering Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *Heilongjiang, China*)

Abstract: New findings in the research of pulse shaping technique are widely used in dynamic compressive test. Dynamic tension, Brazilian disc test and dynamic bending fracture test are introduced in detail. Furthermore, the problems found in the application of the pulse shaping technique are summarized, and the directions for further research in this area are put forward.

Key words: solid mechanics; Hopkinson bar; constant strain rate; pulse shaping technique; dynamic stress equilibrium; dynamic fracture toughness

(责任编辑　曾月蓉)