文章编号：1001-4888(2017)06-0771-10

SHPB 实验过程中岩石变形破坏的实时物像同步分析*

万璋[1]，范立峰[2]，王林[3]，巩荣耀[3]

(1. 浙江大学建筑与工程学院，浙江杭州 310058；2. 北京工业大学建工学院，北京 100024；
3. 中铁十二局集团第二工程有限公司，山西太原 030032)

摘要： 典型的岩石动态压缩应力－应变曲线有不同的阶段，岩石变形、破坏形态也有不同的图像表征，力学响应和图像表征具有一一对应关系。针对上述特性，组合分离式霍普金森压杆(SHPB)与高速摄像机，建立物像同步分析装置，系统研究了岩石在冲击荷载下完整的应力和应变动态响应，并实时采集图像信号。最终，根据应力波传播理论，编制了物象同步分析程序，通过界面显示可实现力学响应与图像表征同步分析。该程序直观地反映了岩石在冲击荷载作用下，应力－应变曲线中不同阶段的力学特性及与其对应的试样开裂情况、破坏趋势、损伤程度等图像表征，清晰地揭示了岩石变形破坏过程的力学机理。

关键词： 物像同步；岩石；分离式霍普金森压杆(SHPB)；应力－应变关系；动态力学性能

中图分类号： TU455 **文献标识码：** A DOI：10.7520/1001-4888-16-206

0 引言

岩石力学(Rock Mechanics)是一门研究岩石在外界因素(如荷载、水流、温度变化等)作用下的应力、应变、破坏、稳定性及加固的学科，其研究目的在于解决水利、土木工程等建设中的岩石工程问题[1-4]。目前，岩石静态力学性能的研究趋于成熟，其动态力学特性或动静组合作用下的冲击破坏特性成为国内外学者的研究热点之一[5-10]。

分离式霍普金森压杆(SHPB)是研究岩石动态力学性能的常用设备[11,12]。国内外的学者利用SHPB进行了大量的相关实验，研究了不同荷载作用下岩石的工程力学特性。刘剑飞等[13]在 Hopkinson 压杆上利用预留间隙法对花岗岩材料开展了高应变率动态实验，发现花岗岩材料有很明显的应变率硬化效应和损伤软化效应；夏昌敬等[14]利用分离式 Hopkinson 压杆装置测量了砂岩的动态力学特性，分析了砂岩在冲击过程中的能量耗散过程，进一步讨论了孔隙率对岩石能量耗散的影响；翟越等[15]利用脉冲整形器改进后的 SHPB 系统对花岗岩材料进行了高应变率下的单轴压缩实验，发现随着应变率的增加，材料抗压强度随之增加，破碎程度也有所提高；尹土兵等[16]利用大杆径 SHPB 实验系统，对不同高温处理后的粉砂岩试样进行了动态力学特性测试；任兴涛等[17]利用 SHPB 实验装置进行花岗岩的动态压缩实验和动态劈裂拉伸实验，其结果表明花岗岩的动态压缩和动态劈裂拉伸的力学性能表现出显著的应变率效应；李夕兵等[18]利用研制的岩石动静组合加载 SHPB 实验装置，系统研究了岩石在一维动静组合加载下的冲击破坏特性；李娜娜等[19]采用 SHPB 系统开展实验研究，分析了不同接触面

* **收稿日期：** 2016-10-12；**修回日期：** 2016-12-02
基金项目： 国家自然科学基金(11572282，11302191)资助
通讯作者： 范立峰(1980－)，男，博士，教授。主要研究领域：岩石力学与岩土工程。Email：fanlifeng@bjut.edu.cn

积比节理的动态力学特性以及节理的接触面积几何分布对应力波传播特性的影响。SHPB 能够方便地分析得到岩石在高应变率下的动态应力－应变本构关系，但缺乏应力－应变曲线各个阶段下岩石冲击破坏过程的可视化研究，无法从试样的形状变化和破裂情况分析其力学机理。因此，有必要发展一种实验方法能够分析岩样变形破坏过程中各个状态点的几何特征。

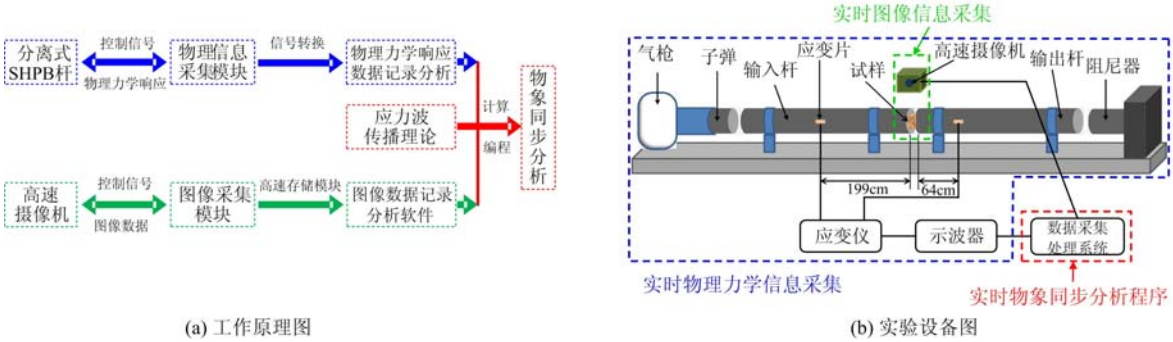
随着科学技术的发展，图像技术逐渐运用于岩石力学的研究中。赵永红等[20]用扫描电镜获得细砂岩表面的灰度分布图，研究了含微裂纹的岩石的变形；陈从新等[21]对数字图像技术在岩石细观力学定量研究中的成果进行了系统评述，探讨了各种方法的优缺点，分析展望了数字图像技术在岩石细观究领域中的应用前景。数字图像技术不仅应用于岩石的静态细观结构，也开始应用于研究岩石破坏变形期间微裂纹的发展过程和破坏过程，满足 SHPB 实验中岩石动态冲击变形破坏过程的可视化需求。李地元等[22]在含孔洞岩石试样 SHPB 冲击压缩试样中，利用高速摄像机完整记录了裂纹的萌生、扩展和贯通直至试样破坏的过程，分析了试样破坏模式和裂纹扩展特性；殷志强等[23]利用高速摄像技术拍摄试样破坏过程，直观反映了试样的动态破坏过程；刘冬梅等[24]利用实时全息干涉法、高分辨率数字摄像机与计算机图像处理系统相连接的三位一体化测量系统，连续动态观测了单轴受压砂岩、花岗岩和压剪受荷砂岩试样裂纹扩展与变形破坏过程。目前的研究主要针对岩石动态本构关系的特殊点(例如，屈服点、起裂点、破坏点等)，人工调取高速摄像图像信息。该方法存在两个弊端：第一，人工调取图像信息往往采用逐帧观察对比，极大地浪费人力物力，同时增加人为引入误差的风险；第二，只能对动态本构曲线上关键点调取图像参数，无法实现实时大数据任意调取图像信息。因此，通过计算编程，实现自动化实时物像同步分析对研究岩石动态力学性能尤其重要。

本研究利用应力波传播理论，将 SHPB 实验技术与高速摄像技术相结合，可实现自动化实时物像同步分析，直观可视化地反映了 SHPB 实验过程中岩石受冲击荷载变形破坏的不同阶段及其表征。实验结果表明，花岗岩试样应力－应变曲线的不同阶段对应着不同的破坏变形特征，试样开裂情况、破坏趋势、损伤程度等都与其内部应力、应变的变化有着密切的联系。

1 实验方案设计

1.1 物像同步分析系统

实验系统主要由三部分组成，SHPB 用于物理力学特性采集、高速摄像装置用于图像信息采集、同步分析程序用于全自动实时物像同步分析，如图 1 所示。



(a) 工作原理图　　(b) 实验设备图

图 1　物像同步分析系统

Fig. 1　Physical image synchronization analysis system

图 1(b)中，SHPB 的压杆直径为 0.07m，子弹、入射杆和透射杆的长度分别为 0.8m、4m 和 3.2m，其弹性模量为 199GPa，弹性波波速为 5122m/s。输入杆和输出杆上所用应变片的电压信号与应变信号转化比例为：1.0V ＝ 238.09$\mu\varepsilon$。

高速摄像机主要配置为：主机系统 Photron Fastcam SA5 一套，PFV 系列控制软件一套及照明系统。实验过程中，拍摄帧速为 75000 次/s。

压杆上的应变片与高速摄像机接入同一个数据采集处理系统中，在记录输入杆、输出杆上应变片电

压信号的同时会采集试样动态冲击画面。

首先，将高速摄像机与 SHPB 输入杆和输出杆上的应变片接入同一个数据采集处理系统中，子弹撞击入射杆的同时触发高速摄像机进行工作，通过系统软件同步采集应变片的电压信号和试样冲击破坏画面。由于应力波在杆件中传播需要时间，导致应变片接收的信号和拍摄画面的时间之间有一定的时间差值。后期处理数据时先用三波法统一入射波、透射波和反射波的时间域，计算出试样的时间－应变、时间－应力和应力－应变曲线，再通过拍摄画面与透射杆中应变片接收信号的时间差值，找出应力－应变曲线的不同阶段对应的冲击破坏画面。

1.2　试样预处理

实验中所用试样为直径 0.05m，高度 0.025m 的圆柱形花岗岩试件（本研究所采用花岗岩试样经过温度为 600℃的加热冲击，其动态压缩弹性模量和动态抗压强度低于常温下花岗岩试样），试样两个端面已打磨光滑，其不平行度小于 0.1mm。实验拍摄前，在试样侧面喷涂上不易掉落白色反光漆和若干个黑色漆点，以便在拍摄过程中有较强反光和对比，可以更加清晰地观察 SHPB 实验过程中试样的变形破坏画面，尤其是试样侧面裂纹的产生与发展的动态过程。

1.3　实验步骤

将试样两端涂上真空脂，夹于入射杆与透射杆之间。将带有字迹的小纸片贴合放置于试样侧面，调整高速摄像机的焦距和照明灯的角度直至可以清楚观察到纸片上的字迹，以便得到清晰的试样图像。测量得到输入杆上应变片与试样左端面距离为 1.99m，输出杆上应变片与试样右端面距离为 0.64m，通过距离长度和压杆弹性波速可以计算入射波、反射波与透射波之间的时间延迟。

SHPB 系统中子弹的打击气压为 0.25MPa，在子弹撞击入射杆的瞬间开始启动高速摄像机拍摄系统。输入杆、输出杆上的应变片所连接的动态应变仪和高速摄像机通过不同的通道连入同一个数据采集处理系统，得到入射波、反射波和透射波的同时会记录下试样的一系列冲击变形破坏画面。图 2 是物像同步分析系统采集得到的试样起始冲击破坏画面（如图上部）和与之相对应的波形图（如图下部）。图上部反映实时图像信息，图下部反映实时物理力学信息，可移动的黄色线条为当前图像对应的实时点。蓝色线条和红色线条分别为输入杆上应变片和输出杆上应变片接收到的电压信号，分析计算后则可生成应力－应变曲线。可以看到，该系统使实验结果更加直观清晰，将物理力学信息和图像信息结合分析，有助于分析岩石变形破坏过程的力学机理。

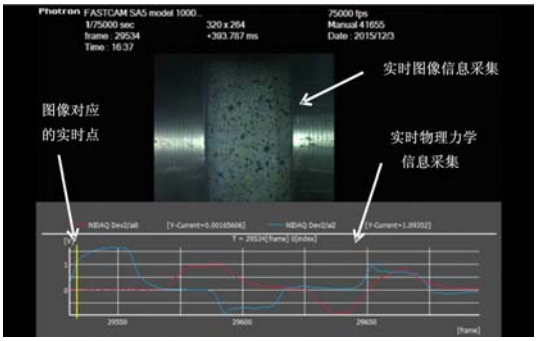


图 2　实时物像同步分析系统采集到的图像信息与物理力学信息

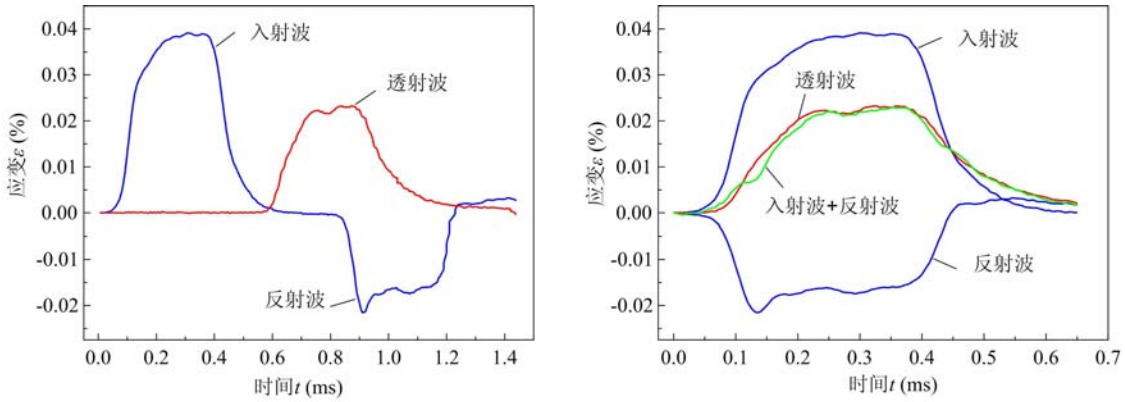
Fig. 2　Image information and mechanical properties information captured by physical image synchronization analysis system

2　实验结果和分析

2.1　SHPB 实验岩石动态力学特性分析

图 3(a)所示为测得的试样原始波形图。蓝色曲线为入射杆上应变片接收到的入射波和反射波的电压信号，红色曲线为透射杆上应变片接收到的透射波的电压信号。子弹头形状为等截面圆柱形，输入杆一端贴有直径为 30mm、厚度为 0.5mm 铜片脉冲整形器。由于入射杆和透射杆上的应变片与试样有一段距离，接收入射波、反射波与透射波之间存在时间延迟，需要调动入射波、反射波与透射波的时间域。图 3(b)是根据 SHPB 数据处理中的三波法[25－27]处理得到的试样波形图，以入射波的时间域为时间基准，反射波需要向前平移时间 $t_1=L_1/c$，透射波需要向前平移时间为 $t_2=(L_1+L_2)/c$，其中 L_1 为输入杆上应变片与试样左端面（靠输入杆端面）的距离；L_2 为输出杆上应变片与试样右端面（靠输出杆端面）的距离；c 为输入杆和输出杆的弹性波波速。调整之后，入射波、反射波和透射波的波头对齐，如图 3

(b)所示,其中蓝色曲线分别为入射波和反射波,红色曲线为透射波,绿色曲线为入射波与反射波相加之后的叠加波形。从图中可以看出,叠加波形与透射波近似重合,即透射波与入射波之差近似等于反射波,入射波、反射波与透射波的波头已经对齐,试样内部达到应力平衡。



(a) 输入杆和输出杆上应变片接收的三波原始波形图 (b) 入射波、反射波与透射波波头对齐后的三波波形图

图 3 原始波形图和处理后波形图

Fig. 3 Initial wave and wave after analyzed

按照一维应力波理论,得到公式(1):

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = \dfrac{1}{l_s}(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \\ \varepsilon(t) = \dfrac{c}{l_s}\displaystyle\int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t)\mathrm{d}t \\ \sigma(t) = \dfrac{1}{2}\left[\dfrac{A}{A_s}E(\varepsilon_i + \varepsilon_r) + \dfrac{A}{A_s}\varepsilon_t\right] = \dfrac{A}{2A_s}E(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \dfrac{A}{A_s}) \end{cases} \tag{1}$$

式中,$\dot{\varepsilon}(t)$为测试过程中试样的平均应变率;$\varepsilon(t)$为测试过程中试样的平均应变;$\sigma(t)$为测试过程中试样两端面应力的平均值,即为试样的可测平均应力;$\dfrac{A}{A_s}E(\varepsilon_i+\varepsilon_r)$项可以看作是试样左端面(靠输入杆端面)的应力;$\dfrac{A}{A_s}\varepsilon_t$项可以看作是试样右端面(靠输出杆端面)的应力;$\varepsilon_i$、$\varepsilon_r$、$\varepsilon_t$分别为测得的入射波、反射波、透射波;$l_s$、$A_s$分别为试样的长度和横截面积;$c$、$A$、$E$为压杆的弹性波波速、横截面积和弹性模量。

由图 3 测得数据,根据公式(1)计算得到试样左右两端面时间一应力曲线如图 4(a)所示,其中绿色曲线是由入射波和反射波的叠加波形计算得出的试样左端面应力随时间变化的曲线图,红色曲线是由透射波计算得到的试样右端面应力随时间变化的曲线图,二者近似重叠,说明实验结果可靠。将左右两端应力平均,则得到试样的可测平均应力,如图 4(b)所示,黑色曲线为试样左端面和右端面应力的平均值随时间变化的曲线图。图 4(c)中曲线则是由公式(1)计算得出的试样的时间一应变曲线。根据图 4(b)和图 4(c)中的时间关系,将试样可测平均应力、平均应变一一对应后,得到图 4(d)中曲线,即为试样的应力一应变曲线。

由图 4(d)可以看出,岩石动态压缩应力一应变曲线大致可分为五个阶段。为了找到不同阶段下岩石变形破坏的不同特征,需要将应力一应变曲线与高速拍摄图像对应,即将图 3(a)中的测量数据与拍摄图像一一对应。统一入射波、反射波与透射波的时间域后,高速摄像机拍摄画面时间与其时间域不统一,所以,找到应力一应变曲线与实时采集图像之间的一一对应关系,成为分析的重点。

2.2 全自动实时物像同步分析

由于试样与输入杆和输出杆上的应变片有一定的距离,所以由高速摄像机拍摄的试样冲击过程画面与应变片接收到的电压信号之间有一定的时间延迟。本文通过计算透射杆上应变片接收电压信号与试样右端面(靠透射杆端面)应力波的时间差值 $t_3 = L_2/c$(其中 L_2 为输出杆上应变片到试样右端面(靠透射杆端面)的距离;c 为输出杆的弹性波速),将动态冲击破坏画面提前时间 t_3,找到实时图像信息与

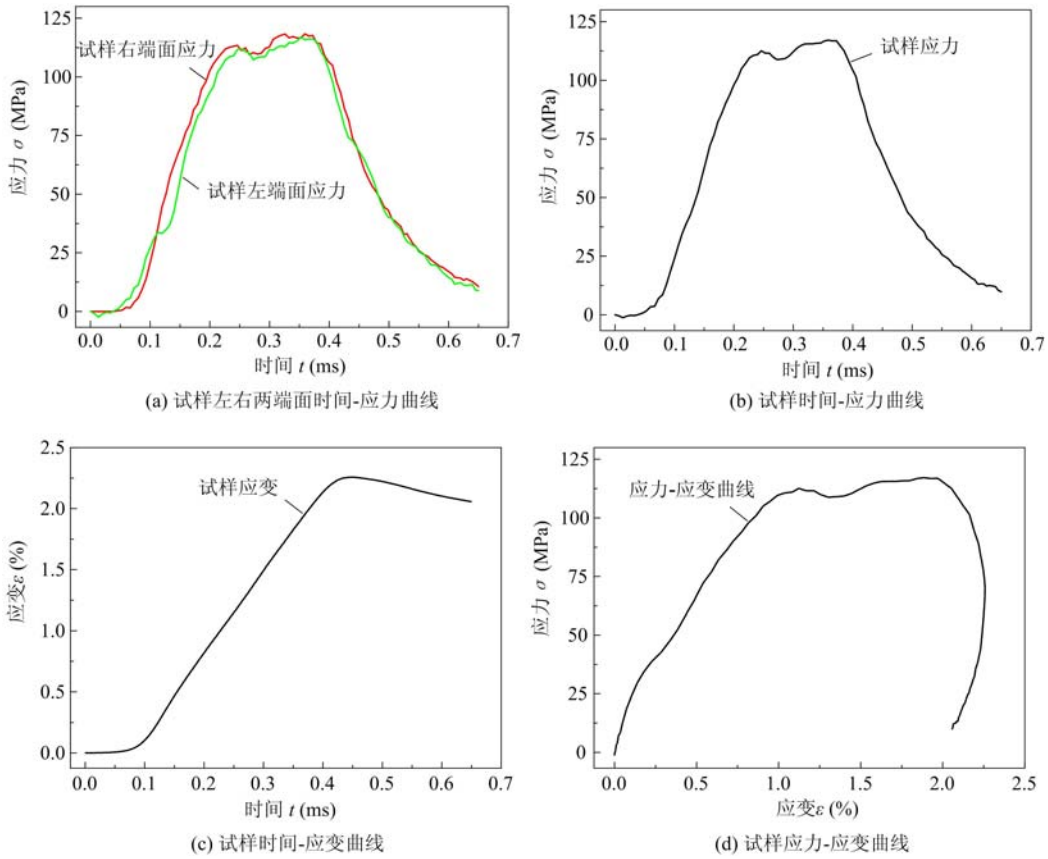


图 4　试样物理力学信息分析

Fig. 4　Analysis of mechanical properties of specimen

试样右端面时间－应力曲线的对应关系，从而将其与试样的应力－应变曲线对应。

图 5～图 11 是选取的试样应力－应变曲线上 7 个点和这些点相对应的试样动态冲击破坏画面。

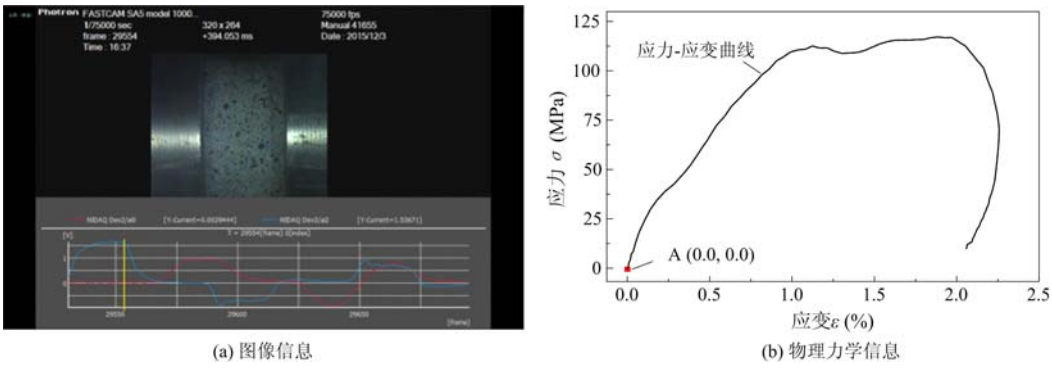


图 5　点 A 对应实时图像信息和物理力学信息

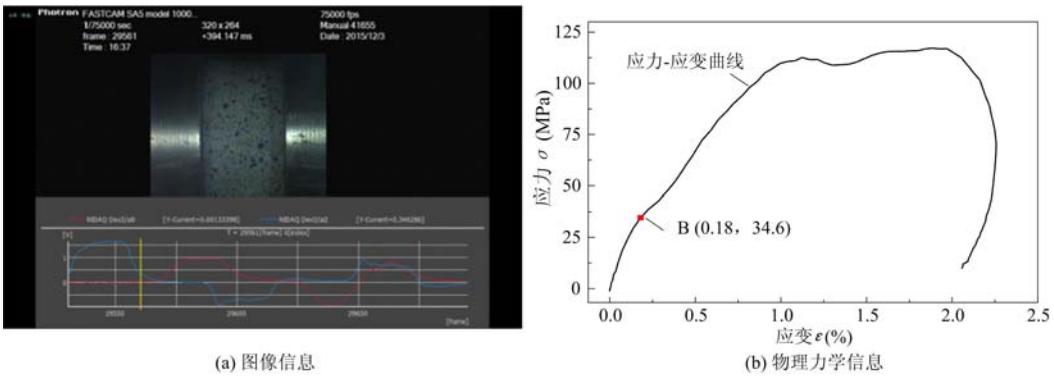
Fig. 5　Dynamic image and mechanical properties of point A

图 5(a)和图 5(b)显示的是试样应力－应变曲线起点 A(应变为 0，应力为 0MPa，对应时间点 $t=0\mu s$)和其对应的动态冲击画面；

随着应变和应力迅速增加，图 6(a)是试样应力－应变曲线上近似弹性阶段终点 B(应变为 0.18%，应力为 34.6MPa，对应时间点 $t=119.5\mu s$)对应的冲击画面，试样侧面没有出现裂纹；

当应力－应变曲线到了如图 7(b)所示 C 点(应变为 0.99%，应力为 109.6MPa，对应时间点 $t=232.5\mu s$)时，其对应的冲击画面图 7(a)中，试样侧面出现第一条可观测的微裂纹；

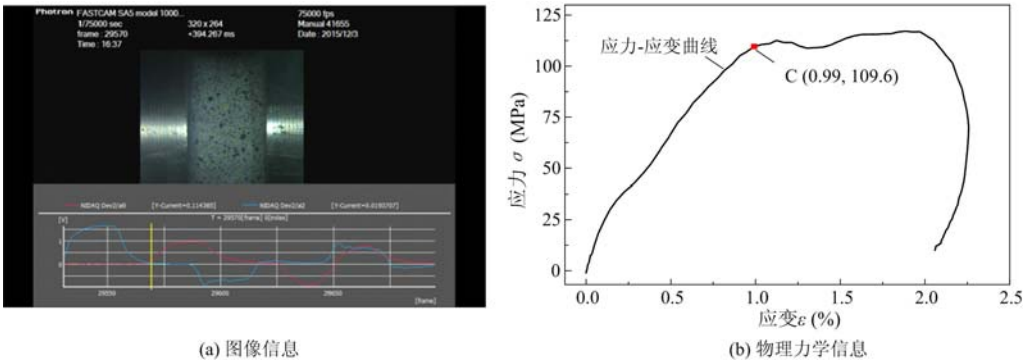
经过点 C 后，应力－应变曲线有一个短暂的下降趋势到达 D 点(应变为 1.30%，应力为108.8MPa，对应时间点 $t=279.5\mu s$)，其对应的冲击画面图 8(a)中裂纹较 C 点对应画面从左向右扩展，裂纹长度、



(a) 图像信息 (b) 物理力学信息

图 6 点 B 对应实时图像信息和物理力学信息

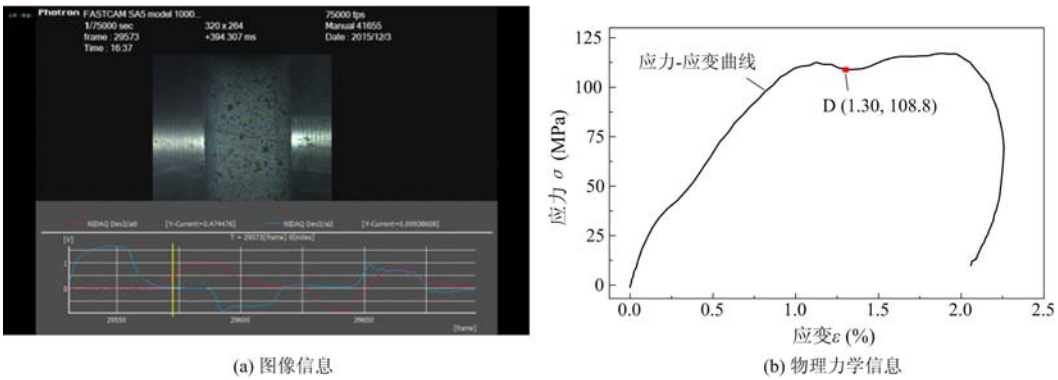
Fig. 6 Dynamic image and mechanical properties of point B



(a) 图像信息 (b) 物理力学信息

图 7 点 C 对应实时图像信息和物理力学信息

Fig. 7 Dynamic image and mechanical properties of point C



(a) 图像信息 (b) 物理力学信息

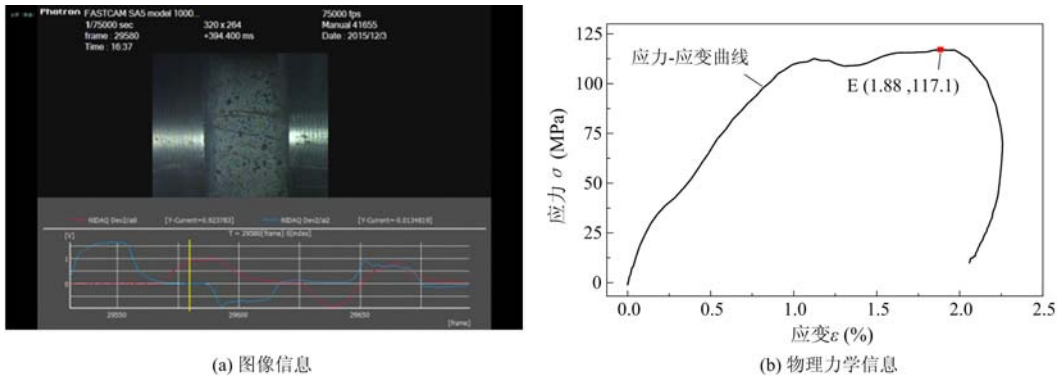
图 8 点 D 对应实时图像信息和物理力学信息

Fig. 8 Dynamic image and mechanical properties of point D

宽度明显增加,几近贯穿整个试样的侧面,这条裂纹下方也出现了一条长度、宽度偏小的微裂纹;之后试样应力达到峰值点 E(应变为 1.88%,应力为 117.1MPa,对应时间点 $t=365.5\mu s$) 如图 9(b)所示,此时由试样冲击画面图 9(a)观察发现,试样侧面多处开裂,微裂纹数量明显增多,裂纹长度和宽度也明显增加,并且出现了多条贯穿试样整个侧面的裂纹。

在峰值应力点 E 过后,试样应力迅速减小,应变缓慢增加。在图 10(b)中,应变达到最大点 F(应变为 2.26%,应力为 73.4MPa,对应时间点 $t=445.5\mu s$),其对应的冲击画面图 10(a)中,部分岩块破坏成了细小碎块。

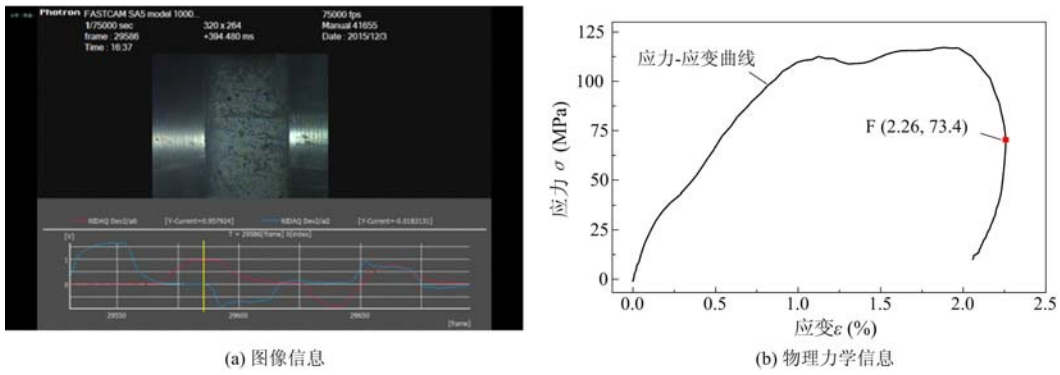
经过点 F 后,试样应变出现减小趋势,出现了回弹现象,此时试样的应力也随之迅速减小到达点 G(应变为 2.1%,应力为 15.7MPa,对应时间点 $t=605.0\mu s$),其对应的冲击画面如图 11(a)所示,试样的破碎程度增加,出现大量的细小碎块,整体碎成了几大块。



(a) 图像信息　　(b) 物理力学信息

图 9　点 E 对应实时图像信息和物理力学信息

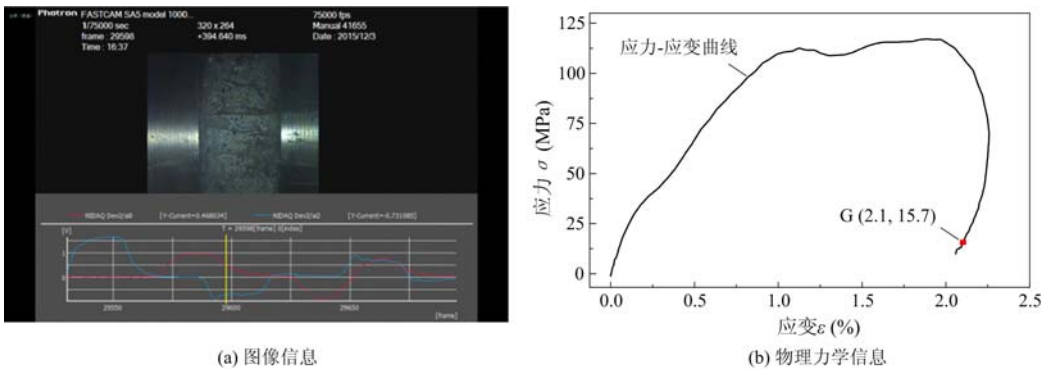
Fig. 9　Dynamic image and mechanical properties of point E



(a) 图像信息　　(b) 物理力学信息

图 10　点 F 对应实时图像信息和物理力学信息

Fig. 10　Dynamic image and mechanical properties of point F



(a) 图像信息　　(b) 物理力学信息

图 11　点 G 对应实时图像信息和物理力学信息

Fig. 11　Dynamic image and mechanical properties of point G

通过实时物理力学信息和实时图像采集信息的一一对应，清晰直观地反映了岩石 SHPB 实验过程中物理力学性质的变化趋势和其对应的变形破坏画面。从岩样的破碎程度和裂纹的扩展两个角度进行分析，我们可以找到应力－应变曲线不同阶段发生变化的内在原因。

在试样应力－应变曲线的不同阶段，试样冲击变形破坏具有不同的特征：由于岩石中原始的微裂纹压密后重新张开和扩展、局部拉伸裂纹张开相伴随的裂纹摩擦滑移，花岗岩试样的整个变形过程为非弹性变形。在应力－应变曲线的 AB 段，试样近似处于一种弹性变化形式，试样出现微小应变，在119.5μs 内应力迅速由 0 增加到 34.6MPa，应变由 0 增加到 0.18%，其压缩模量较大，近似为 19.2GPa，反映了花岗岩材料较高的冲击韧耐强度，此时，在拍摄的图像中，试样侧表面没有出现微裂纹，杆端出现微小位移，试样被轻微压缩；在应力－应变曲线的第二阶段 BC 段，此阶段历时较短为 113.0μs，试样应变迅速增加，压缩模量较 AB 段减小到近似为 9.3GPa，说明岩石内部微裂隙在冲击荷载作用下开始增加，导致

岩石抗压缩能力减弱,而拍摄图像中试样的侧表面没有出现裂纹,而是被迅速压缩,说明试样内部微裂纹压密后重新开始张开和扩展,试样发生损伤现象,影响了岩石的力学性能;第三阶段为 CDE 段,历时为 133.0μs,应变迅速增加而应力增加速度放缓,压缩模量显著降低,在曲线 C 点对应拍摄的冲击画面上,由于拉应力作用,试样侧面产生从左到右发展的轴向、张开型微裂纹,之后迅速扩展,随之试样多处开裂,大部分都是与轴向应力方向偏小角度的裂纹,到达峰值应力点 E 时,试样侧表面出现多条贯穿裂纹,并出现了些许与轴向应力方向偏大角度的裂纹,试样破坏现象明显,说明裂纹的出现显著地影响了岩石的抗压缩能力,并且在试样发生宏观破坏时,其抗压强度达到峰值;第四阶段为 EF 段,历时最短为 80μs,应变的增加放缓,应力反而减小,经对对应拍摄画面分析得出,试样的宏观破裂面显著增多,在其宏观破裂面处有滑移现象,所以其承载能力开始下降,导致试样的应变增加,应力反而减小;在应力－应变曲线的第五阶段 FG 段,此阶段历时最长为 159.5μs,应力大幅度减小并且出现了应变减小现象,对应的冲击破坏画面中,试样破碎成了几大块和大量细小碎块,并没有达到压碎破坏的程度,结合二者分析得出,在此应力波卸载阶段,加载应力小于试样内部弹性力,其变形就会出现小幅度的反弹,导致其应变减小。

通过上述物像同步分析系统,可以自动调取应力－应变曲线上任意一点所对应的图像信息,避免了人为逐帧对比的误差。实验结果表明,应力－应变曲线的不同阶段反映出了岩石物理力学特性变化的过程,从其相对应图像上也观察得到了不同的变形破坏特征。从岩石开裂情况、破坏趋势、损伤程度等角度进行分析,可以找到其物理力学性能改变的内在原因。物理力学信息和图像信息相结合进行分析,清晰直观地揭示了整个冲击过程。

3 结论

本文通过 SHPB 和高速摄像机组成的物像同步分析系统完整采集了岩石冲击变形破坏过程的应力、应变响应信息和图像信息,通过应力波传播理论,编制物像同步分析程序。在得到试样的应力－应变曲线的同时,计算透射杆上应变片电压信号与试样右端面(靠透射杆端面)应力波的时间差值,将力学响应和图像表征一一对应,得出以下结论:

(1) 高速摄像机拍摄的试样冲击变形破坏画面清晰直观地反映了应力－应变曲线的不同阶段下试样开裂情况、破坏趋势、损伤程度等变形破坏特征;其力学响应和图像表征有着密切的关系。SHPB 实验技术与高速摄像技术的结合运用,更有利于分析岩石的变形破坏过程的力学机理;

(2) 将应力－应变曲线和图像信息一一对应后,可以任意调取不同状态点的力学信息和图像信息,节省了逐帧观察对比所需的人力物力,避免了人为误差的出现;

(3) 岩石是一种复杂的介质体,其力学性质与其内部结构有着紧密联系,仅仅通过静态或者动态力学实验分析其性质是不够的,高速摄像技术及其他高尖端技术的运用有助于进行更加系统、深入的研究。

参考文献:

[1] Hudson J A, Harisson J P. Engineering rock mechanics[M]. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1997.

[2] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002 (CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002(in Chinese))

[3] 孙钧. 世纪之交的岩石力学研究[M]//中国岩石力学与工程学会第五次学术大会论文集. 北京:中国科学技术出版社,1998 (SUN Jun. Research of rock mechanics on the joint of the century[M]//Proceedings of the 5th Science Conference of Chinese Socity for Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1998(in Chinese))

[4] 贺永年, 韩立军, 邵鹏, 等. 深部巷道稳定的若干岩石力学问题[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3):288－295 (HE Yongnian, HAN Lijun, SHAO Peng, et al. Some problems of rock mechanics for roadways stability in depth [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(3):288－295(in Chinese))

[5] Freund L B. Dynamic fracture mechanics[M]. Cambridge University Press, 1990.

[6] 李夕兵，古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙：中南工业大学出版社，1994（LI Xibing，GU Desheng. Rock impact dynamics[M]. Changsha：Central South University of Technology Press，1994(in Chinese))

[7] 钱七虎. 岩石爆炸动力学的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(10)：1945－1968（QIAN Qihu. Some advances in rock blasting dynamics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2009，28(10)：1945－1968 (in Chinese))

[8] 何满潮，谢和平，彭苏萍，等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(16)：2803－2813（HE Manchao，XIE Heping，PENG Suping，et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(16)：2803－2813(in Chinese))

[9] FAN L F，REN F，MA G W. Experimental study on viscoelastic behavior of sedimentary rock under dynamic loading[J]. Rock mechanics and rock engineering，2012，45(3)：433－438.

[10] FAN L F，YI X W，MA G W. Numerical manifold method (NMM) simulation of stress wave propagation through fractured rock mass[J]. International Journal of Applied Mechanics，2013，5(2)：238－249.

[11] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Physical Society：B，1949，62(11)：676－700.

[12] 胡时胜. Hopkinson 压杆实验技术的应用进展[J]. 实验力学，2005，20(4)：589－594（HU Shisheng. The application development of experimental technique of Hopkinson pressure bar[J]. Journal of Experimental Mechanics，2005，20(4)：589－594(in Chinese))

[13] 刘剑飞，胡时胜，胡元育，等. 花岗岩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 Jianfei，HU Shisheng，HU Yuanyu，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 (in Chinese))

[14] 夏昌敬，谢和平，鞠杨. 孔隙岩石的 SHPB 研究[J]. 岩石力学与工程学报，2006，25(5)：896－900（XIA Changjing，XIE Heping，JU Yang. SHPB test on porous rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2006，25(5)：896－900 (in Chinese))

[15] 翟越，马国伟，赵均海，等. 花岗岩在单轴冲击压缩荷载下的动态断裂分析[J]. 岩土工程学报，2007，29(3)：385－390（ZHAI Yue，MA Guowei，ZHAO Junhai，et al. Dynamic failure analysis on granite under uniaxial impact compressive load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2007，29(3)：385－390 (in Chinese))

[16] 尹土兵，李夕兵，周子龙，等. 粉砂岩高温后动态力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报，2007，3(6)：1060－1063（YING Tubing，LI Xibing，ZHOU Zilong，et al. Study on mechanical properties of post-high-temperature sandstone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2007，3(6)：1060－1063 (in Chinese))

[17] 任兴涛，周听清，钟方平，等. 花岗岩动态力学性能的实验研究[J]. 实验力学，2010，25(6)：723－730（REN Xingtao，ZHOU Tingqing，ZHONG Fangping，et al. Experimental study for the dynamic mechanical behavior of granite[J]. Journal of Experimental Mechanics，2010，25(6)：723－730 (in Chinese))

[18] 李夕兵，宫凤强，ZHAO J，等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(2)：251－260（LI Xibing，GONG Fengqiang，ZHAO J，et al. Test study of impact fall failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2010，29(2)：251－260(in Chinese))

[19] 李娜娜，李建春，李海波，等. 节理接触面对应力波传播影响的 SHPB 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(10)：1994－2000（LI Nana，LI Jianchun，LI Haibo，et al. SHPB experiment on influence of contact area of joints on propagation of stress wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2015，34(10)：1994－2000(in Chinese))

[20] 赵永红，梁海华，熊春阳，等. 用数字图像相关技术进行岩石损伤的变形分析[J]. 岩石力学与工程学报，2002，21(1)：73－76（ZHAO Yonghong，LIANG Haihua，XIONG Chunyang，et al. Application of digital image processing to rock mesomechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2002，21(1)：73－76 (in Chinese))

[21] 陈从新，刘秀敏，刘才华. 数字图像技术在岩石细观力学研究中的应用[J]. 岩土力学，2010，31(z1)：53－61（CHEN Congxin，LIU Xiumin，LIU Caihua. Application of digital image processing to rock mesomechanics[J]. Rock and Soil Mechanics，2010，31(z1)：53－61(in Chinese))

[22] 李地元，成腾蛟，周韬. 冲击荷载作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(2)：249－260 (LI Diyuan，CHENG Tengjiao，ZHOU Tao. Experimental study of the dynamic strength and fracturing characteristics of marble specimens with a single hole under impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2015，34(2)：249－260 (in Chinese))

[23] YIN Zhiqiang，LI Xibing，JIN Jiefang，et al. Failure characteristics of high stress rock induced by impact disturbance under confining pressure unloading[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2012，22(1)：175－184.

[24] 刘冬梅，蔡美峰，周玉斌，等. 岩石裂纹扩展过程的动态监测研究[J]. 岩石力学与工程学报，2006，25(3)：467－472 (LIU Dongmei，CAI Meifeng，ZHOU Yubin，et al. Dynamic monitoring on developing process of rock cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2006，25(3)：467－472(in Chinese))

[25] GRAY IIIG T. Classic split Hopkinson pressure bar testing[M]//Kuhn H，Medlin D. SAM Handbook，Mechanical Testing and Evaluation，Vol. 8. Materials Park，OH：ASM International，2000：462－476.

[26] 宋力，胡时胜. SHPB数据处理中的二波法和三波法[J]. 爆炸与冲击，2005，25(4)：368－373 (SONG Li，HU Shisheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. Explosion and Shock Waves，2005，25(4)：368－373(in Chinese))

[27] 李英雷，胡昌明，王悟. SHPB实验数据处理的规范化问题讨论[J]. 爆炸与冲击，2005，25(6)：553－558 (LI Yinglei，HU Changming，WANG Wu. A discussion on the data processing of SHPB experiment[J]. Explosion and Shock Waves，2005，25(6)：553－558(in Chinese))

On the Real-time Physical Image Synchronization Analysis for Rock Deformation and Failure Mode Based on SHPB

WAN Zhang[1]，FAN Li-feng[2]，WANG Lin[3]，GONG Rong-yao[3]

(1. College of Civil Engineering and Architecture，Zhejiang University，Hangzhou 310058，Zhejiang，China；2. College of Architecture and Civil Engineering，Beijing University of Technology，Beijing 100084，China；3. China Railway 12th Bureau Group Co. Ltd.，Taiyuan 030032，Shanxi，China)

Abstract：Typical dynamic compression stress-strain curve of rock can be divided into different stages. Moreover，the deformation mode and failure mode of rock have different image representation. There is a one-to-one correspondence between mechanical response and the image representation. In view of above characteristics，a physical image synchronization analysis device was established by combining split Hopkinson pressure bar (SHPB) with high speed camera. Complete stress and strain dynamic response of rock subjected to impact load were systematically studied；real-time image signals were collected. Finally，based on theory of stress wave，an analyzing program for physical image synchronization was compiled，which can realize synchronous analysis of mechanical response and image representation through interface display. This program can intuitively reflect that under impact load condition，the mechanical characteristics and corresponding specimen cracking，failure trend and damage degree on different stages of stress-strain curve，and can clearly reveal the mechanical mechanism of rock deformation and failure process.

Keywords：physical image synchronization；rock；split hopkinson pressure bar (SHPB)；stress-strain relation；dynamic mechanical property