

# 高能同步辐射光源结构动力学线站：高速动态加载过程的原位表征平台高能同步辐射光源结构动力学线站动态加载实验站介绍\*

孙大睿<sup>1</sup>, 边雅龙<sup>2</sup>, 师彩娟<sup>1</sup>, 姚春霞<sup>1</sup>, 王雪<sup>1</sup>, 李宇霄<sup>1</sup>, 张东升<sup>1</sup>, 侯鹏浩<sup>1, 3</sup>, 范端<sup>2</sup>, 徐杰<sup>2</sup>, 郭顺和<sup>2</sup>, 华浚亦<sup>2</sup>, 蔡洋<sup>\*2</sup>, 陶冶<sup>1</sup>, 张兵兵<sup>\*1</sup>,

3

- (1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
2. 顶峰多尺度科学研究所, 四川 成都 610031;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 材料在动态加载过程中的微结构演化与宏观力学行为密切相关, 实时原位表征此过程对先进材料研发与极端工况应用至关重要。高能同步辐射光源 (High Energy Photon Source, HEPS) 结构动力学线站 (Structural Dynamics Beamline, SDB) 动态加载实验站, 作为第四代衍射极限光源的专用动态探测平台, 在光子能量、通量密度及时间/空间分辨率等方面实现了显著提升。该线站光子能量覆盖 21 keV 至 100 keV 以上, 白光 (White Beam) 模式下单脉冲光子数达  $3.2 \times 10^9$  phs/pulse, 依托大束团注入模式, 可支持从毫秒到百皮秒级时间分辨、从厘米视场到微米级空间分辨的多尺度原位表征。线站配备了包括气炮、霍普金森杆及百焦激光在内的多种动态加载装置, 并集成了 X 射线成像、衍射探测等模式。本文系统介绍了该实验站的光源、光学设计、加载设备及定时探测系统, 并展示了利用高速相衬成像、单脉冲成像及时间分辨衍射等方法在发泡水泥压缩、橡胶复合材料侵入、铝合金层裂及不锈钢动态变形/相变等典型冲击实验中的初步应用成果, 充分验证了该平台在揭示不可逆过程材料跨尺度力学响应与微观演化机制方面的独特能力与广阔应用前景。

**关键词:** 同步辐射; 动态加载原位探测; X 射线成像; X 射线衍射

**中图分类号:** 0521.3; O434.12

**文献标识码:** A

## 引言

\*收稿日期: 2026-08-25; 修回日期: 2026-10-1221

基金项目: 高能同步辐射光源 (批准号: 发改高技 (2017) 2173 号); 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划 (批准号: YSBR-096); 国家自然科学基金 (批准号: 11627901)

作者简介: 孙大睿 (1977—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事同步辐射超快 X 射线探测技术研究. E-mail: sunray@ihep.ac.cn

边雅龙 (1994—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事材料动态力学行为和动态 X 射线诊断方法研究. E-mail: ylbian@pims.ac.cn

通讯作者: 张兵兵 (1989—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事同步辐射超快 X 射线探测技术研究. E-mail: zhangbb@ihep.ac.cn

蔡洋 (1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事极端环境物质科学和动态 X 射线诊断方法研究. E-mail: caiy@pims.ac.cn

材料在动态加载（如冲击、高速压缩或拉伸）过程中的微结构演化与宏观力学行为密切相关，揭示其非平衡态下的变形、相变及损伤机理，对先进结构材料的设计与极端工况应用至关重要<sup>[1-6]</sup>。然而，这类过程往往具有高度瞬态性和空间不均匀性，要求在微秒乃至纳秒时间尺度上同时捕捉宏观响应与微观组织演变，这对实验表征手段提出了严峻挑战<sup>[1,7]</sup>。传统可见光诊断技术（如高速摄影、干涉测速仪等）在动态加载研究中发挥着重要作用<sup>[8-11]</sup>，但其固有局限性显著：一方面，可见光无法穿透不透明金属材料，仅能提供样品表面或透明窗口界面的信息，而材料内部的三维应变场、冲击波传播等关键体相信息难以获取；另一方面，光学方法对晶体结构变化不敏感，无法直接识别相变产物或定量晶格畸变，因而在复杂相变动力学研究中往往只能提供间接推论。与此相对，X射线成像与衍射技术兼具强穿透能力和对晶体结构与电子密度的直接敏感性，能够穿透一定厚度的金属样品并获得体相内部的结构与密度信息，因而成为开展不可逆过程材料动态原位表征的核心方法<sup>[12-19]</sup>。其中，时间分辨能力与空间分辨能力是两个最为关键的性能指标：时间分辨率不足将导致运动模糊，丢失关键瞬态信息；空间分辨率低则无法分辨微结构缺陷的细节。二者共同要求探测器在极短曝光时间内获得信噪比足够强的信号，即样品处需具备极高的X射线通量密度。与此同时，为完整描述材料在动态压缩过程中的宏观力学行为、细观应变场和微观晶格变形，往往需要将X射线成像、衍射、散射等多种方法联合使用，而不同方法对聚焦光斑尺寸、能谱带宽和探测几何亦有各自特定要求，这使得单一实验站需具备高度灵活的光学配置与多模态探测能力。

国际上，第三代同步辐射光源已建有若干专用于动态加载原位研究的线站。例如，美国先进光子源（Advanced Photon Source, APS）的动态压缩线站（Dynamic Compression Sector, DCS）提供7–35 keV的光子能量，单脉冲粉光（Pink Beam）光子数约 $7.7 \times 10^8$  phs/pulse@23 keV<sup>[14]</sup>；欧洲同步辐射光源（European Synchrotron Radiation Facility, ESRF）的ID19线站主要工作于19–35 keV<sup>[17-18]</sup>；国内上海光源（Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF）的快速X光成像线站可覆盖光子能量范围为8.7–30 keV，白光（White Beam）模式下积分通量达 $1.31 \times 10^{16}$  phs/s@300 mA<sup>[19]</sup>。尽管这些设施已取得大量重要成果，但其光子能量普遍限于40 keV以下，对于厚样品或高原子序数材料的动态研究仍存在穿透深度和探测效率的瓶颈；同时，受限于光源亮度和发射度，在实现超快X射线衍射探测时往往难以兼顾足够的通量密度，从而限制了衍散射类实验时间分辨能力的进一步提升。

针对上述局限，高能同步辐射光源（High Energy Photon Source, HEPS）结构动力学线站（Structural Dynamics Beamline, SDB）作为第四代同步辐射装置上的专用动态探测线站，在性能设计上实现了跨越式提升。如表1所示，其主要工作光子能量覆盖21 keV至100 keV以上，其中21.7 keV、43 keV和65 keV为三个核心能量点，可依据样品材质与厚度灵活选择。得益于高亮度插入件和优化的光学设计，该线站在白光模式下的单脉冲光子数可达 $3.2 \times 10^9$  phs/pulse，等效积分通量约为 $4.4 \times 10^{16}$  phs/s，比第三代光源典型值高出数倍。这一高亮度、高能量、小焦斑的组合优势，不仅确保了对Ni、Fe等典型高原子序数金属材料具有足够的穿透深度，还能同时支撑微秒级时间分辨与亚微米级空间分辨的动态成像与衍射实验。与此同时，线站配备了可切换的聚焦光学元件和多种探测模式，能够灵活实现成像、衍射、小角散射等多种探测模式切换，从而满足从宏观应力波传播到微观晶格响应跨尺度信息的同步获取需求。结构动力学线站动态加载实验站的具体性能指标详见表1，其核心优势在于，为材料在极端加载条件下的不可逆、原位多尺度表征提供了前所未有的实验能力，有望推动冲击动力学、相变动力学及损伤演化等领域的前沿研究。本文将从X射线光源、光学设计、实验站和定时与探测系统等几部分详细介绍实验站设计，并以试运行期间的若干实验成果验证该实验站的性能及其在动态加载科学中的应用潜力。

表1 结构动力学线站性能指标参数表

Table 1 Performance parameters of SDB

| Specification | Design goal | Test result |
|---------------|-------------|-------------|
| Photon Energy | >20 keV     | >20 keV     |

|                                                      |                                                  |                                                   |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Single Pulse Flux (White Beam Mode)                  | $>1 \times 10^9$ phs/pulse @ 6 mm Gap,<br>200 mA | $3.2 \times 10^9$ phs/pulse @ 6 mm Gap,<br>100 mA |
| Single Pulse Time Resolution                         | 420 ps                                           | 190 ps                                            |
| Single Pulse Flux ( $\mu\text{m}$ Focus Mode)        | $>2 \times 10^8$ phs/pulse @ 5 mm Gap,<br>200 mA | $1.9 \times 10^9$ phs/pulse @ 6 mm Gap,<br>100 mA |
| Minimum Focus Beam Size (only available in M- hutch) | $10 \times 10 \mu\text{m}^2$                     | $5.5 \times 4.6 \mu\text{m}^2$                    |
| Time Resolution                                      | 0.6 $\mu\text{s}$ @ XRD                          | 92ps @ XRD                                        |

## 1 结构动力学线站动态加载实验站

HEPS 是亚洲第一台第四代衍射极限同步辐射光源，该装置产生的 X 射线具有光子能量高、亮度高、相干性高等优异性能。SDB 是 HEPS 首批建设的十四条线站之一，充分利用了 HEPS 高光子能量、高亮度及高相干性的优势，以粉光为特色，能够提供多种光斑大小及多个 X 射线能区，可实现皮秒-毫秒时间分辨、纳米空间分辨-厘米视场多空间尺度表征，以及成像、散射、衍射多参量综合诊断。SDB 是一条长度 220 m 的长束线，建有环内外 M、L 和 N 三个实验站，分别采用特定的实验方法开展不同科学目标的实验研究，其中距离光源点约 200 m 的储存环外 L 棚屋是动态加载实验站，见图 1。L 棚屋超大空间可满足大型加载设备的安装，根据实验需求选择厘米或微米 X 射线光斑尺寸，实验方法以成像和衍射为主，可用于实时观测材料在气炮、杆、激光等动态加载下的组织及微结构动态响应，厘清微观组织与宏观变形损伤等性能的关联。

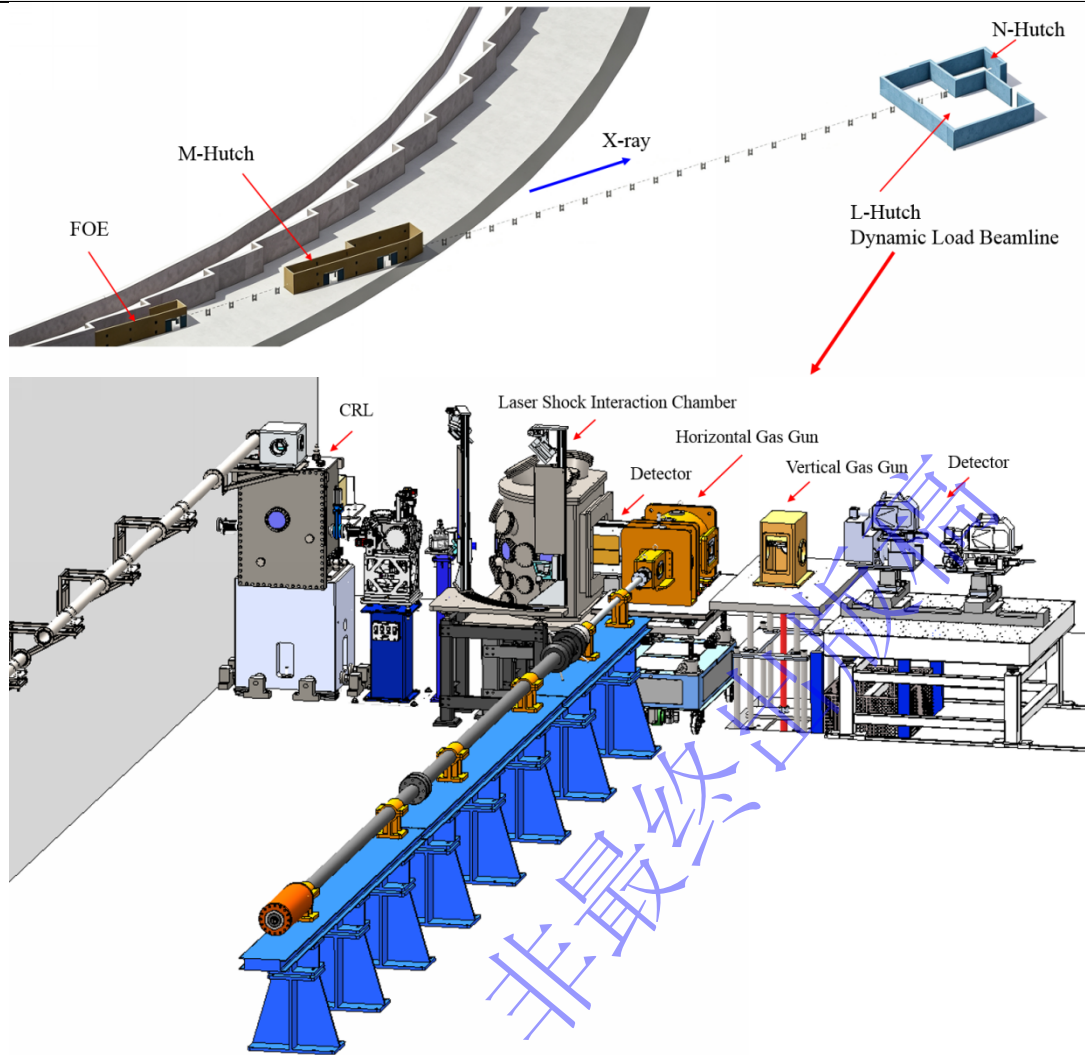


图 1 结构动力学线站及动态加载实验站布局图

Fig.1 Layout of the Structural Dynamics Beamline (SDB) and the dynamic loading experimental station

## 1.1 X 射线光源

HEPS 储存环电子束流能量为 6 GeV，目前运行最高流强 100 mA，结构动力学线站插入件采用短周期 U12 和长周期 U14.2 串联低温永磁波荡器（Cryogenic Permanent Magnet Undulator, CPMU）以满足在高能区间极高积分通量的需求，其参数见表 2。U12 为基波波荡器，基波能量范围 20-28 keV，提供高强度的“干净”粉光，也是目前国际上周期最短的两台 CPMU。U14.2 可实现 43 keV 光子数最大化；串联使用时，可实现某个能量点的积分通量最大化（如 21.7 keV 和 65 keV），图 2 所示为 U12 和 U14.2 的光子能量-亮度调谐曲线。

表 2 结构动力学线站 CPMU 参数表

Table 2 CPMU Parameters of SDB

|                                        | U12       | U14.2     | Unit |
|----------------------------------------|-----------|-----------|------|
| Minimum Gap                            | 5.2       | 5.2       | mm   |
| Periodic Length                        | 12        | 14.2      | mm   |
| Number of Periods                      | 166       | 140       | /    |
| Undulator parameter $K$                | 0.36-0.91 | 0.55-1.32 | /    |
| Peak magnetic field on axis $B_0$      | 0.32-0.81 | 0.41-1    | T    |
| 1 <sup>st</sup> Harmonic Photon Energy | 20.9-24   | 14.4-20.9 | keV  |

|                                            |                      |                      |                                                  |
|--------------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------------------|
| 1 <sup>st</sup> Harmonic Brightness        | $4 \times 10^{22}$   | $2.7 \times 10^{22}$ | phs/s/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> /0.1%BW |
| 1 <sup>st</sup> Harmonic Central Cone Flux | $7.7 \times 10^{14}$ | $1.4 \times 10^{15}$ | phs/s/0.1%BW                                     |
| Power                                      | 5.88                 | 8.88                 | kW                                               |
| Center Cone Angle                          | 4.88/3.71            | 6.83/6.05            | μrad                                             |
| Equivalent Light Source Point Size         | 9.68/2.78            | 9.82/3.22            | μm                                               |

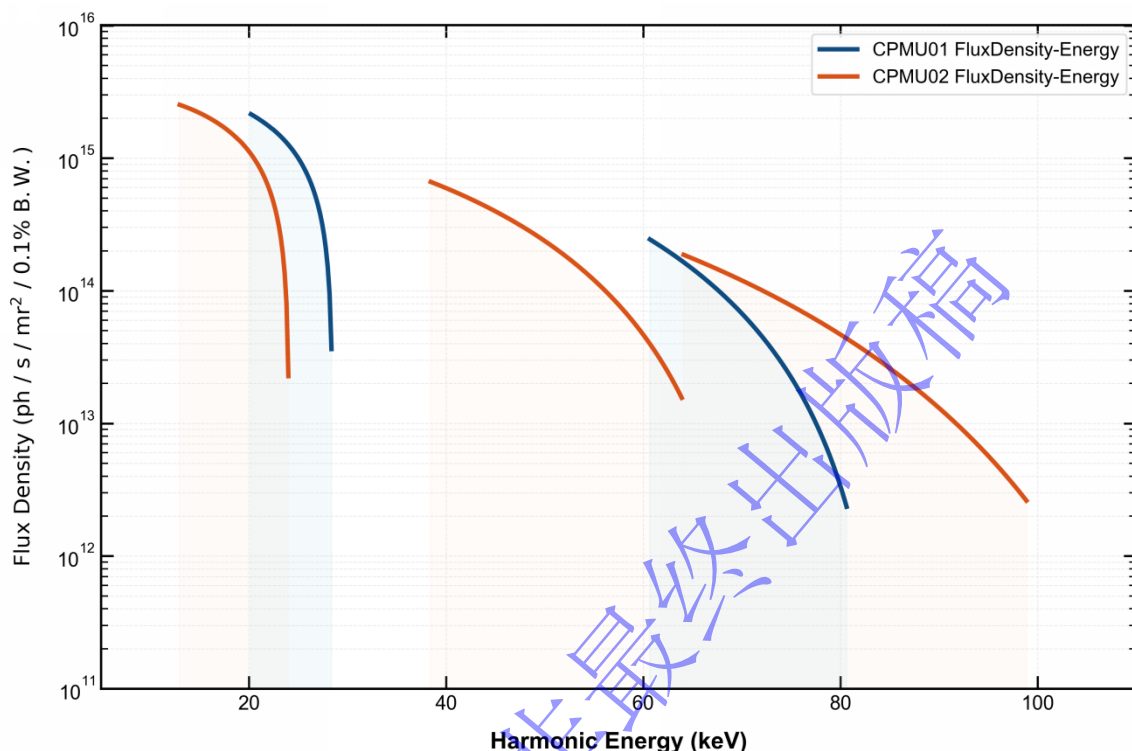


图2 结构动力学线站光子能量-亮度调谐曲线

Fig.2 Photon energy–brightness tuning curve of the Structural Dynamics Beamline

## 1.2 光学设计

X射线从结构动力学线站前端区出口的水冷单晶金刚石窗引出，进入距离光源点 200 m 的动态加载实验站，光学布局示意图 3，其核心光学元件包括水冷可调光阑（Water Cooled Adjustable Aperture, WCA）、热负载斩波器（High Heat Load Chopper, HLC）、多层膜单色器（Double Multilayer Monochromator, DMM）、白光快门（White Beam Shutter）及两组复合折射聚焦透镜组（Compound Refractive Lens, CRL）。

结构动力学线站的 X 射线接收张角调节范围为  $15 \mu\text{rad} \times 15 \mu\text{rad}$  到  $70 \mu\text{rad} \times 70 \mu\text{rad}$ ，采用水冷可调光阑限制下游光学元件的接收角和杂散光水平；热负载斩波器和水冷白光快门用于降低束线光学元件上沉积的平均热功率；两块垂直放置的多层膜晶体构成的多层膜单色器，可实现三个特征能区 21.7 keV、43 keV、65 keV 的能量切换，提供带宽约为 2.8% 的粉光；两组金刚石复合折射透镜可分别独立配置，通过不同聚焦透镜镜片的组合，将不同能量的 X 射线聚焦到环外 L 棚屋的样品点。对于不同光斑大小需求，采用直通光（1-12 mm）、直接聚焦（100-500 μm）和级联聚焦（<100 μm）等方式实现，见表 3。

白光直通模式通过水冷可调光阑控制成像视场，除了必要的金刚石窗以外，不含任何光学元件，以此实现通量的最大化和光束的稳定性，主要用于开展动态成像实验；微米聚焦模式包含金刚石复合折射透镜组，或根据实验需求选择使用多层膜单色器和不同 CRL 透镜组合，实现多个能量点、多个光斑大小的微米聚焦功能，用于开展成像和衍射实验。

表 3 动态加载实验特征能量聚焦光斑参数表

Table 3 Parameters of the focused spot at characteristic energies for dynamic loading experiments

| Photon Energy/<br>keV | Focus Beam Size/<br>$\mu\text{m}^2$ | Flux/<br>phs/s      |
|-----------------------|-------------------------------------|---------------------|
| 21.7                  | 59.4×56.2                           | $3.5\times 10^{16}$ |
|                       | 218.8×175                           | $3.6\times 10^{16}$ |
| 43                    | 84.2×35.2                           | $4.7\times 10^{15}$ |
|                       | 240.6×265.6                         | $5\times 10^{15}$   |
| 65                    | 98.4×30.4                           | $1.2\times 10^{15}$ |
|                       | 197.6×261.8                         | $1.3\times 10^{15}$ |

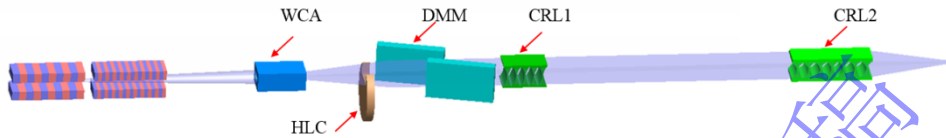


图 3 SDB 动态加载实验光学元件布局示意图

Fig.3 Schematic layout of optical elements for dynamic loading experiment at SDB

### 1.3 动态加载实验站

本文重点介绍 SDB 的动态加载实验站（L-hutch），动态加载实验站位于距离光源点约 200 m 的环外卫星实验棚屋，示意图见图 1。SDB 从科学研究需求出发，配置了多种多样的加载手段，并具有充分的灵活性可以结合科研用户特制加载设备开展 X 射线原位探测研究。

L 棚屋为开展动态加载实验专用设计，为了容纳大型加载设备，棚屋在垂直 X 射线光轴方向的长度达到 23 m，给大型水平轻气炮提供了充足的安装空间，并为配备垂直炮建设了 4 m 的深井及相应的升降机等辅助装置，建有百焦激光洁净间，并且可以灵活切换安装用户自有加载设备，目前已配置的多种动态加载装置具备获得高达 4 km/s 的广泛冲击速度范围的能力，如表 4 所示。杆径 12mm 和 20 mm 以氮气驱动的霍普金森拉/压杆可提供 500-10000 s<sup>-1</sup> 应变率；一级/二级 20 mm 发射口径轻气炮可实现 100-4000 m/s 冲击速度加载，垂直一级轻气炮可实现竖直方向自下向上冲击加载，同时配备小型 8 mm 口径轻气炮满足任意加载方向，并配置磁测速和激光多普勒干涉测速（Laser Doppler Velocimetry, LDV）等速度测量系统。中心波长 1053 nm 的百焦激光加载装置，单脉冲输出能量可达 100 J@15 ns，具备时间整形和空间整形功能，可提供更高应变速率（>10<sup>7</sup> s<sup>-1</sup>）的激光冲击波实验条件，并配备任意反射面干涉仪（Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR）等测速系统。

表 4 加载设备参数表

Table 4 Parameters of Loading Equipments

| Loading Equipment            | Specification Parameters             | Loading Capacity        | Strain Rate (s <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Quasi-static loading systems | Loading mode: compression / tension; | 0.001-5 mm/s            | $10^{-4}\sim 10^{-1}$          |
|                              | Maximum load: $\pm 5$ kN             |                         |                                |
| Drop-weight loading system   | Drop hammer mass: 2.5 kg;            | Impact velocity: <4 m/s | $10\sim 10^2$                  |
|                              | Maximum loading height: 1 m          |                         |                                |
| Split Hopkinson pressure     | Bar diameter: 12 mm and              | Impact velocity: <30    | $10^2\sim 10^4$                |

|                                    |                                                                                                      |                                        |                  |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------|
| bar (SHPB)                         | 20 mm                                                                                                | m/s                                    |                  |
| Split Hopkinson tension bar (SHTB) | Bar diameter: 12 mm and 20 mm                                                                        | Impact velocity: <30 m/s               |                  |
| Miniature gas gun                  | Bore diameter: Φ8 mm                                                                                 | Projectile velocity: 50-350 m/s        |                  |
| Single-stage gas gun               | Bore diameter: Φ20 mm                                                                                | Projectile velocity: 100-1000 m/s      | $10^4 \sim 10^6$ |
| Two-stage gas gun                  | Bore diameter: Φ20 mm                                                                                | Projectile velocity: 500-4000 m/s      |                  |
| Hundred-joule laser loading system | 1053 nm;<br>Maximum output energy: 100 J @15 ns;<br>Pulse width: 3-15 ns, with time shaping function | Loading pressure up to hundreds of GPa | $> 10^7$         |

#### 1.4 定时和探测系统

对于不可逆过程的动态加载原位实验研究，精准控制实验进程时序进行探测是成功的关键，因此定时和探测系统是结构动力学线站重要的组成部分。SDB 的定时系统采用的是 HEPS 加速器部自研的全局定时系统，可提供与储存环回旋频率信号精确同步的周期信号，以及具有特定同步逻辑关系的单次触发信号，保证 10 ps 精调延迟和 6 ns 粗调延迟的系统精度。

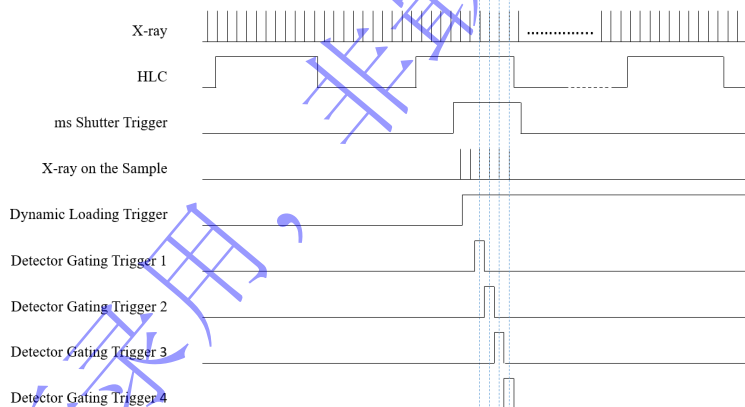


图 4 SDB 束线动态加载实验分幅成像探测时序示意图

Fig.4 Schematic diagram of the frame-by-frame imaging detection timing sequence at SDB

X 射线成像实验采用间接探测的方法，利用 Ce:LuAG、Ce:LYSO 等晶体材料的闪烁体将 X 射线转换成可见光，再通过适当倍率的显微光学耦合系统进行成像探测，以实现足够高的成像空间分辨率，通常时间分辨率取决于探测器的帧频。如需百皮秒的时间分辨率，则采用单脉冲成像分幅探测方式，利用分光功能将其输入到 2（或 4）个独立的像增强型相机，借助相机的超快门控功能实现超高速的曝光效果，最终在多个延迟时刻获得成像，其时序控制图见图 4。X 射线衍射实验则采用高帧频积分像素阵列探测器 Keck-PAD (Sydor) 进行直接探测，工作在 10MHz 高帧频模式时可读出连续 8 张图像，满足持续时间在微纳秒量级的单脉冲探测激光加载和气炮加载的实验需求。实验站的主要探测器及其关键参数汇总于表 5。在此基础上，多种探测手段形成了灵活多样的探测能力，可与相应实验模式精确匹配，从而充分满足动态加载原位实验的需求，具体的时间分辨率和空间分辨率指标参见表 6。

表 5 探测器参数列表

Table 5 Parameters summary of X-ray detectors

| Application scenarios                                | Detector                                                                                                                                  | Pixel size/<br>$\mu\text{m}^2$ | Minimum exposure<br>time or<br>integration<br>time/<br>ns | Maximum<br>frame rate/<br>pfs |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Medium-to-high-speed<br>imaging                      | High-speed CMOS video camera<br>SA-Z (Photron)                                                                                            | 20×20                          | 159                                                       | 200k                          |
| Ultra-high-speed<br>imaging, single-shot             | Ultra-high-speed CMOS video<br>camera                                                                                                     | 30×30                          | 100                                                       | 7M                            |
| High detection<br>efficiency, single-shot<br>imaging | Kirana (Specialized Imaging)<br>High sensitivity sCOMS 4-frame<br>video camera<br>MF-QF-VIS-H20-F-297( Intelligent<br>Scientific Systems) | 9×9                            | 3                                                         | 13.8M                         |
| Single- shot diffraction                             | High Frame Rate Integrated Pixel<br>Array Detector<br>Keck-PAD* (Sydor)                                                                   | 150×150                        | 0.092                                                     | 10M                           |

\*Quantum efficiency > 90% @ (20-65keV), Dynamic range ~1953

表 6 SDB 动态加载实验站白光直通和微米聚焦模式下探测分辨率列表

Table 6 Resolution specifications of the SDB dynamic loading experimental station in white-beam and micro-focused modes

| White beam mode (20-200keV) |                  |                  |                  |                    |                    |
|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| FOV                         | 13mm             | 10mm             | 4mm              | 2mm                | 1mm                |
| Spatial resolution          | 13 $\mu\text{m}$ | 10 $\mu\text{m}$ | 4 $\mu\text{m}$  | 2 $\mu\text{m}$    | 1 $\mu\text{m}$    |
| Temporal resolution         | <100ps*          | <100ps*          | <200ns           | 1~10 $\mu\text{s}$ | 5~20 $\mu\text{s}$ |
| Micro beam mode (20-70keV)  |                  |                  |                  |                    |                    |
| Photon energy               | 21.7 keV         |                  | 43keV            | 65keV              |                    |
| Temporal resolution         | 92ps*            |                  | ~1 $\mu\text{s}$ | ~5 $\mu\text{s}$   |                    |

\*Determined by the X ray single pulse duration.

HEPS 的注入模式包括 648 束团的高亮度模式和 63 束团（或 28 束团）的大束团高电荷量模式（图 5a），结构动力学线站在多束团高亮度模式下开展常规低时间分辨的动态加载实验（如霍普金森杆），在大束团高电荷量模式开展单脉冲探测实验（如激光加载和气炮加载），该工作模式下时间分辨能力最高，由 X 射线脉冲宽度决定，约百皮秒量级。HEPS 现已稳定运行 28 束团注入模式，脉冲的时间间隔为 162 ns。单脉冲探测实验中，热负载斩波器与白光毫秒快门联合使用，以保护光学元件、样品及探测器，降低 X 射线损伤，因此，加载装置触发、快门开关及探测器采集均需满足严格的时序逻辑。其时序如图 4 所示：斩波器与储存环回旋频率信号精确同步；白光毫秒快门、加载装置和探测由单次触发信号启动，触发时刻以斩波器定时信号为基准，并依据设备响应时间和实验需求设置特定延迟。图 5(b)和(c)为 28、63 束团模式单脉冲成像强度的扫描曲线，其中横坐标（图像序号）表征时间信息，采用荧光衰减时间约 40 ns 的 Ce:LYSO 闪烁体（500  $\mu\text{m}$ ，镀 Al

膜)，由于 28 束团模式的脉冲间隔更长，其成像信号相比 63 束团模式表现出显著更优的余晖抑制效果。

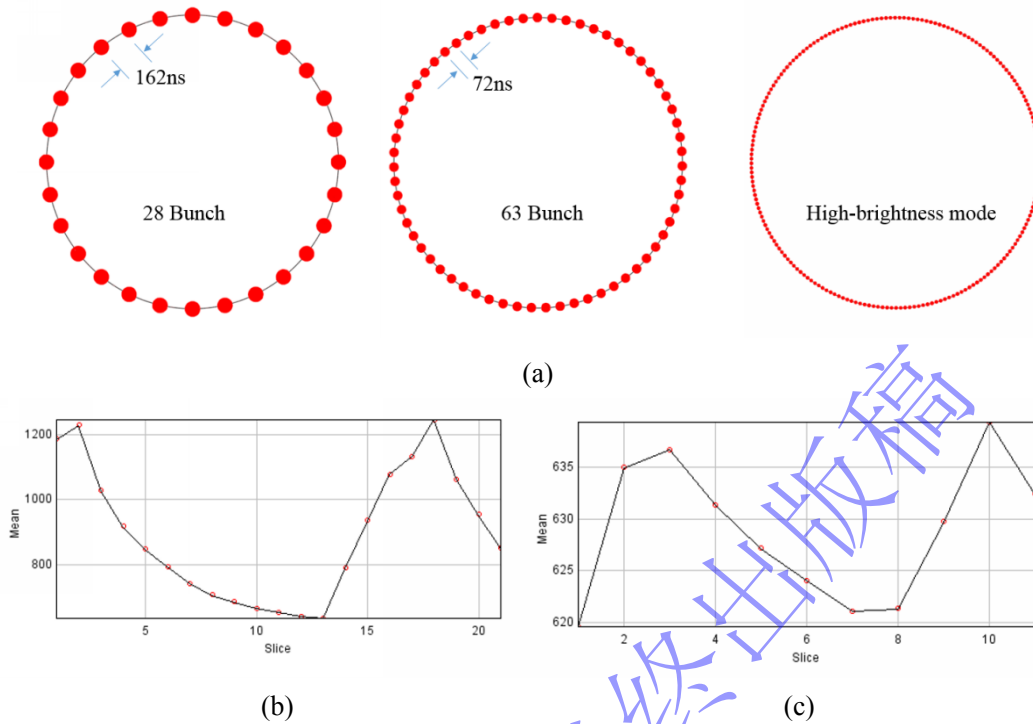


图 5 HEPS 注入模式与单脉冲探测示意图：（a）28 束团、63 束团和高亮度注入模式；（b）28 束团模式下单脉冲成像强度的扫描曲线；（c）63 束团模式下单脉冲成像强度的扫描曲线

Fig.5 Schematic diagrams of HEPS injection modes and single-pulse detection: (a) 28-bunch, 63-bunch and high-brightness injection modes; (b) scanning curve of single-pulse imaging intensity under the 28-bunch mode; (c) scanning curve of single-pulse imaging intensity under the 63-bunch mode

## 2 冲击实验

SDB 在试运行期间取得了一系列体现线站性能的实验成果，接下来将以高速连续成像、单脉冲分幅成像、微秒分辨动态衍射、单脉冲衍射等验证实验为例演示线站在动态侵彻、高速拉伸和激光加载等领域的应用潜力。

### 2.1 霍普金森杆加载的高速 X 射线相衬成像 (X-ray Phase-Contrast Imaging, XPCI)

据统计，近半数民航飞机事故发生在机场起降阶段<sup>[20]</sup>。为保证飞机迫降时的安全制动，自上世纪九十年代起国际民航组织开始推广特性材料拦阻系统 (Engineered Materials Arresting System, EMAS)<sup>[21]</sup>。EMAS 通过采用发泡水泥铺设应急跑道，使得迫降的飞机能在该路段稳定压溃多孔水泥/混凝土材料，实现冲击动能的有效吸收<sup>[22-23]</sup>。发泡水泥具有复杂的细观多孔结构，其在动态加载下的变形损伤行为数据匮乏，这阻碍了针对该材料的力学研究与结构、工艺优化工作。在 SDB 的分离式霍普金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) 上可以实现应变率  $10^3$ - $10^4$   $s^{-1}$  范围内的动态压缩加载，结合 HEPS 的高能 X 射线可以实现多孔水泥材料内部变形损伤行为的快速原位观测<sup>[24]</sup>。

图 6(a)展示了含空心漂珠的多孔水泥试样（孔隙率为~20%）在 SHPB 加载（应变率为  $1800 s^{-1}$ ）过程中动态变形损伤响应的原位 X 射线快速相衬成像序列。该实验中，高速相机拍摄帧率选用 100 kfps，像素大小为  $20 \mu m/pix$ ，选用  $1.5\times$  耦合镜头，理论单像素分辨率为  $\sim 13.33 \mu m/pix$ ，初始试样在成像视野中的尺寸为  $4 mm\times 4 mm$ 。从图 7 中可观察到多孔水泥试样在 SHPB 加载下发生压溃、

断裂和破碎：加载初期（0-50  $\mu\text{s}$ ），图中绿色虚线标记的主裂纹自试样的四角萌生并向试样中心区域延伸，蓝色实线标记的球形孔洞沿加载方向压溃为椭球形，并在裂纹延展至孔洞处后发生剪切破坏；加载中期（60-110  $\mu\text{s}$ ），沿加载方向相对的主裂纹两两合并，在试样两侧形成三角形的破坏区域，且破坏区域的碎片在试样膨胀变形的作用下向两侧飞溅；加载后期（120-170  $\mu\text{s}$ ），残留的试样碎块最终呈现锥形破坏形貌，这与岩石、煤块等脆性材料的单轴压缩破坏模式类似。图 6(b)中，试样的力学响应首先经过线性弹性阶段和非线性弹性阶段，并在达到峰值强度后因内部损伤演化而出现应变软化现象。实验数据经三次重复测试和平均处理获得，并在图中给出误差棒。

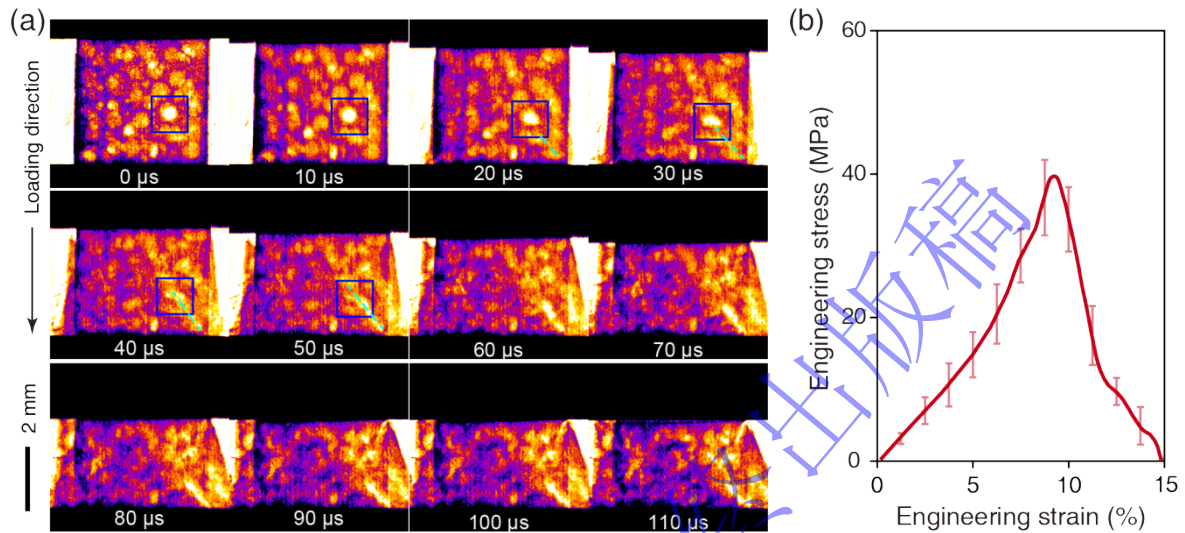


图 6、多孔水泥试样在分离式霍普金森压杆加载（1800  $\text{s}^{-1}$ ）工况下的(a)变形损伤过程原位 X 射线快速相衬成像结果和 (b) 工程应力-应变曲线

Fig.6 Experimental results of a porous cement specimen subjected to SHPB loading at 1800  $\text{s}^{-1}$ : (a) XPCI captured dynamic compression process; (b) Engineering stress-engineering strain curve

## 2.2 弹道侵彻加载的高速 XPCI

顺丁橡胶是工程应用范围最广的合成橡胶之一，常用于制造极端环境（如风沙、寒地等）下的汽车轮胎、缓冲垫块等产品，其在冲击加载下的变形损伤行为具有研究意义。由于顺丁橡胶的强度较低，制备流程中人们会通过掺入金属颗粒实现改性，以提升材料的刚度和强度。依托同步辐射光源高穿透、高相衬成像优势，能够对复合材料内部弹道侵彻动态过程实施原位实时观测<sup>[16]</sup>。

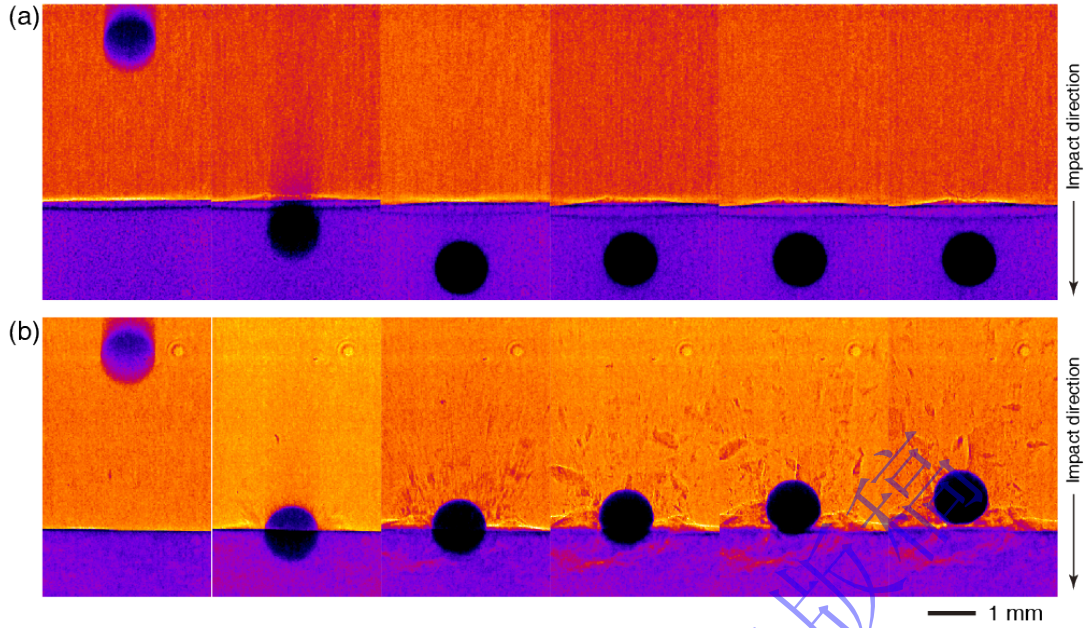


图 7、橡胶及其复合材料在 1 mm 直径钢球以约 200 m/s 速度的弹道冲击下变形损伤过程的原位 X 射线快速相衬成像结果。(a)顺丁橡胶的弹道侵彻实验成像结果。(b)铜颗粒增强顺丁橡胶复合材料的弹道侵彻实验成像结果。相邻成像的时间间隔为 10  $\mu$ s

Fig.7 XPCI captured ballistic impacts of 1 mm-diameter steel sphere penetrating BR-based materials. (a) BR (b) Cu powder reinforced BR. The interval time between each frame is 10  $\mu$ s

在 SDB 的 8 mm 小型一级炮上分别针对顺丁橡胶块体和铜颗粒增强顺丁橡胶块体两类试样开展了弹道冲击测试,使用的钢制弹丸直径为 1 mm,冲击速度为约 200 m/s,高速相机拍摄帧率选用 100 kfps,像素大小为 20  $\mu$ m/pix,选用 1.5 $\times$ 耦合镜头,理论单像素分辨率为 $\sim$ 13.33  $\mu$ m/pix。实验的原位 X 射线快速相衬成像结果分别见图 7(a)和(b)。在图 7(a)中,弹丸撞击靶体后深入内部并形成空腔,这一阶段靶体主要发生弹塑性变形,且未出现显著的裂纹等损伤形貌。弹丸在达到最大侵入深度(约 1.8 mm)后,由于靶体弹性变形逐渐恢复而发生回弹,最终停留在约 1.5 mm 深度处。在图 7(b)中,撞击瞬间在弹/靶接触面上有大量小尺寸的靶材料碎片出现,并以锥形向接触面外溅射。而后,在靶体内部出现大量垂直于冲击方向的裂纹,造成了近冲击面靶体材料的片层状破碎。弹道侵彻下,铜粉增强顺丁橡胶试样中的最大侵彻深度(约 0.5 mm)显著低于顺丁橡胶试样,这说明掺入铜颗粒有效提升了材料的强度,但在成像结果中出现的大量裂纹也说明掺入铜颗粒造成冲击加载下顺丁橡胶材料从弹塑性损伤转为脆性损伤。这可能是因为铜颗粒/顺丁橡胶基体界面为裂纹萌生和扩展提供了弱区。

### 2.3 轻气炮冲击加载的单脉冲 XPCI

在爆炸、高速撞击等强动载冲击工况下,金属、聚合物等固体靶材内常因应力波的传播、反射与相互作用而出现层裂这一失效现象。层裂损伤具有瞬时、高动压等特点,且往往出现在固体材料内部,因而难以通过传统可见光成像等手段直接观测其动态过程;随着同步辐射光源的快速发展,超快 X 射线相衬成像技术日趋成熟,可实现轻气炮冲击加载层裂演化过程的原位可视化观测<sup>[12,18]</sup>。本实验以航空航天领域常用的 6061 铝合金为研究对象,在 20 mm 口径一级轻气炮上开展平板撞击实验,并结合 HEPS 大束团高电荷量模式,利用 X 射线单脉冲成像技术实现层裂过程的动态原位观测。以 HEPS 的 28 束团模式为例,束团间隔约 162 ns,实验前通过线站全局定时系统将相机的快门与光源储存环的射频(RF)信号同步,设置相机不同延时对一个 RF 信号周期内光强变化过程进行扫描,寻找同步辐射光源大束团填充模式下束团的精确位置,并确定大束团 X 射线单脉冲与 RF

信号的同步延迟, 进行精确同步调节, 保证相机快门打开期间, 只有一个大束团 X 射线单脉冲对样品进行曝光, 以此获取曝光持续时间为单个大束团 X 射线单脉冲宽度 (百皮秒) 的超快图像。

在平板冲击实验中, 飞片 (厚度 1 mm) 在轻气炮高压气体驱动下高速撞击靶材 (2 mm), 在飞片/靶材撞击面上形成背向传播的两组冲击波。其中: 沿冲击方向前向传播的冲击波进入靶材内部, 并在到达靶材的自由表面后反射形成稀疏波; 沿冲击方向反向传播的冲击波在到达飞片的自由表面后反射, 形成的稀疏波在穿过飞片后进入靶材内部。两组稀疏波在靶材内的中心区域相会, 并在该区域产生较强的拉伸作用, 使得此处的靶材材料经历孔洞成核、微裂纹萌生、微裂纹合并为宏观裂纹等过程, 最终发生层裂破坏。图 8(a)-(c)展示了 6061 铝合金在平板冲击加载下层裂过程的原位 X 射线单脉冲相衬成像结果。初始时刻 (静态成像, 图 8(a)) 仅有靶材在视野中, 且靶材内无任何损伤特征。在 713 ns 和 1037 ns 时刻, 飞片已经出现在视野中, 且靶材中出现了垂直于冲击方向的层裂损伤区域, 其中可观察到大量的裂纹, 且裂纹的延伸方向基本垂直于加载方向。图 8d 绘制了 6061 铝样品靶片在平板冲击下的后自由面中心点处的速度历史曲线, 从中可计算得知层裂过程的拉伸应变率为  $8.5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 、峰值冲击应力为 2.862 GPa, 而材料的 Hugoniot 弹性极限为 0.488 GPa、层裂强度为 0.941 GPa。

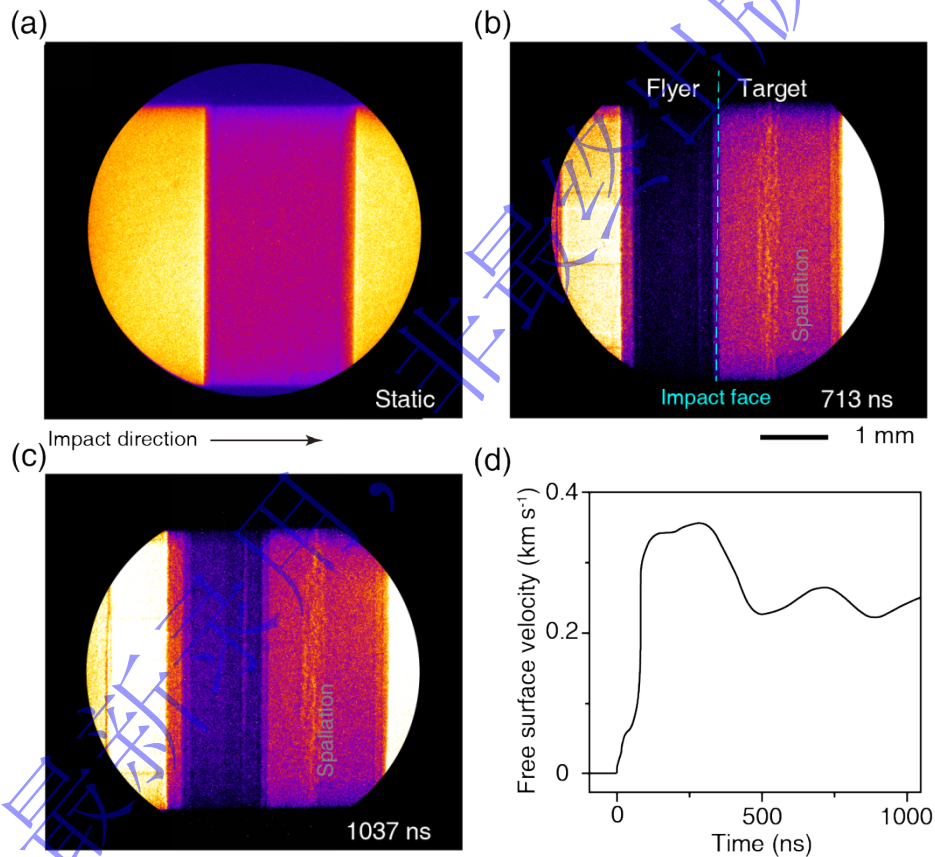


图 8、6061 铝合金的平板撞击 (冲击速度为 400 m/s) 加载实验结果: (a)-(c)层裂过程的原位 X 射线快速相衬成像; (d)样品后自由面曲线历史

Fig.8 Experimental results of 6061 aluminum alloy subjected to plate-impact loading at a velocity of 400 m/s: (a)-(c) In situ XPCI results captured spallation process; (d) Profile of free surface velocity

## 2.4 霍普金森杆拉伸的高速 X 射线衍射 (X-Ray Diffraction, XRD)

TRIP 钢 (Transformation-Induced Plasticity steel) 试样厚度为 0.5 mm, 通过亚稳奥氏体在变形过程中发生马氏体相变, 获得优异的强度与塑性匹配, 其在冲击等极端力学环境下的塑性变形、相变与失效机理一直是结构力学与材料科学的研究热点。在强动载作用下, 材料内部晶格应变、晶粒

取向和相组成的演化共同决定其宏观力学响应，然而这些过程通常在数微秒内快速完成，传统的回收组织显微分析难以真实还原变形过程中的瞬态微观结构。为此，在结构动力学线站结合分离式霍普金森拉杆（Split Hopkinson Tensile Bar, SHTB）加载技术与高能同步辐射硬 X 射线透射衍射手段，实现对 TRIP 钢动态拉伸全过程微观结构演化的原位诊断。实验在光路系统中引入 CRL，将波荡器出光的 44 keV 高能三次谐波精确聚焦至样品处，形成尺寸约为  $100\text{ }\mu\text{m}\times 100\text{ }\mu\text{m}$  的微米光斑；同时配合光束线高精度狭缝系统，巧妙地卡掉并屏蔽了发散角较大的基波及其他各次高阶杂散谐波，实现了极佳的准单色化光束配置，得益于 HEPS 极高的亮度和 SDB 的光学设计，在 44keV 的准单色光依然具有极高的通量，满足开展不锈钢等高密度体系动态衍射的表征需求。为了精准捕捉从弹性加载、塑性流等关键节点，采用了基于应变片的高精度微秒级触发机制：应变片捕捉入射应力波后，其电信号上升沿作为外触发电源，驱动数字延迟发生器（DG645）严格同步控制积分型二维探测器的门控快门。在本次实验中，探测器单次曝光时间设置为  $2\text{ }\mu\text{s}$ ，相邻图像的采集间隔为  $15\text{ }\mu\text{s}$ ，并在一次动态拉伸过程中连续记录衍射图像。本文选取  $t=15$ 、 $45$ 、 $75$  和  $105\text{ }\mu\text{s}$  四个时刻进行对比，分别对应图 9(a)–(d)。

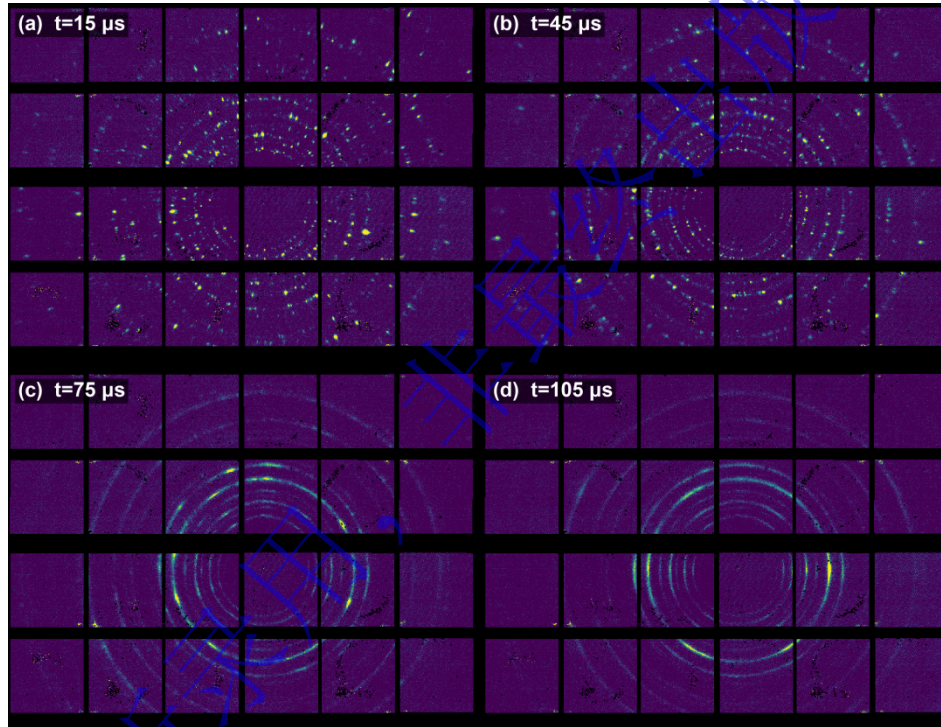


图 9、TRIP 钢在 SHTB 动态拉伸过程中不同时刻的二维 X 射线衍射图谱：(a)  $t=15\text{ }\mu\text{s}$ ；(b)  $t=45\text{ }\mu\text{s}$ ；(c)  $t=75\text{ }\mu\text{s}$ ；(d)  $t=105\text{ }\mu\text{s}$ （试样厚度： $0.5\text{ mm}$ ；曝光时间： $2\text{ }\mu\text{s}$ ；采集间隔： $15\text{ }\mu\text{s}$ ）

Fig. 9 Time-resolved 2D XRD patterns of the TRIP steel during SHTB loading: (a)  $t=15\text{ }\mu\text{s}$ ; (b)  $t=45\text{ }\mu\text{s}$ ; (c)  $t=75\text{ }\mu\text{s}$ ; and (d)  $t=105\text{ }\mu\text{s}$  (sample thickness:  $0.5\text{ mm}$ ; exposure time:  $2\text{ }\mu\text{s}$ ; acquisition interval:  $15\text{ }\mu\text{s}$ ).

从图 9 的图像演变可以直观观察到衍射环形态与晶粒取向分布的连续变化。在  $t=15\text{ }\mu\text{s}$  时（图 9(a)），图谱主要表现为由高亮度、离散斑点和不连续弧段构成的 Debye-Scherrer 环，说明在约  $100\text{ }\mu\text{m}$  光斑照射体积内，满足布拉格衍射条件的晶粒数量较少且取向分布不均（大晶粒）。当动态加载推进至  $t=45\text{ }\mu\text{s}$  时（图 9(b)），原本孤立的高亮衍射斑点在更多方位角方向出现，部分斑点沿环向（方位角方向）发生延展，衍射弧段的覆盖范围明显增加，表明晶粒取向、晶格畸变和局部应变状态开始发生变化。在  $t=75\text{ }\mu\text{s}$  时（图 9(c)），原先离散的衍射斑点逐渐相互连接，多条衍射环在空间上趋于连续并呈现清晰的同心圆弧特征，可能对应于晶粒旋转、亚结构增殖以及塑性变形对衍射信号的共同贡献。在  $t=105\text{ }\mu\text{s}$  时（图 9(d)），衍射环保持较好的连续性，但在特定方位角方向出

现明显的强度集聚和不对称增强,反映出大变形后期 TRIP 钢内部形成了较强的形变组织,晶粒取向在动态应力场及相变过程作用下发生择优重排。

采用已完成几何校准的参数对图 9(a)和图 9(d)对应的二维图谱进行局部一维方位积分。积分前对图像作垂直翻转,以匹配 Dioptas/pyFAI 坐标系;方位角积分窗口限定为水平方向,图 10a 给出  $2\theta=2\sim 13^\circ$  范围内的局部积分曲线,对比了  $t=15\ \mu\text{s}$  (图 9(a)) 与  $t=105\ \mu\text{s}$  (图 9(d))。对约  $8.7^\circ$  峰 (奥氏体 {200} 衍射峰) 采用单峰伪 Voigt 函数进行拟合,图 10(b)和图 10(c)给出了两个目标峰的实测数据、拟合曲线和残差,其拟合中心分别为  $8.749^\circ$  (FWHM=0.280°) 和  $8.659^\circ$  (FWHM=0.210°)。由  $15\ \mu\text{s}$  到  $105\ \mu\text{s}$ , {200} 峰的衍射角位置和半高宽均发生了显著变化,说明水平附近局部方位扇区内的局部晶格响应随动态拉伸演化 (拉应变)。此外,峰展宽的变化对应了局部变形引起的粗晶细化及位错等塑性变形的产生。

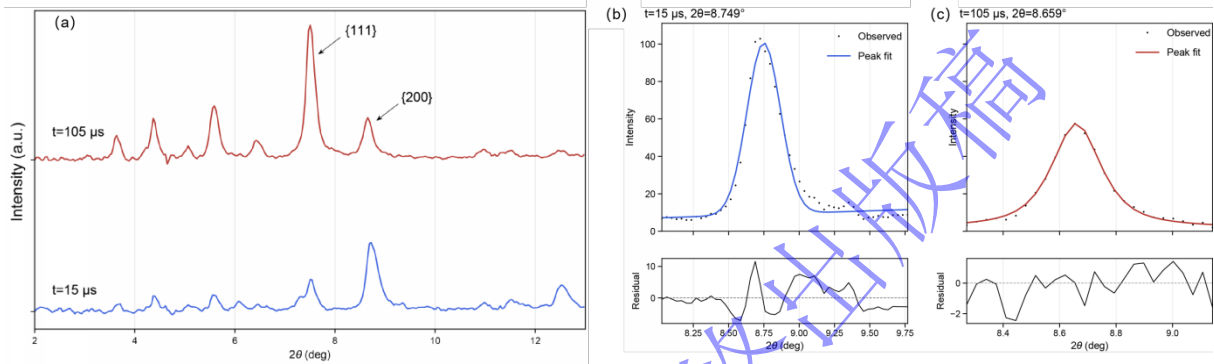


图 10、(a)TRIP 钢在  $t=15\ \mu\text{s}$  和  $t=105\ \mu\text{s}$  时水平方向  $\pm 20^\circ$  方位角扇区的一维 X 射线衍射局部积分曲线;

(b)-(c)TRIP 钢在  $t=15\ \mu\text{s}$  和  $t=105\ \mu\text{s}$  时刻 {200} 峰形拟合结果及残差

Fig.10 (a) Local azimuthal integration profiles of the TRIP steel within the horizontal  $\pm 20^\circ$  sector at  $t=15\ \mu\text{s}$  and  $t=105\ \mu\text{s}$ .

(b)-(c) Gaussian-limit pseudo-Voigt fitting across the complete  $8.0\sim 9.8^\circ$  peak region at  $t=15\ \mu\text{s}$  and fitting of the corresponding peak near  $8.7^\circ$  at  $t=105\ \mu\text{s}$ .

## 2.5 脉冲激光加载的单脉冲 XRD

在超快热加载和极端热应变工况下,钛铝 (TiAl) 合金单晶常经历剧烈的晶格畸变、热应力波传播以及固-液相变等高温动力学过程。此类相变过程发生在纳秒时间尺度,传统静态散射及宏观测试手段难以捕捉其微观结构演化的动态细节。本实验以 TiAl 单晶为研究对象,依托高能量同步辐射光源,利用基波能量为  $20\ \text{keV}$  的分立谐波峰构成的高亮度粉光实现劳厄 (Laue) 衍射,结合积分型二维探测器,开展激光加载下单晶熔化过程的纳秒时间分辨原位衍射观测。实验采用 HEPS 高电荷量模式 (63 束团填充模式),相邻 X 射线脉冲的时间间隔为  $72\ \text{ns}$ ,单个脉冲的半高全宽 (FWHM) 约为  $92\ \text{ps}$ 。实验中利用高能脉冲激光器作为泵浦源对 TiAl 单晶样品表面进行热加载,并通过线站全局定时系统将激光触发信号、储存环射频 (RF) 信号以及探测器的电子快门进行精密同步。调控激光脉冲与 X 射线脉冲到达样品的相对延迟时间,实现对加载过程不同时间节点的采样。积分型探测器由 4 行 8 列共 32 个方形传感器拼接而成,图中展示了局部有信号的四个传感器,图像中深蓝色横竖条带为计数为 0 的传感器间隙。通过将探测器的单帧曝光时间严格设定为  $50\ \text{ns}$ ,小于  $72\ \text{ns}$  的脉冲间隔,实现了对单个  $92\ \text{ps}$  脉冲宽度 X 射线信号的精确门控与积分采集,从而有效避免了相邻束团信号的重叠,获取了高信噪比的超快静态衍射图像。

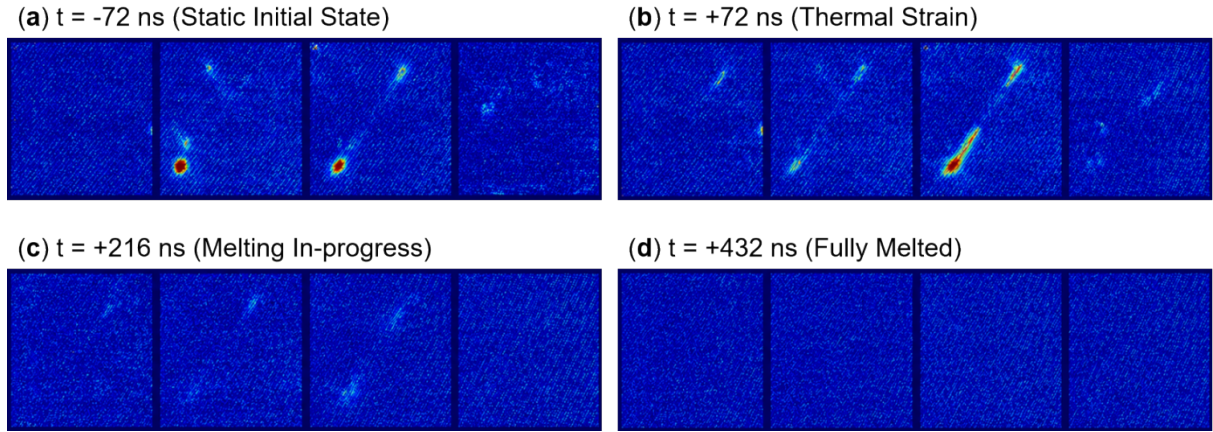


图 11、TiAl 单晶在激光加载熔化过程中的单脉冲时间分辨原位 Laue 衍射

Fig.11 Single-pulse time-resolved in situ Laue diffraction of TiAl single crystals during laser-induced melting

图 11 展示了 TiAl 单晶在激光脉冲加载下经历超快升温、热应变及熔化过程的时间分辨原位 X 射线 Laue 衍射结果，图像颜色映射采用 JET 色板。在加载前-72 ns 时刻，样品处于未受扰动的初始单晶状态，衍射图谱背景干净，仅在中部传感器中观察到少数极其尖锐、明亮且边界清晰的布拉格衍射斑点，对应 TiAl 单晶完美的长程有序晶格结构。随着激光能量注入，在+72 ns 时刻，表层剧烈热膨胀引发强热应变，受 Debye-Waller 效应影响，晶格热振动加剧导致布拉格衍射斑点强度大幅衰减，高计数率区域显著收缩，同时非均匀热应变导致原本集中的斑点沿特定的倒易杆方向发生明显的拉伸与星芒化，呈现条带状弥散。至+144 ns 时刻，热量向深层扩展引发 TiAl 单晶大量熔化，固-液共存区快速扩大，单晶的长程平移对称性遭到破坏，导致尖锐的布拉格衍射斑点急剧衰减并濒临消失，仅在原位置残存微弱的浅蓝色弥散条带。当时间演化至+360 ns 时，激光作用区内的 TiAl 单晶已完全转变为液态，长程晶格平移对称性彻底消失，图像中所有的布拉格衍射斑点完全消失。由于液态结构因子第一主峰的散射角超出了当前探测器的物理覆盖范围，图谱未呈现显式的圆环，而是表现为全视野内均匀抬升的低强度液态漫散射背景，保持了良好的各向同性特征，表明材料已完全进入液态。

### 3 总结与展望

本文系统介绍了高能同步辐射光源（HEPS）结构动力学线站（SDB）动态加载实验站的设计与性能。作为第四代同步辐射装置的专用动态探测平台，该线站充分利用 HEPS 高光子能量、高亮度及高相干性的优势，在多项关键性能指标上实现了对第三代光源的跨越式提升。线站工作光子能量覆盖 21 keV 至 100 keV 以上，白光模式下单脉冲光子数达  $3.2 \times 10^9$  phs/pulse，最小聚焦光斑可达  $5.5 \times 4.6 \mu\text{m}^2$ ，时间分辨率达百皮秒级。这些特性使其具备对高原子序数金属材料厚样品进行原位动态表征的独特能力，为研究材料在冲击、高速变形等极端加载条件下的非平衡态动力学过程提供了前所未有的实验手段。

在光学设计方面，线站采用 U12 与 U14.2 串联低温永磁波荡器，结合多层膜单色器与复合折射透镜组的灵活配置，可在 21.7 keV、43 keV 和 65 keV 三个核心能量点实现从毫米级视场到微米级聚焦的多尺度光斑切换，满足成像、衍射、散射等多模态实验方法的差异化需求。在加载能力方面，线站配备了气炮（冲击速度 100–4000 m/s）、霍普金森拉/压杆（应变率 500–10000  $\text{s}^{-1}$ ）、百焦脉冲激光（应变率  $> 10^7 \text{s}^{-1}$ ）等多种加载装置，覆盖了从准静态到超高速冲击的宽广应变率范围。在探测能力方面，线站集成了高速 CMOS 相机、分幅相机、Keck-PAD 高帧频像素阵列探测器等多种探测设备，并结合 HEPS 的多束团与大束团注入模式，实现了从毫秒到百皮秒时间分辨的多模式探测，可灵活支撑单次不可逆过程的完整时序采样。试运行期间的若干典型实验充分验证了该线站

的综合性能,表明该线站具备开展从宏观变形到微观相变跨尺度原位表征的能力,在冲击动力学、相变动力学及损伤演化等前沿研究领域具有广阔的应用前景。

展望未来,随着 HEPS 储存环流强的进一步提升和注入模式的持续优化, SDB 动态加载实验站的通量密度和时间分辨能力仍有提升空间。线站还将进一步拓展探测方法,如开展基于间接探测的 X 射线衍射和成像联合探测实验研究,发展小角 X 射线散射与 X 射线能谱探测等联合诊断技术,以实现纳米尺度结构演化与元素价态变化的同步表征。同时,结合机器学习辅助的数据处理与图像重建算法,有望实现对海量超快实验数据的高效处理与特征提取,推动动态加载原位研究从定性观测向定量诊断的深度发展。结构动力学线站的建设与运行为国内外用户提供了国际先进的动态加载原位探测平台,将有力推动我国在极端力学与材料科学交叉领域的前沿研究。

**致谢** 本工作得到高能同步辐射光源(批准号:发改高技(2017)2173号)、中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(批准号:YSBR-096)和国家自然科学基金(项目编号:11627901)资助。感谢 HEPS 加速器团队、束线工程团队对实验站建设和运行的支持。

## 参考文献

- [1] BRINGA E M, ROSOLANKOVA K, RUDD R E, et al. Shock deformation of face-centred-cubic metals on subnanosecond timescales [J]. *Nature Materials*, 2006, 5(10): 805-809.
- [2] ZHAKHOVSKY V V, BUDZEVICH M M, INOGAMOV N A, et al. Two-zone elastic-plastic single shock waves in solids [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(43): 135502.
- [3] MEDVEDEV A E, MACONACHIE T, LEARY M, et al. Perspectives on additive manufacturing for dynamic impact applications [J]. *Materials and Design*, 2022, 221: 110963.
- [4] DUBROVINSKY L, DUBROVINSKAIA N, NARYGINA O, et al. Body-centered cubic iron-nickel alloy in Earth's core [J]. *Science*, 2007, 316(5833): 1880-1883.
- [5] GLENZER S H, MACGOWAN B J, MICHEL P, et al. Symmetric inertial confinement fusion implosions at ultra-high laser energies [J]. *Science*, 2010, 327(5970): 1228-1231.
- [6] KUMAR N, YING Q, NIE X, et al. High strain-rate compressive deformation behavior of the  $\text{Al}_{0.1}\text{CrFeCoNi}$  high entropy alloy [J]. *Materials and Design*, 2015, 86: 598-602.
- [7] DOLAN D H, KNUDSON M D, HALL C A, et al. A metastable limit for compressed liquid water [J]. *Nature Physics*, 2007, 3(5): 339-342.
- [8] PALIWAL B, RAMESH K T, MCCAULEY J W, et al. Dynamic compressive failure of AlON under controlled planar confinement [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, 91(11): 3619-3629.
- [9] KRISTOFFERSEN M, COSTAS M, KOENIS T, et al. On the ballistic perforation resistance of additive manufactured AlSi10Mg aluminium plate s[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 137: 103476.
- [10] WANG X, XIA W G, WU X Q, et al. In-situ investigation of dynamic deformation in NiTi shape memory alloys under laser induced shock [J]. *Mechanics of Materials*, 2017, 114: 69-75.
- [11] LE MOUROUX S, LEBAILLIF D, BERTHE L, et al. Development of back-face coatings for the characterization of non-reflective and opaque materials by laser shocks [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2025, 203: 105327.
- [12] LUO S N, JENSEN B J, HOOKS D E, et al. Gas gun shock experiments with single-pulse x-ray phase contrast imaging and diffraction at the Advanced Photon Source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(7): 073903.
- [13] 陈森, 侯琪玥, 王倩男, 等. 基于同步辐射的强冲击荷载下原位诊断技术及其应用研究进展[J]. *高压物理学报*, 2023, 37(5): 050104.
- CHEN S, HOU Q Y, WANG Q N, et al. Progress on synchrotron based in situ dynamic x-ray

- diagnostics and its applications[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(5): 050104.
- [14] RADOUSKY H B, ARMSTRONG M R, GOLDMAN N. Time resolved x-ray diffraction in shock compressed systems[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 129(4): 040901.
- [15] ZHANG D S, YU C, WANG M, et al. In situ transient Laue x-ray diffraction during high strain-rate tension[J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(3): 033902.
- [16] HUA J Y, JIA H X, BIAN Y L, et al. High-speed penetration of laminated alumina ceramic/polymethacrylimide foam composite: in situ synchrotron x-ray imaging and mesoscale modeling [J]. Composite Structures, 2026, 385: 120253.
- [17] ZIELINSKI B, SADAT T, LUKIĆ B, et al. Characterization of local mechanical properties of Al/Cu magnetic pulse welded joints under high strain rates using synchrotron x-ray imaging [J]. Materials Letters, 2023, 337: 133943.
- [18] VIRAZELS T, GARCÍA-MOLLEJA J, LUKIĆ B, et al. Real-time in-situ x-ray imaging of pore compaction and spall fracture in plate impact tests on additively manufactured metals [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2026, 211: 106551.
- [19] 谢红兰, 李可, 付亚楠, 等. 上海同步辐射光源快速 X 光成像线站发展现状及展望 (特邀) [J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(24): 2434011.
- XIE H L, LI K, FU Y N, et al. Current development status and prospects of fast x-ray imaging beamline at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (Invited) [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(24): 2434011.
- [20] XIONG M L, WANG H W, WONG Y D, et al. Enhancing aviation safety and mitigating accidents: a study on aviation safety hazard identification [J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 62: 102732.
- [21] SAN FILIPPO W K, DELONG H. Engineered materials arresting system (EMAS): an alternative solution to runway overruns [M]//Designing, Constructing, Maintaining, and Financing Today's Airport Projects. 2002: 1-12.
- [22] ZHOU H Y, ZHANG X J, WANG X J, et al. Improving energy absorption capacity of foam concrete with gradient and layered architecture [J]. Construction and Building Materials, 2022, 319: 126140.
- [23] HAO Y H, WANG H Z, QIN L D, et al. Dynamic characteristics and response analysis of a new type of prefabricated fly ash foam concrete structure [C]//Structures. Elsevier, 2023, 57: 105074.
- [24] HUA J Y, XU J, BIAN Y L, et al. Dynamic deformation and fracture of porous cement: a high-speed x-ray phase contrast imaging study [J]. Construction and Building Materials, 2026, in press.

Structural Dynamics Beamline of High Energy Photon Source: A Platform for  
in-Situ Characterization of High-Speed Dynamic Loading Processes  
Introduction  
to the Dynamic Loading Experimental Station at the Structural Dynamics  
Beamline of the High Energy Photon Source

SUN Darui<sup>1</sup>, BIAN Yalong<sup>†2</sup>, SHI Caijuan<sup>1</sup>, YAO Chunxia<sup>1</sup>, WANG Xue<sup>1</sup>, LI Yuxiao<sup>1</sup>, ZHANG Dongsheng<sup>1</sup>, HOU Penghao<sup>1, 3</sup>, FAN Duan<sup>2</sup>, XU Jie<sup>2</sup>, GUO Shunhe<sup>2</sup>, HUA Junyi<sup>2</sup>, CAI Yang<sup>\*2</sup>, ZHANG Bingbing<sup>\*1, 3</sup>

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. The Peac Institute of Multiscale Sciences, Chengdu 610031, Sichuan, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The microstructural evolution of materials under dynamic loading is closely related to their macroscopic mechanical behavior, and real-time in situ characterization is of critical importance for the development of advanced materials and their applications under extreme conditions. The dynamic loading experimental station at the Structural Dynamics Beamline (SDB) of the High Energy Photon Source (HEPS), a fourth-generation diffraction-limited light source, serves as a dedicated dynamic probing platform with significant enhancements in photon energy, flux density, and temporal/spatial resolution. The beamline covers a photon energy range from 21 keV to over 100 keV, and delivers a single-pulse photon flux of  $3.2 \times 10^9$  phs/pulse in white-beam mode. Leveraging the high-charge bunch injection mode, it supports multi-scale in situ characterization with time resolutions spanning from milliseconds down to hundreds of picoseconds and spatial resolutions ranging from centimeter-scale fields of view to micron-scale details. The station is equipped with a variety of dynamic loading devices, including gas guns, Hopkinson bars, and a hundred-joule laser system, and is integrated with multiple detection modes such as X-ray imaging, diffraction, and combined multi-modal probing. This paper systematically presents the light source, optical design, loading apparatus, and timing/detection systems of this experimental station. Preliminary application results from typical impact experiments, including in situ high-speed phase-contrast imaging of foamed cement compression, penetration of rubber composites, spallation of aluminum alloy, and dynamic deformation/phase transformation of stainless steel, are demonstrated. These results fully validate the unique capabilities and broad application prospects of this platform for revealing cross-scale mechanical responses and microscopic evolution mechanisms of irreversible dynamic processes in materials.

**Keywords:** synchrotron radiation; *in situ* dynamic loading probing; X-ray imaging; X-ray diffraction