

面向冲击波场测量的 ZnS:Mn²⁺力致发光复合薄膜动态标定*

张博天, 钱秉文, 王长利, 王良全, 吴郑浩, 张鑫, 柯明,

李奕硕, 王军红

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:为实现力致发光材料在冲击波场超压测量中的定量应用, 针对现有准静态或低频动态标定方法难以适应冲击波瞬态加载特性的问题, 开展了 ZnS:Mn²⁺力致发光复合薄膜的动态标定研究。采用高温固相法制备了 ZnS:Mn²⁺粉末并将其制成复合薄膜; 搭建了激波管动态标定系统, 同步采集冲击波超压信号、发光图像与发光光谱; 提出了以标准光源参照法和光谱匹配法为核心的发光强度提取方法; 完成了 0.1 ~ 2.0 MPa 范围内的 60 发标定实验。结果表明: 该薄膜具备亚毫秒级时域动态响应特性, 响应延迟约为 0.174 ms, 上升时间约为 0.323 ms; 在 0.2 ~ 1.7 MPa 范围内发光强度峰值与端面反射超压峰值呈良好线性关系, 标定方程为 $I_{\text{peak}} = 44.702 P_{\text{peak}} + 15.052$, 决定系数为 0.9933, 线性度误差为 5.81%; 重复加载下产生不可逆发光退化, 且退化程度随载荷强度升高而加剧。标定结果验证了由发光强度反演冲击波超压峰值的可行性, 为力致发光材料应用于冲击波超压全场可视化测量提供了实验依据。

关键词: 力致发光; ZnS:Mn²⁺; 冲击波; 超压测量; 动态标定; 激波管

中图分类号: O384; O521.3

文献标识码: A

爆炸冲击波的超压峰值、比冲量、正压作用时间等特征参数直接决定了其毁伤效应, 但由于爆炸过程具有瞬态、剧烈且破坏性强的特点, 对冲击波场的精确测量一直是爆炸与冲击测试中的挑战^[1]。传统的冲击波场测量技术分为接触式和非接触式两大类。接触式测量技术如压电式压力传感器、压阻式压力传感器和 PVDF 薄膜传感器^[2], 技术成熟, 测量精度较高, 然而传感器布设复杂, 仅能获取离散点的信息, 无法反映冲击波阵面的传播形态和超压分布。高速摄影是目前广泛使用的非接触式测量技术, 能够清晰记录冲击波传播过程, 通过分析帧间位移计算平均波速, 进而估算冲击波超压, 但难以直接获取定量超压数据, 理论推算依赖于理想气体假设, 容易引入误差^{[3][4]}。

力致发光材料具备独特的力-光转换特性, 为冲击波场测量提供了新思路。力致发光 (Mechanoluminescence, ML) 也称应力发光, 指物质受到压缩、拉伸、冲击、摩擦等机械作用而直接发光的现象^[5]。不同力致发光材料在发光机制、余辉特性和动态响应等方面存在差异。相比于具有较长余辉且通常需要预激发的储能型材料 (如 SrAl₂O₄:Eu²⁺), ZnS:Mn²⁺属于典型的压电型力致发光材料, 具有发光强度高、响应速度快和动态响应机理较明确等特点^[6], 适用于冲击波瞬态载荷下的光学成像与定量测量。将该类材料以薄膜或涂层形式附着于被测结构表面, 通过高速摄像机记录冲击波作用下的发光图像, 即可实现非接触式、全场、可视化的冲击波超压分布测量。然而, 要将力致发光材料真正应用于冲击波场的定量测量, 首先需开展冲击载荷作用下的动态标定研究, 建立发光强度与实际超压之间的关联模型。目前力致发光材料标定研究主要集中在准静态或低频动态

*收稿日期: 2026-09-04; 修回日期: 2026-09-22

作者简介: 张博天 (2001—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事毁伤光电测试技术研究。

E-mail: zhangbotian@nint.ac.cn

通讯作者: 钱秉文 (1987—), 男, 博士, 研究员, 主要从事毁伤测试与评估研究。

E-mail: qianbingwen@nint.ac.cn

条件下,国内外学者先后开展了落球实验^{[7][9]}、落锤实验^{[10][12]}等研究,但冲击波载荷具有微秒级上升沿、短持续时间和高应变率的瞬态特性,与准静态加载条件存在本质差异,材料在极端动态载荷下的力-光响应行为可能发生变化,导致现有的标定结果无法直接应用于冲击波场测量。

针对上述问题,本文面向冲击波场测量的需求,以 ZnS:Mn²⁺力致发光复合薄膜(以下简称力致发光薄膜)为研究对象,开展了动态标定研究。主要工作包括:(1)采用高温固相法制备 ZnS:Mn²⁺粉末,利用 XRD、SEM、EDS 和 XPS 对其晶体结构、微观形貌、元素组成以及化学态进行表征,经多层复合工艺制备成力致发光薄膜;(2)搭建以激波管为冲击波加载装置,由壁面压力传感器、高速摄像机和光纤光谱仪同步采集的动态标定实验系统,实现冲击波超压与力致发光响应的同步测量;(3)针对标定中的环境光干扰、几何畸变、发光强度量化和力-光时序匹配问题,提出标准光源参照法、透视校正法、光谱匹配法和多源数据对齐方法,建立发光强度提取与处理流程;(4)开展 0.1 ~ 2.0 MPa 范围内共 60 发标定实验,定量评价力致发光薄膜的时域动态响应特性,建立发光强度峰值与端面反射超压峰值的关联模型,确定线性响应区间与标定方程,并揭示重复加载退化规律,为其在冲击波场定量测量中的应用提供标定依据。

1 力致发光材料

1.1 发光机制

纤锌矿结构的 ZnS:Mn²⁺属于压电材料,通常用压电诱导载流子脱陷模型(Piezoelectrically induced electron detrapping model)来解释力致发光现象^{[3][14]}。当 ZnS:Mn²⁺晶体受弹性载荷作用时,非中心对称结构的形变引发局部压电场,而晶体中存在预先捕获电子的缺陷位点,称为“电子陷阱”,压电场会降低这些陷阱的能量深度,使电子更容易脱离陷阱束缚,从而进入晶体的导带,此过程称为载流子脱陷。导带中的电子跃迁到价带,以非辐射形式释放能量,该能量被邻近的 Mn²⁺离子吸收,使其从基态跃迁至激发态。被激发到高能态(⁴T₁)的 Mn²⁺离子在退激发过程中跃迁回基态(⁶A₁),释放特定波长的光子,形成为致发光现象。

这一物理过程的力-光关系可表示为^[15]:

$$I_{ML} = C \cdot P \quad (1)$$

式中, I_{ML} 为发光强度, $C = \eta \delta n_e g \tau \mu B d A$ 为常数, P 为晶体所受压强, η 为掺杂离子的辐射跃迁效率, δ 为捕捉到电子的激活态掺杂离子比例, n_e 为掺杂离子激发态的密度, g 为电子在导带中的产生速率, τ 为电子在导带中的寿命, μ 为电子在晶体中的迁移率, B 为比例系数, d 为压电系数, A 为晶体受压面积。该公式揭示了在弹性变形阶段 ZnS:Mn²⁺发光强度与所受压强之间的线性响应机制,为冲击波超压的定量测量提供了理论依据。

1.2 ZnS:Mn²⁺粉末

ZnS:Mn²⁺粉末采用高温固相法制备,基本步骤如下:(1)原料配比:以高纯度 ZnS (≥99.99%) 为基质,选用 MnCO₃ (99.95%) 作为 Mn²⁺掺杂源,按 Mn 与 Zn 的摩尔比为 3.0 mol% (对应 Mn 元素原子分数约为 1.5 at.%) 称取原材料,并配入 5 wt% 的 MgCl₂ 作为助熔剂;(2)前处理:将混合粉末置于玛瑙研钵中,以适量无水乙醇为介质湿法研磨 2 h 至浆料呈均匀糊状,随后置于 80 °C 恒温电热鼓风干燥箱中烘干;(3)高温煅烧反应:将干燥后的混合料置于刚玉舟内,推入管式炉恒温反应区,通入 95% Ar + 5% H₂ 还原性气氛,控制升温速率为 5 °C/min 升至 1200 °C,恒温煅烧 4 h 以促进 Mn²⁺充分固溶进入 ZnS 晶格;(4)降温与产物纯化:煅烧反应结束后,在保护气氛中随炉降温至 100 °C 以下取出。所得块状烧结产物经粗研磨后,采用 0.1 mol/L 稀盐酸浸洗 10 min 以去除表面残留助熔剂与微量杂相,随后用去离子水反复离心洗涤至滤液呈中性,再用无水乙醇脱水,置于 100 °C 真空烘箱中烘干过夜,研磨过筛(400 目)后最终获得如图 1 所示的 ZnS:Mn²⁺粉末。



图 1 ZnS:Mn²⁺粉末实物

Fig.1 Photograph of ZnS:Mn²⁺ powder

为确定合成粉末的物相组成与晶体结构, 采用 D2 PHASER 型 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 仪对粉末进行测试。所得 XRD 谱如图 2 所示, 衍射峰尖锐且强度高, 表明该材料结晶良好, 物相纯度较高, 主相确认为纤锌矿结构的 ZnS, 且其晶体结构参数与标准卡片 (PDF#97-065-7411) 无显著偏差, 未观察到明显杂相衍射峰, 证实高温固相法成功制备了高纯度 ZnS:Mn²⁺粉末。

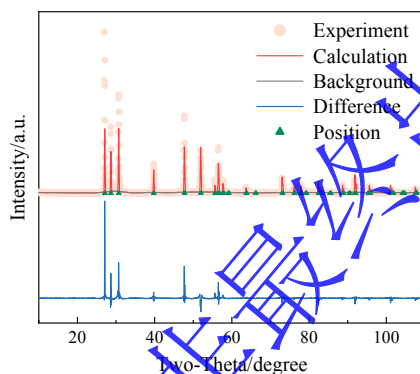
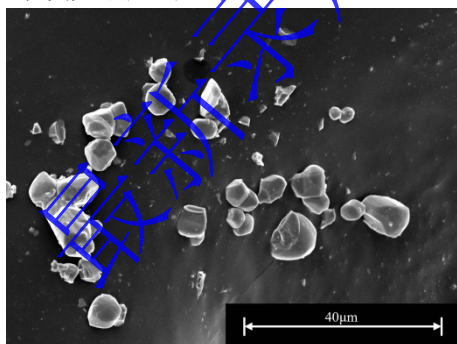


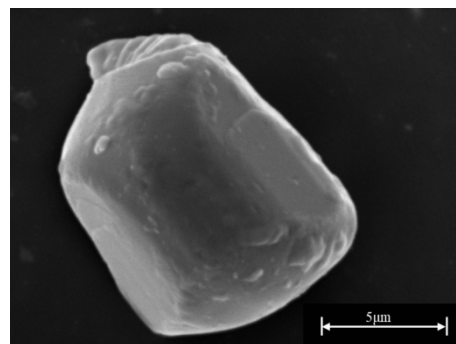
图 2 ZnS:Mn²⁺粉末的 XRD 谱

Fig.2 XRD pattern of ZnS:Mn²⁺ powder

采用 Apreo S 型扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM) 观察粉末的微观形貌特征。结果如图 3 所示, 颗粒整体呈类球形, 表面平整无裂纹, 粒径分布均匀 ($D_{90}/D_{10} \leq 1.7$), 平均粒径约为 10 μm 。均匀的粒径分布与规整形貌使颗粒在复合薄膜中分散均匀, 有利于应力均匀传递, 保证了发光响应的一致性。



(a) SEM image at 2000 $\times$ magnification



(b) SEM image at 10000 $\times$ magnification

图 3 ZnS:Mn²⁺粉末的 SEM 图像

Fig.3 SEM images of ZnS:Mn²⁺ powder

在 SEM 观察基础上, 采用能谱仪 (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy, EDS) 分析微区元素分布与掺杂量。能谱如图 4 所示, 样品主要由 Zn、S 和 Mn 元素组成, 各元素信号稳定, 未见明显偏析; 微区定量分析表明, Mn 元素的实测掺杂量约为 1.4 ± 0.1 at.%, 与理论配料比基本吻合。为进一步确认元素的化学价态, 采用 Thermo Fisher ESCALAB Xi⁺型 X 射线光电子能谱 (X-ray

photoelectron spectroscopy, XPS) 仪进行分析。获得的 XPS 全谱如图 5 所示, Zn 为+2 价, S 为-2 价, Mn 为+2 价, 元素化学态符合纤锌矿结构 ZnS:Mn^{2+} 的理论预期。

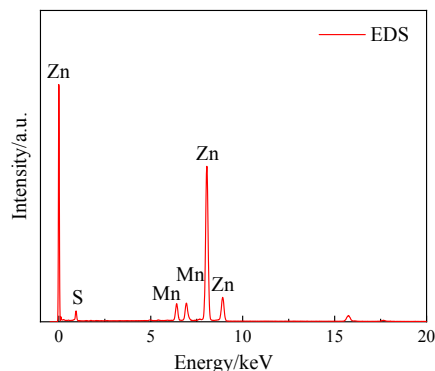


图 4 ZnS:Mn^{2+} 粉末的 EDS 能谱
Fig.4 EDS spectrum of ZnS:Mn^{2+} powder

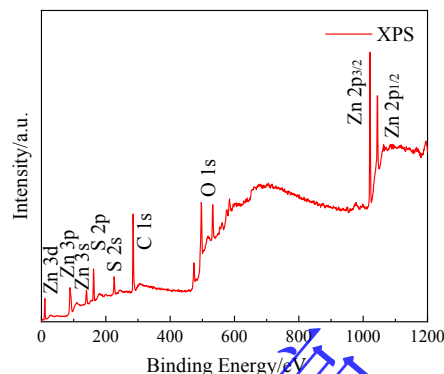
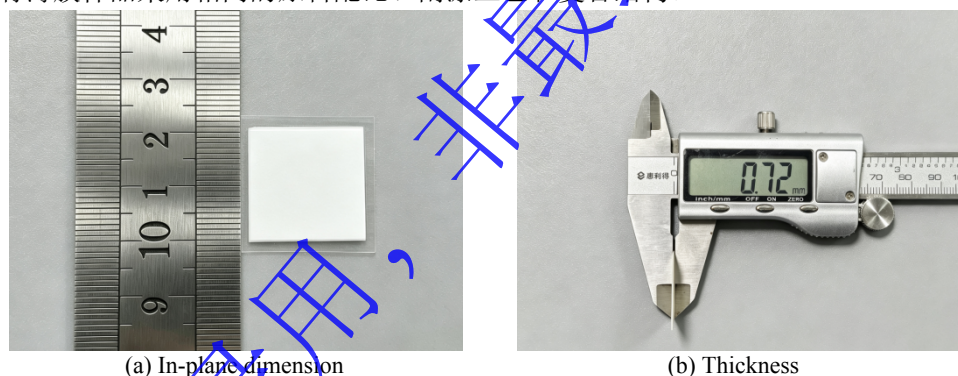


图 5 ZnS:Mn^{2+} 粉末的 XPS 能谱
Fig.5 XPS spectrum of ZnS:Mn^{2+} powder

1.3 复合薄膜

将 ZnS:Mn^{2+} 粉末与环氧树脂基体 (E-51 双酚 A 型环氧树脂配合聚醚胺固化剂) 按质量比 4 : 1 混合均匀, 以约 0.2 mm 的厚度均匀刮涂在 0.15 mm 厚的透明 PET 基底上, 随后将两片完全相同的涂覆试样以发光胶面相对方式对称贴合、压实排气。试样加热固化后对其四周进行加热塑封密封, 最终制得由上下 PET 保护层和中间发光层构成的力致发光复合薄膜。薄膜表面平整, 主体呈淡黄色, 形态为 20 mm×20 mm 的正方形薄片, 厚度约为 0.72 mm, 如图 6 所示。为保证标定结果的可比性, 所有薄膜样品采用相同的原料配比、刮涂工艺和复合结构。



(a) In-plane dimension

(b) Thickness

图 6 力致发光复合薄膜实物

Fig.6 Photograph of mechanoluminescent composite film

该薄膜属于典型复合材料, 由功能相、黏结相与基底三部分构成: ZnS:Mn^{2+} 颗粒为功能相, 实现机械能向光能的转换; 环氧树脂为黏结相, 用于固定颗粒空间分布并传递外加载荷; 上下两层 PET 基底提供支撑和保护。在冲击波载荷作用下, 应力从 PET 基底传入环氧树脂基体, 再经颗粒/基体界面以压缩-剪切耦合方式传递至 ZnS:Mn^{2+} 颗粒内部, 激发局部压电场并诱导力致发光。结构选用 PET 基底主要兼顾其高弹性模量与高透光率; 0.15 mm 基底厚度使应力波渡越时间可忽略; 约 0.4 mm 发光层与 0.72 mm 总厚度既保证了贴覆平整度, 又与 80 wt.% 的颗粒质量分数协同, 在提升单位面积发光颗粒密度的同时, 避免了过厚或颗粒过度团聚引起的界面缺陷与光散射衰减。因此, 研究所得的标定关系表征的是该结构体系的整体力-光响应, 严格依赖于薄膜的结构设计与制备工艺。

2 动态标定实验

2.1 实验系统

动态标定实验系统如图 7 所示，以激波管为冲击波加载装置，实现端面反射超压、力致发光图像和发光光谱的同步采集。激波管为内壁光滑、横截面均匀的长直管，由带十字刻痕的 304 钢膜片分隔为高压驱动段和低压试验段。实验时向高压驱动段充入氮气，膜片在压差作用下沿十字刻痕破裂，高压气体迅速膨胀并推动试验段气体，形成沿管轴向传播的入射冲击波。不同强度等级的冲击波通过改变十字刻痕处的残余厚度实现：在其他条件保持不变时，残余厚度越小，膜片局部承载能力越低，破膜压力越低；残余厚度越大，破膜压力越高。破膜压力的变化改变了膜片破裂瞬间驱动段与试验段之间的压力比，进而形成不同强度等级的入射冲击波。

低压试验段末端设置光学视窗，刚性端面用于贴覆力致发光薄膜。端面中心处预留孔位，嵌入式安装 PCB 113B24 型压力传感器。传感器敏感面与端面内壁齐平，以减小安装凸起或凹陷对局部流场及压力响应的影响。膜片破裂后产生的入射冲击波沿低压试验段传播，并在末端刚性端面处发生反射。因此，该传感器测得的是冲击波作用于刚性端面形成的反射超压（Reflected overpressure），而非低压试验段内自由传播状态下的入射超压。

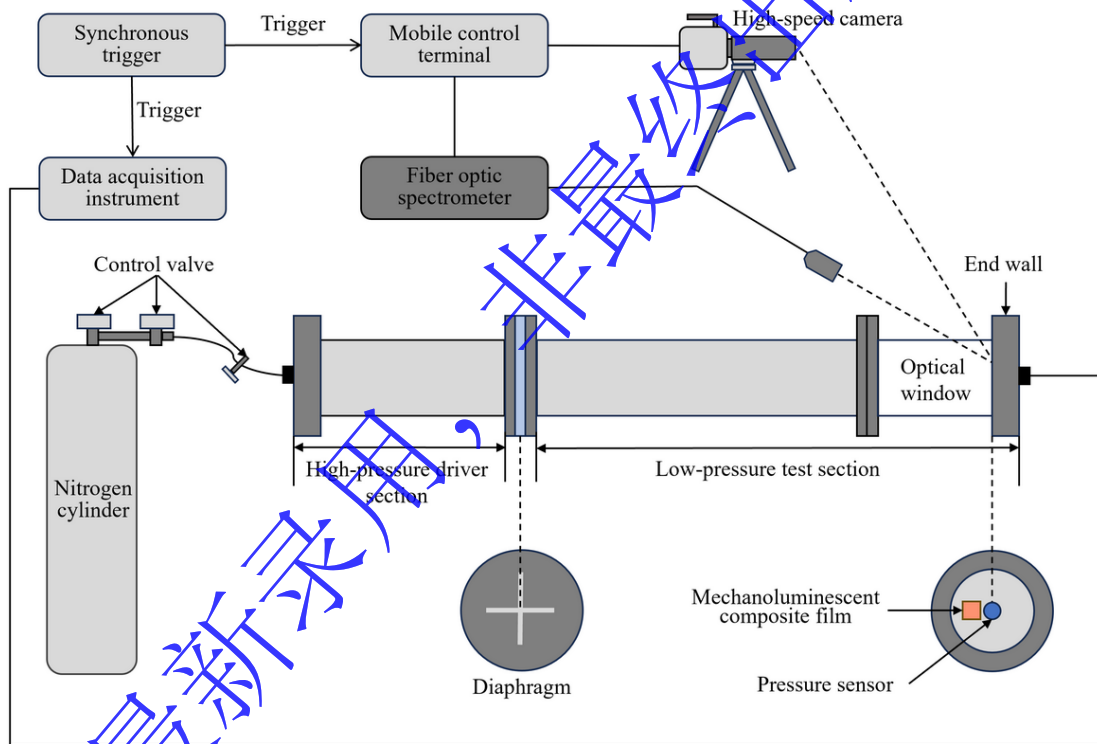


图 7 动态标定实验系统

Fig.7 Experimental system for dynamic calibration

压力传感器信号接入数据采集仪，获取端面反射超压时程数据。高速摄像机和光纤光谱仪布置于光学视窗外侧，由移动控制端远程控制，分别记录薄膜的力致发光时序图像和发光光谱。各采集设备均处于循环缓存模式，预触发时间设为 1 s（事前记录），后触发时间设为 2 s（事后记录），以保证完整记录冲击波到达前后的压力和光学信号。以膜片破裂瞬间作为触发零点（ $t = 0$ s），同步触发器输出 TTL 电平启动各路数据存储。由此，力-光数据基于同一触发基准对齐，保证时序分析的一致性与可追溯性。动态标定实验系统中主要设备型号及性能参数如表 1 所示。

表 1 主要设备型号及性能参数

Table 1 Model and performance parameters of main equipment

Equipment	Model	Performance parameters
Pressure sensor	PCB 113B24 (ICP Piezoelectric)	Standard range: 0 ~ 6.895 MPa; Sensitivity: 1.45 mV/kPa; Resonant frequency ≥ 500 kHz; Rise time ≤ 1.0 μ s
High-speed camera	Phantom V2012	Full-frame rate: 22,600 fps @ 1280 $\times$ 800; Throughput: 22 Gpx/s; ISO sensitivity: 32000
Fiber optic spectrometer	AvaSpec ULS4096CL-EVO	Wavelength range: 200 ~ 700 nm; Resolution: 0.05 ~ 20 nm; Integration time: 9 ~ 40 μ s
Data acquisition instrument	Dewetron DEWE3-A4	Max sampling rate: 10 MS/s Gapless storing rate: 400 MB/s
Synchronous Trigger	NUC-SNYT-08	Trigger delay: ≤ 10 μ s Channel consistency: ≤ 0.1 μ s

2.2 标定方法

为从高速图像中准确、可重复地提取力致发光强度，并实现其与端面反射超压信号的定量关联，按照灰度基准统一、几何畸变校正、发光灰度提取以及力-光时序对齐的处理流程，分别采用标准光源参照法、透视校正法、光谱匹配法和多源数据对齐方法，分述如下。

2.2.1 标准光源参照法

在动态标定实验中，环境光照、采集距离和光学传输条件的微小变化，均可能引起图像灰度基准的波动，从而影响不同发次之间力致发光强度的比较。为建立稳定、统一的图像灰度基准，研究提出标准光源参照法对高速图像进行统一校核。

标准光源采用 ZnS:Mn^{2+} 粉末制备发光核心，具体工艺为：将 ZnS:Mn^{2+} 粉末与聚乙二醇黏结剂按质量比 9 : 1 混合，在 10 MPa 压力下压制为直径 2 mm、厚度 2 mm 的圆片；随后于 800 $^{\circ}\text{C}$ 保温 2 h，以去除黏结剂并提高发光核心的致密性；最后对其表面进行抛光并完成电气封装，如图 8 所示。封装后的标准光源由 12 V 恒压电源供电，通过内置紫外激发单元持续激发，提供稳定的参照光。在实验时段内，标准光源参考区域的平均灰度波动小于 $\pm 1\%$ 。

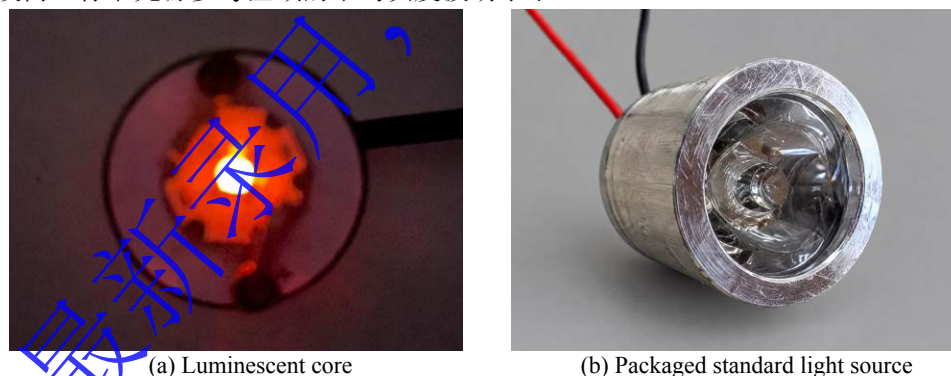


图 8 标准光源

Fig.8 Standard light source

每次实验破膜前，将标准光源置于激波管一侧的固定位置，采用与正式实验相同的相机参数采集标准光源图像，作为该发次的灰度参照；实验结束后，依据相应发次的标准光源图像，对力致发光图像序列进行背景扣除和增益校正，将各发次图像统一至同一相对灰度标尺。经标准光源参照处理后，各发次在冲击波到达前、薄膜尚未产生力致发光时的平均灰度均稳定在 15 附近，表明不同发次之间的图像灰度基准具有较好的一致性。

需要说明的是，标准光源与力致发光薄膜在材料结构和激发方式上存在本质差异，标准光源采用高致密 ZnS:Mn^{2+} 发光核心，并由紫外光激发；薄膜发光层则由 ZnS:Mn^{2+} 粉末与环氧树脂基体组成，通过冲击波加载产生力致发光。因此，标准光源无法用于直接表征复合薄膜的绝对发光强度，只能提供稳定的灰度参照和跨发次的校正基准。

2.2.2 透视校正法

高速摄像机位于激波管透明视窗的斜上方，成像光轴与薄膜表面不垂直，原本为正方形的力致发光薄膜在图像中呈现为不规则四边形。若直接在原始图像中框选矩形区域提取灰度，ROI 内易混入背景像素或遗漏部分发光区域；同时，透视畸变使薄膜相同面积区域在图像中所占像素数不同，简单平均灰度实际上是对发光面的非均匀加权平均，两方面均会引入几何偏差。为此，在图像后处理中采用透视变换（Perspective transformation）^[16]对薄膜区域进行几何校正。

设原始图像与校正图像中对应像素点的齐次坐标分别为 $(x, y, 1)^T$ 与 $(x', y', 1)^T$ ，二者满足：

$$s \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， s 为非零尺度因子； H 为 3×3 透视变换矩阵。将 $h_{33} = 1$ 归一化为 1 后， H 包含 8 个独立自由度，可表示为：

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式（2）与式（3）可得非齐次坐标的映射关系为：

$$\begin{cases} x' = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \\ y' = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \end{cases} \quad (4)$$

在原始图像中定位薄膜的 4 个顶点，并与目标标准正方形的 4 个顶点建立对应关系，由 4 对匹配点求解透视变换矩阵 H 。随后采用同一变换矩阵对同一发火的全部图像进行校正，将薄膜区域映射至统一尺寸的标准正方形，如图 9 所示。校正后，在统一的有效 ROI 内提取薄膜灰度并计算平均值，从而减小背景混入、区域遗漏及拍摄视角差异造成的影响，为后续发光强度提取和力-光关系分析提供一致的空间基准。

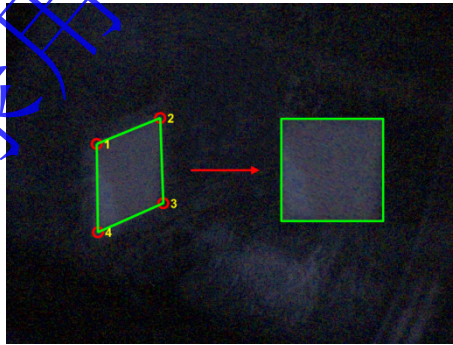


图 9 薄膜区域的透视校正
Fig.9 Perspective correction of the film region

2.2.3 光谱匹配法

为定量表征力致发光薄膜的发光强度，需要将高速摄像机采集的 RGB 彩色图像转换为灰度图像，并计算薄膜发光区域的平均灰度值。传统的灰度映射公式（ITU-R BT.601）^[17]为：

$$I = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (5)$$

式中， I 为像素灰度值， R 、 G 、 B 分别为像素红、绿、蓝通道的强度。该公式的权重分配依据人眼视觉特性和色度学原理确定，未考虑力致发光光谱与相机各通道光谱响应度之间的匹配关系，因此不适用于直接表征薄膜的发光强度。

相机像素对材料发光的有效响应不仅取决于发光强度的大小，还取决于材料发射光谱与相机各颜色通道光谱响应度之间的匹配程度。为此，研究提出光谱匹配法：将像素等效灰度值定义为各通道有效响应值的加权和，其权重由力致发光光谱在各通道的有效响应贡献归一化确定，使计算得到的灰度能够更真实地反映相机对该材料发光的有效光电响应。

设力致发光光谱功率分布为 $P(\lambda)$ ，相机各通道的光谱响应度为 $S_R(\lambda)$ 、 $S_G(\lambda)$ 、 $S_B(\lambda)$ ，单位为 $A \cdot W^{-1}$ ，表示单位入射光功率在波长 λ 处产生的光电流。前者由实验中光纤光谱仪测定，后者通过相机产品技术手册获取。力致发光在第 k 通道产生的有效光电响应与二者的重叠乘积成正比，其在有效波长范围内的积分贡献可表示为：

$$\Phi_k = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) S_k(\lambda) d\lambda, k \in \{R, G, B\} \quad (6)$$

式中， λ_1 与 λ_2 分别为积分的起始与终止波长， Φ_k 表示材料发光对第 k 个通道的有效响应贡献。根据各通道的有效响应贡献进行归一化，得到灰度转换权重：

$$\omega_k = \frac{\Phi_k}{\Phi_R + \Phi_G + \Phi_B}, k \in \{R, G, B\} \quad (7)$$

满足 $\omega_R + \omega_G + \omega_B = 1$ 。据此，重新构建的光谱匹配等效灰度映射公式为：

$$I = \omega_R R + \omega_G G + \omega_B B \quad (8)$$

与传统的灰度映射公式相比，该方法的权重由材料实际发光光谱和相机光谱响应度共同决定，能够更准确地表征相机对该材料发光的相对响应。

2.2.4 多源数据对齐

高速摄像机每秒记录 8000 张图像数据，数据采集仪每秒采集 10^6 个超压样本，建立力-光标定关系前须保证时间匹配。生成一帧所需的总时间称为帧时间（Frame time），时长为 125 μs ，帧时间内包含 120 μs 的曝光时间（Exposure time）和 5 μs 的读出时间（Read-out time）。每张高速图像记录的力致发光现象，反映的是曝光时间内传感器感光元件捕捉到的发光量总和，而读出时间内没有光线进入传感器，对图像中的发光强度没有影响。因此，一帧在时间上对应 125 个超压样本，其中前 120 个关联该帧发光强度（图 10），对其取平均即可反映对应帧图像中力致发光薄膜实际承受的反射超压。

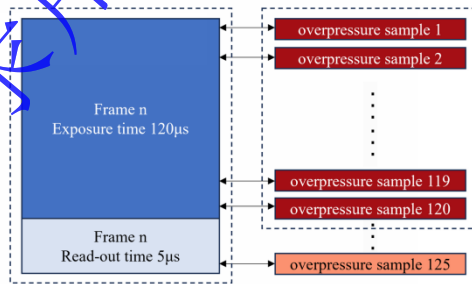


图 10 高速图像与超压数据的时序对齐关系

Fig.10 Time alignment between high-speed images and overpressure sampling data

2.3 实验流程

动态标定实验在常温常压条件下开展，现场如图 11 所示。实验设定 20 档不同强度的冲击波载荷，目标反射超压峰值范围为 0.1 ~ 2.0 MPa，每档间隔 0.1 MPa；不同挡位载荷通过采用不同十字刻痕残余厚度的 304 钢膜片获得，每档进行 3 发实验，共计 60 发。考虑到膜片加工误差、材料性能离散性及破裂过程差异，各发实验的实际反射超压峰值会在目标值附近存在一定波动，研究将压力传感器测得的反射超压峰值作为该发实验的载荷表征量，并用于后续力-光标定分析。

为同时考察力致发光薄膜的重复响应能力,采用“新膜+复用膜”同发对照方案:每个档位第1发仅贴覆1片新膜;第2发将第1发已加载的薄膜(复用膜)与1片新膜并排贴覆在端面,同发加载;第3发将第2发中的新膜(已加载一次,转为复用膜)与1片新膜并排安装,同发加载。由此,每个超压档位获得3次首次加载数据和2次重复加载数据,全部实验共获得60次首次加载和40次重复加载数据。

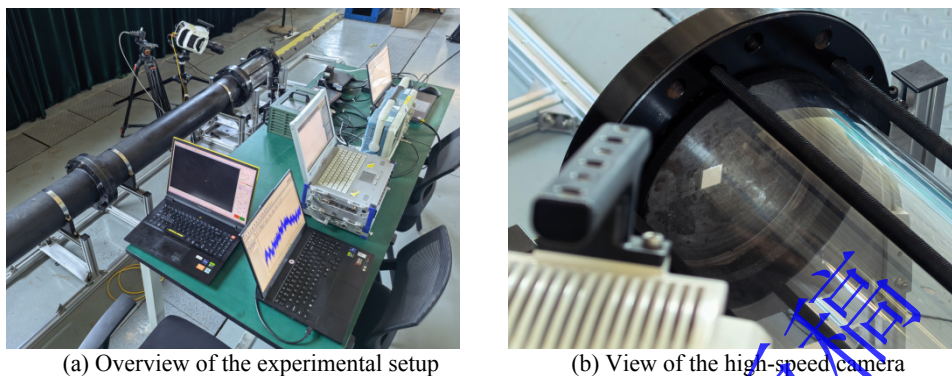


图 11 实验现场

Fig.11 Photograph of the experimental setup

设备采集参数方面,高速摄像机分辨率设为 1280×800 ,采样频率 8000 Hz ;光纤光谱仪光谱采集范围设为 $400 \sim 700 \text{ nm}$,积分时间设为 10 ms ,实验开始前采集背景光谱,作为光谱数据处理的基线;数据采集仪以 1 MS/s 采样率连续记录端面压力传感器信号。

实验数据按以下流程处理:(1)依据标准光源参照法对各发次图像进行灰度基准校核;(2)将原始图像经透视校正还原为标准正方形;(3)按光谱匹配法得到的权重提取力致发光薄膜发光区域的平均灰度,得到发光强度时程 $I(t)$;(4)按照多源数据对齐方法,将 $I(t)$ 与端面反射超压时程 $P(t)$ 逐帧对应,进而提取发光强度峰值 I_{peak} 与对应反射超压峰值 P_{peak} ,构成力-光标定数据。

3 实验结果与分析

3.1 冲击波加载结果

为表征冲击波的实际加载结果,对各发实验获得的端面反射超压时程进行了分析。图 12 给出了不同强度等级下的典型反射超压时程。各组压力信号均呈现出陡峭上升、缓慢衰减的特征,符合激波管冲击波的波形特征。

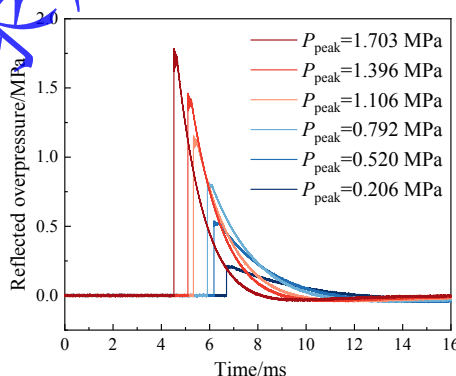


图 12 典型反射超压时程

Fig.12 Typical time histories of reflected overpressure

除峰值反射超压外,正压持续时间和反射比冲量也会随加载强度发生变化。因此,研究同时采用上述三个参数表征冲击波的加载特性。设冲击波到达端面的时刻为 t_0 ,反射超压衰减至背景基线附近的时刻为 t_1 ,则正压持续时间 t_+ 为:

$$t_+ = t_1 - t_0 \quad (9)$$

反射比冲量 i_r 定义为正压阶段反射超压对时间的积分：

$$i_r = \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt \quad (10)$$

表 2 中整理了 20 档载荷条件下反射超压峰值、正压持续时间以及反射比冲量的实测结果（均值±标准差）。实测超压峰值覆盖了 0.1 ~ 2.0 MPa 的设计范围，正压作用时间随超压峰值升高由约 5.80 ms 降至约 3.34 ms，反射比冲量由约 0.250 MPa·ms 增至约 1.732 MPa·ms。各超压档位下 3 发重复实验的波形数据偏差较小，表明加载过程具有良好的可控性和可重复性，为力-光标定提供了稳定的载荷基础。

表 2 冲击波加载特征参数

Table 2 Characteristic parameters of shock wave loading

Case	Target peak reflected overpressure $P_{\text{peak},t}/\text{MPa}$	Measured peak reflected overpressure $P_{\text{peak}}/\text{MPa}$	Positive phase duration t_+/ms	Reflected specific impulse $i_r/(\text{MPa} \cdot \text{ms})$
1	0.1	0.111 ± 0.018	5.80 ± 0.05	0.250 ± 0.038
2	0.2	0.187 ± 0.016	5.62 ± 0.05	0.396 ± 0.032
3	0.3	0.300 ± 0.025	5.39 ± 0.05	0.585 ± 0.045
4	0.4	0.404 ± 0.029	5.21 ± 0.05	0.739 ± 0.049
5	0.5	0.495 ± 0.022	5.07 ± 0.05	0.860 ± 0.036
6	0.6	0.590 ± 0.010	4.93 ± 0.02	0.972 ± 0.016
7	0.7	0.697 ± 0.010	4.77 ± 0.02	1.082 ± 0.015
8	0.8	0.786 ± 0.007	4.64 ± 0.01	1.160 ± 0.012
9	0.9	0.897 ± 0.018	4.49 ± 0.03	1.249 ± 0.024
10	1.0	0.993 ± 0.018	4.37 ± 0.03	1.322 ± 0.023
11	1.1	1.087 ± 0.017	4.26 ± 0.02	1.386 ± 0.021
12	1.2	1.225 ± 0.005	4.10 ± 0.01	1.467 ± 0.007
13	1.3	1.292 ± 0.018	4.03 ± 0.02	1.506 ± 0.020
14	1.4	1.391 ± 0.012	3.93 ± 0.02	1.555 ± 0.014
15	1.5	1.494 ± 0.028	3.82 ± 0.03	1.601 ± 0.029
16	1.6	1.600 ± 0.011	3.72 ± 0.01	1.642 ± 0.012
17	1.7	1.704 ± 0.024	3.62 ± 0.03	1.678 ± 0.024
18	1.8	1.823 ± 0.005	3.50 ± 0.01	1.708 ± 0.006
19	1.9	1.902 ± 0.025	3.42 ± 0.03	1.726 ± 0.023
20	2.0	1.982 ± 0.009	3.34 ± 0.01	1.732 ± 0.010

以图 13 所示的典型力致发光时序图像为例（对应反射超压峰值 1.106 MPa）：冲击波到达前薄膜表面没有发光迹象（Frame 0 ~ Frame 43）；冲击波到达后薄膜发光强度迅速达到峰值（Frame 44 ~ Frame 48），之后发光强度逐渐衰减至初始状态（Frame 49 ~ Frame 90）。发光强度的变化趋势与冲击波超压信号吻合良好，表明力致发光薄膜对阶跃压力具有良好的响应能力。

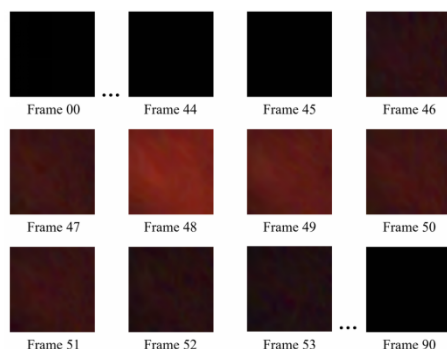


图 13 典型力致发光时序图像
Fig.13 Typical frame sequence of ML

3.2 力致发光光谱

在 400 ~ 700 nm 的可见光波段, 选取反射超压峰值为 0.206 ~ 1.703 MPa 的六组典型发光光谱进行分析, 如图 14 所示。随反射超压峰值升高, 光谱整体强度呈单调递增趋势, 谱形始终保持单一宽峰结构, 在测量范围内未观察到其他明显发射峰, 表明冲击波作用下的发光来自单一力致发光中心。光谱主峰位于 598 nm 附近, 峰位最大波动不超过 1.5 nm, 半高宽约为 47.1 nm, 且在不同超压下峰位未发生显著漂移。该发射特征与 Mn^{2+} 离子的 ${}^4\text{T}_1 \rightarrow {}^6\text{A}_1$ 跃迁辐射高度吻合, 说明瞬态阶跃压力未改变材料的发射能级结构, 表明该复合薄膜在研究所采用的冲击波载荷范围内具有稳定的发射光谱特性。

对全部光谱数据进行逐波长平均处理, 获得了反映力致发光光谱功率分布的特征曲线, 如图 15 所示。图中左轴表示力致发光光谱强度, 右轴表示高速摄像机各通道响应度。可以看出, 发光主峰与红色通道的响应区间重叠程度最高。根据 2.2.3 节的光谱匹配法, 计算得到权重 $(\omega_R, \omega_G, \omega_B) = (0.483, 0.391, 0.126)$ 。结果表明, 红色通道因与发光光谱重叠最大而对总信号贡献最高; 绿色通道贡献居中, 蓝色通道贡献最小。该权重分配符合以红光为主导的力致发光光谱特性, 并与高速摄像机在红色通道较高的响应度相匹配, 为后续灰度提取提供了理论依据。

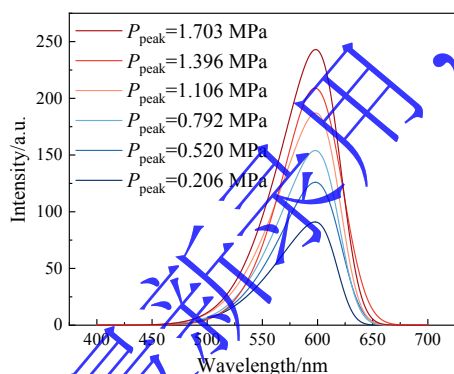


图 14 不同反射超压下的力致发光光谱
Fig.14 ML spectra at different reflected overpressures

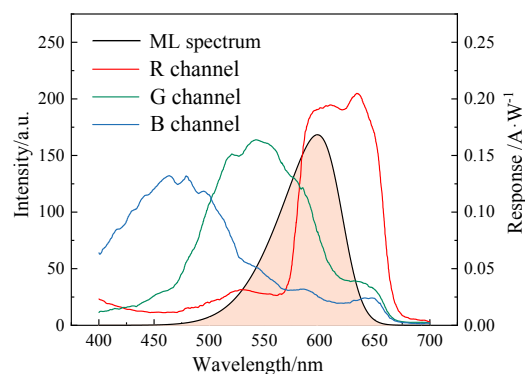


图 15 力致发光光谱与 RGB 通道响应曲线
Fig.15 ML spectrum and RGB channel responsivity curves

3.3 时域动态响应特性

冲击波载荷的作用时间为毫秒量级, 力致发光薄膜能否实时地反映超压变化, 取决于时域动态响应能力。为此, 定义三项指标进行定量评价: 响应延迟 (Response latency)、上升时间 (Rise time) 和峰值延迟 (Peak latency)。图 16 给出一组典型实验的冲击波超压与发光强度时程对比及三项指标的提取方法: 响应延迟为超压上升沿起始时刻 (t_{p1}) 至发光强度上升沿起始时刻 (t_{ML1}) 的时间差, 反映薄膜对载荷到达的响应速度; 上升时间为发光强度由峰值的 10% (t_{ML2}) 增至 90% (t_{ML3}) 所经历的时间, 反映发光中心的激发速率; 峰值延迟为超压峰值时刻 (t_{p2}) 与发光峰值时刻 (t_{ML4}) 的时间差, 反映发光响应对载荷峰值的跟随能力。在 0.2 ~ 2.0 MPa 范围内, 每个超压档位重复 3 次实验, 结果以均值 $\pm$ 标准差给出, 如图 17 所示。

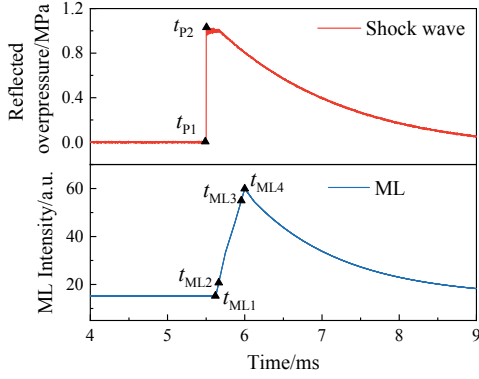


图 16 力-光时程对比

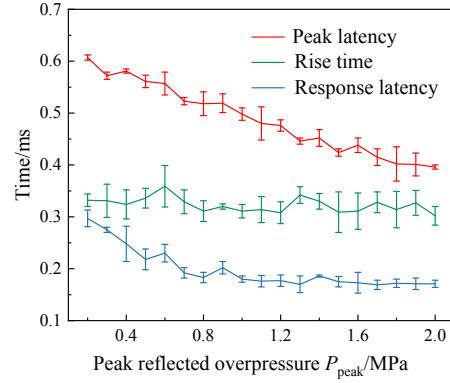


图 17 时域动态响应指标

Fig.16 Time histories of reflected overpressure and ML intensity Fig.17 Time-domain dynamic response indicators
响应延迟随超压升高呈现“先降后平”的趋势：0.2 MPa 时约为 0.297 ms，1.2 MPa 后趋于稳定，平台值为 (0.174 ± 0.011) ms。低压下发光激发依赖应力在颗粒内部的逐步累积与载流子脱陷过程，故响应较慢；当超压高于约 1.2 MPa 后，载荷幅值足以使激发过程在冲击波扫过力致发光薄膜的时间内完成，响应延迟不再随超压变化。上升时间在整个超压范围内几乎不随超压变化，总体为 (0.323 ± 0.025) ms。上升沿对应发光中心从受激到辐射复合的动力学过程，时间尺度由材料自身决定，与载荷幅值无关。峰值延迟随超压升高单调减小，由 0.2 MPa 时的 (0.607 ± 0.005) ms 降至 2.0 MPa 时的 (0.396 ± 0.004) ms，与响应延迟的变化趋势一致，反映了加载速率提高使发光峰提前出现。峰值延迟在全量程内始终为正，表明发光峰并不超前于载荷峰，薄膜对冲击波峰值保持稳定的滞后特性。总体而言，三项指标的重复性良好，不同超压下标准差均不超过 0.04 ms，可满足瞬态冲击波场的测量要求。

需要指出，高速摄影的时间分辨率为 0.125 ms，特征时刻由相邻帧强度线性插值得到，仍存在约半帧（约 0.06 ms）的量化误差。响应延迟和上升时间分别为帧间隔的 1.4 倍和 2.6 倍，已接近采样极限，因此实测值可视为真实响应时间的上限，力致发光薄膜实际响应可能更快。但三项指标的量和变化趋势不受采样率影响，结论依然可靠。

3.4 力-光线性关系

在全部 60 发标定实验数据中，选取反射超压峰值 P_{peak} 与对应的发光强度峰值 I_{peak} （即灰度峰值）作为关联数据。结果表明， I_{peak} 随 P_{peak} 增大整体呈上升趋势，但在测量区间两端呈现出不同的响应特征，可依次划分为无响应段、线性增长段和饱和段。

当 P_{peak} 处于 0.1 MPa 附近（实测 0.092 ~ 0.127 MPa）时， I_{peak} 与力致发光薄膜未激发时的背景灰度基本重合，表明薄膜未产生可分辨的力致发光响应，该载荷引起的局域压电场难以推动载流子脱陷，为无响应段。当 P_{peak} 处于约 0.2 ~ 1.7 MPa（实测 0.177 ~ 1.728 MPa）时， I_{peak} 随 P_{peak} 单调增加，二者呈良好的线性关系，数据点分布集中、无明显离群，为线性增长段。当 P_{peak} 超过约 1.8 MPa（实测 1.817 ~ 1.990 MPa）后， I_{peak} 明显低于按线性关系外推所得的数值，增长趋于停滞，进入饱和段。综合判断，力致发光薄膜的线性响应区间约为 0.2 ~ 1.7 MPa，线性拟合在该区间内进行。

采用最小二乘法对该区间内 48 组数据进行线性拟合，得到标定方程：

$$I_{\text{peak}} = k \cdot P_{\text{peak}} + I_0 = 44.702 P_{\text{peak}} + 15.052 \quad (11)$$

式中，斜率 $k = 44.702$ a.u./MPa，表征力致发光薄膜的力-光灵敏度，即单位超压峰值所引起的发光强度峰值增量；截距 $I_0 = 15.052$ 为零载荷外推灰度，与标准光源参照法校正后未激发薄膜约 15 的灰度基准基本一致，说明拟合截距主要反映统一灰度标尺下的图像本底，而非外加载荷产生的力致发光信号，也从结果层面验证了标准光源参照法对跨发次灰度基准统一的有效性。线性拟合结果如图 18 所示，线性区段内 P_{peak} 与 I_{peak} 呈显著正线性相关，Pearson 相关系数 $r = 0.9966$ ，决定系数

$R^2 = 0.9933$, 残差平方和 $SSE = 139.08$, 各数据点的平均绝对残差约为满量程输出的 1.97%, 拟合精度良好。

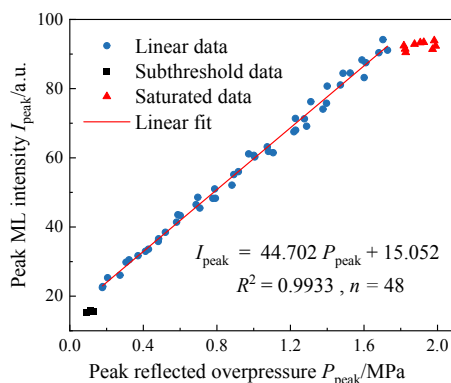


图 18 力-光线性拟合

Fig.18 Linear fit of peak ML intensity versus peak reflected overpressure

为进一步评价线性度, 采用端点法, 以线性区段两端数据点的连线作为参考直线, 计算各数据点相对参考直线的最大偏差 $\Delta I_{\max} = 4.1615$, 满量程输出 $I_{FS} = 71.6812$, 线性度误差:

$$\delta = \frac{\Delta I_{\max}}{I_{FS}} \cdot 100\% = 5.81\% \quad (12)$$

结果表明, 在 0.2 ~ 1.7 MPa 的动态标定区间内, 力致发光薄膜的发光强度峰值与冲击波的反射超压峰值之间具有良好的线性对应关系, 标定方程物理意义明确, 拟合离散度小, 具备由发光强度反演冲击波超压的可靠性与预测能力, 为后续高速摄影全场灰度图像向冲击波场超压分布的定量转换提供了标定基础。

值得注意的是, 爆炸冲击波的破坏效应由超压峰值 P_{peak} 、正压作用时间 t_+ 及反射比冲量 i_r 共同决定。结合表 2 与第 3.3 节响应时序分析可知, 在实测工况下冲击波正压持续时间为 3.34 ~ 5.80 ms, 而 ZnS:Mn²⁺ 力致发光响应主要受瞬态局域压电场驱动, 发光强度峰值 I_{peak} 在冲击波到达后的 0.4 ~ 0.6 ms 内形成。此时, 冲击波正压阶段的冲量累积尚不足总比冲量的 20%。换言之, 发光峰值主要由瞬态超压幅值直接驱动, 后续较长的正压作用时间与残余冲量积分仅影响发光强度的衰减拖尾过程, 并不对发光峰值产生实质性干扰。因此, 基于 $I_{\text{peak}}-P_{\text{peak}}$ 建立的标定关系具有明确的物理对应性, 正压持续时间与冲量被动的交叉干扰在首次峰值反演中可予以忽略。

3.5 重复加载退化规律

为考察力致发光薄膜在重复加载下的性能稳定性, 按 2.3 节所述流程开展对比实验, 以发光强度保持率 (重复加载发光强度峰值与首次加载发光强度峰值之比) 作为退化程度的评价指标。首次、重复加载强度均值及发光强度保持率如图 19 所示, 柱状图对应左轴发光强度, 点线图对应右轴发光强度保持率。

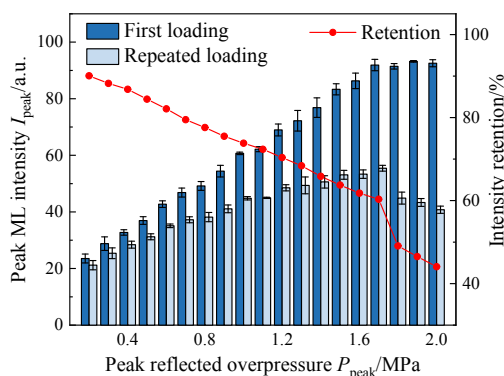


图 19 重复加载下的发光强度与保持率

Fig.19 ML intensity and retention ratio under repeated loading

结果表明, 重复加载发光强度在各超压档位均低于首次加载, 表明冲击波加载使薄膜产生了不可逆的性能退化; 发光强度保持率随反射超压峰值升高单调下降, 由 0.2 MPa 时的 90.1% 逐步降至 2.0 MPa 时的 44.1%, 退化在高载区间显著加速, 呈现“载荷越强、损伤越重”的退化规律。

薄膜在重复加载下的损伤退化, 本质上是冲击波超压峰值与反射比冲量协同作用的结果。在应力层面, 超压峰值会在 ZnS:Mn²⁺颗粒与环氧树脂基体的界面处引发强烈的局域剪切应力集中, 一旦局部应力超过微观结合强度, 便会萌生微裂纹。在能量层面, 反射比冲量随超压升高由 0.396 MPa·ms 增至 1.732 MPa·ms, 反映了冲击波向复合结构持续输入的机械功总量, 正压持续作用期间应力波在复合层间多次振荡, 加速了界面脱粘微裂纹的扩展贯通与基体的黏弹耗散, 进一步削弱了再次加载时的界面应力传递效率。此外, 剧烈的动态冲击波易在 Mn²⁺发光中心周围诱发局部晶格缺陷, 形成非辐射复合通道, 导致本征量子效率衰退。超压峰值引发的局部微观损伤与比冲量主导的能量持续累积相互叠加, 共同促成了发光保持率随载荷强度增加而加速衰减的宏观现象。

整体而言, 力致发光薄膜对冲击波具有快速、灵敏的单次响应, 但重复使用会产生不可逆且随载荷加剧的发光退化。因此在冲击波场定量测量中, 宜将其作为一次性敏感元件, 或重复加载时引入相应的退化修正。

4 结 论

研究面向冲击波场超压测量需求, 制备了力致发光薄膜, 搭建了基于激波管的动态标定实验系统, 完成了 0.1 ~ 2.0 MPa 范围内 60 发力-光动态标定实验, 主要结论如下:

(1) 建立了适用于冲击波瞬态加载的动态标定方法, 通过标准光源参照法统一不同发次的图像灰度基准、透视校正法消除几何畸变、光谱匹配法确定灰度提取权重($\omega_R, \omega_G, \omega_B$) = (0.483, 0.391, 0.126)、多源数据对齐实现超压与光学信号的同步采集, 为力-光定量关联提供了可靠的实验方法与数据处理基础。

(2) 力致发光薄膜对冲击波载荷具有亚毫秒级的时域动态响应能力。响应延迟在高压平台区约为 0.174 ms, 上升时间约为 0.323 ms, 峰值延迟随超压升高由 0.607 ms 降至 0.396 ms, 三项指标均满足瞬态超压的测量要求。考虑到高速摄像机的时间分辨率为 0.125 ms, 实测响应延迟和上升时间已接近采样极限, 薄膜的实际响应可能更快, 仍需通过更高时间分辨率的测量进一步确认。

(3) 在 0.2 ~ 1.7 MPa 冲击波超压范围内, 发光强度峰值与端面反射超压峰值呈良好的线性关系。线性拟合方程为 $I_{\text{peak}} = 44.702 P_{\text{peak}} + 15.052$, Pearson 相关系数 $r = 0.9966$, 决定系数 $R^2 = 0.9933$, 线性度误差为 5.81%。时序分析表明发光峰值在亚毫秒内快速形成, 此时冲量累积不足总量的 20%, 正压持续时间与冲量波动对峰值标定方程无显著干扰, 标定结果具备由发光强度反演冲击波超压的预测能力。

(4) 在冲击波载荷重复作用下, 力致发光薄膜存在不可逆的发光退化现象。发光强度保持率随反射超压峰值升高由 0.2 MPa 时的 90.1% 单调下降至 2.0 MPa 时的 44.1%, 超压峰值引起的局部界面应力集中与比冲量主导的持续能量输入协同加剧了薄膜损伤。在冲击波场定量测量中应将力致发光薄膜作为一次性敏感元件使用。

综上, 标定实验揭示了力致发光薄膜在冲击波载荷下的力-光响应规律, 所得标定方程与动态响应参数为力致发光材料用于冲击波场定量测量提供了实验依据。后续工作将聚焦于高韧性基体改性工艺与界面强化技术, 以提升抗冲击性能, 同时发展基于高速摄影的全场超压反演算法, 推进面域测量的工程化应用。

参考文献

- [1] 施宇成,孔德仁,徐春冬,等.爆炸场冲击波压力测量及其传感器技术现状分析 [J].测控技术,2022,41(11):1-10.
SHI Y C,KONG D R,XU C D,et al.Status Analysis of Shock Wave Pressure Measurement and Sensor Technology in Explosion Field [J].Measurement & Control Technology,2022,41(11):1-10.
- [2] 范志强,常瀚林,何天明,等.基于 PVDF 复合压电效应的低强度冲击波柔性测量 [J].爆炸与冲击,2023,43(1):71-83.
FAN Z Q,CHANG H L,HE T M,et al.Flexible measurement of low-intensity shock wave based on coupling piezoelectric effect of PVDF [J].Explosion and Shock Waves,2023,43(1):71-83.
- [3] 杜亮亮,钱伟新,刘寿先,等.冲击波与爆轰实验瞬态光电测试技术研究进展 [J].兵工学报,2023,44(12):3622-3640.
DU L L,QIAN W X,LIU S X,et al.Research progress of transient photoelectric measurement technology for shock wave and detonation physics experiments [J].Acta Armamentarii,2023,44(12):3622-3640.
- [4] 郑星,黄海莹,毛勇建,等.基于高速纹影技术的爆炸冲击波图像测量研究 [J].光学精密工程,2022,30(18):2187-2194.
ZHENG X,HUANG H Y,MAO Y J,et al.Research on image measurement of explosion shock wave based on high speed schlieren technology [J].Optics and Precision Engineering,2022,30(18):2187-2194.
- [5] ZHUANG X Y,XIE R J.Mechanoluminescence rebrightening the prospects of stress sensing: a review [J].Advanced Materials,2021,33(50):2005925.
- [6] XU C N,WATANABE T,AKIYAMA M,et al.Artificial skin to sense mechanical stress by visible light emission [J].Applied Physics Letters,1999,74(9):1236-1238.
- [7] JHA P,KHARE A,SINGH P,et al.Study of dynamical behaviour of prepared mechanoluminescence impact sensor based on ZnS:Mn and SrAl₂O₄:Eu,Yb phosphors [J].Journal of Luminescence,2023,258:119805.
- [8] FONTENOT R S,HOLLERMAN W A,BHAT K N,et al.Effects of added uranium on the triboluminescent properties of europium dibenzoylmethide triethylammonium [J].Journal of Luminescence,2013,134:477-482.
- [9] 王康.基于力致发光光强比的冲击检测方法研究 [D].芜湖: 安徽工程大学,2024:20-29.
WANG K.Research on impact detection method based on mechanoluminescence intensity ratio [D].Wuhu: Anhui Polytechnic University,2024:20-29.
- [10] DUAN S,SANG M,CHEN H,et al.Shear stiffening-based mechanoluminescent device for impact-thermal coupling protection and impact visualization [J].Advanced Functional Materials,2024,34(48):2411821.
- [11] TOIVOLA R,LAI P N,YANG J,et al.Mechanochromic fluorescence in epoxy as a detection method for barely visible impact damage in CFRP composites [J].Composites Science and Technology,2017,139:74-82.
- [12] CARANI L B,EZE V O,IWUAGWU C,et al.Performance analysis of embedded mechanoluminescence-perovskite self-powered pressure sensor for structural health monitoring [J].Journal of Composites Science,2020,4(4):190.

- [13] USHA S. Piezoelectrically induced electron detrapping model for mechanoluminescent semiconductors: A unified theoretical and experimental perspective [J]. *Journal of Applied Physics*, 2026, 139(13):130901.
- [14] CHANDRA B P, CHANDRA V K, JHA P. Piezoelectrically-induced trap-depth reduction model of elastico-mechanoluminescent materials [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2015, 461:38-48.
- [15] 张国栋, 赵玉龙, 孙警, 等. ZnS:Cu 力致荧光薄膜在冲击压力作用下的光学响应规律及应用 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36(2):021301.
- ZHANG G D, ZHAO Y L, SUN J, et al. Optical response law and application of ZnS:Cu mechanoluminescent thin films under impact pressure [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(2):021301.
- [16] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004:35-46.
- [17] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios: ITU-R Recommendation BT.601-6 [S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2007.

Dynamic Calibration of ZnS:Mn²⁺ Mechanoluminescent Composite Films for Shock Wave Field Measurement

ZHANG Botian, QIAN Bingwen, WANG Changli, WANG Liangquan,
WU Zhenghao, ZHANG Xin, KE Ming, LI Yishuo, WANG Junhong
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: Existing quasi-static or low-frequency dynamic calibration methods fail to accommodate the transient loading characteristics of shock waves. To address this issue and to enable the quantitative application of mechanoluminescent materials in shock wave overpressure measurement, a dynamic calibration study on ZnS:Mn²⁺ mechanoluminescent composite films was conducted. High-temperature solid-state method was adopted to prepare the ZnS:Mn²⁺ powder. The powder was then fabricated into composite films. A shock tube dynamic calibration system was established to synchronously acquire shock wave overpressure signals, mechanoluminescence images and spectra. Additionally, with the standard light source method and spectral matching method as core components, a mechanoluminescence intensity extraction method was proposed. Sixty calibration experiments were conducted at overpressures ranging from 0.1–2.0 MPa. The results showed that the film exhibited a sub-millisecond time-domain dynamic response, with a response latency of approximately 0.174 ms and a rise time of approximately 0.323 ms. The peak mechanoluminescence intensity showed a strong linear correlation with the peak reflected overpressure at the end wall over the range of 0.2–1.7 MPa. The calibration equation was $I_{\text{peak}} = 44.702 P_{\text{peak}} + 15.052$, with a coefficient of determination of 0.9933 and a linearity error of 5.81%. Under repeated loading, irreversible mechanoluminescence degradation occurred, and the degree of degradation increased with rising loading intensity. These calibration results demonstrate the feasibility of inverting shock wave peak overpressure from mechanoluminescence intensity, and provide an experimental basis for the application of mechanoluminescent materials to full-field visual measurement of shock wave overpressure.

Keywords: mechanoluminescent; ZnS:Mn²⁺; shock wave; overpressure measurement; dynamic calibration; shock tube

最新录用，
非最终出版稿