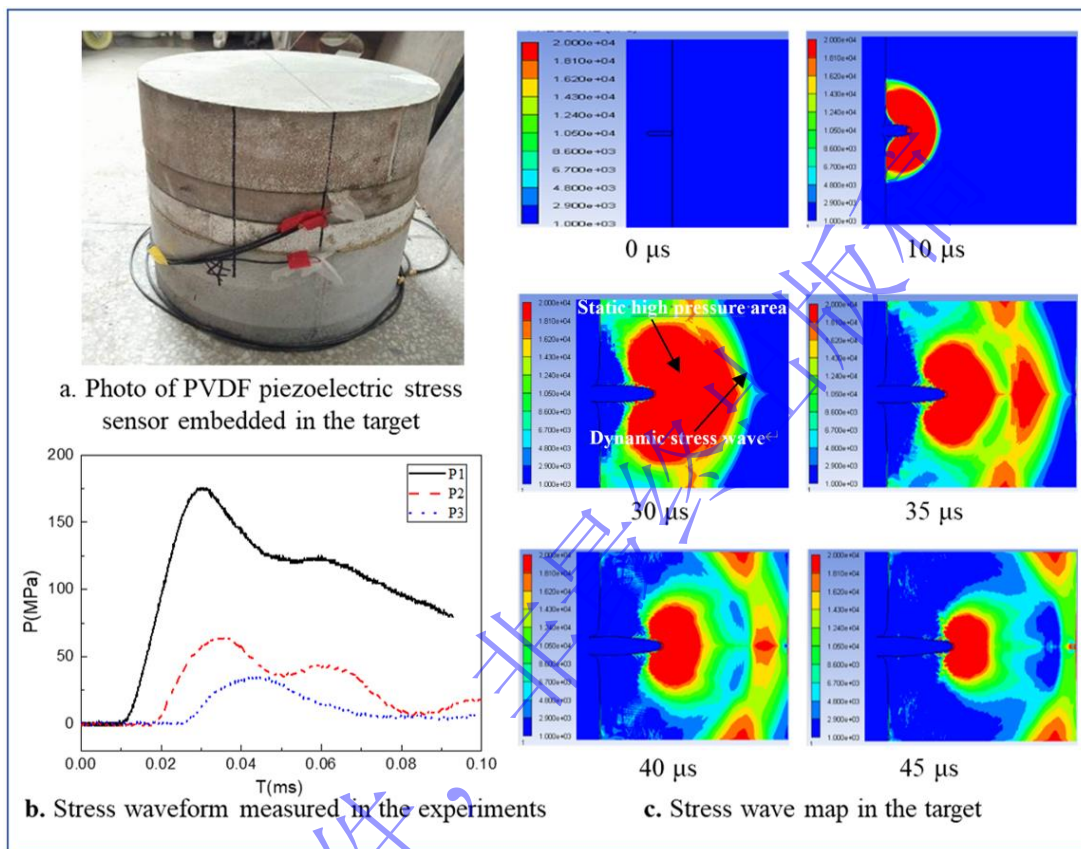


稿号: 2024-0181 (初稿/修改稿, 稿号请作者在退修时补充)

本文亮点介绍 (请在此简单介绍本文的工作亮点, 如创新点、主要突破或应用价值, 以便编辑和审稿人可以更准确、快速地处理和评价本文, 该内容在文章发表的时候会被删除): 为探究超高速撞击条件下混凝土靶体内的应力波特性, 建立了基于 PVDF 压电应力计的应力波测试系统, 获得了克级柱形 93W 钨合金弹体超高速撞击条件下混凝土靶体内的应力波波波形, 并利用数值模拟方法分析了应力波的产生和传播机制, 进一步认识了靶体内应力波的特征和衰减机制。



超高速撞击条件下混凝土靶体内应力波的测量和分析

钱秉文¹, 周刚¹, 陈春林¹, 马坤¹, 李艺烁², 高鹏飞¹, 尹立新¹

(1.西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;

2.中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

摘要: 为探究超高速撞击条件下混凝土靶体内的应力波特性, 建立了基于 PVDF 压电应力计的应力波测试系统并对 PVDF 压电应力计标定方法开展了研究, 测量了克级柱形 93W 钨合金弹体超高速撞击条件下混凝土靶体内的应力波

*收稿日期: _____; 修回日期: _____;

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (11802248)

第一作者: 钱秉文 (1987—), 男, 博士, 副研究员. E-mail: qianbingwen@nint.ac.cn;

通信作者: 周刚 (1964—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师. E-mail: gzhou@nint.ac.cn.

波形, 并利用数值模拟方法对应力波的产生和传播机制进行分析, 得到如下结论: (1) 对 PVDF 压电应力计的动态特性参数进行标定, 得到 PVDF 压电应力计的动态灵敏度系数为 17.5 ± 0.5 pC/N; (2) 利用 PVDF 压电应力计得到了信噪比高的超高速撞击条件下混凝土靶内的应力波形; (3) 数值模拟得到的应力波形与实验测得的波形特征吻合较好, 应力波峰值的模拟结果与实验结果最大偏差不超过 20%, 能够为机理探索提供一个有用的工具。(4) 利用数值模拟方法进一步认识了靶体内应力波的特征和产生衰减机制。

关键词: 超高速; 撞击; 应力波; PVDF; 钨合金弹; 混凝土; 二级轻气炮

中图分类号: O385 **国标学科代码:** 13035 **文献标识码:** A

Measurement and analysis of stress waves in concrete targets under ultra-high velocity impact conditions

QIAN Bingwen¹, ZHOU Gang¹, CHEN Chunlin¹, MA Kun¹, LI Yishuo², GAO Pengfei¹, YIN Lixin¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shanxi, China;

2. Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: To investigate the stress wave characteristics within concrete targets under ultra-high velocity impact conditions, a stress wave testing system based on PVDF piezoelectric stress gauges was established, and research on the calibration method for PVDF piezoelectric stress gauges was conducted. The stress waveforms within concrete targets impacted by kilogram-scale cylindrical 93W tungsten alloy projectiles at ultra-high velocity were measured, and the generation and propagation mechanisms of stress waves were analyzed using numerical simulation methods. The following conclusions were drawn: (1) The dynamic characteristic parameters of the PVDF piezoelectric stress gauge were calibrated, yielding a dynamic sensitivity coefficient of 17.5 ± 0.5 pC/N for the PVDF piezoelectric stress gauge; (2) High signal-to-noise ratio stress waveforms within the concrete target under ultra-high velocity impact conditions were obtained using the PVDF piezoelectric stress gauge; (3) The stress waveforms obtained from numerical simulation were in good agreement with the experimentally measured waveforms, with the maximum deviation of the stress wave peak values between simulation and experimental results not exceeding 20%, providing a useful tool for mechanism exploration; (4) The characteristics of stress waves within the target and the mechanisms of generation and attenuation were further understood using numerical simulation methods.

Keywords: hypervelocity; impact; stress wave; PVDF; tungsten alloy projectile; concrete; two-stage light gas gun

近年来, 学者们对超高速撞击问题研究的兴趣逐渐浓厚。超高速撞击条件下应力波的产生传播规律研究, 是深入认识超高速撞击过程和揭示撞击机理的关键, 也是工程应用的重要依据。国外公开报道的超高速撞击条件下应力波产生传播规律研究大多集中在陨石撞击成坑领域, 重点关注球型弹体超高速撞击条件下的岩土类靶内的应力波。Kei Shirai 等^[1]研究人员实施了冰制弹丸对冰靶的超高速撞击实验, 部署了碳压阻应力计于撞击线路上, 记录了沿线各点的应力波变化, 分析了冰靶内应力波指数式衰减的特性。同时, S. Nakazawa^[2]进行了玄武岩材料的冲击压缩测试, 通过超高速飞片技术实现了 7GPa 至 31GPa 的压力范围, 采用同样的传感器技术, 考察了应力波在玄武岩中的衰减模式和传播速率, 并深入研究了冲击波衰减的原理。国内超高速撞击领域近几年逐渐发展, 王明洋^[3]开展了卵型头钢弹超高速撞击岩石靶实验, 测量并分析了岩石靶中的应力波特性和衰减规律, 提出了一种超高速撞击与爆炸的等效计算方法。牛雯霞^[4]进行了圆柱型铝弹超高速侵彻混凝土靶实验, 利用预埋的锰铜计获得靶内不同位置处的应力波随时间的变化曲线。总体来说, 国内外在柱形弹/长杆弹撞击条件下岩土类靶中应力波产生传播规律方面实验数据比较缺乏, 机理研究尚不够深入。

PVDF 薄膜是一种半静态高聚物, Kawai^[5]在 1969 年揭示, 经过拉伸和高压处理的材料展现出显著的压电特性, 这一发现迅速吸引了全球研究者的兴趣。Bauer^[6]于 1986 年提出了一种循环极化技术,

用以生产性能可靠的 PVDF 压电薄膜，从而推动了 PVDF 压电传感器的发展及其在工程领域的应用。目前，PVDF 压电应力计主要应用于动态测试领域。Graham^[7]的研究表明，在 20GPa 以下，PVDF 压电应力计展现出高测试精度，而其最大测试压力可达 35GPa，尽管存在轻微失真。席道瑛团队^[8]在国内首次使用 SHPB 设备对 PVDF 压电应力计的动态应变常数进行了标定，并研究了应力波在砂岩中的衰减规律。李焰则^[9]对国产 PVDF 压电薄膜进行了系统研究，自制了 PVDF 压电应力计，并深入探讨了动态测量技术。巫绪涛^[10]分析了应力集中，横向泊松效应、摩擦效应对 PVDF 动态压电系数的影响，并将改进后的 PVDF 压电应力计应用到混凝土的冲击压缩实验中。黄家蓉^[11]测量了超高速撞击条件下混凝土中的压力特征，并分析了撞击产生的电磁脉冲对测试信号的干扰。其他的爆炸冲击领域，PVDF 应用也比较广泛，李孝兰^[12]开展了岩土介质内爆炸测试技术的研究与测试结果分析，张景森^[13]等利用 PVDF 压电应力计开展了水中冲击波压力的测试与分析。才源等研究者^[14]通过采用球形铝合金弹丸对充气球形压力容器进行超高速冲击实验。在此过程中，他们利用 PVDF 压电传感器捕捉容器壁上的应力波产生的压力信号。研究揭示了弹丸撞击速度不同情况下，容器壁表面压力的变化趋势，以及这些压力如何随着撞击速度和传播距离的改变而变化。谢呈瑞^[15]利用 PVDF 圆形薄膜传感器建立轻量级传感器阵列构建了空间碎片超高速撞击航天器舱壁模拟实验系统及撞击点定位测试系统，表明采用遗传算法优化传感器阵列参数有效地提高了定位精度。刘震^[16]设计嵌入式 PVDF 薄膜柔性感知防护结构，选取聚偏二氟乙烯 (PVDF) 作为感知材料，开展了不同撞击模式下单张 PVDF 薄膜超高速撞击实验，对 PVDF 薄膜感知超高速撞击模式的可行性进行验证。

为探究超高速撞击条件下混凝土靶内的应力波特性，本文首先对 PVDF 压电应力计进行了动态标定，搭建应力波测试系统，利用 PVDF 压电应力计测量克级柱形 93W 钨合金弹体超高速撞击条件下混凝土靶体内的应力波波形，并利用数值模拟方法分析应力波的产生和传播机制，为超高速撞击机理研究提供依据。

1 实验研究

1.1 实验设计

实验操作在西北核技术研究所的 57/10 两级轻气炮平台上完成，具体的装置布局可参见图 1。实验过程中，弹体被 57/10 两级轻气炮发射至靶室内部，初始阶段在激光测速区接受激光遮断法^[17]的速度测定，该方法的测量误差不超过 1%；随后，弹体在强制脱壳器的作用下与弹托分离；最终，弹体以高速撞击混凝土靶标。混凝土靶内埋设了 PVDF 压电应力计，其与电荷放大器、示波器等构成了靶体内应力波测试系统，能够测量靶体内不同位置处的应力波。在实验过程中，利用了一台分幅相机来捕捉弹体的飞行和撞击目标的过程。该相机的最高拍摄频率可达每秒 20 亿帧，而本次实验中设定的拍摄频率为每秒 150,000 帧，快门开启时间为 145 纳秒。为了照明，实验使用了脉冲式氙气灯作为闪光光源。应力波测试系统、分幅相机和闪光光源之间的同步操作是通过激光信号来实现的。

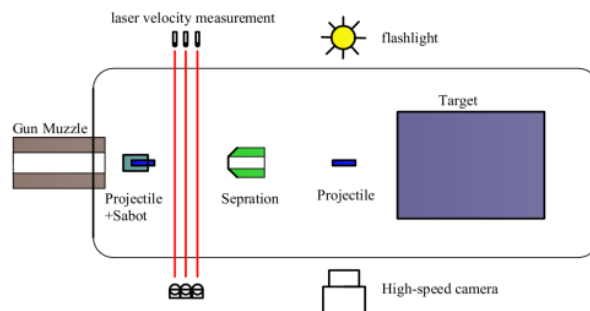


图 1 超高速撞击实验设置示意图

Fig. 1 Set-up for hypervelocity impact experiments



图 2 93W 钨合金柱形弹体和混凝土靶

Fig. 2 Cylindrical tungsten alloy projectiles and concrete targets

实验弹体是圆柱形 93W 钨合金弹，直径 3.5mm，长度 10.5mm，密度 17g/cm^3 ，质量 1.72g，屈服强度 731MPa，抗拉强度 878MPa，断裂伸长率 8%，断裂韧性参数为 $130\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。弹体实物图见图 2。

混凝土靶（水泥砂浆靶）的设计参考了文献[18][19]中的方案，制作过程中，选用了以下原材料：425 型号的普通硅酸盐水泥、细砂（粒径不超过 0.8mm，经过多次筛分处理）以及自来水。混合比例定为水泥：砂：水=1：2.6：0.5。经过 28 天的标准养护，这些靶体的平均单轴抗压强度达到了 42.7MPa。具体的靶体制备效果展示见图 2。

超高速撞击条件下，混凝土靶中应力波峰值一般为 MPa 到百 MPa 量级，上升沿一般为 10us 量级。通常采用锰铜压阻应力计、碳压阻应力计或 PVDF 压电应力计进行测量。锰铜计在 GPa 以下应力区的信噪比不足，且易受到传感器弯折等因素影响；碳压阻应力计目前缺乏成熟的国产传感器产品；PVDF 压电应力计在 0~10GPa 范围内测试灵敏度高，响应速度快（能够满足亚微秒级上升沿的测试需求），且有成熟国产产品，因此本文选用 PVDF 压电应力计进行混凝土内应力波测量。

结合测试要求，定制了 PVDF 压电应力计，长 150mm，宽 10mm，敏感面尺寸 $5\text{mm}\times 5\text{mm}$ ，应力计厚度 0.4mm，图是 PVDF 压电应力计实物图。

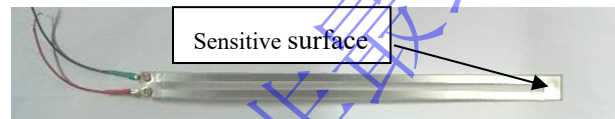


图 3 PVDF 压电应力计实物图

Fig. 3 Picture of PVDF piezoelectric stress sensor

图 4 展示的安装方法是将三个 PVDF 压电应力计嵌入靶体。确保撞击点与三个 PVDF 压电应力计的感应面严格对齐弹道轴线，位置偏差需控制在 1mm 以内。为了避免应力集中，靶体粘接面的周围布置了与应力计同厚度的垫片，并用环氧树脂与 PVDF 压电应力计一同封装于靶体之内。为了增强极端环境下的耐久性，每个应力计的两面均覆盖了一层 0.2mm 厚的聚氨酯薄膜作为保护层。

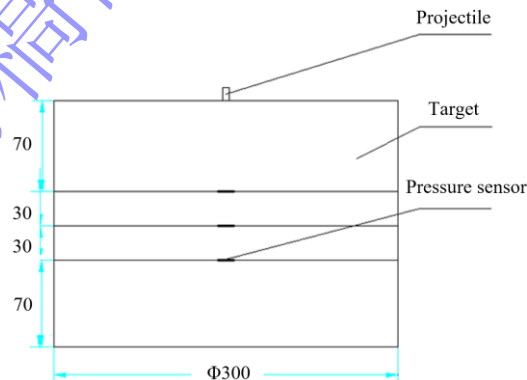


图 4 PVDF 压电应力计在靶体中埋设示意图

Fig. 4 Schematic diagram of PVDF piezoelectric stress sensor embedded in the target



图 5 PVDF 压电应力计在靶体中埋设实物图

Fig. 5 Photo of PVDF piezoelectric stress sensor embedded in the target

1.2 PVDF 压电应力计的标定

1.2.1 标定原理

本文对 PVDF 的动态标定是在 $\Phi 16\text{mm}$ 的立式霍普金森压杆装置 (SHPB) 上进行的 (如图 6), 标定原理见文献[20]。PVDF 压电应力计的受力与输出电荷是线性关系, 通过对实验得到的压力与输出电荷的拟合, 可以得到动态灵敏度系数 K 。

$$K = \frac{Q}{F} \quad (1)$$

其中 F 是一定敏感面积的 PVDF 压电应力计受到的力, 可以通过霍普金森压杆上粘贴的应变片测得并解算得出, Q 是 PVDF 压电应力计释放的电荷, 可由电荷放大器记录得到。动态灵敏度系数 K 的单位是 pC/N 。

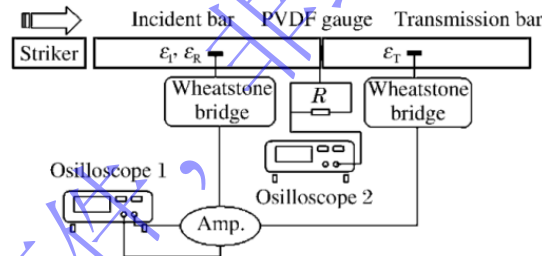


图 6 利用霍普金森压杆进行 PVDF 动态标定的原理图

Fig. 6 Schematic diagram of dynamic calibration of PVDF using Hopkinson pressure bar

标定时, 为模拟实际使用工况 (实际使用时用环氧树脂将 PVDF 粘接在两块靶之间), 将传感器用环氧树脂粘接在两个圆柱型钢垫片间, 然后将粘接后的钢垫片夹在 SHPB 的入射杆和透射杆之间。由于 PVDF 压电应力计的标定方式、制作工艺、使用方式等会显著影响数据可靠性, 下面讨论这些因素的影响, 并提出应对方法。

1.2.2 影响因素分析

(1) 应力集中的影响

由于 PVDF 压电应力计是放置在 SHPB 的入射杆和透射杆之间, 很多情况会导致应力不均匀, 包括: ①PVDF 压电应力计的面积远小于压杆的横截面; ②入射杆和透射杆的接触面不平整; ③PVDF 压电应力计制作的平整度不好。为降低标定过程中应力集中的影响, 提出以下改进思路: ①提高两压杆端面的平整度和平行度; ②改进 PVDF 标定时与杆端面的连接方式, 即将 PVDF 压电应力计用环氧树脂粘接在两块端面平整的圆柱形钢试样中, 再将其放置在入射杆和透射杆之间。

在标定过程中, 利用同一批 PVDF 压电应力计在不同工况下进行标定, 工况一的 SHPB 装置的杆端面平整度一般, 且 PVDF 压电应力计直接置于两杆之间。工况二按照上述思路进行了改进。两种工

况条件下的电荷-压力曲线如图 7 所示。工况一条件下，PVDF 压电应力计的标定数值离散性较大，且拟合得到的动态灵敏度系数为 28PC/N，明显大于静态条件下的灵敏度系数。分析认为由于杆端面平整度不高，引起 PVDF 压电应力计的敏感面位置处发生了应力集中，导致相同入射波情况下，释放的电荷量更大，且离散程度更大。工况二条件下，PVDF 压电应力计的标定数值一致性较好，标定数值为 17.5PC/N。因此，两个工况的对比发现 PVDF 压电应力计受应力集中影响明显，在标定和测试中需要特别注意，尽量避免敏感面周围产生应力集中。

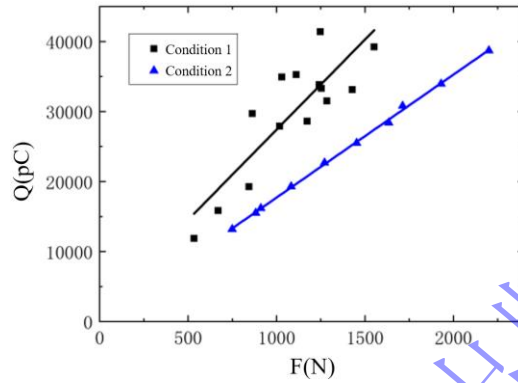


图 7 不同工况下的标定曲线

Fig. 7 Calibration curve under different working conditions

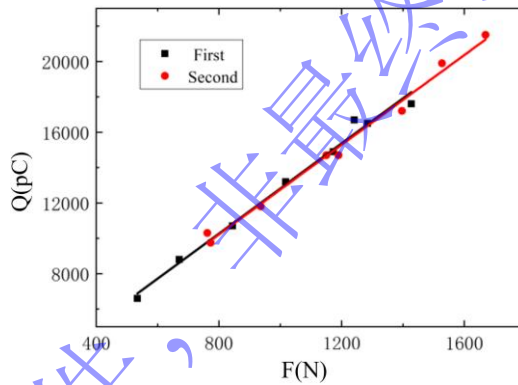


图 8 重复加载条件下的标定曲线

Fig. 8 Calibration curve under repeated loading conditions

(2) 多次重复加载对测试信号的影响

在动态实验过程中，PVDF 压电应力计通常被视为一次性使用的物品，通常不推荐其进行再次利用。但由于工艺问题导致部分传感器的动态灵敏度系数离散较大，最好能在使用前进行标定，剔除异常传感器。因此需要探究重复加载对测试信号的影响。

采用一枚封装好的 PVDF 压力计，进行了两轮共 14 次标定实验，最高应力约 60MPa（该压力条件下，PVDF 压电应力计无可见的塑性变形和损伤^[20]）。第一轮标定开展了 7 次实验，从约 480N 至约 1400N；第二轮标定也开展了 7 次实验，从约 770N 至约 1620N。两轮标定实验后，PVDF 压电应力计无肉眼可见的塑性变形或损坏。通过对标定曲线拟合分析（如图 8），发现两轮实验中的动态灵敏度系数误差不超过 5%。因此，对于低应力范围（约 60MPa 以下）的标定实验，PVDF 压电应力计重复使用后动态灵敏度系数偏差并不大。

以上标定中发现少量 PVDF 压电应力计的动态灵敏度系数明显偏小，说明该 PVDF 压电应力计的一致性不是很好。原因可能有两方面：一是受薄膜制备工艺的影响，即薄膜本身存在一定的离散度；二是受传感器制备工艺的影响，如导线厚度、搭接质量、搭接面积、封装工艺等都会影响传感器的灵敏度。

为解决少量 PVDF 压电应力计灵敏度系数离散大的问题，本文在低压范围内（60MPa 以内，较

易实现，且不会损伤传感器）对每一枚对传感器都进行测试，如果动态灵敏度系数偏差达到 10%以上，则剔除该传感器。筛选出来的合格应力计，依据平均动态灵敏度系数使用。

1.2.3 标定结果分析

将 SHPB 得到的压力与 PVDF 压电应力计得到电荷数据进行拟合，得到 0~220MPa 压力范围内（力的范围为 0~5500N）PVDF 压电应力计的标定曲线，如图 9 所示。标定中发现 18 枚传感器中有 4 枚传感器输出的电荷量显著偏小，根据 1.2.2 节的筛选方法，在拟合中将传感器的数据剔除，对其他数据进行拟合。拟合结果：

$$Q = (17.5 \pm 0.5) \cdot F \quad r^2 = 0.99 \quad (2)$$

拟合得到 PVDF 压电应力计的动态压电系数 $K=(17.5\pm 0.5)\text{pC/N}$ ，拟合优度为 0.99，说明除去异常传感器后，传感器的动态灵敏度系数一致性较好。通过图 10 可以看出，透射波应变信号和 PVDF 测试信号在信号特征方面（上升沿、峰值、下降沿）吻合很好，说明该传感器测试波形质量较高。

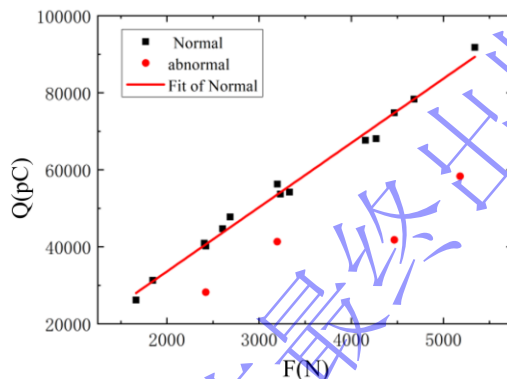


图 9 PVDF 压电应力计动态标定曲线

Fig. 9 Dynamic calibration curve of PVDF piezoelectric stress sensor

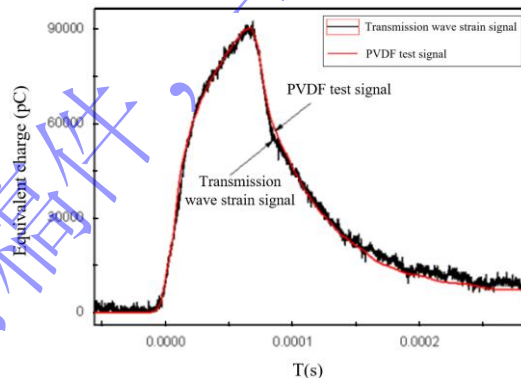


图 10 PVDF 测试信号与透射应变信号对比

Fig. 10 Comparison of PVDF test result and transmitted strain wave

1.3 实验结果

实验实施了克级别的柱状 93W 钨合金弹丸以 3.08km/s 的速度对混凝土靶进行撞击。通过使用 PVDF 压电应力计，记录了靶体在弹道轴线方向上三个不同位置（分别距离撞击面 70mm、100mm 和 130mm，对应传感器 P1、P2 和 P3）的应力波形，如图 11（a）展示。该波形信噪比高，能够很好的区分波形的起跳点、上升沿、峰值、下降沿等。这说明本文的应力计选取、标定、埋设、保护工艺能够满足超高速撞击条件下混凝土靶中应力波测量的需求。

观察图 11（a）可见，应力波抵达后先是迅速升高至顶峰，但并非立即下降，而是出现了一个次级“峰值”，并在持续一段时间后才逐渐降低。以第二路波形为参考，在 0 至 19 微秒期间，应力迅速增加，最大值达到 64.1MPa；接着迅速减少，在大约 40 微秒时形成第二个“峰值”，大约为 40MPa；之

后应力缓慢降至零，波形的正向压力作用时长约为 55 微秒。应力波的产生传播机制如何？为什么会会出现两个“峰”，下文拟利用数值模拟方法解释。

2 数值模拟方法

通过数值模拟手段，可以更深入地理解超高速撞击的原理。数值模拟的精确度受到算法和物理模型选择的影响。本研究中的算法和物理模型依据文献[19]进行选择。在材料参数方面，静态强度、密度和模量等参数是根据静态实验数据^[18]确定的，而其他参数则来源于 AUTODYN 材料模型数据库。这项数值模拟技术在估计穿透深度和剩余弹体长度等关键指标方面与实验数据[19]呈现出较高的一致性。接下来，该项研究将对数值模拟得到的应力波特性与实验数据进行对比分析。

实验测得的应力波形如图 11 (a) 所示，P1、P2 和 P3 传感器分别位于撞击点下方 70mm、100mm 和 130mm。以 P2 传感器记录的波形为参考，以 P2 信号的起始点定义为时间零点。在 0 至 16 微秒时间段内，应力迅速增加至 64.1MPa 的峰值；紧接着迅速下降，并在大约 40 微秒时出现第二个峰值；之后应力逐渐降至零。如图 11 (b) 所示的数值模拟应力波形显示，在 0 至 13 微秒内，应力急剧上升至 75.6MPa 的最高点；然后缓慢降低，在约 30 微秒时出现第二个波峰；之后同样逐渐降至零。通过分析可知，数值模拟的应力波形与实验波形在特征上相吻合，均能清晰识别出两个波峰。第一个波峰的数值与实验数据的对比列于表 1。据此，数值模拟的应力峰值与实验数据之间的最大偏差不超过 20%。在如混凝土这类脆性非均质靶体的研究中，这一误差水平表明数值模拟与实验结果相当一致。

然而，数值模拟得到的上升时间和正压作用时长均短于实验数据，这可能是由于两个因素造成的：首先，混凝土内部存在众多孔隙和裂缝，这可能导致实验中记录的应力波宽度增加；其次，实验过程中为了确保 PVDF 压电应力计的完整性，传感器周围的保护层较厚（达到 0.8mm），这可能导致应力波在传感器及其保护层中传播时发生扩展。

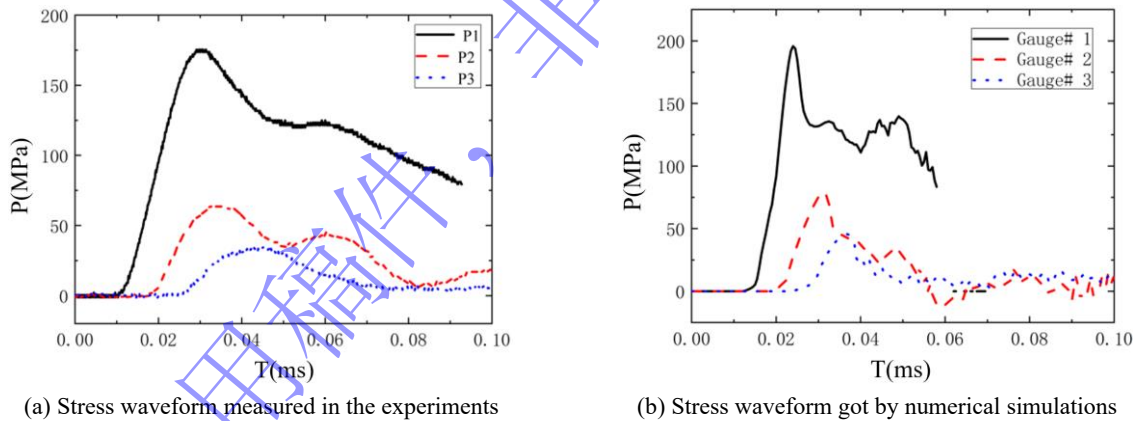


图 11 弹速 3.08km/s 条件下数值模拟得到的应力波形与实验结果的对比

Fig. 11 Comparison of stress waveforms obtained by numerical simulation and experiment under the condition of speed 3.08km/s

表 1 弹速 3.08km/s 条件下数值模拟得到的应力波峰值与实验结果的对比

Table 1 Comparison of stress wave peaks obtained by numerical simulation and experiment under the condition of speed 3.08km/s

传感器	$P_e^{1)}$ / MPa	$P_s^{2)}$ / MPa	数值模拟与实验结果的偏差
1#	175.1	196	11.94%
2#	64.1	75.6	17.94%
3#	34.5	39.5	14.49%

Note: 1) P_e indicates the peak pressure in the experiment;

2) P_s indicates the peak pressure in the numerical simulation.

本部分采用文献[19]提出的数值模拟技术对 93W 钨合金弹丸超高速打击混凝土靶板的过程进行了仿真分析。结果显示，模拟获得的应力波形与实验波形在特征上保持一致，模拟的应力波峰值与实验数据之间的最大误差在 20% 以内。鉴于该模拟技术在预测弹丸侵彻深度和剩余长度方面与实验数据相吻合，可以认为该数值模拟手段有效地再现了 93W 钨合金弹丸高速撞击混凝土靶的物理过程，并为机理研究提供了有效的分析工具。

图 12 和图 13 展示了在 3km/s 的撞击速度下，通过数值模拟得出的弹尾速度、弹靶界面速度、弹靶界面压力以及侵彻深度随时间的变化趋势。根据文献[19]的解析，通过弹靶界面压力的时间变化曲线，可以将超高速撞击过程分为四个阶段：首先是短暂的高压初始阶段，接着是近似的稳态侵彻阶段，然后是第三侵彻阶段，最后是回弹阶段。在 1.7 至 4km/s 的撞击速度区间内，随着速度的增加，稳态侵彻阶段的侵彻深度缓慢增加，且与流体动力学极限的差距较小，表明在这一阶段弹体的行为类似于流体侵彻，弹靶界面压力维持在较高状态。在稳态侵彻阶段，侵彻深度与流体动力学极限接近，该阶段的侵彻行为可用伯努利方程或修正的 AT 模型进行描述。

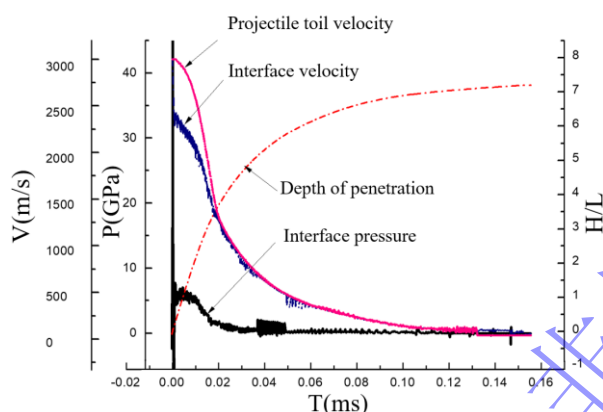


图 12 弹体尾部速度、界面速度、界面压力、侵彻深度随时间的变化关系 ($v_0 = 3\text{km/s}$)

Fig.12 Time history of Projectile tail velocity, interface velocity, interface pressure and the penetration depth ($v_0 = 3\text{km/s}$)

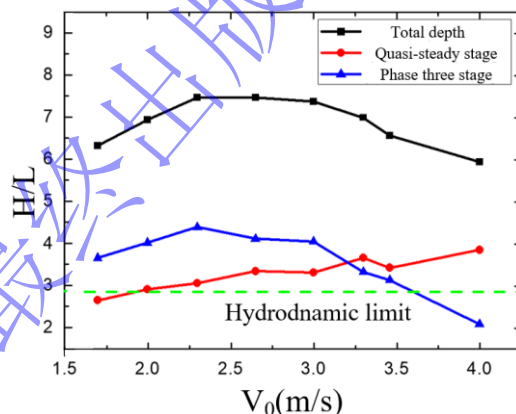


图 13 数值模拟得到的准定常侵彻阶段阶段和第三侵彻阶段的侵彻深度和总侵彻深度的关系

Fig.13 The relationship of penetration depth between quasi-steady stage, phase three stage and the total penetration obtained by simulation

在第三阶段的侵彻过程中，随着弹丸速度的增加，侵彻深度先是上升，达到峰值后在 2300m/s 时开始下降。在弹速介于 1700m/s 至 2300m/s 之间时，尽管弹体的剩余长度随速度上升而减少，但是从准定常侵彻阶段过渡到第三阶段的初始刚体侵彻速度却随撞击速度的提高而上升，表明弹体以刚体方式侵彻的能力逐渐增强。弹速一旦超过 2300m/s，弹体的剩余长度迅速缩短，其刚体侵彻效能也迅速减弱，此时靶板的进一步侵彻主要依靠坑底碎片的残余速度作用，这使得第三阶段的侵彻深度逐渐减小。

刚体侵彻的深度主要受残余弹长及其初始侵彻速度的影响，这两个因素在决定最终侵彻深度时起着关键作用，尤其是刚体侵彻部分通常占据了总侵深的较大部分。一旦弹体完全磨损，观察到的总侵深会明显减小。由此可见，残余弹长对于总侵深曲线上的拐点位置有显著影响，这一点与实验观察到的趋势相一致。

准定常侵彻阶段的弹靶界面应力持续为高压，但是距离传感器较远，衰减到传感器位置处应力衰减较大；第三侵彻阶段弹靶界面瞬时速度快速下降，应力也快速下降，但是距离传感器较近，应力衰减较小，下文的应力波波形以此为基础。

3 应力波产生传播机制分析

3.1 应力波双峰结构的分析

本节拟采用数值模拟方法分析混凝土靶中不同位置处的应力波形，进而探索应力波的产生传播机制，分析为什么会出现两个“峰”。图 14 是靶体中的传感器埋设情况，分别在距离靶体表面 0mm、10mm、20mm、30mm、40mm、50mm、60mm、70mm、100mm 和 130mm 埋设传感器。撞击速度取为 3km/s，是具有代表性的超高速撞击的速度。测得的波形如图 15 和图 16 所示。

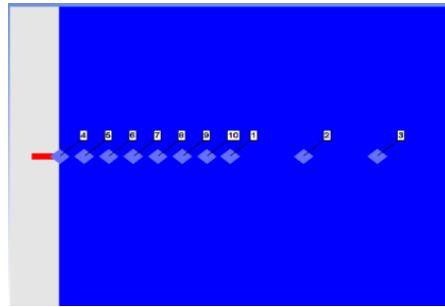


图 14 数值模拟条件下的传感器布置

Fig. 14 Sensor arrangement under numerical simulation

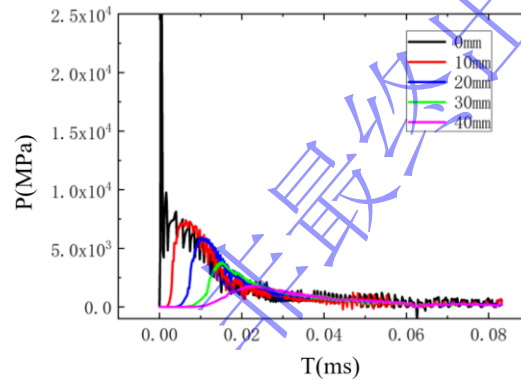


图 15 距离靶体撞击端面 0mm~40mm 位置处传感器得到的应力波形

Fig. 15 Stress waveform obtained from the sensor at a position of 0mm~40mm from the surface of the target

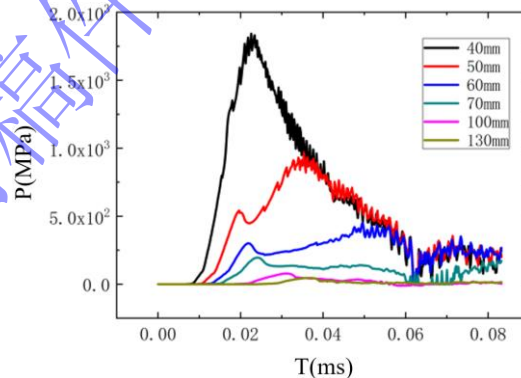


图 16 距离靶体撞击端面 40mm~130mm 位置处传感器得到的应力波形

Fig. 16 Stress waveform obtained from the sensor at a position of 40mm~130mm from the surface of the target

通过图 15 和图 16 可以看出，在撞击初始时刻弹靶界面处的冲击波幅值很高，达到 35GPa 以上，脉宽仅有 0.8 μ s，由于冲击波脉宽太小，而混凝土靶属于多孔材料，所以高幅值、短脉宽的冲击波衰减很快，在 10mm 位置处的传感器上就看不到初始强冲击波的信号。在距离撞击点小于 40mm 的传感器测得的波形中，应力波形只有一个波峰；在距离撞击点大于 40mm 的传感器测得的波形中，可以明显看到两个波峰。通过图 17 可以更直观地观察到孤立波扩展到双波的过程。在 30 μ s 以前，靶体中是孤立波结构，应力波主要由准定常侵彻阶段产生的应力波向外传播衰减产生；到 35 μ s 之后，应力波波阵

面与弹靶界面的距离逐渐展宽,存在两个深颜色区域,分别在应力波波阵面位置和弹靶界面位置附近,这也对应着传感器测得的双“峰”结构。

邓国强^[22]在针对钢质弹丸超高速侵彻岩石靶的数值模拟研究中,同样观察到了双“峰”现象,这表明在重金属弹体以超高速撞击地质材料靶时,应力波的双“峰”特征是一种普遍现象。

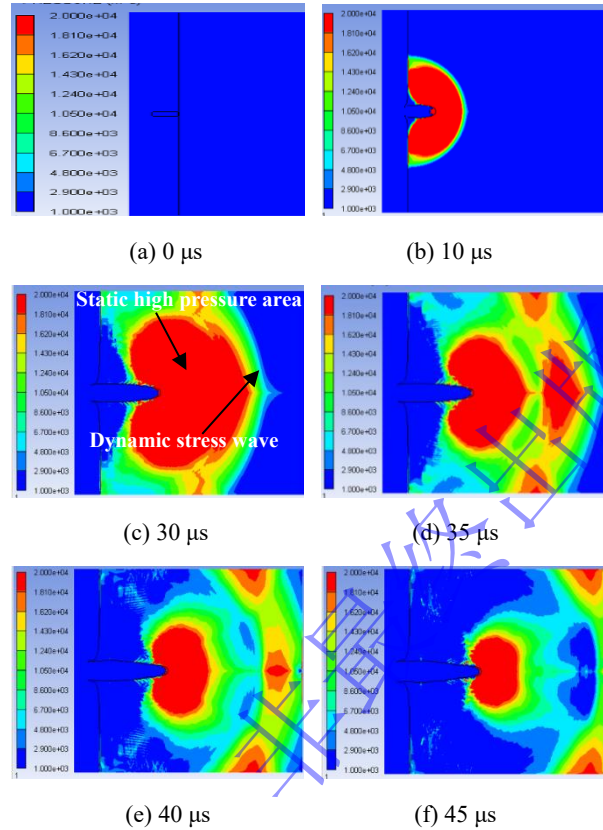


图 17 不同时刻靶体内的应力波云图 ($v=3\text{km/s}$)

Fig. 17 Stress wave map in the target at different times ($v=3\text{km/s}$)

分析发现,撞击后的靶体可分为动态应力波区和弹靶界面附近的静高压区两部分,如图 17(c)所示。动态应力波区包括弹性前驱波和塑性应力波,是准定常侵彻阶段较高的弹靶界面应力传播衰减而产生的,在传感器测量的波形中表现为第一个“峰”;在侵彻过程转入第三阶段时,弹靶接触区域附近会出现一个高应力区域,即所谓的静高压区。与准定常侵彻阶段相比,弹体速度在这一阶段迅速减小,同时弹靶界面所承受的压力也显著下降,因此得名“静高压区”。在第三侵彻阶段,由于刚体侵彻深度较深,弹靶界面与传感器的距离相对较近,压力波传播的衰减距离较短。尽管压力有所下降,但到达传感器位置时的应力波峰值依然较高,这便导致了在传感器记录的波形中出现了第二个“峰”。

3.2 应力波的“波源”的分析

根据数值模拟结果可以得到弹靶界面压力和传感器位置处的压力,如图 18 所示。可以发现瞬态高压段会产生 35GPa 以上的冲击压力,但是该阶段持续时间极短(0~0.8 μs),衰减很快,因此在应力波衰减研究中并不考虑该阶段的高压力。随后,在 0.8~10 μs 时刻弹靶界面压力基本保持不变,是一个近似的平台段,对应着准定常侵彻阶段,该阶段弹体处于一边侵蚀一边开坑的状态,弹靶界面向靶内快速运动。

图 18 中 A 点、B 点位于弹靶界面的压力曲线中, C 点、D 点位于传感器测量的压力曲线中。结合侵彻物理过程可以看出,在 AB 阶段,弹靶界面快速向靶内运动,而弹靶界面压力近似处在一个平台段,压力为 6GPa,因此在固定的传感器处(取为距离表面 100mm 的 2#传感器),B 点的压力衰减至传感器位置处得到的压力高于 A 点。随后,弹靶界面压力大幅下降,衰减至传感器处的压力也大幅下

降。因此，传感器处得到的压力呈现先增大后减小的特征，存在一个应力波峰值（D点）。分析发现，平台段的持续时间（A点到B点的时间）约为 $10\mu\text{s}$ ，而靶体中埋设的测点的升压时间（C点到D点的时间）也约为 $10\mu\text{s}$ ，与准定常侵彻阶段的持续时间接近。综上所述，我们认为D点的应力峰值是由弹靶界面B点处的压力衰减而来，衰减距离是撞击面到传感器的距离减去B点对应的侵彻深度值，这个侵彻深度值可近似认为是流体动力学极限值^[19]。

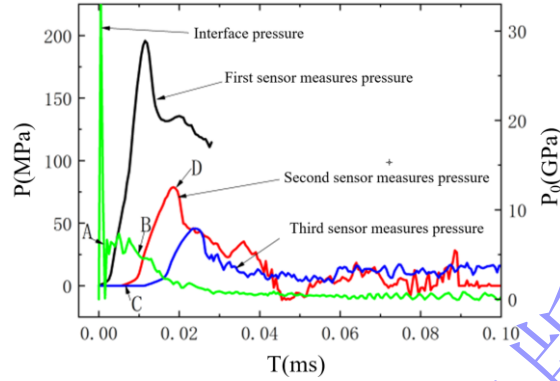


图 18 数值模拟得到的钨合金弹体以 3km/s 撞击混凝土靶的弹靶界面应力和传感器测量应力随时间变化关系

Fig. 18 The relationship between the interface stress and the measured stress of the sensor in concrete calculated by numerical simulation with the impact speed of 3km/s

为了验证前文的论述，本研究还实施了钨合金长杆弹对金属靶的超高速撞击的数值模拟实验（参见图 19）。弹靶参数的选择和材料参数模型依据文献[23]进行。在这种弹靶配置下，准定常侵彻阶段持续的时间更长，这使得我们能够更准确地分辨出准定常侵彻阶段的持续时间与靶体内部测得的应力波升压时间之间的关联。数值模拟得到的弹靶界面压力和靶体中传感器的测量压力见图 20，可以看出，弹靶界面压力的平台段出现在 $2\sim 32\mu\text{s}$ ， $32\mu\text{s}$ 之后界面压力快速下降，平台的持续时间约为 $30\mu\text{s}$ 。靶体中 14#（距离撞击表面 100mm ）传感器测量波形如图 19 中的 P_Gauge 曲线所示，峰值时刻距离起跳点的时刻为 $30\mu\text{s}$ 。这说明靶体内传感器得到的应力波形的上升时间，与弹靶界面压力平台段的持续时间基本相同，也证实了上文的分析。

根据以上两个弹靶组合算例的分析认为：瞬态高压段，弹靶高速碰撞产生很高的冲击压力，但持续时间极短，应力波衰减很快，在传感器布设位置处不考虑该阶段对应力波的影响；准定常侵彻阶段，弹靶界面压力近似保持不变，弹体一边侵蚀一边开坑，弹靶界面向靶内快速运动，靶体中埋设的传感器测得的首峰的峰值是准定常侵彻阶段的弹靶界面压力衰减至传感器位置处产生的，衰减距离是准定常阶段末段的位置到传感器的距离，这为应力波的产生衰减规律理论分析提供了重要依据。

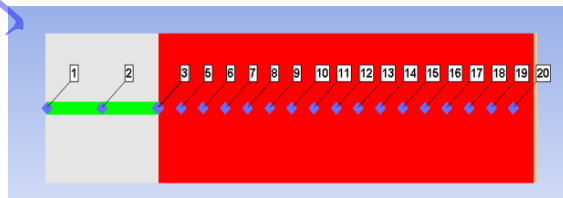


图 19 钨合金长杆弹超高速撞击金属靶的数值模拟模型和传感器布置情况

Fig. 19 Numerical simulation model and sensor arrangement of the tungsten alloy projectile penetrating into metal target

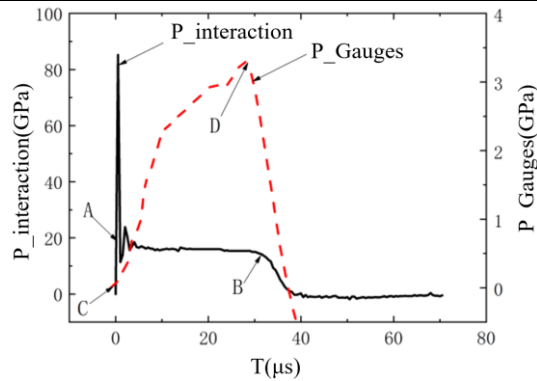


图 20 弹靶界面压力和靶体中传感器的测量压力的关系

Fig. 20 Relationship between the pressure of the interface and the measured pressure of the sensor in the target

4 结论

为探究超高速撞击条件下混凝土靶内的应力波特性，建立了基于 PVDF 压电应力计的应力波测试系统，测量了克级柱形 93W 钨合金弹体超高速撞击条件下混凝土靶体内的应力波波形，并利用数值模拟方法对应力波的产生和传播机制进行分析，得到如下结论：

(1) 选取 PVDF 压电应力计进行靶体内应力波的测量，改进标定时传感器的埋设工艺，采用实验前低压标定并剔除异常传感器的方法解决传感器动态灵敏度离散的问题，得到 PVDF 压电应力计的动态灵敏度系数为 $17.5 \pm 0.5 \text{ pC/N}$ 。

(2) 利用 PVDF 压电应力计得到了信噪比高的超高速撞击条件下混凝土靶内的应力波形，能够清晰的判读波形的起跳点、上升沿、峰值、下降沿。

(3) 采用文献^[9]的数值模拟方法，模拟得到的应力波形与实验测得的波形特征一致，应力波峰值的模拟结果与实验结果最大偏差不超过 20%，能够为机理探索提供一个有用的工具。

(4) 利用数值模拟方法分析了靶体内应力波双峰的产生原因，还发现靶体中埋设的传感器测得的峰值是压力平台段末段的压力衰减至传感器位置处产生的，为应力波的产生衰减规律理论分析提供了依据。

参考文献：

- [1] KEI S, MANABU K. Laboratory impact experiments and numerical simulations on shock pressure attenuation in water ice [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: 11002. DOI: 10.1029/2008JE003121, 2008.
- [2] NAKAZAWA S. Experimental investigation of shock wave attenuation in basalt [J]. Icarus, 2002, 156: 539-550. DOI: 10.1006/icar.2001.679.
- [3] 王明洋, 岳松林, 李海波, 等. 超高速弹撞击岩石的地冲击效应等效计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2655-2663. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0473.
WANG M Y, YUE S L, LI H B, et al. An equivalent calculation method of ground shock effects of hypervelocity projectile striking on rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2655-2663. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0473.
- [4] 牛雯霞, 黄洁, 罗锦阳, 等. 超高速撞击混凝土冲击压力测量与分析 [J]. 兵工学报, 2009, 30(S2): 242-246. DOI: 1000-1093(2009)S2-0242-05.
NIU W X, HUANG J, LUO J Y, et al. Measurement and analysis for shock pressure in hypervelocity impact on concrete target [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(S2): 242-246. DOI: 1000-1093(2009)S2-0242-05.

- [5] KAWAI H. The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride) [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1969, 8(7): 975.
- [6] BAUER F. Method and device for polarizing ferroelectric materials: US, US4611260A [P]. 1986-9-9.
- [7] GRAHAM R A, LEE L M, BAUER F. Response of Bauer piezoelectric polymer stress gauges (PVDF) (polyvinylidene fluoride) to shock loading [R]. Sandia National Labs., 1987.
- [8] 席道瑛, 郑永来. PVDF 压电计在动态应力测量中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(2): 174-179.
XI D Y, ZHENG Y L. Application of PVDF gauges to dynamical stress measurements [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(2): 174-179.
- [9] 李焰, 钟方平, 刘乾, 等. PVDF 在动态应变测量中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 230-234. DOI: 1001-1455(2003)03-0230-05.
LI Y, ZHONG F P, LIU Q, et al. Application of PVDF in dynamic strain measurement [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(3): 230-234. DOI: 1001-1455(2003)03-0230-05.
- [10] 巫绪涛, 胡时胜, 田杰. PVDF 应力测量技术及在混凝土冲击实验中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 411-415. DOI: 1001-1455(2007)05-0411-05.
WU X T, HU S S, TIAN J. Stress-measurement method by PVDF gauge and its application to impact test for concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 411-415. DOI: 1001-1455(2007)05-0411-05.
- [11] 黄家蓉, 王晓峰, 吴飏, 等. 超高速撞击过程产生的电磁脉冲对测试信号的干扰 [J]. 防护工程, 2018, 40(02): 24-29. DOI: 10.1187/j.issn.1674-5124.2018.10.011.
HUANG J R, WANG X F, WU B, et al. Electromagnetic pulse interference to measure signal in hypervelocity impact [J]. Protective Engineering, 2018, 40(02): 24-29. DOI: 10.1187/j.issn.1674-5124.2018.10.011.
- [12] 李孝兰. 硬岩中大当量地下爆炸应力波的测试和分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, (04): 393-395. DOI:10.3969/j.issn.1008-0562.2001.04.003.
LI X L. Stress wave measurement and analyses of the underground explosions in hard rock with large yield [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2001, (04): 393-395. DOI:10.3969/j.issn.1008-0562.2001.04.003.
- [13] 张景森, 裴明敬, 胡华权, 等. 基于 PVDF 薄膜的水中冲击波压力测量技术 [J]. 现代应用物理, 2013, 4(03): 289-292. DOI:10.3969/j.issn.2095-6223.2013.03.013.
ZHANG J S, PEI M J, HU H Q, et al. Measurement of underwater shock waves pressure with PVDF film [J]. Modern Applied Physics, 2013, 4(03): 289-292. DOI:10.3969/j.issn.2095-6223.2013.03.013.
- [14] 才源, 庞宝君, 曲鑫, 等. 球形压力容器超高速撞击应力波传播特性研究 [J]. 热加工工艺, 2021, 50(04): 25-28. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20193055.
CAI Y, PANG B J, QU X, et al. Research on stress wave propagation characteristics of gas-filled spherical pressure vessel under hypervelocity impact [J]. Hot Working Technolog. 2021, 50(04): 25-28. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20193055.
- [15] 谢呈瑞. 基于 PVDF 的空间碎片撞击航天器定位算法及系统集成 [D]. 沈阳理工大学, 2023.
XIE C R. Space debris impact spacecraft location algorithm and system integration based on PVDF [D]. Shenyang Ligong University, 2023.
- [16] 刘震. 柔性防护结构嵌入式超高速撞击感知技术研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
LIU Z. Research on embedded hypervelocity impact sensing technology of flexible protective structure [D]. Harbin Institute of Technology, 2022.
- [17] 张德志, 唐润棣, 林俊德, 等. 新型气体驱动二级轻气炮研制 [J]. 兵工学报, 2004, 25(1): 14-17. DOI:10.3321/j.issn:1000-1093.2004.01.004.

- ZHANG D Z, TANG R D, LIN J D, et al. Development of a new type gas-driven two-stage light gas gun [J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(1): 14-17. DOI:10.3321/j.issn:1000-1093.2004.01.004.
- [18] 钱秉文, 周刚, 李进, 等. 钨合金弹体超高速撞击混凝土靶成坑特性研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(10):26-31. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2018.10.004
- QIAN B W, ZHOU G, LI J, et al. Study of the Crater Produced by Hypervelocity Tungsten Alloy Projectile into Concrete Target [J], *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(10):26-31. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2018.10.004
- [19] 钱秉文, 周刚, 李进, 等. 钨合金柱形弹超高速撞击水泥砂浆靶的侵彻深度研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(08): 139-147. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0141
- QIAN B W, ZHOU G, LI J, et al. Study of penetration depth produced by hypervelocity tungsten alloy projectile into concrete target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(08): 139-147. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0141
- [20] 庞宝君, 杨震琦, 王立闻, 等. PVDF 压电计的动态响应特性及其在橡胶材料 SHPB 实验中的应用 [J]. *高压物理学报*, 2010, 24(05): 359-367. DOI: 1000-5773(2010)05-0359-09.
- [21] PANG B J, YANG Z Q, WANG L W, et al. PVDF stress gauges dynamic stress measurement and its application to SHPB experiment for rubber materials [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010, 24(05): 359-367. DOI: 1000-5773(2010)05-0359-09.
- [22] 邓国强, 杨秀敏. 超高速武器对地打击效应数值仿真 [J]. *科技导报*, 2015, 33(16): 65-71. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.16.010.
- DENG G Q, YANG X M. Numerical simulation of damage effect of hyper velocity weapon on ground target [J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(16): 65-71. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.16.010.
- [23] 唐奎. 两种非均质长杆弹芯侵彻半无限厚金属靶研究 [D]. 南京理工大学, 2020.
- TANG K. Investigations on the penetration of semi-infinite metal target by two types of heterogeneous long rod penetrators [D]. *Nanjing University of Science & Technology*.