高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS
DOI：10.11858/gywlxb.20261168

爆炸冲击载荷下工业电子雷管内部超压响应特性*

吴俊杰[1,2]，李洪伟[1,2]，梁昊[1,2]，杨霖[3]，朱福元[4]，辛达[5]，章万龙[4]

（1. 安徽理工大学化工与爆破学院，安徽 淮南 232001；
2. 安徽理工大学智能爆破与安全防护淮南市重点实验室，安徽 淮南 232001；
3. 西安庆华民用爆破器材股份有限公司，陕西 西安 710038；
4. 淮南舜泰化工有限责任公司，安徽 淮南 232001；
5. 无锡盛景微电子股份有限公司，江苏 无锡 214142）

摘要：针对井巷小断面爆破中工业电子雷管受邻孔装药爆轰冲击易发生拒爆的工程问题，为探明冲击波经管壳透射后的内部超压载荷特性，本文采用 PVDF 压电薄膜传感器构建水下爆炸动态超压测试系统，以 8 号工业电子雷管为标准爆源，在 4~7 cm 爆距范围内对覆铜钢空心管壳的内部瞬态超压进行原位实测，分析了内部峰值超压、波形演化特征及衰减规律，并基于试验数据对 Cole 水下爆炸经验公式进行修正拟合。研究结果表明：雷管内部峰值超压随爆距增大显著下降，4 cm 爆距下内部峰值超压达 26.0 MPa，7 cm 时降至 5.2 MPa，壳体超压衰减系数由 0.81932 升至 0.93273；内部超压波形随爆距增大由单峰尖锐形态逐步演变为多峰振荡形态，体现了透射波与壳体挤压效应主导作用减弱、空腔反射与稀疏波耦合作用增强的波系演化规律。研究验证了 PVDF 测试方法在小型腔体内部冲击超压测量的可行性，揭示了管壳—空腔的载荷衰减机制，可为电子雷管抗冲击结构优化、安全阈值确定及数值模拟验证提供试验依据与理论支撑。

关键词：工业电子雷管；PVDF 传感器；爆炸冲击波；内部动态超压；壳体透射；超压衰减

中图分类号：O347; O521.9　　文献标识码：A

工业电子雷管是高精度可编程起爆器材，在现代工程爆破与特种弹药中应用日益广泛[1]，内部包含电子控制模块、引火药头和起爆药剂，在复杂使用环境中，雷管壳体可能遭受先爆药包产生的强烈冲击波[0]。这种冲击波载荷透过后爆工业电子雷管管壳，在其内部空腔形成的动态超压场，是导致工业电子雷管电子控制模块失效或性能劣化，最终引发拒爆的关键力学环境。

目前，李洪伟等人[3]基于水下爆炸冲击载荷开展液态铝电解电容冲击实验，探究冲击载荷作用下液态铝电解电容的电击穿行为与漏电流变化规律；王家乐等人[4]利用水下爆炸对钽电容进行冲击实验探究钽电容的电压瞬变特性和失效模式；杨霖等人[5]采用水下爆炸测试方法对无装药基础的雷管施加冲击载荷，待冲击作用完成后拆解受载雷管，依托高速纹影系统进行观测，探究外部冲击载荷作用于工业电子雷管时，对其内部药头造成的损伤特性及对发火时间的影响规律；吴红波等人[6]利用混凝土试块分别构建单次冲击和叠加冲击试验系统探究工业电子雷管电子控制模块受冲击发火可靠性；陈辉等人 **Error! Reference source not found.**利用水下爆破预实验和 ANSYS-LS/DYNA 对各个不同爆破条件下工业电子雷管芯片受到的损伤进行分析和研究，从而提出环间延时起爆可以减少工业电子雷管的损伤。

针对爆炸冲击波与结构相互作用的研究多集中于宏观结构响应或外部载荷参数测量，针对工业电子雷管这类小型腔体化结构内部瞬态超压场的实验研究较少，理论上，冲击波在“水—金属壳体—内部介质”多介质体系中传播，会经历透射、反射、叠加和耗散等过程。雷管壳体材料的波阻抗、

*收稿日期：2026-09-11；修回日期：2026-11-03
作者简介：吴俊杰（2002－），男，硕士研究生，主要从事工业电子雷管研究. E-mail：1132246574@qq.com
通讯作者：李洪伟（1979－），男，硕士，教授，主要从事爆炸安全与控制爆破技术研究. E-mail：lihw@aust.edu.cn

录用稿件，非最终出版稿

厚度、几何形状以及内部空腔结构，都会影响超压波传递形式。因工业电子雷管壳体尺寸小、曲率大，内部空腔存在边界约束，冲击波进入内部后不再是理想单脉冲，会在狭小空间内发生多次反射与时域重构[9]。仅靠经验公式或简单解析模型，难以准确描述其内部瞬态超压历程。因此，建立可靠的近场微区动态超压测试技术，通过系统实验获取内部超压载荷的定量数据，是该领域亟待解决的关键问题。

Yurim P 等人 Error! Reference source not found.利用 2 级气枪对铝板进行超高速冲击，利用 PVDF（聚偏氟乙烯）压电传感器测定其冲击响应；Liang G 等人[10]基于 PVDF 压电薄膜制作可以在超重力、强冲击和瞬态高温条件下正常运行的冲击传感器，并在超重力水下爆炸测试条件下，传感器实现精确的超压测量；Tang E 等人[12]利用 PVDF 薄膜为敏感单元制作水下爆炸超压传感器，通过数值模拟和实验结合，验证在爆炸源附近传感器测量冲击波超压的精度和可靠性。在动态超压测量方法中，PVDF 薄膜传感器因其高频响、柔性好、质量轻、可贴附于复杂曲面等优势，在冲击波、应力波和瞬态超压测试中具有明显适用性[13]。

PVDF 通过机械拉伸和高压极化形成 β 相晶体结构，其压电响应频带宽、耐疲劳性能好，且相较刚性压电陶瓷传感器更适合狭小空间和复杂接触界面测试。将 PVDF 传感器布置于工业电子雷管内部，可以在不显著改变原结构边界的前提下实现动态超压采集，这为开展工业电子雷管内部超压场实验研究提供现实可能。

本研究针对工业电子雷管特殊工况拒爆的工程问题，旨在通过实验揭示外部冲击波向雷管内部的透射机制。研究构建适用于水下爆炸近场强干扰环境的 PVDF 压力传感器测试系统，优化传感器安装与高速数据采集模块，解决该环境下微秒级瞬态超压信号的可靠获取难题。基于该系统改变传感器与爆源的水平距离开展实验，在一发 8 号工业电子雷管爆炸冲击波作用下同步记录空心管壳内的动态超压时程曲线，分析内部超压特征参数（峰值超压、上升时间及二次超压峰值等）的变化规律，阐明爆炸近场下外部载荷与管壳对内部超压环境的耦合影响机制，最终为抗爆结构设计、内部超压预测，以及工业电子雷管抗冲击加固、安全阈值确定、数值模拟验证提供实验依据与理论支撑。

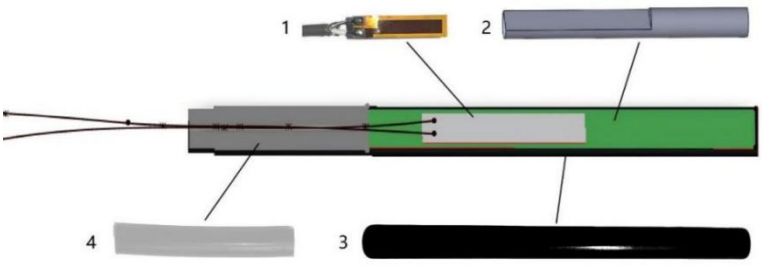
1 实　验

1.1 实验材料及仪器

实验材料：PVDF 压电薄膜（锦州科信生产，尺寸为 21 mm×4.8 mm，敏感面积为 14 mm×3 mm，压电常数为 22.8 pC/N）、水下压力传感器、爆炸水池（水池为不锈钢材质，直径 1.6 m，高度 1.4 m，壁厚 5 mm）、8 号工业电子雷管（装药量为 0.6 g 钝化黑索金）、HDO4104A 示波器、恒流源、尼龙材质 3D 打印试件（替代工业电子雷管发火板）、起爆器、固定角钢和定值 1000 Ω 电阻。

1.2 样品制备

将 PVDF 传感器粘贴于 3D 打印试件上，随后将该试件放入空雷管壳内，PVDF 传感器距离管壳最远处为 1.1 mm；该雷管壳为覆铜钢材质，外径 7.5 mm，长度 85 mm，壁厚 0.5 mm。将 PVDF 传感器脚线套上橡胶塞后，采用卡口机对样品进行卡口装配，卡口卡印符合现代工业电子雷管卡口工艺要求，装配如图 1 和图 2 所示。



最新录用，非最终出版稿

1—PVDF 传感器 PVDF sensor；2—3D 打印试件 3D printed specimen；
3—工业电子雷管管壳 Industrial electronic detonator housing；4—橡胶塞 Rubber stopper

图 1 PVDF 内部安装示意图

Fig.1 Schematic diagram of internal installation of PVDF



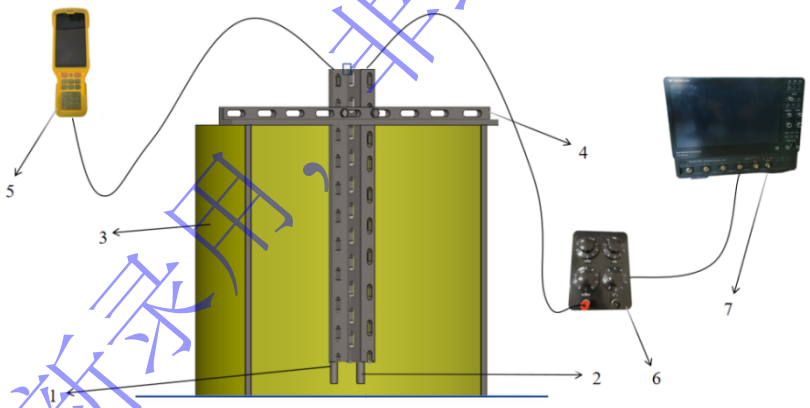
图 2 待测样品

Fig.2 Sample to be tested

1.3 实验方案及原理

1.3.1 实验方案

采用 PVDF 薄膜传感器对工业电子雷管壳体内部动态超压进行测试，具体实验方案为将样品雷管和主发雷管分别固定于两根角钢底端，放入爆炸水池中进行实验[13][16]，使样品内部 PVDF 传感器的敏感方向正对爆源。通过调整两根角钢之间的间距，改变主发雷管与样品之间的爆距，从而控制样品外壁所受冲击波强度，如图 3 所示。爆炸发生后，外部水中冲击波首先作用于样品雷管壳体，随后透射至内部空腔并加载于 PVDF 传感器表面。传感器输出经低阻抗电流模式转换后由示波器记录电压波形，再换算为内部动态超压信号。



1—主发雷管 Main electronic detonator；2—样品雷管 Sample electronic detonator；
3—爆炸水池 Explosion cistern；4—角钢 Steel frame；5—主发雷管起爆器 Primary detonator；
6—电阻 Resistor；7—示波器 Oscilloscope

图 3 测试示意图

Fig.3 Test schematic diagram

该实验方案具有两方面特点。其一，水下爆炸环境便于形成相对稳定的球形冲击波前沿，且冲击波传播规律较明确，有利于比较不同爆距条件下载荷变化。其二，采用“外部标准爆源—壳体透射—内部 PVDF 测量”的方式，可在不直接破坏雷管壳体结构的前提下获得内部超压时程曲线，更接近工业电子雷管实际受冲击工况。

在进行外部超压测量时，将待测样品换成图 4 水下 PCB 压力传感器（型号 ICP 水下爆炸冲击-压力传感器；主要参数灵敏度 149.0 mV/MPa；分辨率 0.07 kPa；最大压力 345 MPa；非线性≤2% FS）并依托图 4 恒流源进行测量，测量示意图如图 4 所示。

最新录用，非最终出版稿

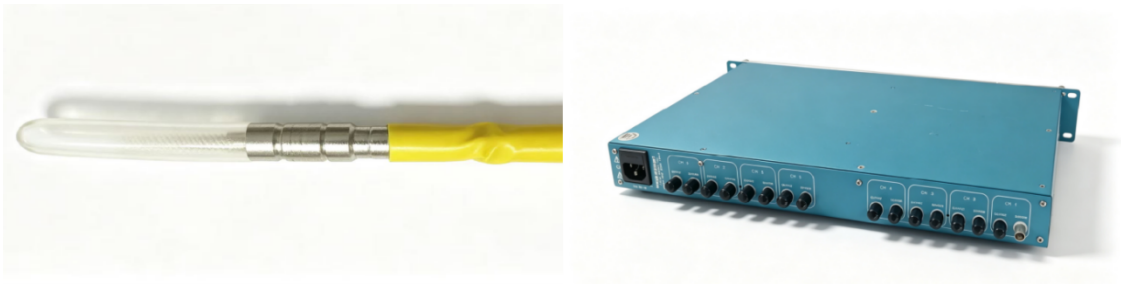


图 4 外部超压测量装置

Fig.4 External Overpressure Measurement Device

1.3.2 PVDF 电流模式测量原理

PVDF 传感器进行电流测量时，通常需要将低阻抗电阻与之并联，以此构成放电回路。PVDF 传感器两端产生的电荷会通过电阻 R 形成电流信号，PVDF 传感器自身阻抗极高，可等效为电压源与大阻值电阻的串联模型，外接电阻 R 负责分压，测量电阻两端的电压就能间接得到电流变化信息，再对电流做时间积分，就可得出 PVDF 产生的电荷量[17][20]，测量原理如图 5 所示。

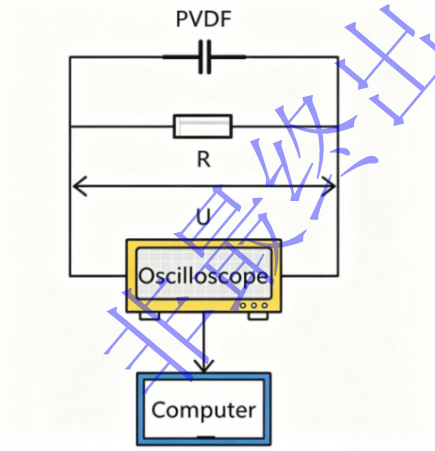


图 5 PVDF 电流模式测量原理图

Fig.5 Schematic diagram of the PVDF current mode measurement principle

电流模式的主要优势包括：

（1）将输入的电压信号进行阻抗匹配与缓冲处理，转换为低阻抗输出，便于后续数据采集、处理及电压波形的长期记录与稳定保存；

（2）在此基础上，测量系统进一步优化信号转换与标定过程，从而能够更精确地建立应力与转移电荷量之间的定量对应关系，提高测量的准确性与可重复性。

（3）对于采用电流测量模式时，在同一时刻测量回路中，被测电流、电压及电荷三者之间遵循如下基本物理关系：

$$\frac{dQ(t)}{d(t)}=\frac{U(t)}{\mathrm{R}}+\mathrm{C}\frac{dU(t)}{d(t)} \tag{1}$$

式中：Q 为电荷量，U 为电阻 R 两端的电压，C 为 PVDF 传感器和测量电路的总电容，其量级为 pF 级，远小于 $U(t)$/R，因此忽略等式右边第 2 项。对上式积分可以得到传感器所产生的电荷量随时间的变化关系：

$$Q(t)=\int_0^t\frac{U(t)}{\mathrm{R}}dt \tag{2}$$

由上式可以得到压力 p 或应力 σ 与电荷量 Q 的线性关系：

录用录用，非最终出版稿

$$p(t)=\frac{Q(t)}{\mathrm{K}} \tag{3}$$

$$\sigma(t)=\frac{Q(t)}{\mathrm{AK}} \tag{4}$$

式中：A 为 PVDF 压力传感器的有效感应面积，K 为 PVDF 压力传感器的动态灵敏度系数。

2 结果与讨论

2.1 外部峰值超压

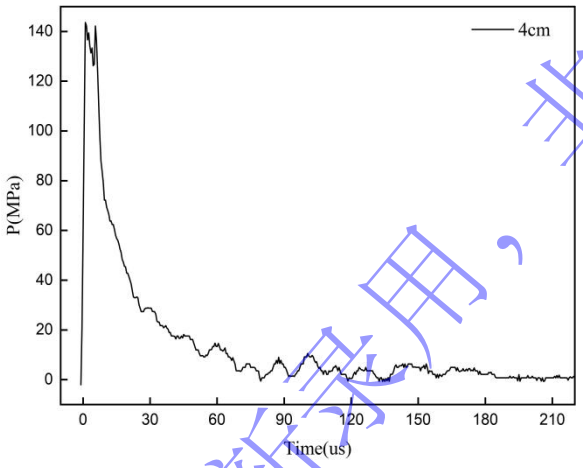
将水下传感器与爆源放在同一水平距离下，分别测量三次冲击波峰值超压，取平均值[21][23]，冲击波超压测量值如表 1 所示。

表 1 工业电子雷管外部超压

Table 1 External overpressure of industrial electronic detonators

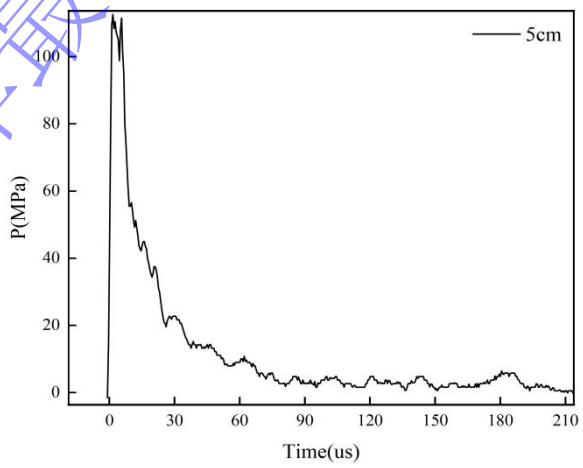
Distance/cm	External shock wave overpressure/MPa			Average shockwave overpressure/MPa
	First measurement	Second measurement	Third measurement	
4	143.2	144.7	143.9	143.9
5	114.2	112.6	113.4	113.4
6	92.1	92.8	93.4	92.8
7	76.2	77.8	78.0	77.3

外部冲击超压时程曲线如图 6 所示。



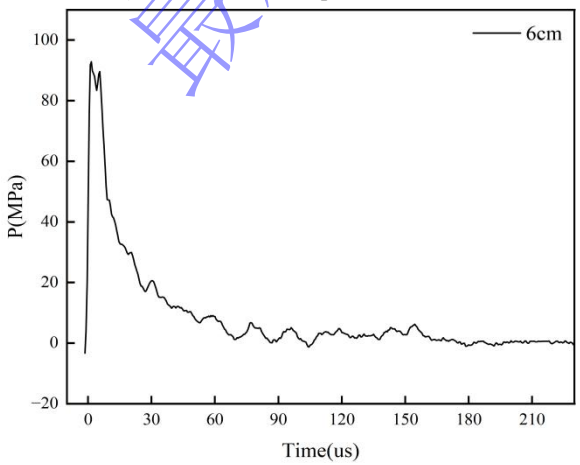
(a) 4 cm 外部超压曲线

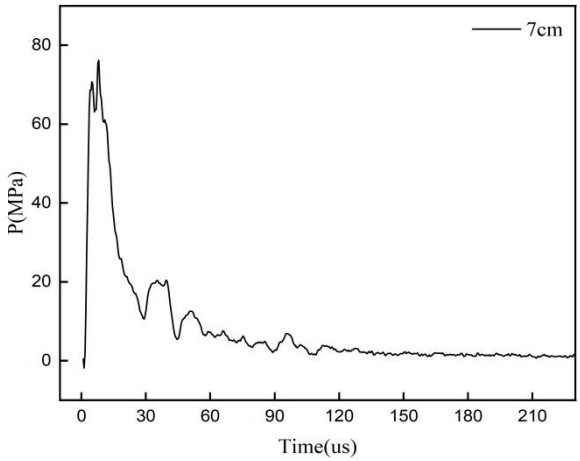
a) 4 cm external overpressure curve



(b) 5 cm 外部超压曲线

b) 5 cm external overpressure curve





录用稿件，非最终出版稿

(c) 6 cm 外部超压曲线　　(d) 7 cm 外部超压曲线

c) 6 cm external overpressure curve　　d) 7 cm external overpressure curve

图 6 外部超压时程曲线

Fig.6 External overpressure time-history curve

水下球形装药爆炸所产生的冲击波超压可以使用 Cole 公式来进行计算，根据 Cole 经验公式，水下爆炸冲击波超压计算公式为：

$$P_m = \mathrm{k}\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{\alpha} \tag{5}$$

式中：P_m 为冲击波峰值超压，MPa；R 为传感器至 8 号工业电子雷管中心的距离，m；Q 工业电子雷管装药量为 0.0006 kg 钝化黑索金；k、α 为与实验相关系数和指数。

一发 8 号工业电子雷管的爆炸按照水下球形装药 1 gTNT 爆炸能量进行近似计算，k 取 52.07，α 取 1.13。将冲击波超压实测值与 Cole 经验公式的计算值进行对比基本符合。

2.2 内部峰值超压响应特性

试验后拆解回收管壳样品发现，爆炸前可顺利装配入壳的 3D 打印试件冲击后无法取出，说明在外部强冲击作用下覆铜钢管壳发生了一定的塑性变形，同时爆炸瞬态过程壳体还存在弹性振动。因此 PVDF 采集得到内部超压信号并非单纯空腔空气冲击波压力，而是空腔透射冲击波、空腔多次反射压力与壳体塑性-弹性变形带来的结构挤压载荷共同耦合形成的综合载荷。

为定量分析内部超压响应特性，将各爆距下实测的内部冲击波超压峰值如表 2 所示，表中数据为三次重复测量结果。

表 2 工业电子雷管内部超压

Table 2 Internal Overpressure in Industrial Electronic Detonators

Distance/cm	Internal shock wave overpressure/MPa			Average shockwave overpressure/MPa
	First measurement	Second measurement	Third measurement	
4	26.1	25.2	26.6	26.0
5	17.5	17.7	16.8	17.3
6	12.6	10.2	11.4	11.4
7	4.3	5.6	5.8	5.2

从表 2 可见，内部峰值超压随爆距增加呈显著下降趋势。在 4 cm 爆距下，内部峰值超压达到 26.0 MPa，对应的外部冲击波超压平均值为 143.9 MPa，内部超压约为外部超压的 18.1%。随着爆距增大至 5 cm，内部超压降至 17.3 MPa，约为外部超压 113.4 MPa 的 15.4%；6 cm 时内部超压为 11.4 MPa，约占外部超压 92.8 MPa 的 12.3%；7 cm 时内部超压为 5.2 MPa，约占外部超压 77.3 MPa 的 6.7%。可见，壳体对冲击波的衰减作用随爆距增加而增强，这主要是由于随着爆距增加到达工业电子雷管管壳外部冲击波强度减弱后，工业电子雷管壳体对弱冲击波的透射效率有所下降[24][25]，同时对壳体造成的弹塑性变形也较少。

4 cm 爆距：如图 7 所示，耦合载荷波形呈典型陡峭前沿，内部超压从基线急剧上升至 15 MPa，上升时间约 1-2 μs，表明近距离强冲击下，外部冲击波经工业电子雷管壳体透射后仍保持极高加载速率。到达峰值后超压未立即归零，经陡峭下降阶段，整个过程无明显次级超压波动，随后再次上升至 21 MPa，约 90 μs 时达到峰值 26.1 MPa。该形态表明，近距离爆炸载荷冲击下，外部水域冲击波强度达 143.9 MPa，经覆铜钢管壳和内部空腔空气透射衰减后，冲击波透射效应与壳体变形挤压共同向内部输入能量。初始入射能量充足，冲击波透射效应占比较高，同时伴随壳体挤压作用，形成尖锐主峰，上升下降阶段无明显震荡，反射形成的次级波能量较弱，未形成可辨识的叠加信号；后续在冲击波多次透射反射与壳体振动挤压共同作用下，形成多个间隔约 2 μs 的载荷峰。

录用稿件，非最终出版稿

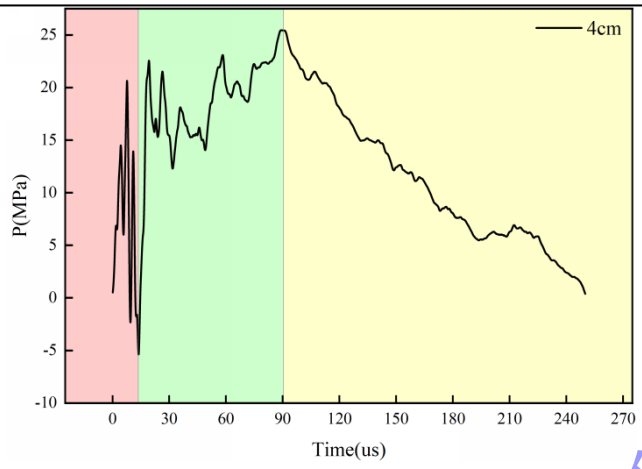


图 7 4 cm 内部超压时程曲线

Fig.7 Time-course curve of internal overpressure at 4 cm

5 cm 爆距：如图 8 所示，耦合载荷峰值相较于 4 cm 降至 17.5 MPa。与 4 cm 波形相比，上升前沿仍陡峭但略趋平缓，上升时间约 2-3 μs，较 4 cm 略有增加，到达峰值后超压下降速率稍慢。波形下降段开始出现微弱波动，主峰降至约 1/3 峰值处可见小幅起伏，应为冲击波首次透射壳体后，在内部空腔壁面反射，反射波与主波尾部轻微叠加；此时反射波能量较弱，未形成独立二次峰，整体仍以单峰为主，后续反射波、透射波与壳体振动挤压效应的叠加强度弱于 4 cm 爆距，波峰间隔更大。

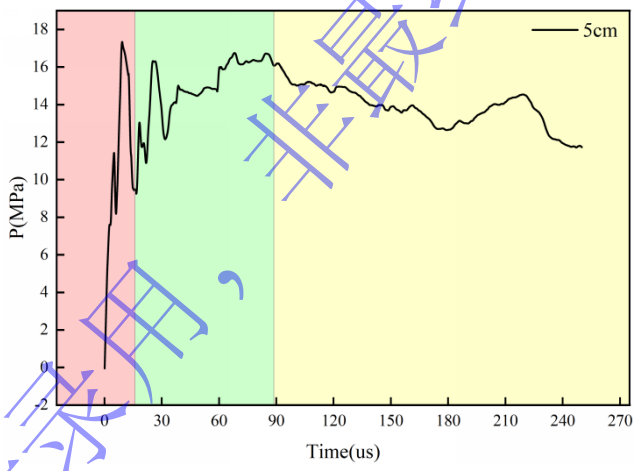


图 8 5 cm 内部超压时程曲线

Fig.8 Time-course curve of internal overpressure at 5 cm

6 cm 爆距：如图 9 所示耦合载荷峰值进一步降至 12.6 MPa。波形特征发生变化：上升前沿较 5 cm 更为平缓，上升时间增至约 3-4 μs，下降段约 7.5 μs 处出现明显震荡。该现象表明，随着爆距增加，透射冲击波强度减弱，雷管壳体内部空腔管壳边界对冲击波的约束作用相对增强；透射波在壳体端部或内壁反射后，反射波与主波时间上分离，形成可辨识震荡，说明 6 cm 爆距下，内部超压场已由单一透射波主导转变为透射波、反射波与壳体挤压多重效应叠加的复杂超压场。

最新录用，非最终版稿

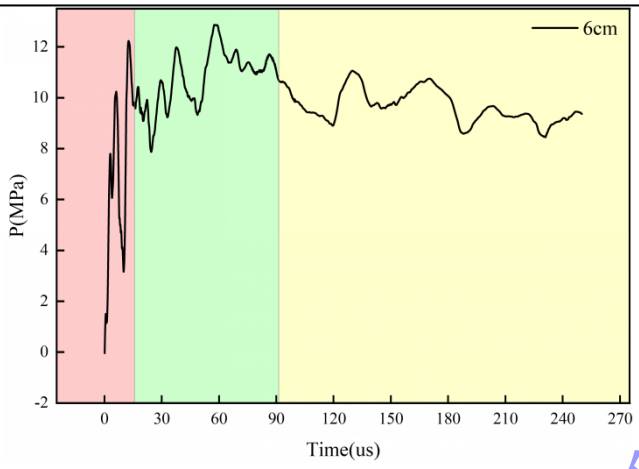


图 9 6 cm 内部超压时程曲线

Fig.9 Time-course curve of internal overpressure at 6 cm

7 cm 爆距：如图 10 所示，耦合载荷峰值超压进一步降至 4.3 MPa。波形上升前沿进一步趋于平缓，上升时间约 4-5 μs。8.5 μs 处主峰后，10.5 μs 处再出现一个波峰，呈现双峰特征。这表明 7 cm 爆距处，外部冲击载荷已大幅衰减，透射波能量与壳体挤压载荷较低，雷管壳体内部空腔多次反射效应更为突出，形成多个反射波叠加的复杂波形。波形振荡幅度逐渐减小，反映冲击波在内部空腔多次反射并逐步耗散能量的过程。

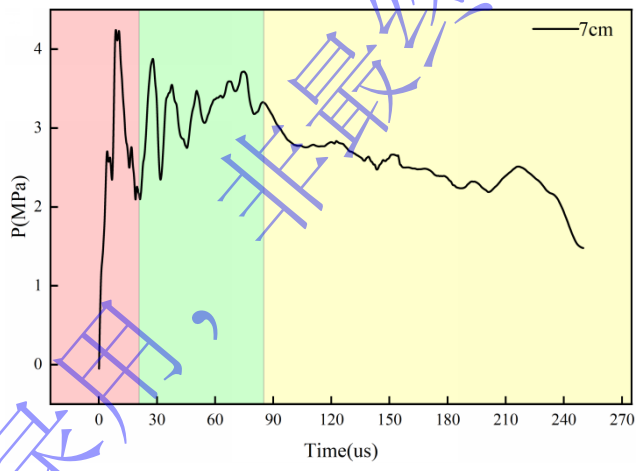


图 10 7 cm 内部超压时程曲线

Fig.10 Time-course curve of internal overpressure at 7 cm

由于壳体透射及弹塑性形变效应，各距离下的波形形态存在明显差异。综合分析：对比四个爆距下的波形，可以总结出以下规律：

在全部 4 种工况下，超压信号均呈现出“先出弱峰、后出主峰”的特征，其中弱峰的成因可从近场水域炸药爆炸的能量传递机制解释[26][27]：弱峰系主发雷管爆炸所产生的入射冲击波首次经壳体透射进入空腔后形成的初始透射波；主峰则由入射波的后续分量、水中绕射波、壳体弹性波、空腔内多次反射波以及壳体受爆炸载荷所产生的弹塑性形变带来的挤压载荷耦合叠加形成。细长圆柱形工业电子雷管管壳内会发生冲击波多次反射与透射叠加过程。爆炸冲击波作用管壳后，将在侧壁与两端面发生反复反射，形成纵波、横波与表面波以及壳体挤压载荷的耦合作用，在时域上展开为多个波峰，使得超压信号的持续时间远大于入射冲击波的正压宽度。

当爆距由 4 cm 逐步增大至 7 cm 时，入射冲击波强度逐渐降低，整个卸载过程呈现出连续演化规律：在 4 cm 近距离强冲击条件下，空腔内空气被高度压缩，高压空气的高声速特性使得应力波的往返传播时间极短同时壳体挤压效应显著，因此形成高频小幅振荡；随着爆距增大，入射冲击波强度逐渐衰减，稀疏波强度与壳体挤压效应同步降低，超压卸载速率逐渐放缓；同时空气压缩程度

录用稿，非最终出版稿

降低使得声速逐步回落至常压水平，振荡频率随之逐步降低，相邻波峰的间隔不断增大；此外，入射能量的衰减也使得振荡幅度逐渐降低。

冲击波波形整体呈现出连续演化特征：由 4 cm 爆距下的单峰尖锐波形，逐步演变为 5 cm 爆距下的微弱波动、6 cm 爆距下波峰下降段出现明显振荡，最终发展为 7 cm 爆距下的双峰波形。该演化过程揭示了冲击波在管壳内部传播与反射及壳体受冲击载荷弹塑性形变挤压试件的物理机制：近距离爆轰条件下，透射波与壳体挤压效应占绝对主导，反射波能量较弱且与主波在时域上重合；随着爆距增加，透射波与壳体挤压效应强度逐渐衰减，反射波的相对贡献逐渐增大，且在时域上与主波发生分离。

2.3 冲击载荷衰减规律

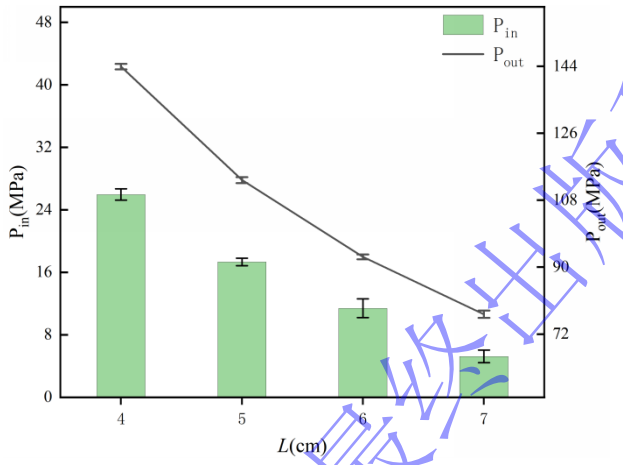


图 11 工业电子雷管内外部超压趋势

Fig.11 Pressure trends inside and outside industrial electronic detonators

为进一步定量评估壳体内外载荷衰减效果，定义衰减系数 $\eta=(P_{out}-P_{in})/P_{out}$，即外部与内部峰值载荷的差与外部冲击波超压之比。根据表 1 及外部超压数据，计算得到各爆距下的载荷衰减比例如表 3 所示。

表 3 各距离载荷衰减系数

Table 3 Distance-dependent load attenuation coefficients

Distance/cm	External shock wave overpressure/MPa	Internal shock wave overpressure/MPa	Difference between internal and external pressures/MPa	Attenuation coeffcient
4	143.9	26.0	117.9	0.81932
5	113.4	17.3	96.1	0.84744
6	92.8	11.4	81.4	0.87716
7	77.3	5.2	72.1	0.93273

可见，冲击载荷衰减程度随爆距增加而增加，由 4 cm 的 0.8193 增至 7 cm 的 0.9327。这表明在近距离爆炸时，壳体对强冲击波的衰减能力相对较弱，壳体受到的挤压载荷也更为强烈；随着距离增加，外部冲击波强度减弱，壳体对弱冲击波的隔离效果更为明显，壳体的弹塑性变形造成的挤压载荷也更弱，超压衰减比例显著上升。

3 结 论

综上，针对井巷小断面爆破中工业电子雷管受邻孔冲击易拒爆的工程问题，本文搭建了适用于微小腔体的 PVDF 内部超压测试系统，在 4~7 cm 爆距范围内开展了水下爆炸冲击试验，获得了覆铜钢空心管壳内部的瞬态超压时程数据，揭示了内部超压的波形演化规律，得到的主要结论如下：

最新录用，非最终出版稿

（1）本研究搭建了适用于工业电子雷管微小腔体内部的动态超压测试的 PVDF 传感系统，在 4~7 cm 爆距范围内实现了覆铜钢管壳内部超压的原位精准测量，验证了 PVDF 压电薄膜在狭小空间瞬态冲击载荷测试中的可行性与可靠性。

（2）内部耦合载荷波形随爆距增大呈现规律性演化特征。近距离强冲击工况下，冲击波透射效应占比较高，同时壳体弹性-塑性挤压作用显著；随爆距增大，透射冲击波强度衰减，空腔多次反射效应相对贡献提升；随着爆距增加，透射波强度与挤压载荷发生衰减，空腔壁面的多次反射效应逐步增强，反射波与主波在时域上发生分离，形成独立的振荡特征；在 90 μs 后流场进入稀疏波主导的卸载阶段，振荡频率与幅度随爆距增大逐步降低，卸载速率持续放缓，该特征可为解析内部电子元器件的卸载损伤机制提供理论参考。

（3）载荷衰减系数 η 随爆距增加由 4 cm 处的 0.81932 升至 7 cm 处的 0.93273，表明覆铜钢壳体在近距离爆炸时，壳体对强冲击波衰减能力较弱，受挤压载荷更强；爆距增加后，外部冲击波强度减弱，壳体对弱冲击波隔离效果更明显，挤压载荷更弱，超压衰减比例显著上升，证实金属管壳对内部元器件的防护作用具有载荷强度依赖性，为电子雷管抗冲击结构优化设计提供了参数支撑。

参考文献

[1] 张良杰,叶飞,唐子涵.数码电子雷管与传统工业雷管对比分析[J].煤矿爆破,2023,41(03):35-38.
ZHANG L J,YE F,TANG Z H.Comparative analysis between digital electronic detonator and traditional industrial detonator[J].Coal Mine Blasting,2023,41(03):35-38.

[2] 刘忠民,杨年华,石磊,等.电子雷管小孔距爆破拒爆试验研究[J].爆破器材,2021,50(05):39-42+49.DOI:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.05.007.
LIU Z M,YANG H N,SHI L.Experimental Study on Misfire in Small Hole-Space Blasting of Electronic Detonator[J].Explosive Materials,2021,50(05):39-42+49.DOI:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.05.007.

[3] 李洪伟,王家乐,梁昊,等.爆炸冲击对电子雷管发火电容释能特性的影响[J].兵工学报,2025,46(03):227-235.DOI:10.12382/bgxb.2024.0221.
LI H W,WANG J L,LIANG H, et al.Effect of Explosion Shock on the Energy Release Characteristics of Ignition Capacitance of Electronic Detonator[J].Acta Armamentarii,2025,46(03):227-235.DOI:10.12382/bgxb.2024.0221.

[4] 王家乐,李洪伟,王小兵,等.冲击载荷作用下钽电容的电压瞬变特性及微观机理[J].爆炸与冲击,2024,44(04):17-25.DOI:10.11883/bzycj-2023-0232.
WANG J L,LI H W,WANG X B, et al.Voltage transient characteristics and microscopic mechanism of tantalum capacitors under impact load[J].Explosion and Shock Waves,2024,44(04):17-25.DOI:10.11883/bzycj-2023-0232.

[5] 杨霖,李洪伟,梁昊,等.爆炸冲击作用对电子雷管引火药头损伤及发火时间的影响[J].高压物理学报,2025,39(06):89-100.DOI:10.11858/gywlxb.20240945.
YANG L,LI H W,LIANG H, et al.Effect of Explosive Impact on Ignition Head Damage and Ignition Time of Electronic Detonator[J].Chinese Journal of High Pressure Physics,2025,39(06):89-100.DOI:10.11858/gywlxb.20240945.

[6] 吴红波,叶紫阳,汪鑫齐,等.电子雷管电子控制模块冲击动态响应与可靠性[J].含能材料,2025,33(12):1448-1457.
WU H B,YE Z Y,WANG X Q, et al.Impact Dynamic Response And Reliability of Electronic Control Modules in Electronic Detonators[J].Chinese Journal of Energetic Materials,2025,33(12):1448-1457.

[7] 陈辉,翟慧杰,张雷,等.冲击载荷作用下数码电子雷管损伤研究[J].振动与冲击,2025,44(20):256-268+304.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2025.20.026.
CHEN H,ZHAI H J,ZHANG L, et al.Research on the damage of digital electronic detonators under impact load[J].Journal of Vibration and Shock,2025,44(20):256-268+304.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2025.20.026.

最新录用，非最终出版稿

[8] 金辉,于鹏,张皓博,等.基于 PVDF 的装药水下爆炸能量近场测试技术与实现[J].火炸药学报,2024,47(8):677-685.DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202405014.
JIN H,YU P,ZHANG H B, et al.Near-field Measuring-Testing Technique and Its Realization of Underwater Explosion Energy Based on PVDF[J].Chinese Journal of Explosives & Propellants,2024,47(8):677-685.DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202405014.

[9] 周章涛,刘建湖,裴红波,等.水下近距和接触爆炸流固耦合作用机理及加载效应研究[J].兵工学报,2017,38(S1):136-145.
ZHOU Z T,LIU J H,PEI H B, et al.Fluid-structure Interaction Mechanism and Loading Effect in Close-in and Contact Underwater Explosions[J].Acta Armamentarii,2017,38(S1):136-145.

[10] YURIM P ,YUNHO K ,CHANGKYO S, et al.Characterization and Statistical Approach of Hypervelocity Impact Response of Aluminum Plates using PVDF Sensors[J].International Journal of Impact Engineering,2022,(prepublish):104212-.DOI:10.1016/J.IJIMPENG.2022.104212.

[11] LIANG G ,HONG C ,DING Y, et al.Design, fabrication and application of a thin-film PVDF impact sensor for hypergravitational underwater explosion tests[J].Measurement,2026,257(PD):118858-118858.DOI:10.1016/J.MEASUREMENT.2025.118858.

[12] TANG E ,WANG D ,HAN Y, et al.Environmental characteristics of underwater explosion source and application of PVDF pressure sensor[J].Ocean Engineering,2024,303117714-.DOI:10.1016/J.OCEANENG.2024.117714.

[13] 林尚剑,王金相,马腾,等.水下多点爆炸冲击波叠加效应研究[J].兵工学报,2020,41(S1):39-45.DOI:10.3969/j.issn.1000-1093.2020.S1.006
LIN S J,WANG J X,MA T, et al.Superimposed Effect of Shock Waves of Underwater Explosion[J].Acta Armamentarii,2020,41(S1):39-45.DOI:10.3969/j.issn.1000-1093.2020.S1.006

[14] HU H W,SONG P,GUO S F, et al.Shock wave and bubble characteristics of underwater array explosion of charges[J].Defence Technology,2022,18(8):1445-1453.DOI:10.1016/J.DT.2021.05.020.

[15] 张轶凡,刘亮涛,王金相,等.水下爆炸冲击波和气泡载荷对典型圆柱壳结构的毁伤特性[J].兵工学报,2023,44(02):345-359.DOI:10.12382/bgxb.2021.0598.
ZHANG Y F,LIU L T,WANG J X, et al.Damage Characteristics of Underwater Explosion Shock Wave and Bubble Load on Typical Cylindrical Shell Structure[J].Acta Armamentarii,2023,44(02):345-359.DOI:10.12382/bgxb.2021.0598.

[16] WU H ,CHEN Z ,CHENG Y.Influence of explosion position on blast resistance of concrete gravity dam against underwater explosion blast wave and bubble pulsation[J].Engineering Failure Analysis,2025,169109188-109188.DOI:10.1016/J.ENGFAILANAL.2024.109188.

[17] RAJASEKAR J ,KIM H T ,KIM D H.Visualization of shock wave propagation due to underwater explosion[J].Journal of Visualization,2020,23(5):1-13.DOI:10.1007/s12650-020-00664-9.

[18] 胡亚峰,刘建青,顾文彬,等.PVDF 应力测试技术及其在多孔材料爆炸冲击实验中的应用[J].爆炸与冲击,2016,36(05):655-662.DOI:10.11883/1001-1455(2016)05-0655-08.
HU Y F,LIU J Q,GU W B, et al.PVDF Stress Testing Technology and Its Application in Explosion Impact Tests of Porous Materials[J].Explosion and Shock Waves,2016,36(05):655-662.DOI:10.11883/1001-1455(2016)05-0655-08.

[19] ZHANG Y,DI C,PENG P, et al.Research on somatosensory shock wave pressure measurement method based on PVDF film[J].Thin-Walled Structures,2024,196111520-.DOI:10.1016/J.TWS.2023.111520.

[20] GUO F D,ZHAO L,GANG B S.A PVDF-Based Sensor for Internal Stress Monitoring of a Concrete-Filled Steel Tubular (CFST) Column Subject to Impact Loads.[J].Sensors (Basel, Switzerland),2018,18(6):1682-1682.DOI:10.3390/s18061682.

[21] Qi B ,Kong Q ,Qian H , et al.Study of Impact Damage in PVA-ECC Beam under Low-Velocity Impact Loading Using Piezoceramic Transducers and PVDF Thin-Film Transducers[J].Sensors,2018,18(2):671-671.DOI:10.3390/s18020671.

最新录用，非最终出版稿

[22] 周恩,李洪伟,孙翼,等.工业电子雷管储能电容和点火药头的抗冲击性能[J].工程爆破,2025,31(06):155-163.DOI:10.19931/j.EB.20240132.
ZHOU E,LI H W,SUN Y, et al.Impact Resistance of Energy Storage Capacitor and Ignition Head in Industrial Electronic Detonator[J].Engineering Blasting,2025,31(06):155-163.DOI:10.19931/j.EB.20240132.

[23] 杨文,韩尧,吴竞,等.电子雷管用电子控制模块的抗冲击性能研究[J].爆破器材,2023,52(02):8-12.DOI:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.02.002.
YANG W,HAN Y,WU J, et al.Impact Resistance of Electronic Control Module for Electronic Detonators[J].Explosive Materials,2023,52(02):8-12.DOI:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.02.002.

[24] 张振华,王乘,黄玉盈,等.舰船底部液舱结构在水下爆炸作用下的动态响应实验研究[J].爆炸与冲击,2007,(05):431-437.
ZHANG Z H,WANG C,HUANG Y Y, et al.Experiment research of the dynamic response of fluid cabin in the bottom of warship subjected to underwater explosion[J].Explosion and Shock Waves,2007,(05):431-437.

[25] 李彪彪,王辉,沈飞,等.壳体对炸药水下爆炸近场特性的影响[J].火炸药学报,2019,42(01):58-62.DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.2019.01.009.
LI B B,WANG H,SHEN F, et al.Effect of Shell on Short-range Characteristics of Underwater Blast of Explosive[J].Chinese Journal of Explosives & Propellants,2019,42(01):58-62.DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.2019.01.009.

[26] FAN R ,LIN G ,ZHANG H, et al.Dynamic Behavior of Submerged Cylindrical Shells Under Combined Underwater Explosion, Bubble Pulsation, and Hydrostatic Pressure[J].Materials,2025,18(4):818-818.DOI:10.3390/MA18040818.

[27] LENG Z ,FAN Y ,LU W, et al.Failure mechanisms of electronic detonators subjected to high impact loading in rock drilling and blasting[J].International Journal of Coal Science & Technology,2025,12(1):10-10.DOI:10.1007/S40789-025-00749-6.

录用稿，非最终出版稿

Internal Overpressure Response Characteristics of Industrial Electronic Detonators under Explosion Shock Loading

WU Junjie[1,2], LI Hongwei[1,2], LIANG Hao[1,2], YANG Lin[3], ZHU Fuyuan[4], XIN Da[5], ZHANG Wanlong[4]

(*1. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*

2. Huainan Key Laboratory of Intelligent Blasting and Safety Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

3.Xi'an Qinghua Civil Explosives Co., Ltd., Xi'an 710038, Shaanxi, China;

4.Huainan Shuntai Chemical Co., Ltd., Huainan 232001, Anhui, China;

5.Wuxi Shengjing Microelectronics Co., Ltd., Wuxi 214142, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the engineering problem that industrial electronic detonators are prone to misfire under the detonation impact of adjacent borehole charges during blasting in small-section roadways, this study investigated the characteristics of internal overpressure load after shock wave transmission through the detonator shells. A dynamic underwater explosion overpressure measurement system was established using PVDF piezoelectric thin-film sensors. With No. 8 industrial electronic detonators as the standard explosion source, in-situ measurements of transient internal overpressure inside copper-clad steel hollow detonator shells were carried out at standoff distances ranging from 4 cm to 7 cm. The peak internal overpressure, waveform evolution characteristics and attenuation laws were analyzed, and the Cole empirical formula for

underwater explosion was modified and fitted based on experimental data. The results show that the peak internal overpressure of the detonator decreases significantly with the increase of standoff distance, reaching 26.0 MPa at 4 cm and dropping to 5.2 MPa at 7 cm; the shell overpressure attenuation coefficient rises from 0.81932 to 0.93273. As the standoff distance increases, the internal overpressure waveform gradually evolves from a sharp single-peak shape to a multi-peak oscillatory shape, which reflects the wave system evolution law: the dominant effects of transmitted waves and shell compression weaken, while the coupling effects of cavity reflection and rarefaction waves strengthen. This study verifies the feasibility of the PVDF measurement method for impact overpressure measurement inside small cavities, reveals the load attenuation mechanism of the detonator shells–cavity system, and provides experimental data and theoretical support for the anti-shock structure optimization, safety threshold determination and numerical simulation verification of electronic detonators.

Keywords: industrial electronic detonator; PVDF sensor; explosion shock wave; internal dynamic pressure; shell transmission; overpressure attenuation

最新录用，非最终出版稿