

内爆炸环境下舱室壁面压力测试方法*

翟红波, 苏健军, 李芝绒, 袁建飞, 王胜强

(西安近代化学研究所第七研究部 西安, 710065)

摘要 针对内爆炸热、振动干扰壁面压力测量的问题,提出了一种内爆炸环境下舱室壁面压力测试方法。对于热影响,采用一种热隔离装置,并在其中涂抹隔热油脂,降低热对传感器的影响。对于结构振动影响,采取一种隔振安装结构,抑制壁面振动向传感器的传递,并对该方法进行分析与试验验证。结果表明,该方法能够有效降低热、振动对压力测试的影响,提高压力测试精度,适用于内爆炸环境下的舱室壁面冲击波压力测试。

关键词 舱室; 内爆炸; 热冲击; 振动; 压力测试

中图分类号 TJ410.6; TH73

引言

冲击波是爆炸产生的重要毁伤元之一,是表征弹药爆炸威力的重要指标^[1]。其中,壁面冲击波压力可以直观反映结构所受的爆炸作用载荷,是评估侵爆弹对舰船、建筑等目标毁伤效果时必须考虑的因素。尤其是舰船舱室,不仅要考虑壁面压力峰值,也要考虑一定时长内的壁面压力冲量。而冲击波超压测试系统测量精度要受到仪器不确定度和环境不确定度的影响,必须对试验环境和测试条件进行具体分析,采取措施降低它们对测量精度的影响。

近年来,众多学者围绕冲击波超压测试开展了深入广泛的研究,并取得了一系列研究成果。由于温压炸药冲击波超压测试中使用的压力传感器不具备高温屏蔽能力,温压炸药后燃烧阶段的压力测试值往往偏离实际。孔霖等^[2]研究了压力传感器的热冲击响应,通过涂抹油脂的方式,有效解决了温压炸药后燃烧阶段的压力测试问题。邱艳宇等^[3]讨论了瞬变温度对压电式压力传感器的影响,对比分析了涂抹凡士林和覆盖玻璃纤维布两种热防护措施的有效性。陈昊等^[4]为避免爆炸碎片对传感器的损坏,在封闭房间内采用壁面型压力传感器研究了炸药爆炸的冲击波传播特点和波形变化规律。李燕杰等^[5]从装置受力与压力传感器性能两方面分析了在冲击波荷载作用下产生振动噪声的原因,分析了该噪声信号的波形特点,提出了两种消减振动噪声的方法。

上述研究多针对自由场冲击波测试,内爆炸壁面压力测试研究偏少,针对温压炸药的更为罕见。温压炸药在舱室内爆炸较为特殊,爆炸后产生持续热冲击与较强的舱壁振动,给壁面压力测试带来了很大困难。因此,针对舱室内爆炸环境,开展壁面冲击波压力测试的隔热隔振研究,提高压力测试精度,对于弹药威力评价与毁伤评估具有重要的意义。

1 压电型压力传感器工作原理

压电传感器通常由本体、膜片、压电晶体、电极片、密封台构成,如图 1 所示。爆炸载荷首先作用到膜片上,膜片在冲击波压力作用下发生弹性变形,继而挤压下方的压电晶体,压电晶体在受到膜片弹性变形传递的压力后也发生相应变形,在电极片中产生与冲击波压力成正比的压电输出信号,通过传输电缆输出。

压力传感器是利用压电材料的压电效应原理制作的,压电材料选用石英晶体制作。石英晶体两表面间的电压为

$$\begin{cases} U_{11} = Q_{11} / C_{11} \\ Q_{11} = d_{11} F_x \end{cases} \quad (1)$$

其中: U_{11} 为石英晶体两表面间的电压; Q_{11} 为石英晶体纵向压电效应产生的电荷; C_{11} 为石英晶体两表面的电容; d_{11} 为石英晶体的压电系数; F_x 为晶体上作用的压力。

压电效应是材料中一种机械能与电能互换的现

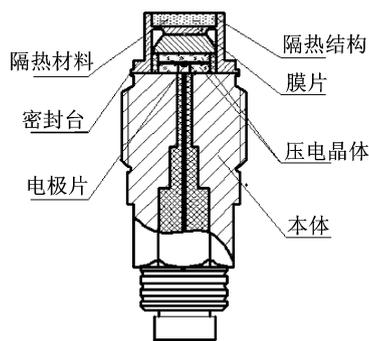


图1 压力传感器示意图

Fig. 1 The diagram of the pressure sensor

象,最早由皮埃尔居里和雅克居里兄弟在1880年发现^[6]。石英晶体是一种各向异性的结晶体,具有压电效应。压电效应是能量物质效应的一种。Heckmann于1925年提出的“机-电-热”3种能量物质效应模型,直观地描述了3种能量间的物质效应关系,即任何物质效应都是能量转换与信息转换的结果,给出了主效应和交叉效应概念以及效应表达式^[7]。但Heckmann模型忽略了磁学量,因此又发展出了“机-电-热-磁”物性效应模型,包含4种能量形式^[8],如图2所示。外正方形的4个顶点为示强变量(也称约束变量、自变量、强度变量或广义力);内正方形的4个顶点为示容变量(亦称示量变量、响应变量、因变量或广义位移)。相对应的两个顶点连线(粗箭头所示)的2个变量间的关系,即同一能量系统参量间的关系称为主效应。其余各参量之间的耦合关系(图中用细实线所示)为交叉效应。

从图2中可以发现,当一种强度变量发生变化时,不仅产生主效应使对应的响应变量发生变化,而且产生交叉效应改变其他响应变量。换句话说,当一种强度变量发生变化时,每种响应变量都会跟着

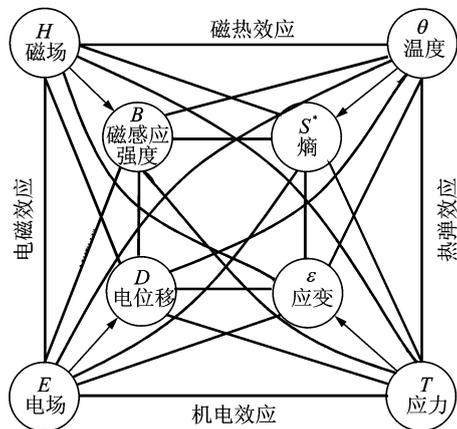


图2 4种能量的物性效应模型

Fig. 2 Physical effects model of four types energy

变化。对于传感器的压电晶体而言,信号来源不仅包括应力变化,而且包括温度、磁场、电场的变化。要想准确地获取应力应变产生的电信号,必须隔离温度、磁场、电场的影响^[9]。

2 内爆炸环境分析

装药在舰船舱室或建筑物内部发生爆炸时,产生的空气冲击波向四周传播,遇到四周壁面结构后,在结构表面产生反射现象。壁面结构在爆炸载荷作用下常常产生大的塑性变形或发生局部或整体的破损,同时结构产生剧烈的冲击振动,通过联接构件向其他结构件传递。冲击波在密闭空间内部经过多次反射,逐渐形成了准静态压力。如果装药为温压型炸药,在爆轰后产生后燃烧现象,释放大量的燃烧热,在密闭空间内会形成更高的准静态压力和温度。

内爆炸时,结构的冲击波毁伤通常服从冲量准则^[10],因此在壁面压力测量时需要重点关注冲量载荷数据的获取。传感器与壁面刚性连接时,壁面振动全部传递给传感器,不仅会使压力输出信号发生震荡,而且过高振动严重影响传感器的工作。内爆炸产生的持续热冲击会改变膜片的预紧力,使冲击波曲线发生漂移,同时改变传感器灵敏度,严重影响冲量载荷(通过压力曲线的积分得到)的准确获取。

2.1 压力测试结构振动干扰分析

在爆炸作用过程中,不仅传感器敏感面受到冲击波作用,传感器的安装结构也受到冲击波的作用,安装结构发生振动引起传感器的振动;当冲击波作用到壁面结构上时,壁面发生振动,壁面的振动信号会通过传感器安装基座传向传感器。传感器对两种振动都会产生感应,输出信号,进而干扰测试结果。壁面冲击波压力测试一般采用压电式压力传感器,由于存在附加质量块,压电式压力传感器受到激励后产生电荷信号。在爆炸场中,传感器与信号线的连接头以及信号线本身振动都会产生电荷,从而干扰测试数据。必须在传感器安装结构中采取相应的减振措施,降低测试的振动干扰。

在冲击波超压测试中,振动引起传感器安装部位应变,传递给传感器基座,进而传递到压电元件,产生误差信号输出。为了验证压力传感器的加速度信号输出,敲击某传感器安装基座,不给传感器敏感面施加压力,产生的振荡信号即为传感器输出的振动附加信号,如图3所示。

在内爆炸环境中,距离爆心近的结构受到冲击

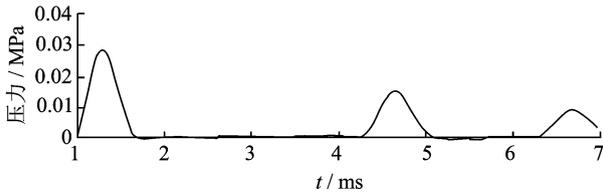


图3 压电压力传感器直接敲击安装座输出的压力曲线
Fig.3 Pressure curve of piezo-electric pressure sensor with knocking installation

波作用后在产生振动,并向其他连接结构传递。由于钢结构中的波传播速度(5 000 m/s)大于冲击波传播速度,部分测点处的冲击波和振动波会同时到达,对冲击波信号的输出产生干扰(如图4所示)。如果振动波到达某一测点的时间滞后于冲击波到达时间,可认为其对冲击波超压的测量影响不大,反之则认为有影响。图4为某舱室(试验布置见图5)测点 B_4 和 B_6 的压力曲线,50 g TNT在舱室几何中心处内爆炸。深色曲线为 B_4 测点,距爆源较近,振动波对冲击波首个波形影响不大;浅色曲线为 B_6 测点,距爆源较远,振动波对压力波形存在干扰。

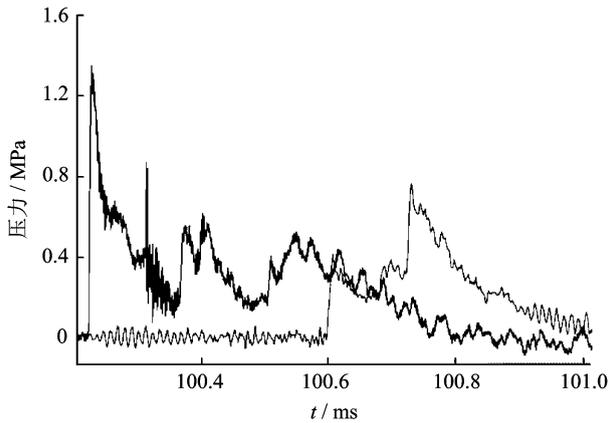


图4 50 g TNT内爆炸时不同测点处的壁面冲击波
Fig.4 Pressure curve of two wall points with 50 g TNT charge explosion

2.2 压力测试热干扰分析

对于温压型装药,爆轰后产生高温高压场。缓变温度对测试精度的影响较小,但瞬变温度会改变压电传感器的灵敏度并产生零点漂移,对测试结果造成较大影响^[11],主要原因:a.热释电效应。压电材料自身具有热释电效应,当受到瞬时热冲击时,压电传感器灵敏度会发生变化^[12]。尽管压电晶体的温度系数较小,但在温压场的持续热冲击下,灵敏度变化不可忽略。b.热弹效应。传感器中,承受压力作用的弹性元件主要有膜片、膜盒和薄壁圆筒等,

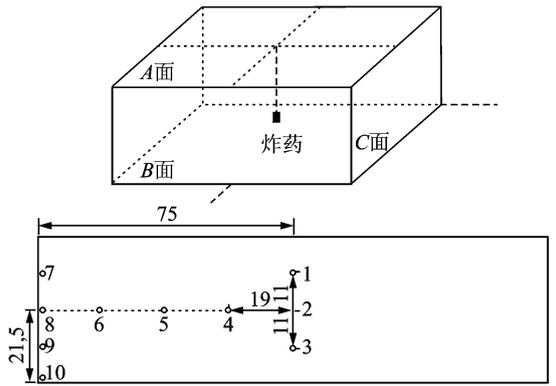


图5 舱室试验布局示意图(单位:cm)
Fig.5 Field layout of the test(unit:cm)

在受到热冲击时,由于各部件的热膨胀及热应力,导致膜片产生形变,影响了预紧力的稳定,从而使传感器输出产生漂移^[13]。

3 壁面压力测试隔热技术

为了解决爆炸热作用对冲击波压力测量的影响问题,采用一种隔热安装结构(如图1所示),能经受后燃烧阶段的热冲击,达到获取完整冲击波压力变化曲线的目的。

使用时,将压力传感器安装到隔热安装结构内,在传感器敏感表面与安装结构表面形成1~1.5 mm深的凹槽,凹槽内填充隔热油脂。隔热油脂热阻比钢质材料大,减缓了热量向压力传感器内部传导速度,在一定时间段内使压力传感器受到的热影响小,减小压力传感器热效应信号对测量的压力信号的影响,提高了压力信号测量精度。

热冲击向传感器内部传导的过程是一个非稳态导热过程,传感器内部温度随着时间的推移逐渐趋于恒定的值,温度变化可用式(2)描述

$$\frac{t - t_w}{t_0 - t_w} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}} e^{-\eta^2} d\eta = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) = \operatorname{erf}\eta \quad (2)$$

其中: t 为敏感面温度; t_0 为传感器初始温度; t_w 为突然升高的传感器端面温度; x 为传感器端面至敏感面的距离; τ 为计算时刻; erf 为误差函数,表示自变量带来的误差,无量纲量 $\eta = 0.5x(a\tau)^{-0.5}$ 。

隔热材料以硅油为例,设初始温度 $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $t_w = 1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$, $x = 1\text{ mm}$, $\tau = 500\text{ ms}$,硅油 $\rho = 0.96\text{ g/cm}^3$,导热系数 $\lambda = 0.159\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,比热容 $c = 1.63\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 。带入方程(2),得到传感器敏感面温度为 $21.6\text{ }^\circ\text{C}$,温升为 $1.6\text{ }^\circ\text{C}$ 。可见当以硅油作为隔热材料时,如果外界温度从室温瞬态上升为 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在500 ms的时间内,传感器结构

的敏感元件受外界温度影响较小,其输出信号是有效冲击波超压信号。

为了验证隔热措施的热抑制效果,采用瞬时热冲击模拟装置进行耐热效应模拟试验,瞬时热冲击模拟装置的结构原理如图6所示。选取两只动态性能相同的压力传感器,一只直接安装到钢质板上,传感器敏感面与板表面平齐,另一只通过隔热安装头,安装到钢质平板上,在形成的凹槽中填充隔热油脂。以乙炔焊枪喷射火焰加热一块钢质圆柱块,加热到钢块发红为止。迅速将发红钢块垂直跌落到钢质平板上。触发信号由断通靶产生,断通靶的一端连接到传感器安装座上,另一端连接到钢热块上。当热钢块与安装传感器的钢平板接触时,断通靶导通产生触发信号,数采系统开始采集记录传感器的响应输出信号,如图7所示。

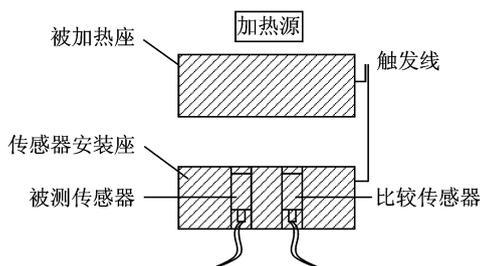


图6 瞬时热冲击模拟装置原理图

Fig. 6 Schematic diagram of analogue device of instantaneous thermal shock

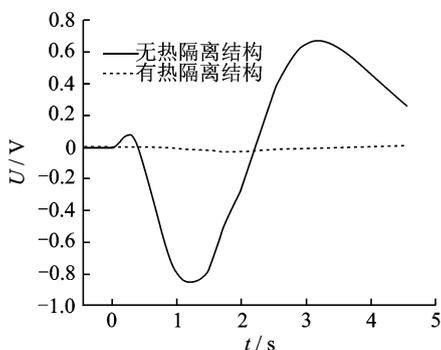


图7 耐热效应模拟试验响应信号

Fig. 7 Response signal of analog test of the thermal effects

从图7中可以看出,无热隔离装置的传感器在0.3s后产生十分显著的负信号,随后逐渐回升,这是由于传感器结构产生相对热变形,改变敏感元件的受力状态,导致传感器的性能参数发生变化;而有热隔离装置的传感器在0~0.3s期间没有信号输出,在0.3~1s期间几乎一直处于零线,此后热量传递到传感器内部使其产生微弱负信号,但已经超出温压炸药爆炸压力效应的作用时间,不影响压力

效应的完整采集记录。

为了进一步验证隔热措施的热抑制效果,开展某配方温压炸药的爆炸塔试验,测试爆炸冲击波超压。试验药量为1kg,炸高1.5m。选取两只传感器,一只只有热隔离装置,一只无热隔离装置,安装在测试墩上,放置于地面。图8是得到的冲击波超压曲线,冲击波到达传感器敏感面后,产生瞬时超压输出信号。从超压曲线中可以发现,有热隔离装置的压力传感器输出信号在冲击波衰减以后一直处于零线位置,零点没有漂移,直到0.05s时间时出现一微弱正压信号,这是温压炸药后燃烧过程产生的低压信号;无热隔离装置压力传感器的输出信号在冲击波后有显著负压信号,这是爆炸热量传递到传感器内部敏感元件上改变了传感器受力状态而产生的畸变输出信号。

试验结果表明:和无热隔离装置的压力传感器相比,采取热隔离措施的压力传感器在500ms持续时间内能够隔离温压爆炸的热冲击作用,有效消除热冲击对传感器的性能影响,提高测试精度。

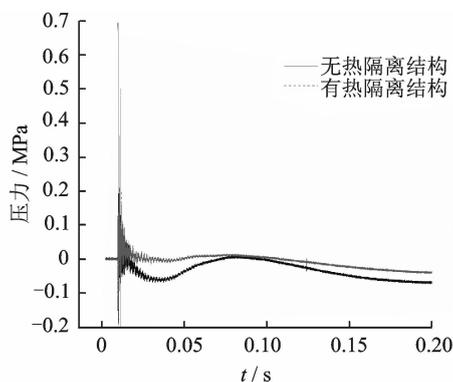


图8 爆炸塔试验冲击波超压测试曲线

Fig. 8 Pressure curve of the test in explosion container

4 壁面压力测试隔振技术

为了抑制振动作用对冲击波压力测量的影响,设计一种压力传感器的隔振安装结构(如图9所示),由传感器、安装座、隔离环、基座及压紧螺构成。

传感器通过螺纹联接安装到安装座的中心孔内,在传感器肩部有铜垫圈,在安装座凸台的两个端面分别安装一个隔离环,然后将安装座置于基座内,通过压紧螺固紧。安装座端面与壁面平齐,保证测量位置与壁面一致,避免扰动冲击波流场。

测量装置的隔振主要通过两个隔离环实现。隔离环的制造材料为聚乙烯,实现了传感器安装座与基座的非刚性接触,既能固定安装座,又能增加连接结构的阻尼,抑制基座振动向安装座的传递,有效降低了振动对传感器压力输出信号的干扰。此外,传

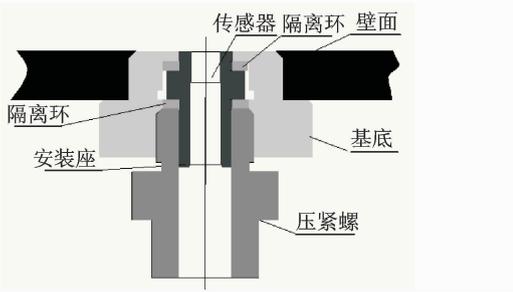


图 9 传感器隔振安装结构

Fig. 9 Vibration isolation mounting structure of sensor

感器肩部的垫圈,也可以降低安装座振动向传感器的传递。

冲击波压力测试要保证足够的精度,测量装置的谐振频率必须大于测量信号频率的 5 倍。为了验证隔振装置的动态性能达到冲击波超压信号测量的精度要求,在空气激波管进行了压力传感器和隔振测量装置的动态性能标定试验,传感器型号为 M113A26-17231。试验如图 10 所示,标定传感器固定在端部安装板上,当激波管中的平台激波压力冲击波作用到传感器敏感面后,传感器输出响应压力信号,计算压力波形的上升前沿时间,得到压力测量组件的安装谐振频率。内爆炸场冲击波正压作用时间一般为毫秒量级,特别是近场,冲击波正压作用时间为百 μs 级,频率达到十 kHz 级。图 11 是隔振测压装置输出的压力信号。表 1 是动态性能试验的测试结果。可以发现,传感器的谐振频率为 446 kHz,隔振压力测量装置的谐振频率为 373 kHz,该隔振压力测量装置的谐振频率大于 5 倍超压频率,因此隔振压力测量装置的谐振频率动态性能能够满足内爆炸场冲击波信号的测量精度要求。

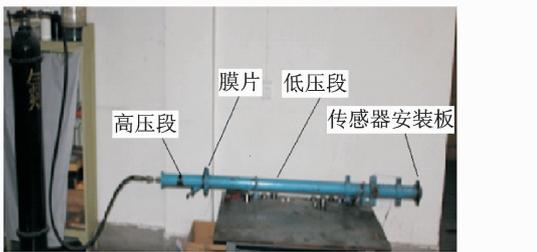


图 10 激波管试验装置

Fig. 10 Test device of the shock tube

表 1 压力测量装置动态性能测试结果

Tab. 1 Dynamic performance of the pressure measuring device

试验条件	上升时间/ μs	谐振频率/kHz
无安装结构	0.56	446
有安装结构	0.67	373

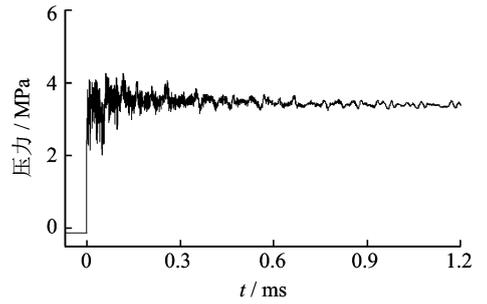


图 11 隔振测压装置输出的压力信号

Fig. 11 Output pressure curve of vibration isolation pressure measuring device

某舱室结构(如图 5 所示)进行了内爆炸试验。舱室长为 1.5 m,宽为 0.95 m,高为 0.43 m,舱壁均采用 Q235 钢。试验装药是 100 g 压装 TNT 柱状炸药,长径比为 1 : 1.2,密度为 1.58 g/cm^3 。分别采用隔振压力测量装置与普通压力测量装置进行壁面压力测量,输出压力曲线如图 12 所示。可以发现,普通压力测量装置输出的冲击波压力波形有较大的毛刺与振荡,会引起冲量计算的误差,而隔振压力测量装置输出的冲击波压力波形没有振荡,且毛刺较少。这说明隔振压力测量装置具有较好的隔振性能,能够抑制基座振动向安装座的传递,有效消除爆炸场基座振动对传感器性能的影响,实现获取完整准确冲击波压力变化曲线的目的。

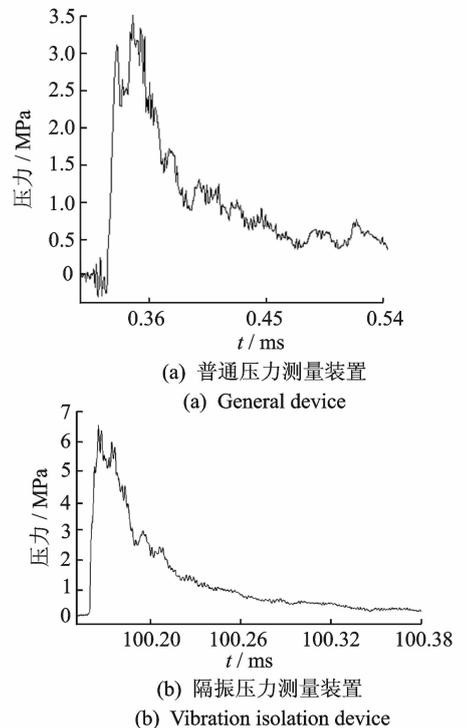


图 12 内爆炸压力信号曲线

Fig. 12 Pressure curve of inner explosion

为了验证该隔振压力测量装置的隔振性能,在

5 结束语

舱室内爆炸时,产生持续时间较长的热冲击,且舱壁的振动加速度较大,影响壁面压力测试装置正常工作,干扰舱壁冲量载荷的获取。因此,笔者提出了一种内爆炸环境下舱室壁面压力测试方法,采用隔热措施与隔振安装结构,降低热、振动对测试信号的影响,并开展理论分析与试验验证。结果表明,该方法在500 ms持续时间内能够隔离温压爆炸的热冲击作用,有效抑制舱壁振动对传感器性能的影响,提高舱室壁面压力测试精度。

参 考 文 献

- [1] 陈昊,陶钢,蒲元. 冲击波的超压测试与威力计算[J]. 火工品, 2010(1):21-24.
Chen Hao, Tao Gang, Pu Yuan. The measurements of overpressure of shock wave and analysis of tnt equivalent [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010(1):21-24. (in Chinese)
- [2] 孔霖,苏健军,李芝绒,等. 某压力传感器热冲击响应的抑制方法[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(12):69-72.
Kong Lin, Su Jianjun, Li Zhirong, et al. A way to restrain the response of thermal impact of a pressure sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(12):69-72. (in Chinese)
- [3] 邱艳宇,卢红标,蔡立良,等. 压电传感器受爆炸瞬变温度影响的试验研究[J]. 爆破, 2010, 27(4):31-34.
Qiu Yanyu, Lu Hongbiao, Cai Ligen, et al. Experimental research on effect of explosion transient temperature on piezoelectric sensors [J]. Blasting, 2010, 27(4):31-34. (in Chinese)
- [4] 陈昊,陶钢. 温压弹在有限空间内爆炸的超压测试和分析[J]. 爆破器材, 2009, 38(3):4-7.
Chen Hao, Tao Gang. The test and analysis on overpressure generated by thermo-baric grenade explosion in limited space [J]. Explosive Materials, 2009, 38(3):4-7. (in Chinese)
- [5] 李燕杰,祖静,杜红棉. 冲击波测试中振动噪声的产生与去噪[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(8):71-73.
Li Yanjie, Zu Jing, Du Hongmian. Generation and denoising of the vibration noise during shock wave test [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(8):71-73. (in Chinese)
- [6] 孙宝元,钱敏,张军. 压电式传感器与测力仪研发回顾与展望[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(2):127-134.
Sun Baoyuan, Qian Min, Zhang Jun. Review and

prospect on research for piezoelectric sensors and dynamometers [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41(2):127-134. (in Chinese)

- [7] Ballato A. Piezoelectricity: old effect, new thrusts [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 1995, 42(5):9-21.
- [8] 孙宝元,钱敏,张军. 机电耦合等于大于二次感生效应探析[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(2):268-273.
Sun Baoyuan, Qian Min, Zhang Jun. Inquire into electromechanical coupling ≥ 2 times induced effect [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1999, 39(2):268-273. (in Chinese)
- [9] 杨世超,陈锋. 压电式压力传感器的加速度灵敏度的测试与分析[J]. 振动、测试与诊断, 1984(3):11-14.
Yang Shichao, Chen Feng. The measuring and analysis of the acceleration sensitivity of piezo-electric pressure sensor [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1984(3):11-14. (in Chinese)
- [10] 孙建运,李国强,陆勇. 爆炸荷载作用下 SRC 柱中混凝土的断裂破坏原理[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2):168-171.
Sun Jianyun, Li Guoqiang, Lu Yong. Concrete fracture mechanisms of steel-reinforced-concrete columns subjected to blast loading [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2):168-171. (in Chinese)
- [11] 吴松,陈宏,谷笛华,等. 一种压电压力传感器的隔热方法[J]. 科学通报, 2007, 52(8):866-869.
Wu Song, Chen Hong, Gu Qiehua, et al. A thermal protection method of piezo-electric pressure sensor [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(8):866-869. (in Chinese)
- [12] 程鹏,程江,闫冠. 压电式压力传感器热冲击效应的试验研究[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(2):27-29.
Cheng Peng, Cheng Jiang, Yan Guan. Experiment research on thermal shock effect of piezoelectric pressure transducers [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(2):27-29. (in Chinese)
- [13] 朱明武,梁人杰,柳光辽,等. 动压测量[M]. 北京:国防工业出版社, 1983:114-116.



第一作者简介:翟红波,男,1987年8月生,博士、副研究员。主要研究方向为结构动态响应与毁伤评估。曾发表《In-plane dynamic response analysis of curved pipe conveying fluid subjected to random excitation》(《Nuclear Engineering and Design》2013, Vol. 256, No. 7)等论文。

E-mail: zhaihongbo@qq.com

