DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0633-07

三爆轰管-脉冲爆轰发动机的近场噪声特性*

黄孝龙,翁春生,李 宁,许桂阳
(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏 南京 210094)

摘要: 为研究三爆轰管脉冲爆轰发动机噪声的形成机理和特性,设计了正三角形组合的三爆轰管 PDE 实验系统,分别在与中心轴线成 0°、30°、60°及 90°方向上,对 8 个不同距离处的声压进行了测量,结果表明:不同距离处噪声幅值最大值均在 30°方向上;爆轰噪声的参考半径为 3 倍"名义管径";爆轰噪声的 A 持续时间随着 r(距离三爆轰管名义"中点"的直线距离)的增加近似线性减小,并随着角度的增大而减小。B 持续时间与声压值的大小成反比关系,并且随着轴向距离的增加而增加。在不同的方位角上,峰值声压越大,B 持续时间越小。

关键词: 爆炸力学;爆轰噪声;参考半径;脉冲爆轰发动机;指向性;持续时间
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

脉冲爆轰发动机(pulse detonation engine,简称 PDE)是一种利用脉冲式爆轰波产生推力的新概念发动机,具有热效率高、结构简单等优点。多管 PDE 的构想最早出现在 20 世纪 50 年代,相对于单爆轰管的 PDE,增加爆轰管数量具有增加推力和提高工作频率等优点。国内外对多爆轰管 PDE 研究颇有成效,2014 年 T. Morozumi 等[1]采用乙烯为燃料,N_2O 为氧化剂,实现了四爆轰管 PDE 装置的成功起飞,工作过程中对称的两爆轰管同时起爆,在 1500 ms 的工作过程中测得平均推力为 256 N,比冲为 130.8 s。2011 年,袁成等[2]以汽油为燃料,空气为氧化剂,成功实验了六个爆轰管的吸气式 PDE 的多循环起爆。然而作为一种动力装置,其在工作过程中产生较大的噪声会引起结构的声疲劳、对相关工作人员的听力造成损伤、对周围环境产生噪声污染等危害。因此,对多爆轰管 PDE 爆轰噪声的研究具有重要意义。

针对单爆轰管 PDE 爆轰噪声特性已有一系列的研究报道,L. Shaw 等[3]对距离出口 0~3.66 m范围内的 PDE 管外噪声进行了测量,发现距离管口越近,声压级越高。通过信号频率的处理,发现随着距管口的距离的增加,由于高频噪声在大气中的耗散作用,其声压的幅值迅速衰减。美国辛辛那提大学 A. Glaser 等[4]对距离出口方向不同角度、不同轴向距离的 PDE 爆轰噪声进行了实验,发现爆轰噪声辐射具有一定的指向性,并且得出了噪声幅值随轴向距离变化的衰减规律。国内对于 PDE 爆轰噪声的实验研究相对较少。郑龙席等[5]进行了气液两相 PDE 噪声实验研究,发现其噪声辐射呈现间歇性和周期性的特点,噪声源主要由单极子源和四极子源组成;噪声辐射的频谱为宽频带谱,其能量主要集中在低频部分,由气流脉动的基频和谐频组成;峰值声压级与爆轰频率无关,而脉冲声压级、声功率级和声功率随爆轰频率的增加而提高。许桂阳等[6]对加装不同喷管的 PDE 爆轰噪声进行了实验研究,发现加装喷管可以降低爆轰噪声和减小爆轰噪声的参考半径。

对于多管 PDE 爆轰噪声的研究,美国辛辛那提大学 N. Caldwell 等[7]对双爆轰管的 PDE 爆轰噪声进行了相关的实验研究,与单爆轰管 PDE 相比,双爆轰管 PDE 在距离管口 2.89 m 处产生的声压级要高出至少 3 dB,并且爆轰噪声辐射的指向性更加明显。当前,国内多管 PDE 爆震噪声的研究尚未见到报道。

* **收稿日期**: 2015-01-27; **修回日期**: 2015-04-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(11472138);中央高校基本科研业务费专项基金项目(30920130112007);国防预研究基金项目
第一作者: 黄孝龙(1988—),男,博士研究生,huang_xl@foxmail.com。

在前人研究的基础上，本文中着重于对正三角形这一典型多爆轰管组合方式的 PDE 爆轰噪声展开研究，通过实验探索多循环三爆轰管 PDE 近场噪声特性，分析其波形特征与衰减规律，得到爆轰噪声峰值衰减系数，并对噪声辐射指向性和持续时间进行研究。研究结果有助于探索多爆轰管 PDE 爆轰的噪声形成和传播机理以及多爆轰管 PDE 爆轰噪声的控制方法。

1 实验系统

三爆轰管 PDE 实验系统如图 1 所示，主要包括 PDE、供气系统、供油系统、点火控制系统和测试系统等。

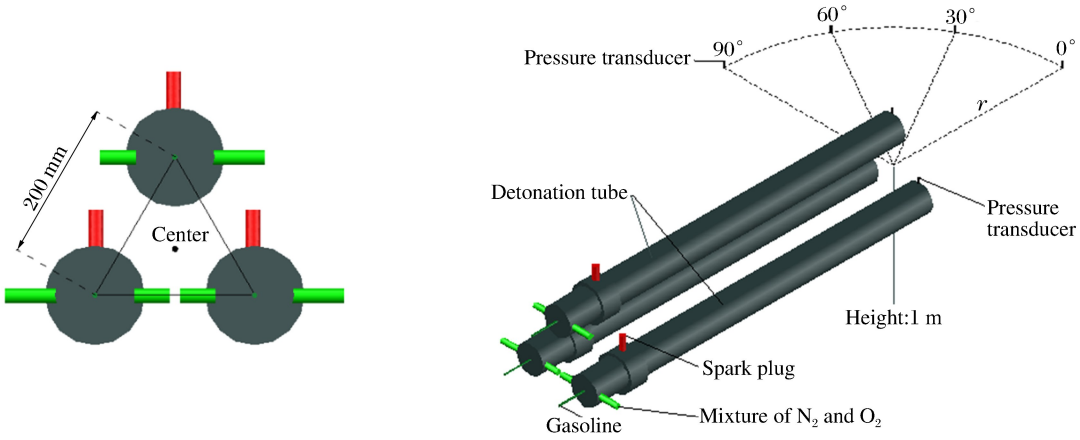

图 1 三管 PDE 爆轰噪声实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

以压缩空气和压缩氧气作为氧化剂，燃料为 93# 汽油。3 个爆轰管直径均为 80 mm，摆放成正三角形样式，如图 1 所示，中心轴间距为 200 mm。PDE 管头部以径向方式进气，通过精细雾化喷嘴和文氏管实现汽油雾化，并在混合室内实现氧化剂和燃料充分均匀混合。采用高能点火头，通过时序控制，实现三爆轰管同时起爆，点火频率为 8 Hz，实验在常温常压下进行。在每个爆轰工作循环间隙内，会有新鲜燃料和氧化剂的混合物吹扫废气，同时达到完全填充 PDE 管，此时下一次点火开始，进行下一次工作循环。测试系统中的传感器为 PCB 公司高频动态传感器，传感器布置在垂直于爆轰管中心轴连线的水平面内 0°、30°、45°和 90°方向上，高度与图 1 中正三角形中心点保持一致。在同一工况下，分别对距 PDE 出口 400、600、800、1 000、1 200、1 600、2 400 和 3 000 mm 处的噪声进行测试。测试得到的噪声电信号通过信号调理器处理后由同步数据采集系统采集，采样率为 5×10^5 s^{-1}。

2 PDE 近场爆轰噪声传播特性分析

2.1 三管爆轰发动机爆轰噪声参考半径的变化

以 r_0 为参考半径，将 PDE 噪声场划分为近场和远场，计算公式为[4]：

$$r_0=\left(\frac{E}{p_0}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{1}$$

式中：r_0 为参考半径，E 为爆炸能量，p_0 为大气压力。定义 r 为距离三爆轰管名义“中点”的直线距离。当 $r<r_0$ 时，PDE 爆轰噪声峰值的衰减与 r 的倒数满足 3 次方变化规律，而在参考半径 r_0 之外时，PDE 爆轰噪声峰值的衰减与 r 的倒数满足 1 次方变化规律：

$$p_{\mathrm{peak}}=\begin{cases}k\left(\dfrac{r_0}{r}\right)^3 & r\leqslant r_0\\ k_1\dfrac{r_0}{r} & r>r_0\end{cases} \tag{2}$$

式中：k、k_1为衰减系数。

因此，参考半径 r_0对 PDE 爆轰噪声机理研究具有重要意义。图 2 为不同方向上 PDE 爆轰噪声幅值随距离 r 的变化曲线。其中实线为负 3 次方拟合曲线，虚线为负 1 次方拟合曲线。

PDE 近场爆轰噪声峰值 p_{peak}与 r 的倒数满足一定的变化规律[4]（公式(2)）。

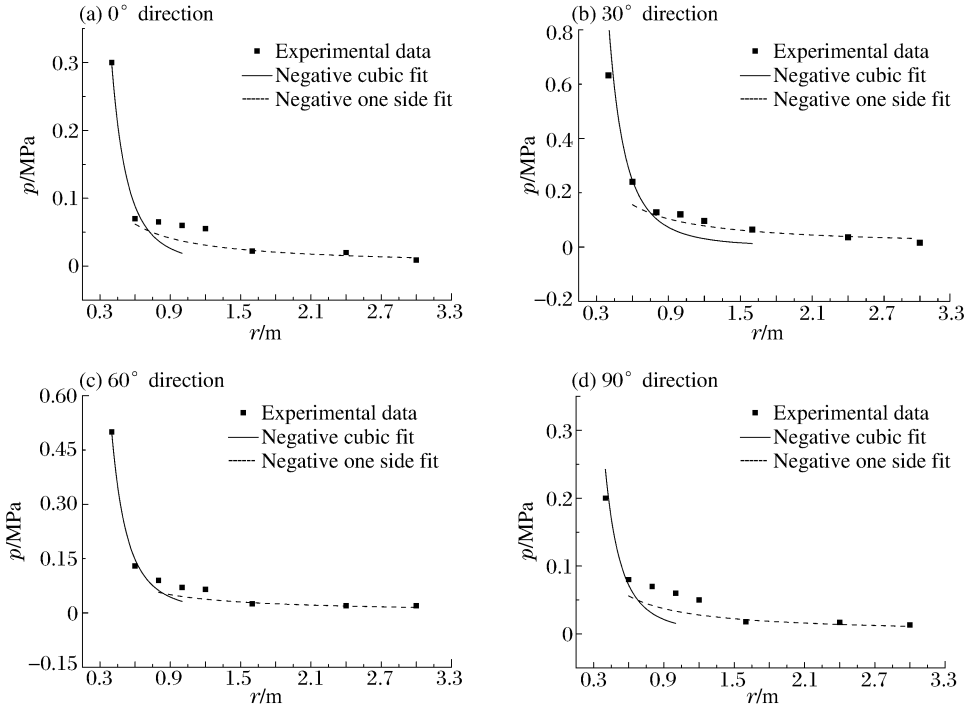

图 2 爆轰噪声峰值随距离 r 变化的拟合曲线

Fig. 2 Fitted curves of detonation noise amplitudes varying with different distances

由曲线拟合情况可以看出：在距离管口较近的区域，三爆轰管 PDE 噪声场中的幅值衰减较快，衰减速度与 $1/r$ 的 3 次方成正比。衰减速度逐渐放缓，在距离管口较远的地方，衰减速度与 $1/r$ 成正比。这主要是因为在管口附近，管内爆轰波退化形成的高强度的激波和高温高压燃烧产物迅速喷出管口形成高压力区。伴随着高强度冲击波的迅速衰减和高温高压区的迅速扩散，压力幅值迅速下降。随着冲击波继续向前传播，冲击波强度逐渐减弱，其衰减速度也减慢。而中间距离的测试点，既不符合 3 次方，也不符合 1 次方的衰减规律。可将此区域定义为过渡区[8]，即由强非线性声场向弱非线性声场衰减的过渡区域。该区域内，冲击波强度迅速衰减，并且衰减速度逐渐放缓，最终由衰减逐步蜕变为弱非线性声波，其声压的衰减速度较快且规律性较差。根据公式(2)，以两条曲线的交汇点定义出参考半径 r_0，由 0°、30°、60°和 90°等 4 个方向的拟合曲线可以看出，参考半径 $r_0 \approx 0.7$ m。本文中实验所用的爆轰管的直径 $d=80$ mm，因此参考半径 $r_0 \approx 9$ 倍管径。求得在 0°、30°、60°和 90°下，3 次方衰减系数 $k=5.13\times10^{-2}$、9.13×10^{-2}、8.42×10^{-2}和 4.35×10^{-2}；1 次方的衰减系数 $k_1=5.16\times10^{-2}$、8.26×10^{-2}、6.41×10^{-2}和 4.53×10^{-2}。

2.2　PDE 近场爆轰噪声指向性分析

作为脉冲噪声，PDE 近场爆轰噪声主要评价有脉冲声压级和峰值声压级。本文中着重研究峰值声压级，即爆轰噪声声压-时间曲线中声压峰值 p_{peak}的分贝值，表达式为：

$$L_{peak}=20\lg(p_{peak}/p_0) \tag{3}$$

式中：L_{peak}为峰值声压级，dB；p_{peak}为爆轰噪声的峰值声压，Pa；$p_0=2\times10^{-5}$ Pa，为基准声压。

指向性是表示声源在不同的方向辐射声能量的差异性。由图 3 可知，通过实验测得三管 PDE 近场爆轰噪声具有较强的指向性。三管 PDE 近场爆轰噪声峰值最大值均出现在 30°方向。并且随着距离的

增加，指向性更加明显。爆轰噪声，近似于高速喷流噪声的一种，主要由冲击波噪声和高速喷流噪声组成，冲击波噪声由爆轰波衰减而成的冲击波组成，高速喷流噪声由高温高压爆轰产物喷出 PDE 形成的高速喷流产生。文献[5]中对爆轰噪声的频谱计算分析认为，爆轰噪声的声源主要由单极子和四极子源组成。其中的四极子源，即由射流边界层中产生的湍流脉动引起的高频噪声，具有明显的指向性。文献[4]中，测量了单管 PDE 爆轰噪声指向性，得出了除 1 倍管径处，其余测量位置处的爆轰噪声辐射最大声压级均在 30°方向上的结论，三爆轰管 PDE 虽不同于单爆轰管 PDE，但其声源特性与单爆轰管 PDE 表现出了相似的规律性。

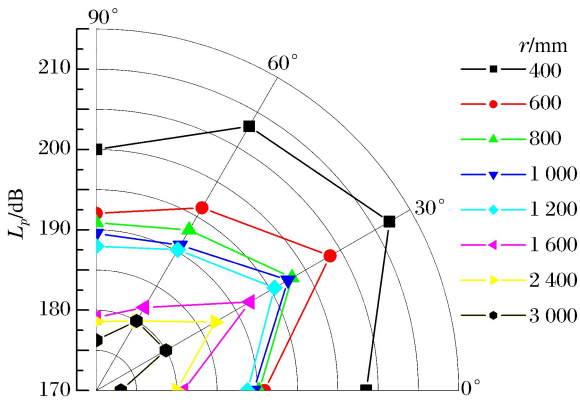

图 3 爆轰噪声峰值的指向图

Fig. 3 Diagram of detonation noise directivity

2.3 PDE 噪声近场的时间特性

脉冲噪声的持续时间，也是脉冲噪声重要的评价标准。爆轰波出管口退化而成的冲击波在近场区域仍为较强的冲击波，具有很强的间断性。幅值上升快，下降也快，持续时间较短。本文中采用的判定标准有 2 种，即 A 持续时间和 B 持续时间[9]。按照国家标准[GJB 2A-1996]的定义，A 持续时间为噪声在自由场的简单脉冲波，持续时间即指压力上升至主要正峰值，随后又迅速下降至环境压力所需要的时间。对于 B 持续时间，即在混合场或其他原因产生反射形成的一系列振荡波时，其持续时间为：在声压脉冲波峰值下降 90% 的声压振幅范围内的时间总和。图 4 为 0°方向，r=1 000 mm 处的声压变化曲线，其中声压峰值为 62 kPa，L_a 和 L_b 分别为波动范围线的上下界限，大小分别为压力峰值 p_{peak} 的±1/10。图中 O、A 两点间的时间差为 A 持续时间，O、B 两点间的时间差为 B 持续时间。

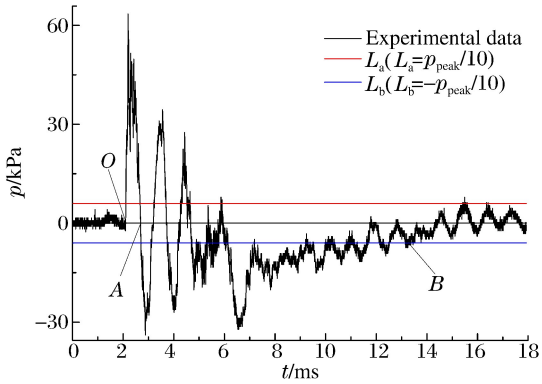

图 4 爆轰噪声持续时间

Fig. 4 Time of duration for detonation noise

表 1 为 0°、30°、60°、90°等 4 个方向，测试距离分别为 600、800、1 000、1 200 mm 处的脉冲噪声的持续时间。

表 1 爆轰噪声的持续时间

Table 1 Time of duration for detonation noise

φ/(°)	r=600 mm		r=800 mm		r=1 000 mm		r=1 200 mm	
	A	B	A	B	A	B	A	B
0	0.55	9.64	0.61	10.93	0.63	12.10	0.64	25.56
30	0.45	6.61	0.49	8.14	0.50	9.51	0.57	12.90
60	0.39	7.13	0.41	8.28	0.44	9.16	0.47	14.82
90	0.37	9.16	0.39	12.50	0.40	15.26	0.42	21.91

2.3.1 A 持续时间

A 持续时间随不同位置、不同方位角的变化情况如图 5(a)所示。在相同的位置 r 处，随着方位角 φ 的增加，A 持续时间近似线性规律下降。在同一方位角情况下，随着距离 r 的增大，A 持续时间也增大。分析认为，在相同的方位角上，随着轴向距离增大，一定量的脉冲声通过单位面积的声能量不断减小，因

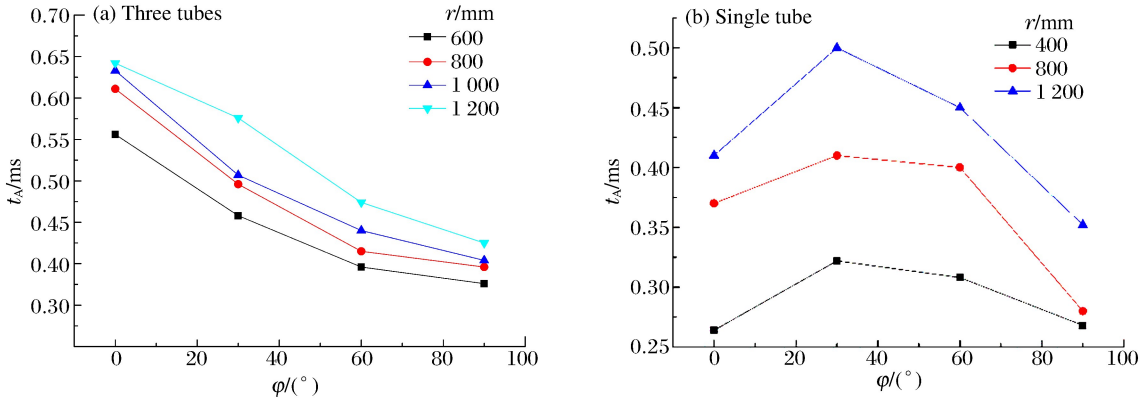

图 5　A 持续时间随方位角的变化曲线

Fig. 5　Curves of A time duration varying with different angles

而峰压减小，压力-时间曲线拉宽，正脉冲时间也变长。在同一距离 r 处，由于三爆轰管 PDE 爆轰噪声的指向性，在 30°方向能量辐射比较大，因而不仅压力值高，且 A 持续时间也长。而 0°方向上能量分布较小，但是 A 持续时间较长，主要是因为三爆轰管虽然是同时点火，但由于三个爆轰管之间交汇流场的复杂性和波系之间的抵消作用，导致到达测试点的时间不一致。图 6 为 800 mm 距离处测量所得压力随时间变化曲线，图中明显可以看出在压力上升区，存在 3 个峰值的叠加，导致其压力波形的正持续时间变长。

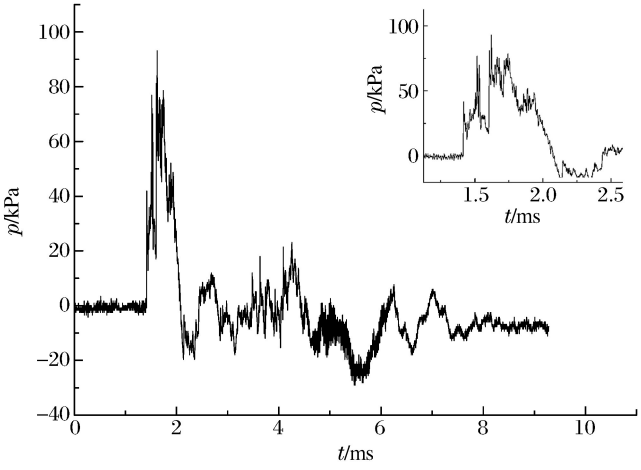

图 6　压力随时间变化曲线

Fig. 6　Curves of detonation noise amplitudes varying with time

为验证对 A 持续时间规律分析的正确性，对单爆轰管 PDE 爆轰噪声近场噪声进行了实验测量。单爆轰管 PDE 爆轰噪声的最大值在 30°方向，A 持续时间随着方位角的变化曲线如图 5(b)所示：由图中可以看出，同一方位角下，随着距离的增加，A 持续时间不断增加。同一轴向距离处，由于爆轰噪声辐射的指向性，在 30°处，A 持续时间较长，与上述分析结论一致。

2.3.2　B 持续时间

B 持续时间随着方位角 φ 的变化曲线如图 7 所示。在 600、800、1 000、1 200 mm 处，30°和 60°的 B 持续时间均小于同一距离下的 0°和 90°方向。图 8 为 800、1 000 mm 处的爆轰噪声峰值指向性和 B 持续时间变化曲线。0°～30°，随着方位角的增加，峰值声压级增加，B 持续时间相应减小，在 60°～90°区间内，随着方位角的增加，峰值声压级下降，B 持续时间增加。这两段区间内，峰值声压级的变化与 B 持续时间的关系成反比。在 30°～60°处，B 持续时间与方位角和峰值声压级没有明确的关系。在方位角相同的情况下，

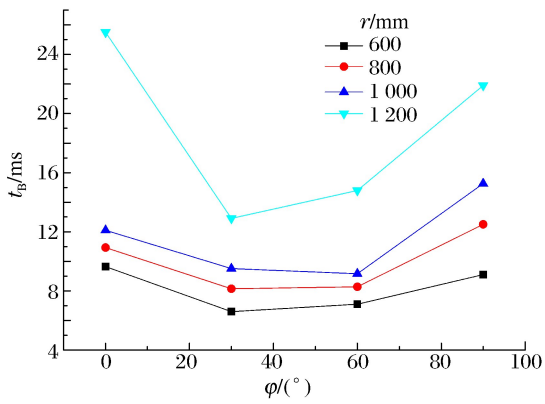

图 7　B 持续时间随方位角的变化曲线

Fig. 7　Curves of B time duration varying with different angles

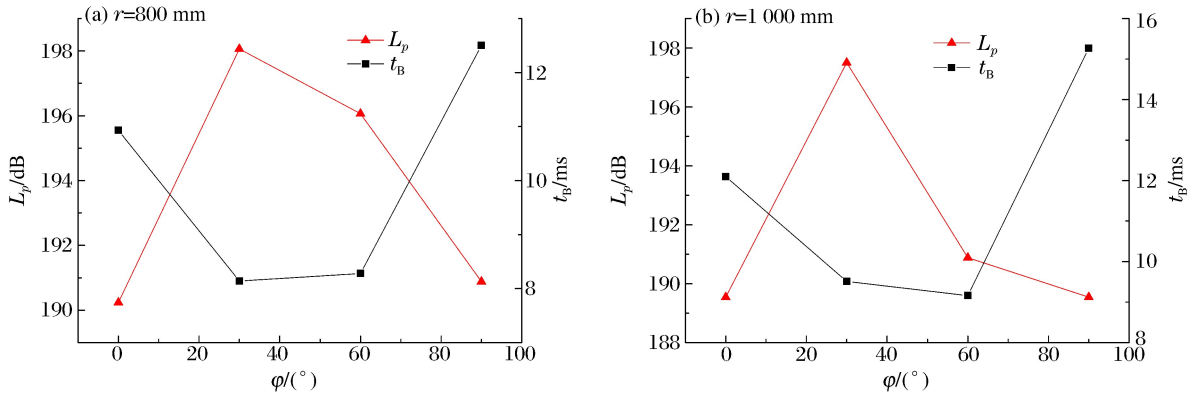

图 8 峰值声压级的指向性和 B 持续时间随方位角的变化曲线

Fig. 8 Curves of detonation noise directivity and B time duration varying with different angles

随着距离 r 的增大，B 持续时间增加。

由上述分析可以看出，B 持续时间与噪声峰值具有一定的关系，随着传播距离的增加，峰值逐渐减小，B 持续时间增加。图 9 为 800 和 1 000 mm 处 0°方向上压力变化曲线，峰值为 84、60 kPa。可以看出，峰值的衰减速度较快，但在小压力扰动区域，衰减速度较慢。3 个流场之间的交汇作用较复杂，产生的波系也相对复杂。声场也并不是单管之间的简单叠加，在某些区域存在一定程度的抵消，某些区域存在一定程度的叠加[10]，因此会出现峰值压力减小，B 持续时间增大的现象。

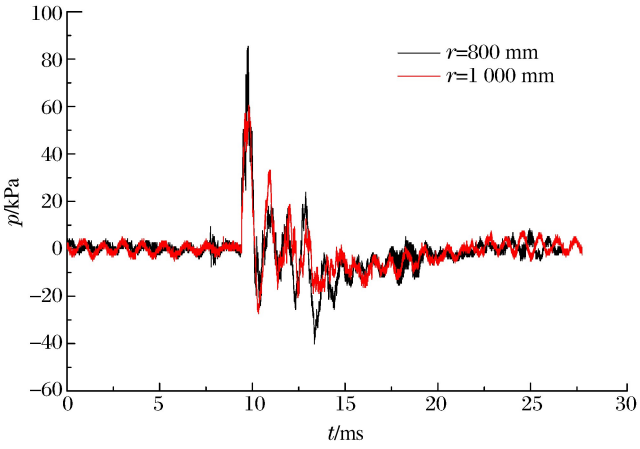

图 9 800、1 000 mm 处压力波形对比

Fig. 9 Curves of detonation noise amplitudes varying with time at 800, 1 000 mm

3 结 论

通过对三爆轰管脉冲爆轰发动机同时起爆工况下爆轰噪声的研究，得出以下结论：

(1)爆轰噪声随着传播距离的增加，迅速衰减，在 3 倍“名义管径”距离之前，按照距离 r 的负 3 次方的规律衰减，近场与远场的参考半径在 3 倍“名义管径”处，3 倍“名义管径”之后一定距离处，按照距离 r 的负一次方的规律衰减。

(2)爆轰噪声辐射具有明显的指向性，峰值均出现在 30°方向。

(3)在相同的距离 r 处，随着方位角 φ 的增大，A 持续时间的下降规律近似线性的。在同一方位角情况下，不同距离 r 处，A 持续时间随着 r 的增大而增加。

(4)B 持续时间与声压峰值的大小成反比关系，并且随着距离 r 的增大，B 持续时间增加。在不同的方位角上，峰值声压越大，B 持续时间越小。

参考文献：

[1] Morozumi T, Sakamoro R, Kashiwazaki T, et al. Study on a rotary-valved four-cylinder pulse detonation rocket: Thrust measurement by ground test[R]. AIAA 2014-1317, 2014.

[2] 袁成，范玮，彭畅新，等. 六管吸气式脉冲爆震发动机试验[J]. 航空动力学报，2011，26(9)：1981-1985.
Yuan Cheng, Fan Wei, Peng Changxin, et al. Experimental investigation on a six-tube air-breathing pulse detonation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 1981-1985.

[3] Shaw L, Harris K, Schauer F, et al. Acoustic measurements for a pulse detonation engine[R]. AIAA 2005-2952, 2005.

[4] Glaser A J, Caldwell N, Gutmark E. A fundamental study on the acoustic behavior of pulse detonation engines [R]. AIAA 2007-444, 2007.

[5] 郑龙席，严传俊，范玮，等. 脉冲爆轰发动机模型机噪声辐射特性初探[J]. 振动、测试与诊断，2006，26(3)：176-180.
Zheng Longxi, Yan Chuanjun, Fan Wei, et al. Preliminary exploration on noise radiation characteristics of pulse detonation engine model[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2006, 26(3): 176-180.

[6] 许桂阳，翁春生，李宁. 喷管对脉冲爆轰发动机爆轰噪声影响的实验研究[J]. 兵工学报，2014，35(11)：1800-1804.
Xu Guiyang, Weng Chunsheng, Li Ning. Study on the noise characteristic of pulse detonation engine with nozzle [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(11): 1800-1804.

[7] Caldwell N, Glaser A, Gutmark E. Acoustic measurements of multiple pulse detonation engines firing out of phase [R]. AIAA 2007-445, 2007.

[8] Eerden F V D, Berg F V D. The acoustic source strength of high-energy blast waves: Combining measurements and a non-linear model[C]. 20th International Congress on Acoustics, 2010: 23-27.

[9] 王秉义. 枪炮噪声与爆炸声的特性和防治[M]. 北京：国防工业出版社，2001：31-59.

[10] 胡声超，鲍福廷，赵瑜. 多喷管射流气动声学特性的数值研究[J]. 推进技术，2012，33(3)：430-435.
Hu Shengchao, Bao Futing, Zhao Yu. Numerical simulation for multi-jet aeroacoustics[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(3): 430-435.

Experimental study of acoustic behavior of three-tube PDE system in near-field

Huang Xiaolong, Weng Chunsheng, Li Ning, Xu Guiyang

(*National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: In the present work, a testing system consisting of three detonation tubes was designed in a regular triangle to investigate the noise characteristics of a three-tube PDE system and their formation mechanism. The distance between each tube and the central axis is 200 mm. The directivity of acoustic emissions is measured using a circular array of four transducers (0°, 30°, 60°, and 90°) at various radial distances. Results show that all the max peak pressures appear in the directivity of 30°. The referential radius of the detonation noise is three times that of the "nominal tube diameter". The duration of A time decreases almost linearly along with the increase of r (the distance to the nominal "central point" of the three detonation tubes), and also decreases with the increase of the angle. The duration of B time is inversely proportional to the noise amplitude, and increases with the increase of the axial distance. At different angles, the greater the peak pressure, the smaller the duration of B time.

Key words: mechanics of explosion; detonation noise; reference radius; pulse detonation engine; directivity; time of duration

（责任编辑　曾月蓉）