

DOI: 10.7652/xjtuxb201804005

应用激波降噪机理的炮口消声器设计及试验验证

闫艳艳¹, 路宽¹, 王峰², 高鑫², 吴九汇¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西北机电工程研究所, 712000, 西安)

摘要: 针对火炮的膛口噪声问题,提出了一种基于激波降噪机理的消声方法,利用超声速气流经过激波后总压降低、可用能量降低的特点来降低膛口噪声声功率,进而设计了一种膛口消声器,通过扩张段增加马赫数、收缩段产生激波可以不断降低火药燃气的可用能量,达到降低膛口噪声的目的。建立消声器的数值计算模型及仿真分析,研究了消声器内部的流体流动情况及激波形成过程,以炮口及消声器出口的总压降低情况分析了消声器的降噪效果,并设置外部监测点检测外部压力场的变化,最后通过试验验证消声器降噪效果。结果表明:基于激波降噪机理设计的消声器可降低膛口噪声 19 dB 左右,且试验降噪量与采用总压降低量进行分析的降噪效果基本一致,证明了应用激波特性降低噪声以及采用总压降低量分析消声器降噪效果的可行性。研究内容为消声器设计提供了一种新思路,为炮口噪声的降低提供了理论及工程指导。

关键词: 火炮;激波;炮口消声器;降噪

中图分类号: TB535 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)04-0031-09

Design and Experimental Verification of Muzzle Silencer Following Mechanism of Noise Reduction by Shock Wave

YAN Yanyan¹, LU Kuan¹, WANG Feng², GAO Xin², WU Jiuhui¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an 712000, China)

Abstract: In view of the artillery muzzle noise, a noise elimination scheme is proposed based on shock wave characteristics to reduce muzzle noise acoustical power by virtue of lowered total pressure and mechanical energy of supersonic airflow after passing through shock wave. Then, a new muzzle silencer is designed. By heightening Mach number in divergent section of airflow and forming shock wave in contracted section, the mechanical energy of gunpowder gas is weakened to accomplish the reduction of muzzle noise. The fluid flow condition and the formation of shock waves inside the muffler is discussed via establishment of a numerical model and simulation of the new muffler, and the noise reduction effect of the silencer is analyzed according to the reduction degree of total pressure in muzzle and muffler exhaust plane. An external monitoring point is set up to detect the change of the external pressure field. Experiments verify the noise reduction effect of the new muffler and show that the muzzle silencer designed following the mechanism of noise reduction by shock wave can reduce muzzle noise by about 19 dB, which coincides with the theoretic result by the total pressure reduction scheme. Thus, reducing muzzle noise by shock wave and adopting the reduction degree of total pressure to analyze the noise reduction effect of a

收稿日期: 2017-06-21。 作者简介: 闫艳艳(1989—),女,硕士生;吴九汇(通信作者),男,教授,博士生导师。

网络出版时间: 2017-11-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20171119.1715.002.html>

silencer are feasible.

Keywords: artillery; shock wave; muzzle silencer; noise reduction

火炮在现代战争中拥有着不可替代的地位,随着现代高科技的迅速发展和生产工艺的不断改进,未来的火炮在精准度、射程、威力、机动性方面都将有显著提高^[1]。但同时,火炮在发射时产生的强烈膛口噪声产生了严重的负面影响,不仅威胁到射手及附近战士的身心健康,同时发射时的强大声源也容易将我方阵地及火力配置暴露,不适应现代战场的声隐身要求^[2-3]。因此,降低火炮炮口噪声成为相关人员需要解决的迫切问题之一。

文献[4-6]对膛口噪声的特性及膛口噪声声功率做了研究,发现膛口噪声的声功率近似与膛口火药气流的功率成正比,降低膛口噪声的关键在于降低膛口压力、膛口气流速度和面积。在已有的对于膛口噪声的解决方法中,出现了多种用于枪械类消声器上的消声原理^[7-10],大致可以归为3类。

(1)抗性消声原理,包括膨胀消声、多腔隔音消声、膨胀反射消声等,采用在消声器内部设置膨胀腔、隔板等装置,使火药燃气因膨胀、受阻或反射等降低气体的出口压力,从而达到降低噪声的目的^[11-13]。文献[14]对小口径滑膛炮的噪声特性进行了分析,并依据抗性消声原理设计了一种扩张式串联共振式的消声器结构。此类消声器用于枪械类武器上时有较好的消声效果,但由于相对尺寸及质量都较大,无法直接应用于火炮的膛口噪声降低。

(2)阻性消声原理,如吸热与损耗消声,在消声器内部装置吸声或吸热材料吸收火药燃气的热量,从而降低气体出口压力达到降噪目的。由于吸声或吸热材料导致升温快且不容易降温,阻性消声器不适用于连发,对于高温高压的火炮膛口噪声情况也不适用。

(3)阻抗复合型消声原理,如涡流消声、小孔扩散消声、密闭及枪管开孔消声原理等,使火药燃气因受阻隔而产生压力降低,同时使燃气产生涡流、湍流或设置吸声吸热材料等降低燃气能量,降低膛口噪声^[15]。

文献[16]设计了一种阻抗复合型的消声器,采用了多腔共振吸声与阻性损耗吸声的消声原理相结合的方法,并增加了穿孔板结构以增大消声量。文献[17]设计了一种用于射击枪械上的消声器,采用了小孔扩散原理及消声碗结构。此类消声器结合了抗性与阻性消声的优点,但同时也会出现尺寸及质

量较大以及热量无法快速传递出去的弱点,因而无法应用于火炮膛口降噪。

鉴于以上分析,火炮炮口噪声的降低是目前需要迫切解决的问题之一,而现有的消声原理及消声器无法直接应用于火炮降噪,故本文设计了一种基于激波理论的火炮膛口消声器。当流体流经激波后,流体参数产生突跃变化,总压有很大的降低,代表流体可用能量的降低。应用流体经过激波后总压能量降低的特性,设计合理的内部结构,使火药燃气的出口能量降低,从而达到降低膛口噪声的目的。该消声方法的本质在于通过使燃气在消声器内部产生激波,降低火药能量。消声器性能主要取决于内部产生的激波强度以及气流折角的大小,因而可使消声器尺寸及重量较小,便于应用。

1 激波降噪机理研究

当超声速气流流经连续内折微小角度的壁面时,由于管道截面的突然变小,流体受到压缩,此时在每个折角处产生一道微弱压缩波,压缩波相交处则形成一道强波。当将连续内折的微小角度变为一个大角度时,无穷多道弱压缩波在折角处叠加成一道强压缩波,即为斜激波,如图1所示。这道斜激波的产生是由于折角的存在强迫气流改变了流动方向,故称为方向决定的激波。 θ 称为气流折角, β 称为激波斜角。

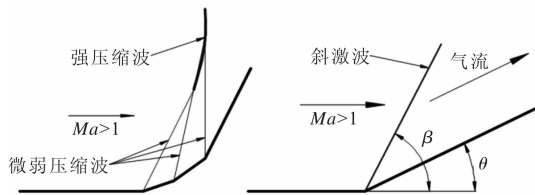


图1 斜激波产生示意图

设波前气流参数为 Ma_1 、 p_1 、 T_1 、 p_{01} , 气流折角为 θ , 波后气流参数为 Ma_2 、 p_2 、 T_2 、 p_{02} 。激波强度以 P 表示,指通过激波的压强增量与波前压强之比,即

$$P = \frac{p_2 - p_1}{p_1} = \frac{p_2}{p_1} - 1 \quad (1)$$

斜激波中

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} Ma_1^2 \sin^2 \beta - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \quad (2)$$

即,斜激波的激波强度与 $Ma_1^2 \sin^2 \beta$ 成正比,激波前后气流参数变化的关系式分别为

$$\tan \theta = \frac{Ma_1^2 \sin^2 \beta - 1}{[Ma_1^2 ((\gamma + 1)/2 - \sin^2 \beta) + 1] \tan \beta} \quad (3)$$

$$Ma_2^2 = \frac{Ma_1^2 \sin^2 \beta + 2/(\gamma - 1)}{(2\gamma/(\gamma - 1))Ma_1^2 \sin^2 \beta - 1} + \frac{(2/(\gamma - 1))Ma_1^2 \cos^2 \beta}{Ma_1^2 \sin^2 \beta + 2/(\gamma - 1)} \quad (4)$$

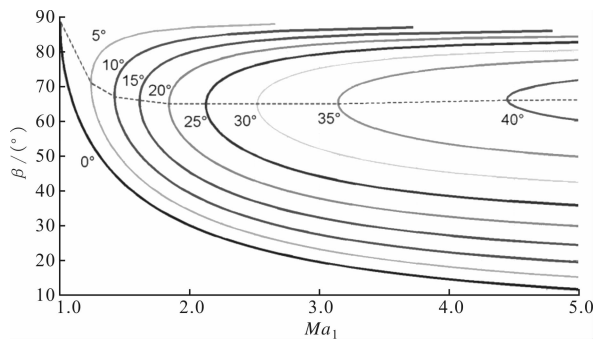
$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} Ma_1^2 \sin^2 \beta - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right)^{-\frac{1}{\gamma - 1}}$$

$$\left[\frac{(\gamma + 1)Ma_1^2 \sin^2 \beta}{(\gamma - 1)Ma_1^2 \sin^2 \beta + 2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (5)$$

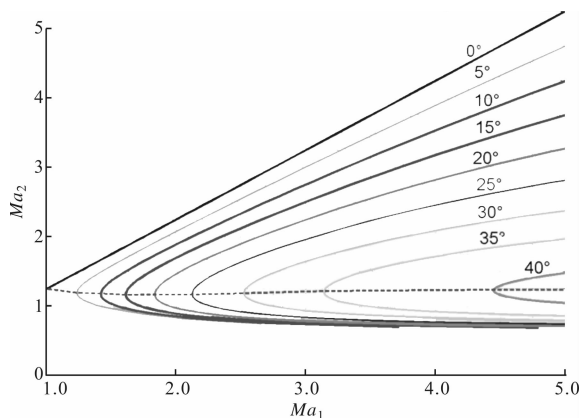
图2为波后气流参数与气流折角和波前马赫数的关系图,从中可以看出如下规律。

(1)当气流折角一定时,激波斜角 β 随 Ma_1 的增加而降低, Ma_2 随 Ma_1 的增加而增加,总压比随 Ma_1 的增加而减小。即若固定气流折角 θ ,则 Ma_1 越大,激波斜角 β 越大,总压比越小,对应的激波强度和总压损失就越大。

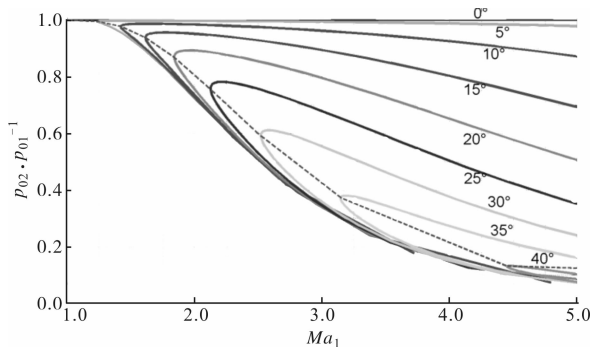
(2)若来流马赫数 Ma_1 不变,则激波斜角 β 随气流折角 θ 的增加而增加,波后马赫数 Ma_2 随气流折角 θ 的增加而减小,总压比随气流折角 θ 的增加而降低。即若固定波前马赫数 Ma_1 ,当气流折角 θ



(a) 激波斜角与气流折角 θ 、波前马赫数 Ma_1 的关系



(b) 波后马赫数与气流折角 θ 、波前马赫数 Ma_1 的关系



(c) 总压比与气流折角 θ 、波前马赫数 Ma_1 的关系

图2 波后气流参数与气流折角 θ 、波前马赫数 Ma_1 的关系

越大时,激波斜角 β 越大,总压比越小,对应的激波强度和总压损失就越大。

故若增大气流折角 θ 和波前马赫数 Ma_1 ,将会使激波强度增加,总压损失增加。

由空气动力学知识可知,总压是流体等熵地达到滞止状态时对应的压力。总压的高低代表了气流所具有的机械能的大小,表征了气流可用能量的大小,总压越低,气流的可用能量越小。

从图2c总压比曲线可以看出,经过激波后气流的总压必定降低,对应气流可用能量降低。对于高温高速高压的火炮膛口流场产生的膛口噪声来说,如果气流的可用能量得到降低,则膛口噪声功率必定降低,从而膛口噪声降低。

由此,本文得到一种降低火炮膛口噪声的激波降噪机理,即通过使火药燃气流经激波,降低火药燃气总压,从而降低火药燃气的可用能量,达到降低膛口噪声功率的效果,降低膛口噪声。

2 应用激波降噪机理的炮口消声器设计与分析

2.1 炮口消声器设计

膛口噪声的声功率近似地与膛口火药气流的功率成正比,降低膛口噪声声压级必须降低火药气流的出口功率,即火药燃气的出口能量。考虑到激波的性质,即流体通过激波后总压降低,可用能量降低,设计一种基于激波特性的消声器,通过在消声器内部产生激波从而降低气流能量,进而降低膛口噪声功率。

由激波的产生及激波前后气流参数的变化可知,激波的产生需要两个必要条件:一是来流为超声速气流,即 $Ma_1 > 1$;二是需要有一定的内折角度使气流受到压缩从而产生激波。同时,激波的强度、总压损失与气流折角 θ 和波前马赫数 Ma_1 密切相关,

θ 和 Ma_1 越大,激波越强,总压损失越多。

由此得到消声器设计要点:一是需要设置一段膨胀腔,使火药燃气加速,增大波前马赫数 Ma_1 ;二是需要设置一定的气流折角 θ ,即需要设置一段收缩段,从而使火药燃气压缩产生激波;三是设置成多腔结构,从而使火药燃气产生数层激波,总压层层降低,加大总压损失。

根据上述分析,设计消声器如图 3 所示,消声器中的扩张腔使火药燃气膨胀加速,达到较大的马赫数。隔板使燃气流动产生阻隔,产生收缩管道,从而在入口处形成激波。多腔结构使激波数量增加,加大总压损失。由空气动力学可知^[18],正激波是相同马赫数的激波中强度最大的,因而可以降低更多的流体能量,因此考虑将隔板角度设置为 90° 使流体尽可能的产生正激波。考虑到实际应用与燃气的压力逐渐降低,消声器内部腔体容量逐步降低,总长度不超过 1 m。

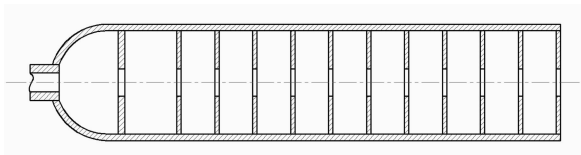


图 3 炮口消声器设计图

2.2 炮口消声器分析

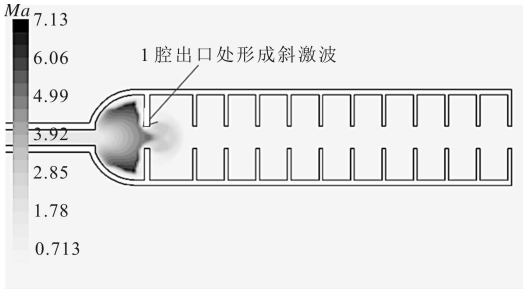
为验证应用激波特性的消声器的降噪效果,本文对该模型进行了数值仿真,采用 CFD 软件模拟消声器内部的流体流动情况、总压变化情况以及消声器外部压力场的变化等,并与不装消声器时的光膛口数据进行对比分析。

消声器为轴对称结构,采用 Fluent 二维轴对称模型进行计算,利用 Gambit 软件建立模型及网格划分,数值计算模型如图 4 所示,其中 A 为炮管内部流场区域,B 为消声器内部流场区域,C 为外部流场区域,忽略弹丸和膛口装置。本文采用有限体积法,时间推进采用二阶龙格-库塔法,对流项选用能在较大马赫数下提高激波等间断面捕捉效率的 AUSM 格式求解。为了缩短计算时间,采用单方程 S-A 湍流模型。膛内高温高压火药燃气采用局部初

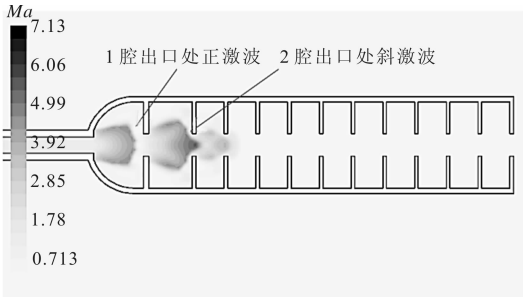
始流场,并采用压力出口边界条件。

对该炮口消声器的数值分析主要分 3 个方面:消声器内部激波的形成情况,消声器内部总压的变化情况,以及消声器外部压力场的变化情况。

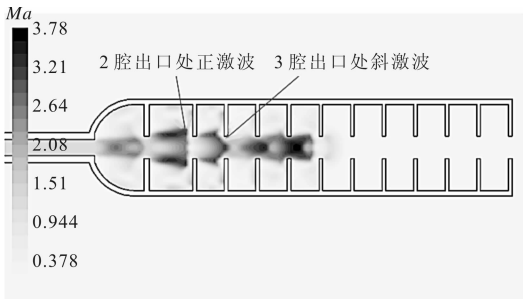
2.2.1 消声器内部激波的形成过程 激波的形成及强度与流体马赫数密切相关,故不同时刻消声器内部流场的马赫数如图 5 所示,观察激波在消声器内部的形成过程。



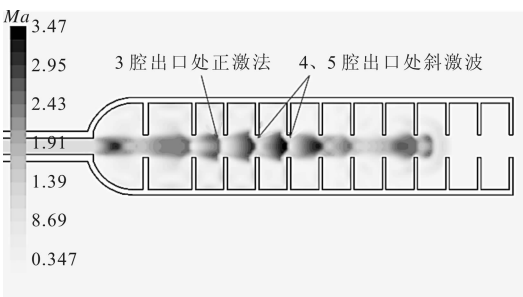
(a)0.1 ms



(b)0.2 ms



(c)0.5 ms



(d)0.9 ms

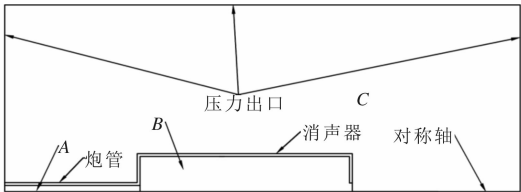


图 4 炮口消声器的数值计算模型

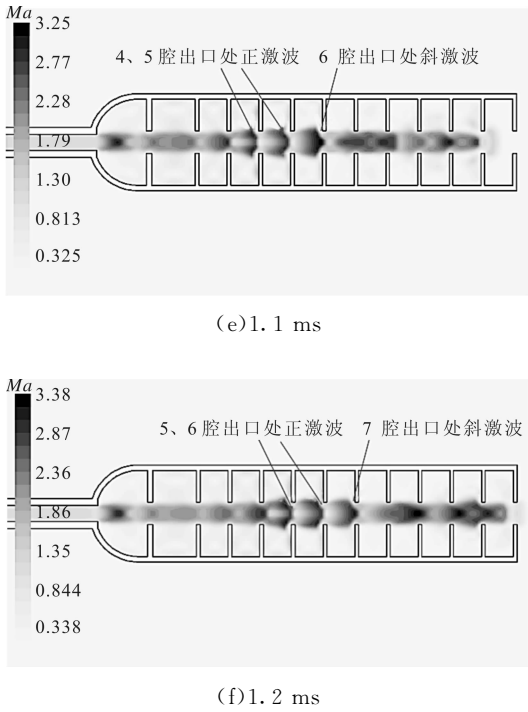


图 5 不同时刻消声器内部马赫数云图

由图 5 可以看出:

(1) 激波主要形成于消声器内部每个腔的出口处,且前半部分激波强度大,后半部分由于能量的逐渐损失,激波强度逐渐变弱;

(2) 流体在腔内膨胀加速形成超声速气流,受到隔板的阻挡压缩在消音腔的出口处形成斜激波,流体反射压缩形成正激波,最后激波消失。

2.2.2 消声器内部总压的变化情况 由于流体经过激波后总压的降低代表流体可用能量的降低,故本文以总压来衡量消声器对流体能量的降低效果,进而评估其降低噪声声压级的效果。

激波形成时刻轴线总压如图 6 所示。从图 6 可以看出,0.1 ms 时 1 腔出口压力较高,0.2 ms 时 2 腔出口压力已经有所降低,0.5 ms 时 2 腔出口形成正激波,压力持续降低,0.9 ms、1.1 ms 和 1.2 ms 时 3、4、5、6 各腔的压力呈阶梯型下降趋势。图 6 表明了流体经过各腔激波后,轴线压力持续降低。

光膛口时炮口总压和带消声器时消声器出口总压随时间的变化如图 7 所示。由图 7 可以看出,增加消声器后,出口总压明显降低,最大值降低到原始值的 14.94%,按照声压级公式

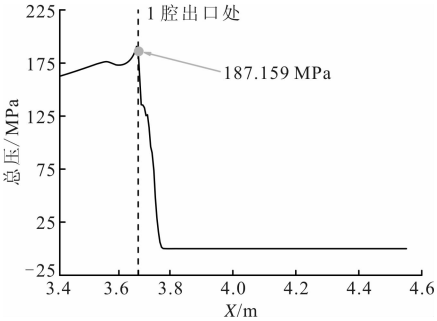
$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \tag{6}$$

则,声压级降低量可表示为

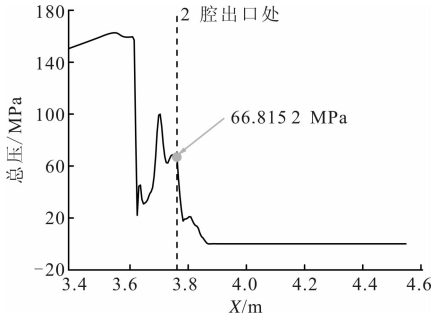
$$\Delta L_p = 20 \lg \frac{p_g}{p_x} \tag{7}$$

式中: p_0 为基准声压; p_g 为光膛口炮口压力; p_x 为消声器出口压力。经计算,炮口处噪声声压级最大可降低 16.5 dB 左右。由大气中的声衰减知识可知,当室外大气条件一样的情况下,在同样的距离上声衰减的情况是一样的,大约 16.5 dB 左右。

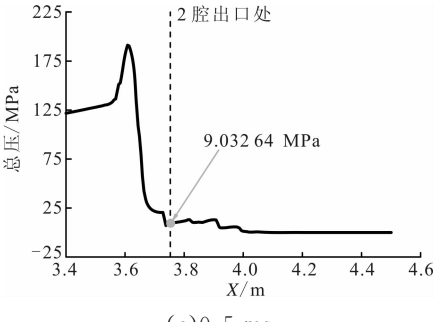
故从总压层面来看,基于激波特性设计的炮口消声器大约可降低膛口噪声声压级 16.5 dB。



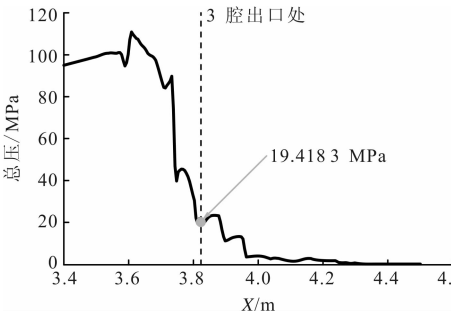
(a) 0.1 ms



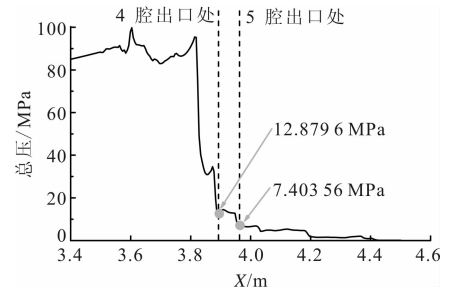
(b) 0.2 ms



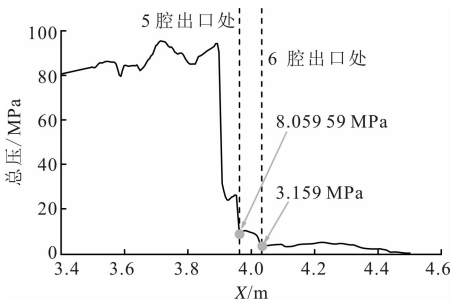
(c) 0.5 ms



(d) 0.9 ms



(e)1.1 ms



(f)1.2 ms

图 6 不同时刻消声器内部轴线总压图

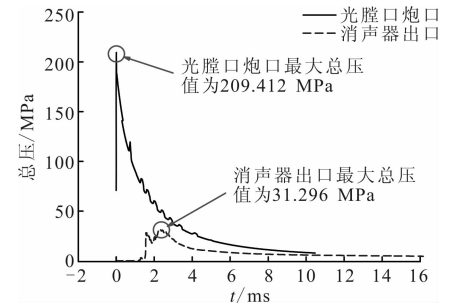


图 7 光膛口炮口和消声器出口总压对比

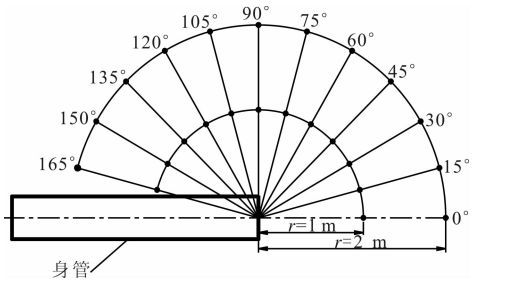
2.2.3 消声器外部压力场变化情况 为进一步探究消声器对外部压力场的影响情况,对膛口周围的多个点进行检测,监测点位置如图 8 所示。

为便于观察,将检测点曲线的总压最大值列表并绘图,如表 1、表 2、图 9 所示。

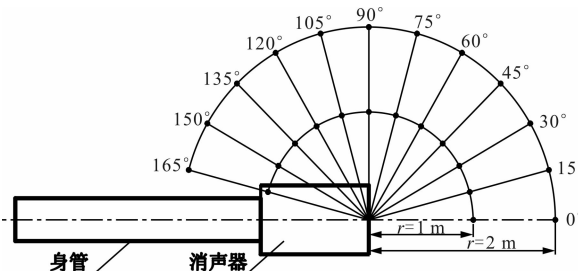
从表 1、表 2 及图 9 可以看出:

表 1 $r=1\text{ m}$ 处各个监测点最大总压

角度/(°)	总压/MPa		角度/(°)	总压/MPa	
	光膛口	消声器		光膛口	消声器
0	248.507	317.501	90	157.262	110.887
15	420.086	248.682	105	131.655	106.419
30	318.361	193.754	120	120.920	104.104
45	322.378	160.886	135	113.081	103.608
60	212.795	127.552	150	109.192	104.195
75	168.787	114.683	165	113.702	104.697



(a)光膛口



(b)带消声器

图 8 光膛口与带消声器时监测点位置示意图

表 2 $r=2\text{ m}$ 处各个监测点最大总压

角度/(°)	总压/MPa		角度/(°)	总压/MPa	
	光膛口	消声器		光膛口	消声器
0	292.304	220.608	90	134.810	106.884
15	160.710	127.164	105	114.694	104.369
30	155.229	122.602	120	111.461	102.130
45	157.717	118.061	135	107.524	102.365
60	144.875	114.513	150	102.258	102.537
75	126.196	110.220	165	104.647	103.042

(1)增加消声器后,监测点的最大总压明显降低,最大处降低到原始值的 59.2%。即消声器对出口后的能量存在明显的降低效果;

(2)未加消声器时, $r=1\text{ m}$ 处的总压主要集中在 $15^\circ\sim 45^\circ$ 的范围角内,增加消声器后,缩小在了 30° 以内,即消声器降低了出口激波瓶系的直径。

(3) $r=1\text{ m}$ 、 0° 方位角处的总压增加,是由于消声器压缩了出口激波瓶系的直径使总压集中在 0° 方位附近,导致该方位总压最高。

从以上对消声器 3 方面的仿真分析可以得到:

(1)在消声器内部消音腔的出口处形成了较强的激波,前半段激波较强,后半段激波较弱;

(2)增加消声器后,炮口最大总压降低到原始值的 14.94%,对应声压级峰值可降低 16.5 dB 左右;

(3)外部压力场总压变化明显,最大处降低到原始值的 59.2%。

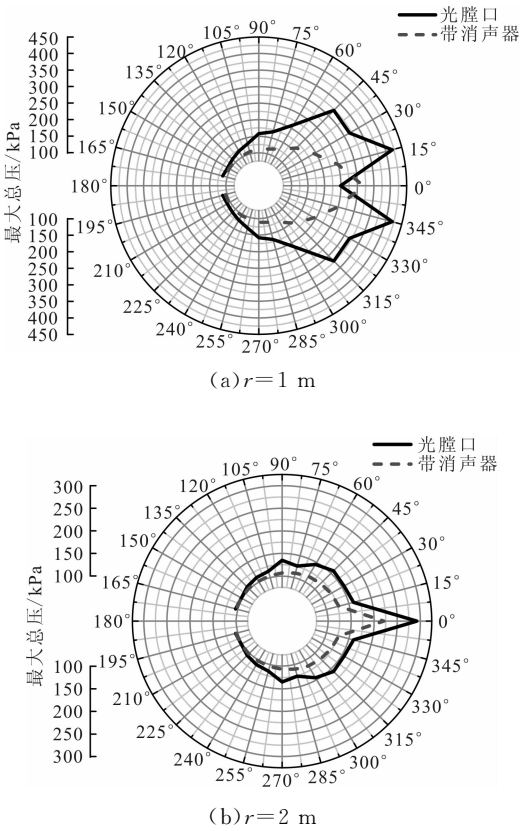


图 9 光膛口与带消声器时各监测点最大总压对比

3 炮口消声器降噪效果试验验证

为验证采用激波降噪机理的膛口消声器的降噪效果,本文进行了一次试验验证。试验分为两部分:一是在未加任何膛口装置的情况下进行火炮发射试验,在监测点检测声压级,得到有效声压;二是增加消声器后进行火炮发射试验,同样检测声压级得到有效声压,对比声压级降低得到消声器的降噪效果。

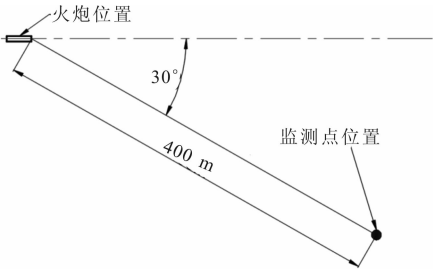


图 10 试验监测点位置示意图

试验在火炮前方 1 m、30°方位角处和火炮前方 400 m、30°方位角处分别检测噪声声压级。由于炮口周围声压级较高,导致火炮前方 1 m、30°方位角处的测试数据超出设备量程而无法使用,该检测位置失效。最终对比试验的监测点采用距离炮口较远的火炮前方 400 m、30°方位角处,如图 10 所示。

3.1 试验准备

试验消声器采用炮钢材料,先加工单腔然后焊接成型,并通过螺纹连接、销连接等装配在炮管上。试验选择在晴朗无风的天气下进行,室外温度为 24℃左右。

试验硬件采用泛华 PXI-9106/3031 平台,NI 公司 PXI-4498 动态信号采集卡,采样频率设置为 102.4 kHz,最大声压等级参数设置为 135 dB。为保证传感器测试准确性,采用两支 PCB 麦克风,两个通道同时测试噪声数据,麦克风传感器方向指向炮口。

试验软件采用 LabVIEW2013 平台,对测得的传感器振动数据进行输出显示与转换,得到声压级数据。

3.2 试验结果

现场试验共测试 6 次,3 次光膛口数据,3 次带消声器数据。在现场试验时,利用测速雷达对弹丸的初始速度进行测量,结果显示消声器对弹丸初速无影响。由内弹道理论可知,增加消声器后并不影响火炮的有效射程和杀伤力。

试验测得的声压幅值曲线如图 11、图 12 所示。6 组试验数据中,通道 1、2 的波形图均基本吻合,测试一致性较好。

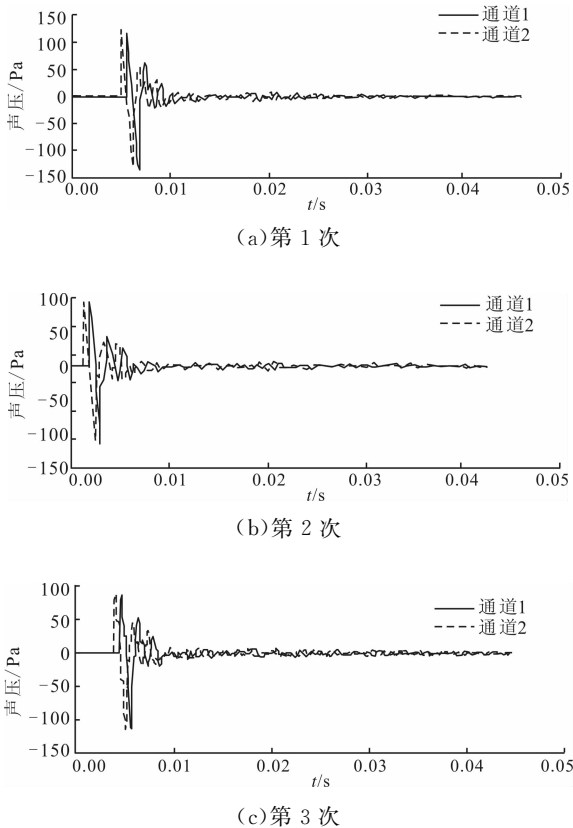


图 11 光膛口时 3 次测试的声压幅值曲线

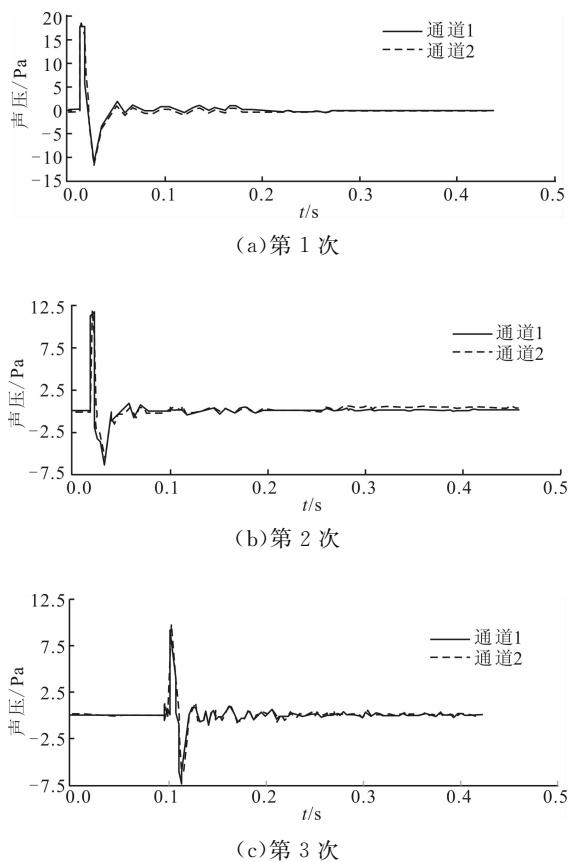


图12 带消声器时3次测试的声压幅值曲线

6次测试的声压级数据如图13所示,光膛口时测试的声压级均值在116.5 dB,带消声器测试时的声压级均值在96.9 dB。

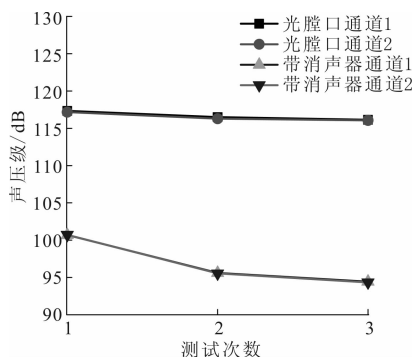


图13 6次测试的监测点声压级曲线

经典的声衰减公式为

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho c^3} \left[\frac{4}{3}\eta + (\gamma - 1) \frac{\partial}{c_p} \right] \quad (8)$$

式中: α 为由于媒质中黏滞性和热传导性引起的经典吸收; ω 为角频率; ρ 为密度; c 为声速; η 为黏滞系数; γ 为比热比; ∂ 为热导率; c_p 为比定压热容。由式(8)可知,当室外大气条件一样的情况下,在同样的距离上相同频率的声衰减情况也是一样的^[19]。因此,理论上400 m处的声压级降低在16.5 dB左右。

从测试结果可以看到,消声器的降噪效果明显,降噪量在15.5~22.9 dB之间,均值降噪量为19.6 dB。在第1发弹进行试验时,靶场测试区域内有阵风,文献[20]表明,环境的本底噪声会随着风速的增加而升高,且当风速大于5 m/s时,会比无风时高10 dB以上,因此增加消声器后第1发弹的声压级与后两发相比出现了5 dB左右的偏差。为了保证本试验的严谨性,我们没有对试验结果进行修正。当试验用3发弹全部结束时,现场火炮专家根据测试结果,认为激波消声器的降噪效果达到了预期。

该消声器的理论噪声降低量为16.5 dB,与试验的实际降噪均值相差3 dB左右,更接近实际降噪量的下限。这是由于在理论分析中采用的是总压曲线中的最大值进行单点分析,从总压对比曲线(见图7)上可以看出,加消声器时的炮口总压低于光膛口时的数据,即带消声器后每一点的总压均有所降低,从而导致实际测试的降噪量大于理论单点分析的降噪量。

4 结 论

通过对激波理论、激波降噪机理以及消声器的仿真、试验验证的论述,本文得到以下结论。

(1)本文针对火炮噪声较高的问题,在分析现有消声方法的基础上,提出了一种基于激波降噪机理的消声方法,并应用该方法设计了一种适用于火炮降噪的新型炮口消声器。

(2)通过仿真分析,该消声器的理论降噪量在16.5 dB左右。对所设计的消声器进行了试验验证,试验降噪量在15.5~22.9 dB之间,均值为19.6 dB,理论分析降噪量为消声器可降低噪声的下限,证明了本文提出的消声方法及消声器的适用性。

(3)本文采用的是激波理论及总压降低量的方法,对所设计消声器的理论降噪效果进行分析,而试验降噪量与理论分析降噪量基本一致,证明了采用激波理论降低膛口噪声以及采用总压进行降噪量分析的可行性,为消声器设计提供了理论及工程指导。

参考文献:

- [1] 朱森元. 小口径速射火炮武器系统发展展望[J]. 兵工自动化, 2008, 27(6): 1-4.
ZHU Senyuan. Development forecasting for small caliber rapid firing artillery system[J]. Ordnance Industry Automation, 2008, 27(6): 1-4.
- [2] 宋崇范. 火炮发射时噪声和有害气体对人体的影响与

- 防护[J]. 解放军医学情报, 1996(2): 86-88.
- SONG Chongfan. Influence and protection of noise and harmful gas on human body during artillery launching [J]. Medical Information of PLA, 1996(2): 86-88.
- [3] 宋浩元, 刘国瑞, 朱广智, 等. 火炮噪声对炮手听力损伤的流行病学调查报告[J]. 西南国防医药, 1993(3): 311-313.
- SONG Haoyuan, LIU Guorui, ZHU Guangzhi. Epidemiological investigation of hearing impairment of gunners caused by cannon noise [J]. Medical Journal of National Defending Forces in Southwest China, 1993(3): 311-313.
- [4] 王秉义. 膛口噪声特性[J]. 噪声与振动控制, 1983(6): 20-24.
- WANG Bingyi. Muzzle noise characteristics [J]. Noise and Vibration Control, 1983(6): 20-24.
- [5] 王秉义. 枪口噪声声功率与膛口参数的关系[J]. 兵工学报, 1989(1): 51-54.
- WANG Bingyi. The relationship between muzzle noise power and muzzle parameters [J]. Acta Armamentarii, 1989(1): 51-54.
- [6] 路宽, 赵俊利, 雷红霞, 等. 高温高压大口径火炮膛口噪声场分布特性研究[J]. 河北农机, 2014(1): 59-60.
- LU Kuan, ZHAO Junli, LEI Hongxia. Study on muzzle noise distribution characteristics of high temperature and high pressure large caliber gun [J]. Hebei Agricultural Machinery, 2014(1): 59-60.
- [7] 王秉义. 膛口装置之三: 消声器篇[J]. 轻兵器, 2002(11): 45-47.
- WANG Bingyi. Third chapter of muzzle device: muffler [J]. Small Arms, 2002(11): 4-47.
- [8] 任雨. 消声器的工作原理及结构[J]. 轻兵器, 2002(7): 47-48.
- REN Yu. The working principle and structure of muffler [J]. Small Arms, 2002(7): 47-48.
- [9] 陈心中, 徐润君. 微声枪械的消声原理[J]. 物理教师, 2003(8): 43-44.
- CHEN Xinzhong, XU Runjun. Noise elimination principle of micro acoustic weapon [J]. Physics Teacher, 2003(8): 43-44.
- [10] 彭茂祥. 轻武器消声器[J]. 现代兵器, 1988(11): 15-18.
- PENG Maoxiang. Silencer for small arms [J]. Modern Armament, 1988(11): 15-18.
- [11] 王秉义, 曾永珠. 膛口消声器[J]. 噪声与振动控制, 1984(3): 15-17.
- WANG Bingyi, ZENG Yongzhu. Muzzle silencer [J]. Noise and Vibration Control, 1984(3): 15-17.
- [12] 汪冰, 王永娟, 徐诚. 某小口径枪弹膛口噪声抑制作用实验研究[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(2): 160-163.
- WANG Bing, WANG Yongjuan, XU Cheng. Experimental study on muzzle noise suppression of minor-caliber bullet [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(2): 160-163.
- [13] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京大学出版社, 2012: 161-166.
- [14] 熊艳辉. 某小口径滑膛炮消声器的结构分析与设计[D]. 南京理工大学, 2007: 25-50.
- [15] 崔正翔. 膛口噪声机理与膛口消声器[J]. 噪声与振动控制, 1991(1): 17-20.
- CUI Zhengxiang. Muzzle noise mechanism and muzzle silencer [J]. Noise and Vibration Control, 1991(1): 17-20.
- [16] 李伟龙, 王振宏, 孙丰. 阻抗复合型消音装置的设计[J]. 机械, 2013, 40(10): 166-167.
- LI Weilong, WANG Zhenhong, SUN Feng. The design of impedance composite muffler [J]. Mechanics, 2013, 40(10): 166-167.
- [17] 杜呈信, 朱庆川, 季孝平, 等. 一种带有消声器的射击枪械: CN102735099A [P]. 2012-10-17.
- [18] 陆志良. 空气动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 93-103.
- [19] 马大猷. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 122-130.
- [20] 徐辉, 程明昆, 宋福祥, 等. 风噪声对噪声自动监测数据的影响分析[J]. 环境科技, 2015(4): 46-49.
- XU Hui, CHENG Mingkun, SONG Fuxiang, et al. Analysis of influence on monitoring data of noise automatic monitoring system by wind induced noise [J]. Environmental Science and Technology, 2015(4): 46-49.

(编辑 杜秀杰)