

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0108

不同海拔高度炮口冲击波动态演化 特性数值模拟研究*

康越¹, 马天¹, 王俊龙^{1,3}, 张逸之², 张文博⁴, 韩笑¹, 栗志杰⁵

(1. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100010;

2. 清华大学航天航空学院, 北京 100084;

3. 湘潭大学物理与光电工程学院, 湖南 湘潭 411105;

4. 大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

5. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 基于欧拉-拉格朗日耦合法 (Euler-Lagrangian coupling method, CEL) 建立了“火药燃气-炮管/炮弹-空气”流固耦合模型, 分别对低海拔 (海拔高度 0 m)、中海拔 (海拔高度 1000 m)、亚高海拔 (海拔高度 3000 m) 和高海拔 (海拔高度 5000 m) 环境下大口径火炮的发射过程进行了数值模拟, 研究了海拔高度对炮口冲击波动态演化过程的影响机制。模拟结果表明, 大口径火炮炮口冲击波动态演化过程具有显著的方向依赖性, 炮口冲击波峰值压力随海拔高度的增加而降低, 峰值压力与环境压力近似呈线性关系; 形成于炮口制退器处的侧向冲击波主导了操炮人员典型作业区域 (炮口后方 3~5 m) 的冲击波超压峰值, 在不同海拔条件下进行火炮射击都可致操炮人员听觉器官发生损伤, 并对非听觉器官造成威胁。因此, 亟需提高操炮人员个体装备防护性能, 从而形成对眼、耳、肺和脑等重要器官的有效保护。

关键词: 炮口冲击波; 流固耦合模型; 海拔高度; 人员防护

中图分类号: O382

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Numerical simulation study on the dynamic evolution characteristics of muzzle shock waves at different altitudes

KANG Yue¹, MA Tian¹, WANG Junlong^{1,3}, ZHANG Yizhi², ZHANG Wenbo⁴, HAN Xiao¹, LI Zhijie⁵

(1. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100010, China;

2. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Physics and Optoelectronics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;

4. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

5. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the Euler-Lagrangian coupling method (CEL), a fluid-solid coupling model of gunpowder gas-barrel/cannonball-air is established. Numerical simulations are carried out on the launching process of large-caliber artillery shells in low altitude (altitude 0 m), medium altitude (altitude 1000 m), sub-high altitude (altitude 3000 m) and high altitude (altitude 5000 m) environments, and the comparative studies are conducted on the influence mechanism of altitudes on the dynamic evolution characteristics of muzzle shock waves. The simulation results show that the dynamic evolution process of the muzzle shock wave has significant direction dependence. The peak pressure of the muzzle shock wave will decrease as the altitude increases (namely the ambient pressure decreases), and the decrease of peak pressure is approximately linear to the

* 收稿日期: 2024-04-15; 修回日期: 2024-10-15

第一作者: 康越 (1989—), 男, 博士, 高级工程师, goodluckky@163.com

通信作者: 栗志杰 (1987—), 男, 博士, 助理研究员, lizhijie_20082006@163.com

change of ambient pressure. Increasing altitude will reduce the pressure peak of the muzzle shock wave for the same position (same distance and direction). The lateral muzzle shock wave, formed at the muzzle brake, dominates the pressure peak in the typical operating zone of the artillery operators (3~5 m behind the muzzle). The pressure peak value and effective action time at different altitudes can cause damage to the hearing organs, and induce the threat to the non-hearing organs. Therefore, the protection capabilities of artillery operators' equipment is urgently needed to be improved, providing the effective protection for the important organs, such as ears, eyes, lungs and brains.

Keywords: muzzle shock wave; fluid-structure interaction model; altitude; personal protection

炮口冲击波形成于炮弹发射过程中,由初始流场(弹前压缩空气和从弹丸与膛壁间隙逸出的高压燃气复合形成)和复杂火药燃气流场(弹丸出膛后高温高压气体迅速向外膨胀形成)以及与运动弹丸的相互作用共同形成,属于同方向、非定常、多相湍流夹杂复杂化学反应的物理过程^[1-2]。鉴于炮口冲击波的复杂性,早期科学家多采取试验验证与理论推导相结合的办法开展研究,如 Hugoniot^[3]将炮口冲击波动态演化过程类比为高压储气装置排空过程进行研究。近年来,计算机模拟技术和现场检测技术的飞速发展,为研究炮口冲击波的形成和演变提供了新的方法与思路^[4-5]。孙兆全等^[1]基于可压气体黏性流动的 Navier-Stokes 方程和 Spalart-Allmaras 湍流模型,结合动网格技术对某型突击炮炮口冲击波流场进行了数值模拟,研究得到了该型火炮炮口冲击波超压和流场温度分布情况,为揭示炮口流场特性、预测炮口冲击波危害提供了重要参考价值。Crowley 等^[4]以二维欧拉方程为基础,采用非结构贴体网格技术研究了炮弹出膛后流场的变化,与传统结构化网格计算方法相比,该技术提升了计算的灵活性和速度。赖富文等^[5]利用极坐标布放传感器的测试方法,检测并绘制了某型舰炮炮口冲击波的等压场图,得到了该舰炮炮口冲击波的等压场曲面。蒋晟等^[6]利用试验和模拟相结合的办法,分析了大口径火炮炮口冲击波的动态演化过程,研究了不同装药情况下炮手作业区域超压峰值随时间的变化规律。

基于新的观测手段和数值模拟技术,学者们重点关注并研究了炮口制退器结构^[7-9]、炮弹(管)构型^[10-11]、不同介质^[12-14]、炮口二次燃烧^[2,15-16]以及初始流场^[17-18]等因素对炮口冲击波动态演化过程的作用机制。作为一种广泛应用的反后坐力技术,炮口制退器一方面通过控制火药燃气的流量分配、气流速度以及炮身制退力等提高炮架的稳定性和射击精度;另一方面,会造成炮口区域形成强激波,加剧后效期火药燃气流场的复杂性及膛口焰现象,加大火炮发射初速扰动及膛口冲击波超压,从而对火炮周围设备及操作人员造成不良影响^[8]。针对上述矛盾,相关领域专家开展了大量研究。王加刚等^[7]基于实验方法验证了新型炮口制退器的防护效果,发现该装置可有效减小火药燃气的侧向流动,降低冲击波强度,使操作人员处的冲击波强度降低 61.4%,显著降低了射击过程中由冲击波所造成的损伤。杨丽等^[19]利用流体仿真软件对炮口冲击波进行了数值模拟,并基于优化后的制退器实现了更高的制退效率及较低的炮后超压和温度。炮弹(管)构型显著影响弹前激波的波系结构,进一步影响炮口冲击波的演化。Luo 等^[10]基于数值计算方法研究了不同形状弹头(平头、锥头和钝头)对膛口冲击波-弹头的相互作用过程、分离流生成以及 Richtmyer-Meshkov 不稳定性的影响机制。炮口冲击波在不同介质中的动态演化过程存在显著差异,相比空气中的炮口冲击波,水下炮口冲击波马赫盘形成时间早、激波核心区面积小、弹丸头部未发现冠状冲击波;水中马赫盘距离膛口轴向位移随时间变化呈指数增大,而空气中则为线性增大^[13]。炮口二次燃烧是一个复杂的物理化学过程,对炮口冲击波的动态演化产生较大影响。郭则庆^[2]建立了包含化学反应的任意拉格朗日欧拉(arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE)形式 Navier-Stokes 方程,化学反应采用 C-H-O-N 基元反应模型,并利用有限体积法和结构化贴体网格技术进行求解控制方程,开发适用于膛口化学反应流和冲击波场计算的二维轴对称并行计算程序,研究了膛口流场化学反应发生过程及其对炮口冲击波演化过程的影响。王丹宇等^[20]建立了包含炮口二次燃烧过程及弹丸与炮管壁面间微小扰动的炮口流场模型,模拟了弹丸出膛后炮口流场的动态演化过程,预测了马赫盘、冲击波和入射激波等复杂波系结构及炮口焰(尤其是二次焰)的形状和大小,预测结果与试验结果相吻合。在炮弹即将脱离炮管时,弹前激波冲出炮管形成初始冲击波,进而发展成初始流场。该流场改变了原有初始环境,对火

药燃气动态演化过程产生了显著影响^[17-18]。海拔高度也会影响炮口冲击波的传播过程^[21],对空气自由场爆炸冲击波(化爆冲击波)而言,海拔高度直接影响其在空气介质中的传播规律,且随海拔高度的增加,冲击波超压峰值和比冲量降低,并缩短了超压峰值到达特定位置的时间,提高了冲击波的传播速度。郭则庆^[2]和朱冠南等^[22]研究发现,小口径枪炮(无制退器)膛口冲击波峰值压力随膛口环境压力的降低而下降,且在一定范围内两者近似呈线性关系。对爆炸冲击波而言,其超压峰值也呈现类似的规律^[23-24]。然而,炮口制退器的引入使得大口径火炮炮口冲击波流场的动态演化过程变得复杂^[8],且关于海拔高度对炮口冲击波动态演化过程的影响及对应作用机制的研究鲜有公开报道。

大口径火炮单发或连续发射时产生的冲击波、噪声、有害气体和灰尘等都会对操炮人员造成威胁,且冲击波的重复作用会对人体形成累加损伤,导致致伤阈值降低,伤情加重。孙艳馥等^[25]研究发现,当受到 1 次和 5 次冲击时,人体咽喉部和消化道的致伤阈值分别由 41 和 55 kPa 下降至 21 和 48 kPa。杨志焕等^[26]研究发现,经连续多次冲击,上呼吸道、肺和胃肠道的损伤阈值分别由单次致伤的 29.0、29.5 和 41.2 kPa 降为连续 60 次冲击后的 21.0、18.0 和 40.4 kPa。Yelverton 等^[27]研究发现,当绵羊遭受连续 50 次超压峰值为 18 kPa 的冲击后呼吸道损伤发生率为 33%,而当冲击增加至 100 次后,伤情发生率上升到了 83%。另外,相关研究^[28-29]显示,高原环境下爆炸冲击波引起的生物肺部损伤要比在平原地区严重 1~3 个等级。对于炮口冲击波,高原环境下生物试验数据则相对匮乏,亟待研究高原环境炮口冲击波对生物的致伤效应。

本文中,通过建立“火药燃气-炮管/炮弹-空气”流固耦合模型,模拟不同海拔高度下炮口冲击波的动态演化过程,研究海拔高度的影响作用机制;并根据相关标准^[30-31],预测操炮人员可能遭受的炮口冲击波超压峰值及有效作用时间,为预测生物体损伤情况提供数据支撑。

1 “火药燃气-炮管/炮弹-空气”流固耦合模型

火炮发射及冲击波动态演化过程是一个伴随炸药燃烧等复杂化学反应的、具备复杂边界条件的流固耦合过程。炮弹发射初期,在极短时间内炮弹尾部装药即转化为高温高压气体,急剧膨胀的气体受到炮管周向约束推动炮弹沿炮管轴向加速运动,不断加速的炮弹挤压前部空气使其前部形成局部高压区,该区域气体将先于炮弹“冲出”炮管并向周边低压区域扩散传播,形成初次冲击波。随后,高速运动的炮弹脱离炮管,炮弹后部高温高压气体向周边急速扩散形成炮口冲击波,并伴随炸药残留物的剧烈燃烧形成炮口附近的“火球区”。本文中,将尾部炸药等效为高温高压火药燃气,忽略炸药残留物燃烧等复杂化学反应过程对炮口冲击波的影响^[32-35],建立“火药燃气-炮管/炮弹-空气”流固耦合模型。炮管与炮弹在炮弹发射过程中的形变相对较小,可采用拉格朗日单元进行网格划分。火药燃气与空气需要模拟冲击波的发生、传递以及与炮管(炮弹)相互作用等动态演化过程,对应区域应当采用欧拉单元进行描述,以避免单元过度变形。火药燃气(空气)与炮管(炮弹)在接触边界上的相互作用需要通过求解流固耦合方程进行确定。通用有限元软件 ABAQUS 通过非线性瞬态程序与耦合的欧拉-拉格朗日(coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)法能够对系统的三大守恒偏微分方程(动量、质量和能量)进行同时求解。欧拉区域能够对导致严重网格扭曲的高度动态事件进行模拟(如冲击波),并为拉格朗日区域提供压力边界条件;拉格朗日区域可完全或部分位于欧拉区域内,拉格朗日表面为欧拉区域提供边界条件,该边界条件不允许在其表面的法线方向产生流动;增强浸入边界方法提供了欧拉区域与拉格朗日区域之间的耦合作用。目前,CEL 法已被广泛应用于爆炸冲击及生物组织损伤预测^[36-37],在我们前期的研究工作中,也已建立了爆炸冲击波-颅脑流固耦合模型^[36-38]和爆炸冲击波-胸部流固耦合模型^[39-40],研究了爆炸冲击波作用下颅脑与肺部损伤机制,模拟结果与实验结果具有较好的一致性。因此,本文中,将继续采用 CEL 法模拟炮弹发射过程中冲击波的形成、传播以及与炮管(炮弹)间的耦合作用,从而获得炮口冲击波动态演化规律。下面将对“火药燃气-炮管/炮弹-空气”流固耦合数值模型进行详细介绍。

1.1 流固耦合模型与有限元离散

“火药燃气-炮管/炮弹-空气”流固耦合模型如图 1 所示。在流固耦合模型中,欧拉区域采用圆柱

形, 对应的直径 D 和长度 L (沿炮管轴向) 分别为 20 和 18 m。炮管的直径和壁厚分别为 20 和 5 cm。在炮管前段设置模拟炮口制退器结构, 在炮管尾部设置用于模拟炸药的高温高压火药燃气, 并在其前部设置了模拟炮弹, 炮弹直径与炮管相同 (暂未考虑炮弹与炮管间隙的影响)。同时, 为了简化流固耦合模型, 本文中未模拟冲击波与地面和火炮发射装置间的相互作用过程。

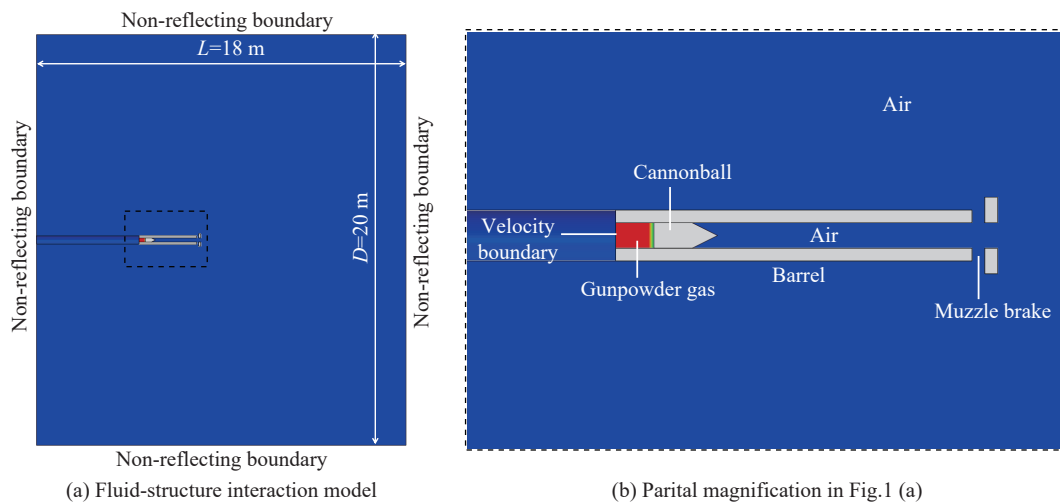


图 1 “火药燃气-炮管/炮弹-空气”流固耦合模型

Fig. 1 Fluid-structure interaction model of gunpowder gas-barrel/cannonball-air

采用不同尺寸八节点缩减积分欧拉单元 (EC3D8R) 对欧拉区域进行网格划分。对于炮管及其近场区域, 采用较小的单元尺寸 (20 mm) 进行网格划分, 从而达到真实模拟炮弹、炮管与冲击波间相互耦合作用的目的; 剩余欧拉区域采用相对稀疏的网格, 单元尺寸从 20 mm 过渡到 200 mm, 整个流场区域包含约 195 万个单元。对于朗格朗日区域, 采用八节点缩减积分单元 (C3D8R) 对炮管与炮弹进行网格划分, 为了与欧拉区域网格划分相匹配, 保证欧拉单元与拉格朗日单元具有较好的一致性, 炮管和炮弹的单元尺寸均设置为 20 mm。同时, 对网格无关性进行了分析, 采用更小的单元尺寸 (15、15~150 和 15 mm) 分别对炮管及其近场区域、炮管远场区域以及炮管与炮弹进行网格划分, 模拟所得结果与采用较小单元尺寸 (20、20~200 和 20 mm) 离散上述区域对应的结果是基本一致的, 从而验证了网格的无关性。

1.2 本构模型

采用理想气体状态方程表征空气和火药燃气的力学特性, 通过设置气体的初始密度和初始温度确定其初始压力。对于低海拔 (海拔高度 0 m) 环境空气, 气体密度设置为 1.16 kg/m^3 , 气体常数为 $287.04 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, 比热容为 $1005 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, 初始温度和参考压力分别为 303 K 和 101 kPa, 从而保证空气的初始超压值为 0 kPa^[37-38]; 对于中海拔 (海拔高度 1 km)、亚高海拔 (海拔高度 3 km) 和高海拔 (海拔高度 5 km) 环境空气密度分别设置为 1.04 、 0.81 和 0.62 kg/m^3 , 对应的参考压力分别为 90、70 和 54 kPa^[23]。不同海拔高度的火药燃气密度均设置为 4190 kg/m^3 , 温度为 2000 K, 初始超压值为 2.4 GPa。其中, 火药燃气温度参考了文献 [6,13,41] 中的物理参数进行确定, 火药燃气压力 (或密度) 是基于已知炮弹速度反向推算出来的。利用 “火药燃气-炮管/炮弹-空气” 流固耦合模型对炮弹发射过程进行模拟, 通过调整火药燃气初始密度 (或压力) 可获得不同的炮弹出膛速度。当预测炮弹出膛速度与实测结果一致时, 火药燃气所对应的能量与炮弹尾部装药能量近似一致, 从而获得火药燃气的初始状态。同时, 设置炮管和炮弹均为钢质材料 (弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3), 采用线弹性本构模型模拟两者的力学行为。

1.3 接触与边界条件

在 ABAQUS 程序中, 需要借助基于增强浸入边界法的流固界面模型表征流体与固体的相互作用。

通过设置通用接触引入流固界面模型, 捕捉火药燃气(空气)与炮管(炮弹)间的相互作用界面, 确定流体与固体的相互作用过程。同时, 在炮弹与炮管间设置无摩擦接触条件, 忽略两者间的摩擦阻力对炮弹运动的影响。

对于拉格朗日区域, 炮管底部采用固定边界条件, 近似模拟其约束状态。同时, 欧拉区域的外表面均采用无反射边界条件, 气体可从流场外表面自由流出, 如图 1(a) 所示。火药燃气边界则设置为速度边界条件, 约束该边界的法向速度, 防止火药燃气从炮管尾部逸出, 如图 1(b) 所示。

炸药产生的高温高压气体推动炮弹运动。随着炮弹冲出炮管, 炮管内部的压力和温度迅速降低, 整个过程通常仅持续几毫秒。同时, 由于气体与炮管间的对流换热系数相对较小, 高温气体无法将大量热量传递给炮管, 炮管温升相对较小且集中于炮管内壁的表面薄层(3 mm 内)^[42], 对炮管内部流场演化的影响较小。因此, 本文中不考虑炸药燃气与炮管间的热传递过程。

1.4 初始条件

在进行流固耦合分析前, 需要对系统的初始条件进行设置, 主要包括材料的初始分布和初始温度条件。本文中, 采用 ABAQUS 软件中的材料分布功能函数对火药燃气和空气在离散欧拉场中的分布进行设定, 保证某一特定空间位置点只能有一种材料。这样处理既符合物理实际, 又为流固耦合模型提供了流/固边界条件。同时, 由于对火药燃气和空气均采用理想气体状态方程进行描述, 所以需要确定系统的初始温度条件。对低海拔(海拔高度 0 m)、中海拔(海拔高度 1 km)、亚高海拔(海拔高度 3 km)和高海拔(海拔高度 5 km)环境下的空气初始温度均设置为 303 K, 对应的参考压力分别为 101、90、70 和 54 kPa, 保证 4 种海拔环境下空气的初始超压均为 0 kPa^[23]。

2 不同海拔高度下炮口冲击波的动态演化特性

基于上述“火药燃气-炮管/炮弹-空气”流固耦合模型, 对海拔高度分别为 0 m(低海拔, 平原环境)、1 km(中海拔)、3 km(亚高海拔)和 5 km(高海拔)条件下的炮弹发射过程进行模拟, 研究海拔高度对炮口冲击波动态演化特性的作用机制, 预测操炮人员典型作业区域的冲击波超压峰值。炮弹发射过程主要包括炮弹弹道内加速、初始冲击波和炮口冲击波 3 个典型阶段。模拟结果表明, 不同海拔高度下炮弹发射 3 个典型阶段的基本过程及主要特征是类似的。随着海拔高度的增加, 空气逐渐稀薄, 对应大气压力降低, 从而对炮口冲击波动态演化过程产生影响。本文中, 首先介绍炮口冲击波的动态演化特性, 然后分析海拔高度对炮口冲击波的作用机制。

2.1 炮口冲击波的动态演化特性

基于平原环境的模拟结果, 对炮弹发射过程中的炮弹在弹道内加速、初始冲击波和炮口冲击波 3 个典型阶段进行详细描述与分析。

2.1.1 炮弹在弹道内的加速阶段

位于炮弹底部的高压火药燃气体积急速膨胀, 推动炮弹沿炮管轴向加速运动。随着炮弹运动速度的提高, 其不断挤压前部空气形成高压气体区。炮弹前高压气体形成于炮弹斜面与炮管壁之间, 后逐步发展为平面激波(后面简称为“弹前激波”), 如图 2 所示。图 3 进一步显示了炮弹速度、弹前激波压力和炮弹后火药燃气压力随炮弹沿炮管轴线运动到不同位置处的动态演化过程。本文中设置炮管尾部端部为参考原点(即距离零点), 设置炮弹前尖端处靠近管壁的位置为弹前激波压力采样点(见图 2 中 A 点)。由图 3(a) 可知, 在炮弹发射的起始阶段, 炮弹后高压火药燃气推动炮弹运动, 炮弹速度急速上升, 并伴随炮弹后火药燃气压力急剧下降; 由于炮弹后火药燃气压力持续降低, 炮弹速度的变化率(加速度)呈下降趋势。炮弹后火药燃气压力与炮弹速度两者的变化规律符合指数分布, 具有较好的相关性。对比图 3(a) 与 3(b) 可知, 在弹前激波到达炮口时, 炮弹速度约为 830 m/s, 平面激波超压峰值约为 1 MPa, 出口压力比约为 10。弹前激波超压峰值远低于炮弹后火药燃气对应压力值(约为 125 MPa)。因此, 在当前炮弹速度下(小于 1000 m/s)弹前激波对炮弹速度的影响基本上可忽略不计。

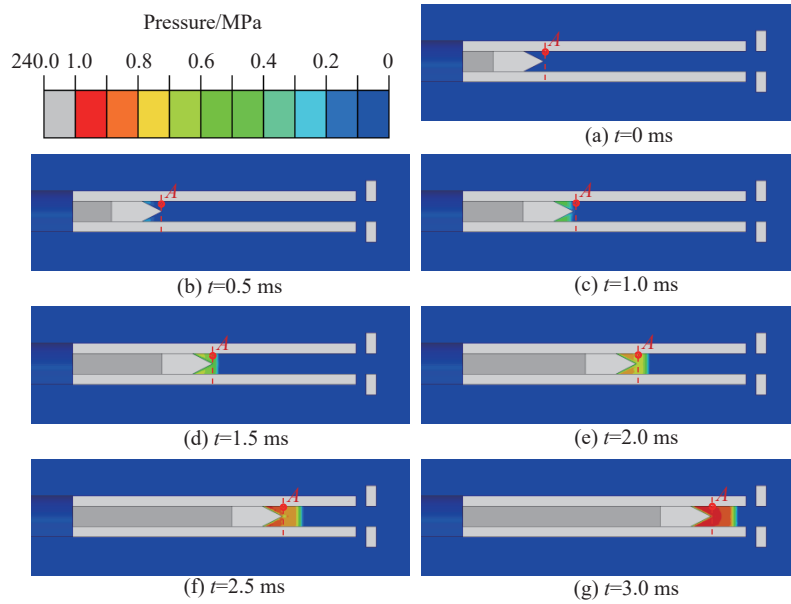


图 2 炮弹前平面激波动态演化过程

Fig. 2 Dynamic evolution process of plane shock wave before cannonball

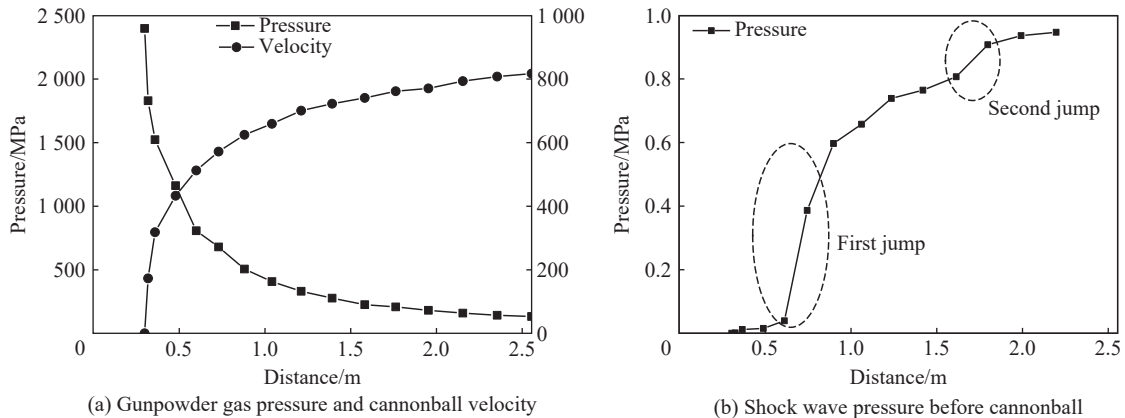


图 3 炮弹运动到不同位置时火药燃气的压力、炮弹的速度和弹前的激波压力

Fig. 3 Gunpowder gas pressure and cannonball velocity as well as shock wave pressure before cannonball when the cannonball moves to different positions

需要注意的是, 弹前激波压力并不遵循连续变化趋势, 在距离炮管后端部 0.6 和 1.6 m 处出现了 2 次“跳跃”。图 2 详细显示了弹前激波动态演化过程, 炮弹与平面激波间的相对速度可以由炮弹与冲击波(峰值)前沿的距离进行判断。炮弹运动伊始, 其前部与炮管壁接触邻近区域内(“楔形区域”)的气体压力明显高于其他区域对应值, 如图 2(b) 所示。随着该区域气体压力持续提高, 气体沿轴向的运动速度逐步升高; 当气体速度高于炮弹速度时, 高压气体演化成平面激波, 沿轴向进行传播并通过动态压力测点(见图 2 中 A 点), 使该点压力由 39 kPa 快速升高至 387 kPa(见图 2(c) 和 2(d)), 从而在 0.6 m 处形成第 1 个压力“跳跃”。随后, 炮弹前气体压力逐步上升, “楔形区域”内的气体保持高压状态, 但是平面冲击波峰值前沿速度低于此时的炮弹速度, 并不会造成动态测点 A 处压力的陡然上升, 如图 2(e) 和 2(f) 所示; 在接近 1.6 m 处时, “楔形区域”内平面激波峰值前沿速度高于炮弹速度, 并沿炮管轴向通过动态测点 A, 从而形成了该测点的第 2 个压力“跳跃”, 如图 2(g) 所示。因此, 2 次压力“跳跃”分别是由于平面激波前沿和平面冲击波峰值前沿通过动态测点 A 处所致。

2.1.2 初始冲击波阶段

弹前激波从炮口制退器和炮管出口处快速溢出, 分别形成侧向初始冲击波与沿着炮管轴向传播的正向初始冲击波, 对应流场速度和流场压力的动态演化过程见图 4。由图 4 可知, 侧向初始冲击波的峰值压力明显低于正向初始冲击波对应值, 侧向初始冲击波快速衰减, 其对炮口初始流场的影响相对较小。因此, 本文中仅对正向初始冲击波动态演化过程进行分析。弹前激波从炮口处快速溢出, 体积急剧膨胀形成球形初始冲击波。其在内部单一射流的持续推动下形成一个球心不断向前运动的球形波阵面(图 4(g)~(h)), 同时靠近炮口区域的高速气流(约 3~4 马赫)不断向低压区扩展, 最终形成超音速射流区, 并伴随形成马赫盘(见图 4(c)~(d) 和 4(g)~(h))。图 5 展示了初始冲击波的波系结构。需要注意的

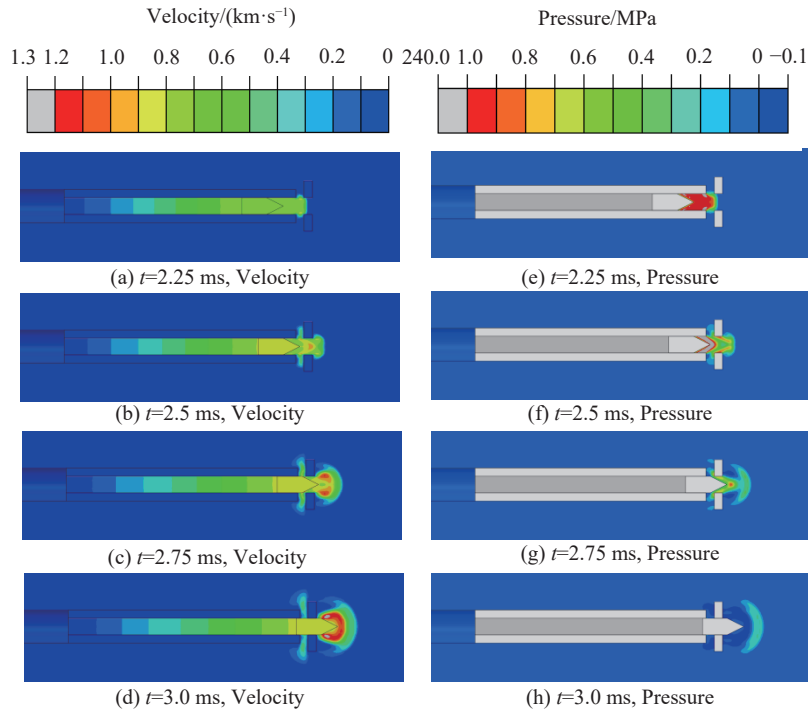


图 4 初始冲击波流场速度和流场压力的动态演化

Fig. 4 Dynamic evolution of flow field velocity and pressure of initial shock wave

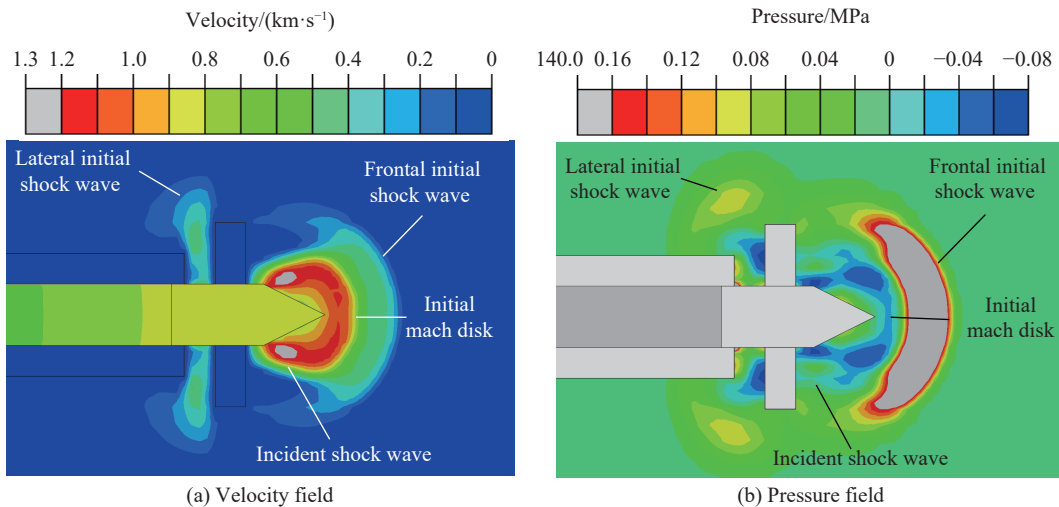


图 5 初始冲击波波系结构

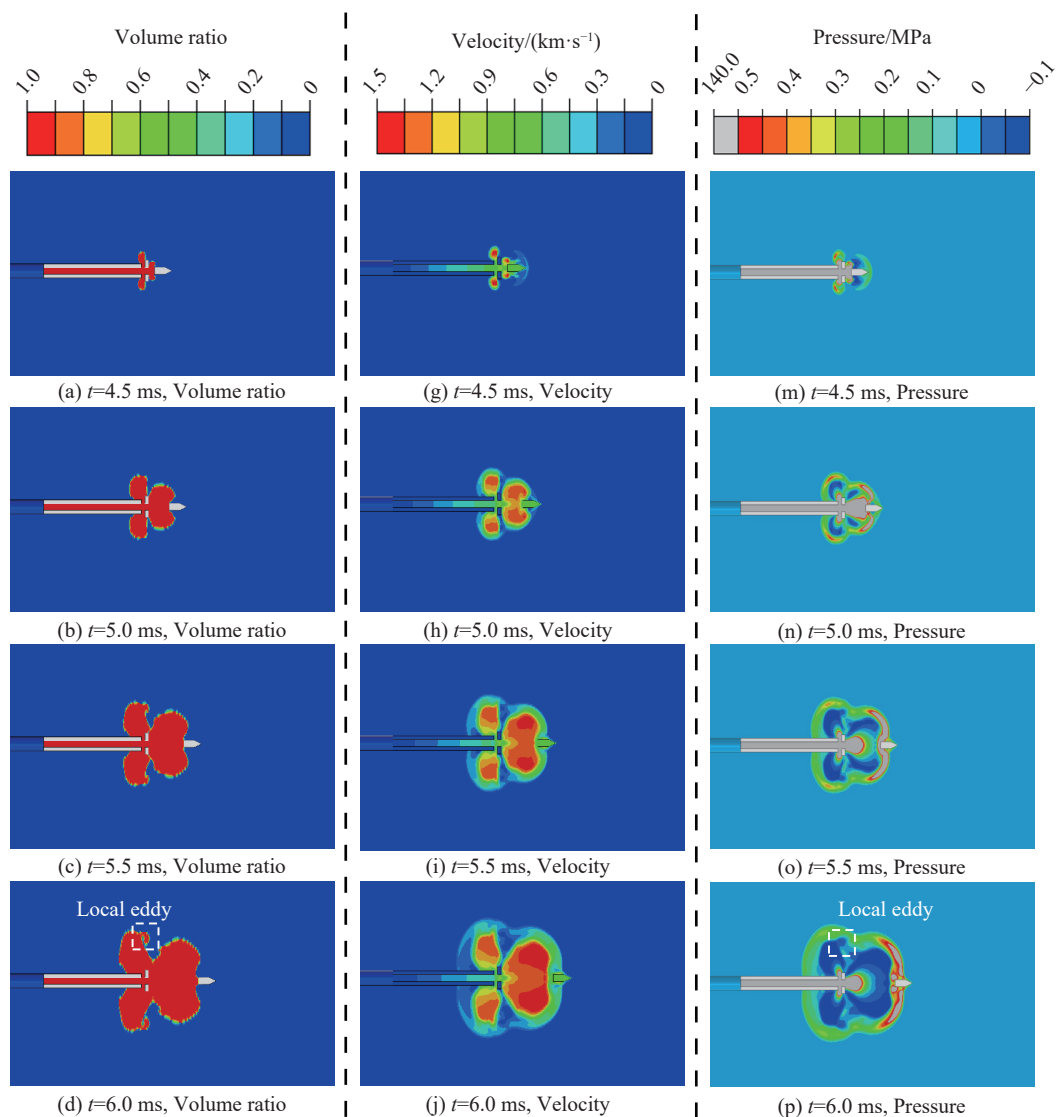
Fig. 5 Muzzle blast loaded structure of initial shock wave

是, 在弹前激波持续输出及其在制退器转角处湍流效应的影响下, 炮口区域始终为高压区, 从而抑制了超音速射流区的形成(图 4(e)~(f))。

2.1.3 炮口冲击波阶段

图 6 显示了炮口冲击波阶段火药燃气分布、流场压力与流场速度的动态演化过程。当炮弹尾部经过炮口制退器时, 部分火药燃气从制退器缺口处快速释放, 从而形成侧向炮口冲击波; 随后, 炮弹脱离炮管, 大部分火药燃气从炮口端快速溢出形成正向炮口冲击波, 如图 6(a)~(b) 和 (m)~(n) 所示。

对于侧向炮口冲击波而言, 火药燃气在离开炮管及制退器约束后流速急剧增大(见图 6(g)~(h)), 体积迅速膨胀, 从而挤压初始静态空气并在火药燃气前方形成压缩气体。起始阶段, 压缩气体压力相对较小, 火药燃气决定了侧向炮口冲击波的超压峰值, 火药燃气的持续注入抑制了制退器出口区域负压区的形成(图 6(a) 和 (m))。随后, 火药燃气不断膨胀, 自身压力逐步降低, 高流速火药燃气使制退器出口附近区域形成负压区, 火药燃气前沿与侧向冲击波峰值前沿相吻合, 火药燃气主导侧向冲击波峰值压力与传播过程(图 6(b) 和 (n))。随着火药燃气的继续膨胀, 负压区逐步扩大并形成马赫盘; 同时, 持续膨胀的火药燃气将能量(或压力)逐步传递给压缩空气, 火药燃气前沿逐步落后于侧向冲击波峰值(见图 6(i)~(l)、6(c)~(f) 和 6(o)~(r))。



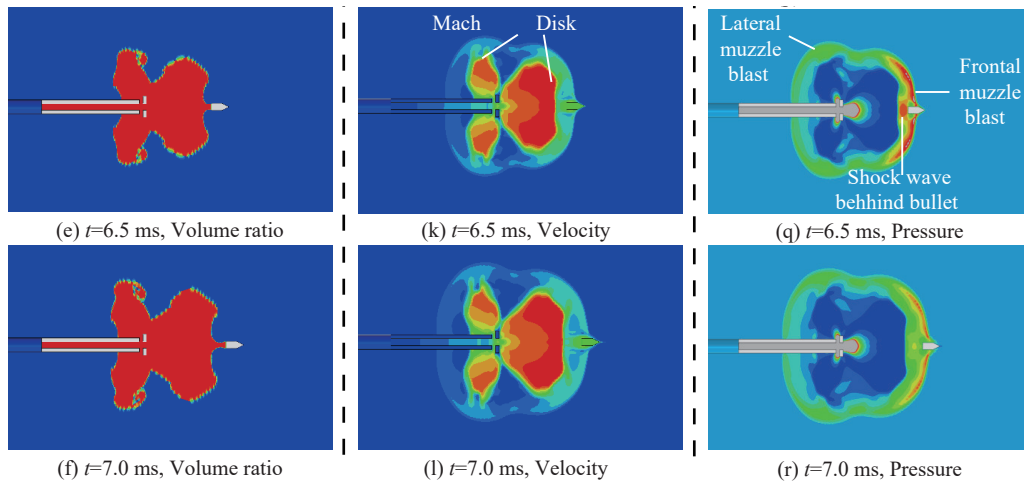


图 6 炮口冲击波火药燃气分布、流场压力与流场速度的动态演化

Fig. 6 Dynamic evolution of gunpowder gas distribution, flow field pressure and velocity of muzzle blast

相比于侧向炮口冲击波,正向炮口冲击波动态演化过程受炮弹影响。在初始形成阶段,正向炮口冲击波的传播速度高于炮弹速度,炮弹阻碍其尾部区域内的正向炮口冲击波,使其转变为反向传播的弹底激波。弹底激波的反向传播实际上是将高压火药燃气引入到炮口附近区域,抑制马赫盘的形成与生长(见图 6(g)~(i) 和 (m)~(o))。同时,炮弹对其它区域的正向炮口冲击波影响相对较小,炮口冲击波运动速度相对较高,从而形成了中间区域运动速度低、周边区域运动速度高的正向炮口冲击波,如图 6(m)~(o) 所示。该冲击波具有较高的运动速度与超压峰值,一方面,将追赶并融合运动速度与超压峰值相对较低的正向初次冲击波,在该过程中弹底激波逐步弱化,马赫盘逐步生长(见图 6(i)~(k) 和 (o)~(q));另一方面,会继续追赶运动速度略低的炮弹,当 $t=6.0\sim 6.5$ ms 时,正向炮口冲击波基本包裹了高速运动的炮弹(尖端部分除外,见图 6(p)~(q))。随后,冲击波的超压峰值与运动速度随传播距离的增加而急速下降,但此时炮弹的运动速度基本保持稳定(见图 7),高速运动的炮弹将凭借较高的出膛速度冲出正向炮口冲击波覆盖区域,如图 6(q)~(r) 所示。

除独立传播过程外,侧向与正向炮口冲击波在靠近炮口制动器的区域将相互作用、融合,逐步形成“闭合”的炮口冲击波,并继续向四周传播。正向与侧向炮口冲击波在其运动方向的后方区域均会形成一个负压区,两个负压区随炮口冲击波的传播不断增大,并最终汇合连通成一个整体,如图 6(n)~(r) 所示。另外,侧向与正向炮口冲击波的相互作用会促使形成“局部涡”(见图 6(d) 与 6(p) 中方框标示),使得炮口流场压力与火药燃气分布更加复杂。

2.2 海拔高度对炮口冲击波作用机制

图 8 对比展示了低海拔与高海拔环境下炮弹发射流场压力的动态演化过程。其中,高海拔环境冲击波在炮弹加速阶段、初始冲击波阶段与炮口冲击波阶段的动态演化过程与低海拔对应阶段基本相似,主要区别在于:炮管中弹前激波压力、初始冲击波超压峰值与炮口冲击波超压峰值在高海拔环境下明显低于低海拔环境对应值。炮弹在炮管中运动时,弹前激波压力为 $0.5\sim 1.0$ MPa,相对炸药燃烧气体压力

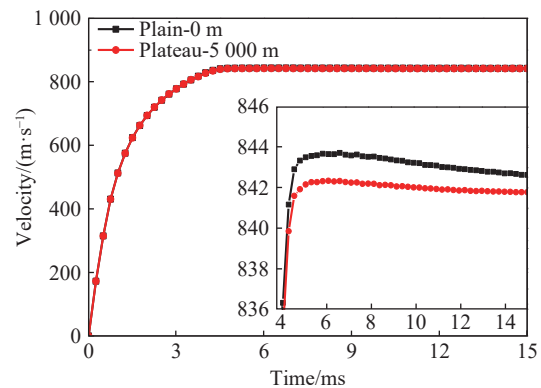


图 7 平原与高原环境下的炮弹速度

Fig. 7 Velocity of cannonball in the plain and plateau environments

较小(约几百 MPa), 对炮弹速度的影响可忽略不计(见图 7)。由于高原环境空气密度低, 当炮弹速度(或行程)一致的情况下, 会导致弹前激波压力峰值低于平原环境(图 8(a)); 初始冲击波是弹前激波冲出炮管所形成的, 因此高海拔环境下初始冲击波的超压峰值低于低海拔环境(如图 8(b) 所示); 对于炮口冲击波, 高海拔环境下冲击波轮廓和火药燃气分布区略大于低海拔环境(图 8(c)~(d) 和图 9), 这是由于较低的空气密度增大了炮口冲击波与初始态空气间的密度梯度, 加强了冲击波逸散效应, 增加了炮口冲击波与火药燃气气体的传播速度。同时, 高海拔环境会加速炮口冲击波衰减, 其压力峰值明显低于低海拔环境对应值。从模拟结果可知, 炮弹在即将冲出炮管时(4 ms)的速度达到了 830 m/s; 伴随炮弹冲出炮管, 炮口冲击波在炮口区域形成并急剧膨胀, 从而对炮弹进行加速, 使其速度达到 840 m/s(见图 7)。在炮口冲击波对炮弹的加速过程中, 相比低海拔环境, 高海拔会加速炮口冲击波扩张, 使其超压峰值降低(见图 8), 从而减弱了炮口冲击波对炮弹的加速作用, 使炮弹的运动速度低于低海拔环境对应值。随着炮口冲击波膨胀速度降低、炮弹速度增加, 在某一特定时刻(约为 7 ms), 炮口冲击波便不再对炮弹进行加速, 此时两种环境下的炮弹速度差值达到最大。炮弹在后续运动过程中主要受空气阻力影响。在低海拔环境

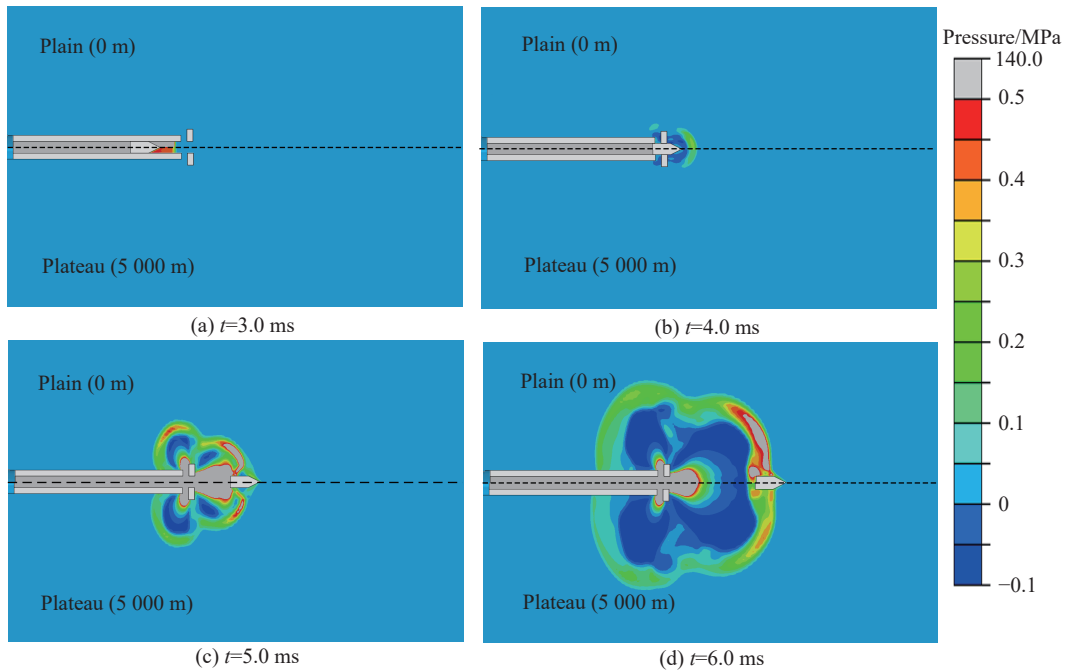


图 8 低海拔与高海拔环境下炮口流场压力对比

Fig. 8 Comparison of muzzle flow field pressure between the plateau and plain environments

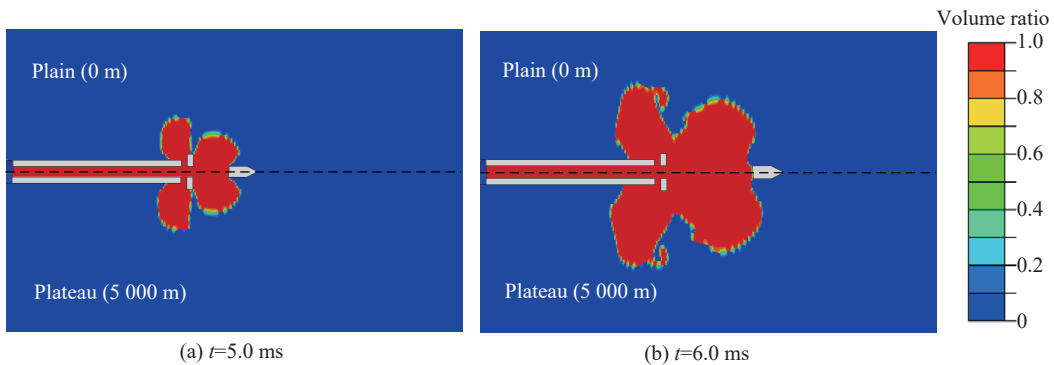


图 9 平原与高原环境下火药燃气分布

Fig. 9 Distribution of gunpowder gas in the plain and plateau environments

下,密度较高的空气会对炮弹运动产生较大的阻力,单位时间内炮弹运动速度降低幅度大于高海拔环境下的对应值,从而对炮弹射程产生明显影响。

不同海拔高度下的炮口冲击动态演化过程具有显著的方向依赖性,如图 10 所示。图 10 显示了 5 个典型方向(分别是:0°方向、45°方向、90°方向、135°方向与 180°方向)上 5 个特征测量点的位置示意图($R_1 \sim R_5$, 对应距离炮口端 1~5 m 处)。其中,180°方向 3~5m 对应的区域为操炮人员典型作业区。图 11(a) 显示了炮口冲击波沿炮管轴向方向(0°方向)传播时 5 个特征位置处的压力-时程曲线。 $R_1 \sim R_3$ 处压力-时程曲线趋势基本相似,即压力迅速上升后急速下降,超压峰值随传播距离的增大而逐渐降低,冲击波正压持续时间随距离增大而增加;但 $R_4 \sim R_5$ 等 2 个特征位置处的压力-时程曲线却展示出不同的演化特性,整个演化过程可分为正压持续时间相对较短但压力上升较快的第 1 阶段和正压持续时间较长但压力上升较慢的第 2 阶段。图 12 显示了上述 2 个阶段的动态演化过程,在经过 R_4 与 R_5 特征位置处时,高速运动的炮弹冲出炮口冲击波前沿,炮弹前部挤压前方周向气体形成影响区域相对较小的周向激波(图 12(a)~(b))。同时,由于炮弹运动速度较快(出膛速度约为 830 m/s),该激波压力快速上升,从而在 R_4 与 R_5 特征位置处形成了第 1 阶段的特征压力波形。除了在周向形成激波外,高速运动的炮弹会在其尾部形成低压区,炮口冲击波的高压气体在虹吸作用下向低压区快速运动造成该区域压力下降,阻断了炮口冲击波前沿

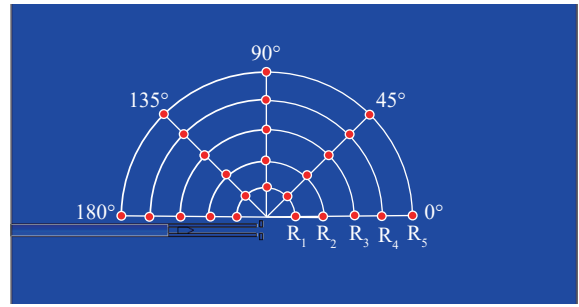


图 10 典型传播方向与测点位置布置示意图
Fig. 10 Schematic diagram of typical propagation direction and measuring points

图 11(a) 显示了炮口冲击波沿炮管轴向方向(0°方向)传播时 5 个特征位置处的压力-时程曲线。 $R_1 \sim R_3$ 处压力-时程曲线趋势基本相似,即压力迅速上升后急速下降,超压峰值随传播距离的增大而逐渐降低,冲击波正压持续时间随距离增大而增加;但 $R_4 \sim R_5$ 等 2 个特征位置处的压力-时程曲线却展示出不同的演化特性,整个演化过程可分为正压持续时间相对较短但压力上升较快的第 1 阶段和正压持续时间较长但压力上升较慢的第 2 阶段。图 12 显示了上述 2 个阶段的动态演化过程,在经过 R_4 与 R_5 特征位置处时,高速运动的炮弹冲出炮口冲击波前沿,炮弹前部挤压前方周向气体形成影响区域相对较小的周向激波(图 12(a)~(b))。同时,由于炮弹运动速度较快(出膛速度约为 830 m/s),该激波压力快速上升,从而在 R_4 与 R_5 特征位置处形成了第 1 阶段的特征压力波形。除了在周向形成激波外,高速运动的炮弹会在其尾部形成低压区,炮口冲击波的高压气体在虹吸作用下向低压区快速运动造成该区域压力下降,阻断了炮口冲击波前沿

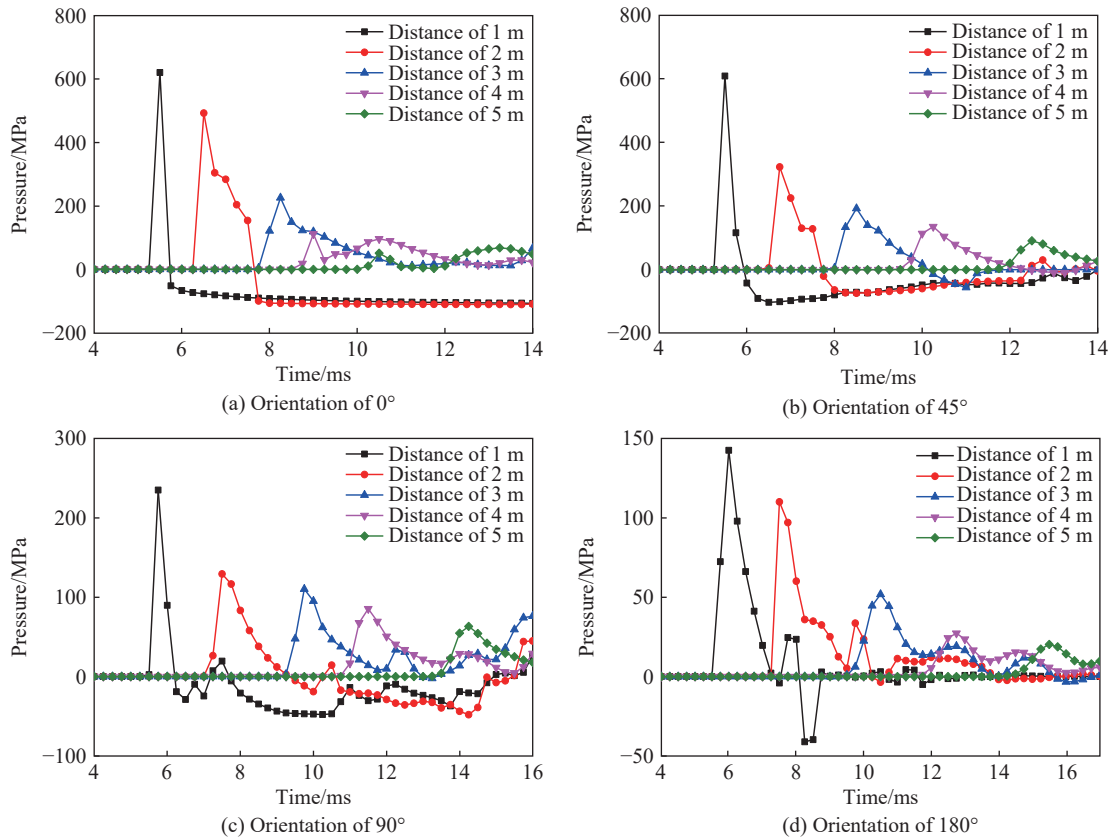


图 11 炮口冲击波在不同传播方向上的动态演化特性

Fig. 11 Dynamic evolution characteristics of the muzzle blast along different orientations

的连续性。此时, 0° 方向炮口冲击波的超压峰值显著降低; 而远离该区域的炮口冲击波则未受影响(图 12)。因此, 炮口冲击波在经过 0° 方向 R_4 与 R_5 特征位置处时, 形成了第 2 阶段的特征压力波形。图 11(b) 与图 11(d) 分别显示了炮口冲击波在 45° 和 180° 方向上 5 个特征位置处的压力-时程曲线, 炮口冲击波超压峰值随传播距离增加而显著降低(两者之间符合指数关系), 对应正压作用时间持续增加, 正压冲量则保持相对稳定。 45° 和 180° 方向的压力演化过程分别由正向炮口冲击波和侧向炮口冲击波主导(见图 6)。图 11(c) 显示了炮口冲击波在 90° 方向传播时 5 个特定位置处的压力-时程曲线, 炮口冲击波压力在远离炮口区域(距炮口 3~5 m 处区域)的降低速率相对较小。为了表征超压峰值的降低速率, 本文中引入无量纲参数-超压峰值衰减系数(定义为 $(p_1-p)/p_1$)进行表征。其中, p_1 为距炮口 1 m 处的超压峰值(设置其为基准值), p 为特征位置处超压峰值。图 13 显示了炮口冲击波超压峰值衰减系数在 45° 、 90° 和 180° 等 3 个方向上的演化过程。 45° 和 180° 等 2 个方向上的超压峰值衰减曲线基本一致, 超压峰值衰减系数与炮口距离间近似呈指数变化; 而 90° 方向的炮口冲击波则不满足上述规律。从炮口冲击波动态演化过程可知, 远离炮口区域的正向和侧向炮口冲击波相互融合, 减缓了冲击波峰值压力的衰减速率, 从而使 90° 方向该区域超压峰值衰减系数明显小于 45° 和 180° 传播方向上的对应值。

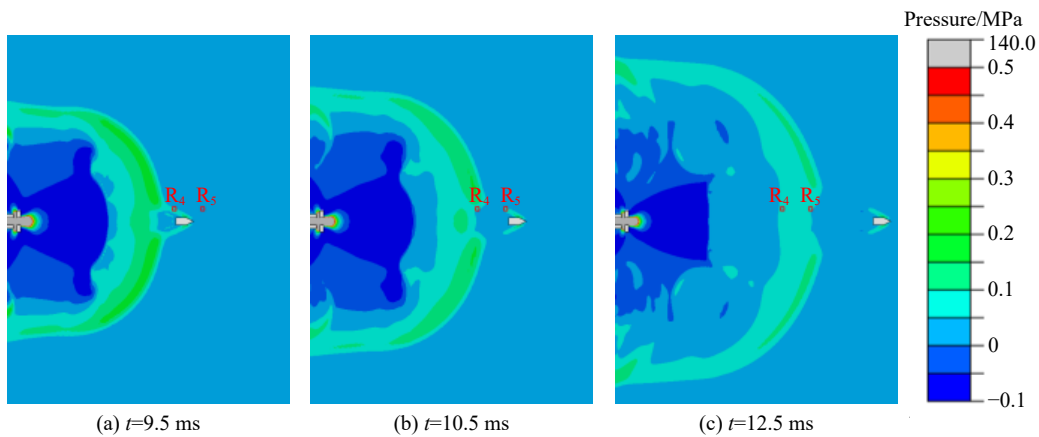


图 12 炮口冲击波在 R_4 与 R_5 特征位置处的动态演化过程

Fig. 12 Dynamic evolution process of muzzle blast at the characteristic positions of R_4 and R_5

图 14 进一步对比了不同海拔高度下冲击波在 45° 方向与 180° 方向特征位置处的超压峰值。由图 14 可知, 炮口冲击波超压峰值与炮口距离间近似满足指数关系。对于上述任一特征位置, 炮口冲击波超压峰值随海拔高度增加而降低。海拔高度对炮口冲击波超压峰值的影响和特征位置、炮口间距离密切相关, 靠近炮口特征位置处的超压峰值随海拔高度增加显著下降, 而海拔高度对远离炮口特征位置处的超压峰值影响相对较小。同时, 海拔高度对 45° 方向特征位置处超压峰值的影响明显大于 180° 方向特征位置处对应值。由此可知, 海拔高度对超压峰值的影响呈显著方向性。图 15 展示了不同海拔高度下炮口冲击波在 45° 方向与 180° 方向特征位置处超压峰值与参考大气压力间的关系曲线。由图 15 可知两者近似呈线性关系, 这与小口径枪炮炮口冲击波及爆炸冲击波工况下对应关系^[23-24]是一致的。

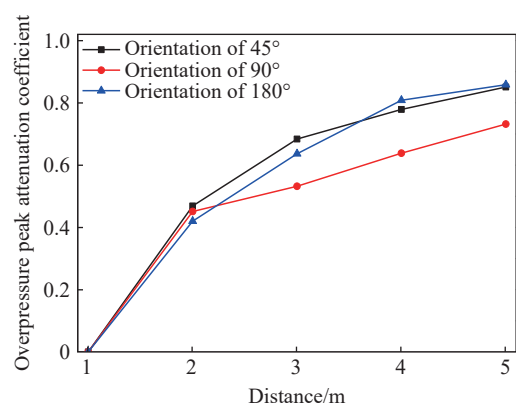


图 13 炮口冲击波超压峰值衰减系数

Fig. 13 Decay coefficient of muzzle blast peak overpressure

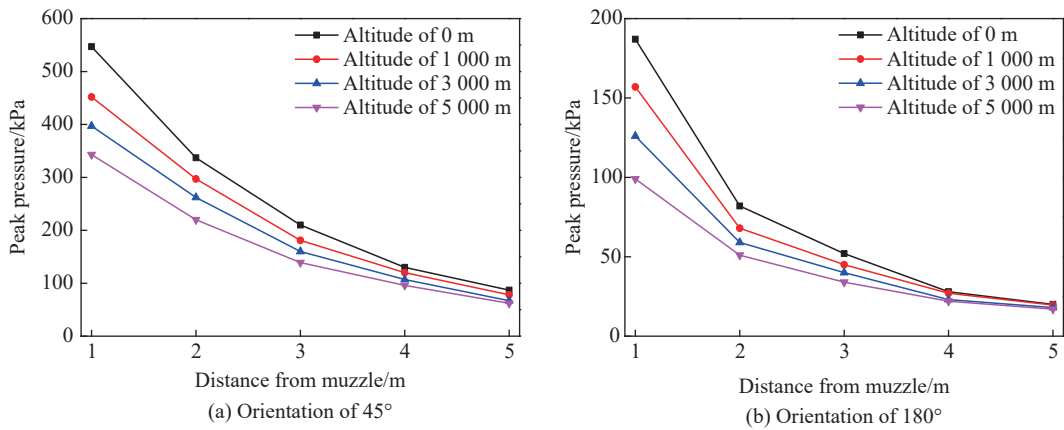


图 14 不同海拔高度特征位置处峰值压力

Fig. 14 Peak pressure of characteristic positions at different altitudes

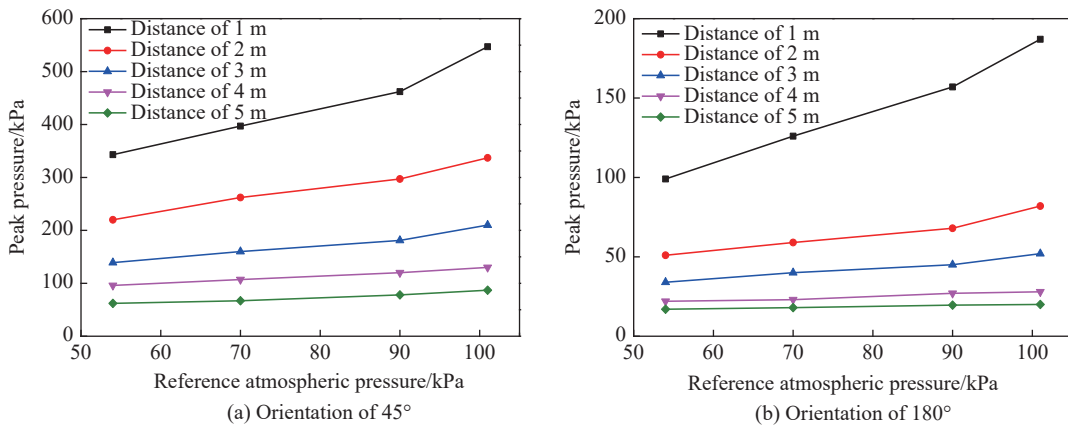


图 15 特征位置处峰值压力与不同海拔高度下参考大气压力之间的关系

Fig. 15 Relationship between the peak pressure of characteristic positions and the reference atmospheric pressure at different altitudes

表 1 统计了不同海拔高度下炮兵典型作业区的超压峰值, 并依据相关标准确定了致使操炮人员非听觉器官和听觉器官损伤的有效时间。表 2^[30] 和表 3^[31] 分别统计了炮口冲击波作用下非听觉器官与听觉器官在不同有效持续时间下的损伤阈值, 该阈值随炮弹发射数量的增加而显著下降, 这与相关研究结论^[43-44] 保持一致。结合表 1~2 统计数据可知, 不同海拔高度下炮口冲击波会使操炮人员听觉器官出现损伤。同时, 在低海拔条件下靠近炮口的区域, 炮口冲击波会使操炮人员遭受非听觉器官损伤。由表 1 可知, 炮口冲击波超压峰值及其致非听觉器官损伤有效时间随海拔高度增加而降低, 但由于人体“靶器官”(诸如肺部、耳部等)随海拔高度增加而愈发“敏感”, 致伤阈值降低, 伤情加强, 故高海拔条件下可能会增加人体靶器官损伤效应^[29-30]。因此, 对操炮人员进行炮口冲击波防护是非常必要的。

表 1 不同海拔高度下操炮人员典型作业区域特征位置处的超压峰值和器官损伤持续时间

Table 1 Peak overpressure of characteristic positions in the typical operating zone of artillery operators at different altitudes and the corresponding duration time of organ damage

海拔	特征位置/m	超压峰值/kPa	损伤持续时间 T_d /ms	
			听觉器官	非听觉器官
低	3.0	52.0	2.25	1.3
	4.0	27.9	3.25	0.8
	5.0	20.2	3.00	0

表 1 (续)
Table 1 (Continued)

海拔	特征位置/m	超压峰值/kPa	损伤持续时间 T_c /ms	
			听觉器官	非听觉器官
中	3.0	44.9	2.20	1.25
	4.0	26.5	3.00	0.75
	5.0	19.7	3.20	0
亚高	3.0	39.8	2.75	1.00
	4.0	23.1	2.50	0.5
	5.0	18.4	2.75	0
高	3.0	33.7	2.50	0.90
	4.0	22.2	2.00	0.30
	5.0	17.0	2.75	0

表 2 炮口冲击波下听觉器官的损伤阈值^[30]

Table 2 Safety limits of human auditory organ damage risk under muzzle blast^[30]

有效持续时间 T_c /ms	安全限值/kPa						
	1发	3发	10发	50发	100发	300发	500发
1.6	12.30	8.84	6.16	3.80	3.09	2.22	1.91
3.0	10.18	7.32	5.10	3.15	2.56	1.84	1.58

表 3 炮口冲击波下非听觉器官损伤阈值表^[31]

Table 3 Safety limit of human non-auditory organ damage-risk under muzzle blast^[31]

有效持续时间 T_c /ms	安全限值/kPa								
	1发	5发	10发	15发	20发	30发	60发	80发	100发
1	41.2	36.3	34.3	33.0	32.2	31.0	28.9	28.0	27.3
2	39.1	34.3	32.2	31.0	31.0	28.9	26.8	25.9	25.3

3 结 论

基于 CEL 方法建立了“火药燃气-炮管/炮弹-空气”流固耦合模型, 对不同海拔高度下炮弹发射过程开展了数值模拟, 研究了海拔高度对炮口冲击波动态演化过程的影响规律, 预测了炮口冲击波在操炮人员典型作业区的超压峰值及有效持续时间, 并对其生物致伤效应进行了评估。得到的主要结论如下。

(1) 炮管中, 炮弹后火药燃气压力与炮弹速度近似为指数关系, 弹前激波对炮弹速度的影响可基本忽略不计, 该结论与内弹道模型保持一致; 炮弹出膛后, 低海拔环境下, 在近炮口区域内火药燃气会增加对炮弹的助推作用, 并增大远离炮口区域炮弹的运动阻力。高海拔环境会加速炮口冲击波扩张, 使其超压峰值降低, 减缓了炮口冲击波对炮弹的加速作用, 使炮弹的运动速度低于低海拔环境对应值, 但炮弹运动阻力减小。

(2) 火药燃气从炮口与炮口退器处快速溢出、膨胀, 分别形成正向炮口冲击波与侧向炮口冲击波, 两者最终结合形成闭合的炮口冲击波并向外传播; 对于靠近炮口的区域, 炮口冲击波超压峰值随海拔高度的增加显著下降, 这种影响会随炮口冲击波传播距离的增大而逐步弱化。

(3) 带有炮口制退器的大口径火炮, 炮口冲击波的动态演化过程具有显著的方向依赖性; 正向和侧向炮口冲击波的峰值压力与参考大气压力近似呈线性关系, 这与小口径枪炮炮口冲击波及爆炸冲击波规律保持一致。

(4) 操炮人员典型作业区域炮口冲击波压力峰值及有效作用时间会造成人体听觉器官受损, 并对非听觉器官形成威胁, 亟待加强操炮人员个人防护措施。

参考文献:

- [1] 孙全兆, 范社卫, 王殿荣, 等. 某突击炮炮口流场数值模拟研究 [J]. *弹道学报*, 2019, 31(4): 63–67. DOI: 10.12115/j.issn.1004-499X(2019)04-011.
SUN Q Z, FAN S W, WANG D R, et al. Numerical study of muzzle flow field of assault gun [J]. *Journal of Ballistics*, 2019, 31(4): 63–67. DOI: 10.12115/j.issn.1004-499X(2019)04-011.
- [2] 郭则庆. 膛口流场动力学机理数值研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012. DOI: 10.7666/d.Y2275207.
GUO Z Q. Numerical investigations on the dynamics mechanism of muzzle flow [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012. DOI: 10.7666/d.Y2275207.
- [3] HUGONIOT M. On the diversified movement of a gas compressed in a reservoir which empties freely into the atmosphere [J]. *Comptes Rendue*, 1886, 1: 103.
- [4] CROWLEY A B, SZMELTER J. Computation of muzzle flow fields using unstructured meshes [C]// *Proceedings of the 19th International Symposium of Ballistics*. Interlaken: Launch Dynamic & Propulsion, 2001: 265–271.
- [5] 赖富文, 张志杰, 胡桂梅, 等. 某型舰炮炮口冲击波等压场测试方法 [J]. *传感技术学报*, 2015, 28(1): 77–80. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2015.01.014.
LAI F W, ZHANG Z J, HU G M, et al. A method to measure muzzle shock wave pressure field for a naval gun [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(1): 77–80. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2015.01.014.
- [6] 蒋晟, 阮文俊, 孙雪明, 等. 大口径火炮发射噪声场数值仿真与实验研究 [J]. *火炮发射与控制学报*, 2024, 45(1): 113–118. DOI: 10.19323/j.issn.1673-6524.202303027.
JIANG S, RUAN W J, SUN X M, et al. Numerical simulation and experimental study on noise field of large caliber gun [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2024, 45(1): 113–118. DOI: 10.19323/j.issn.1673-6524.202303027.
- [7] 王加刚, 余永刚, 周良梁. 埋头弹火炮高效低危害炮口制退器的实验研究 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(5): 1035–1040. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.05.025.
WANG J G, YU Y G, ZHOU L L. Experimental study of high efficiency and low hazard muzzle brake for CTA gun [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(5): 1035–1040. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.05.025.
- [8] 余海伟, 袁军堂, 汪振华, 等. 新型结构炮口制退器的膛口冲击波数值研究与性能分析 [J]. *高压物理学报*, 2020, 34(6): 065102. DOI: 10.11858/gywlxb.20200568.
YU H W, YUAN J T, WANG Z H, et al. Muzzle blast wave investigation and performance analysis of new-structure muzzle brake based on numerical simulation [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(6): 065102. DOI: 10.11858/gywlxb.20200568.
- [9] DILLON JR, R, NAGAMATSU H. A parametric study of perforated muzzle brakes [C]// *Proceedings of the 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference*. Orlando: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993. DOI: 10.2514/6.1993-3090.
- [10] LUO Y, XU D, LI H. Analysis of the dynamic characteristics of the muzzle flow field and investigation of the influence of projectile nose shape [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1468. DOI: 10.3390/app10041468.
- [11] CARSON R A, SAHNI O. Numerical investigation of propellant leak methods in large-caliber cannons for blast overpressure attenuation [J]. *Shock Waves*, 2014, 24(6): 625–638. DOI: 10.1007/s00193-014-0522-7.
- [12] ZHANG X, YU Y G, ZHANG X W. Numerical simulation and analysis of the 3D transient muzzle flow field of underwater artillery [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 284: 115270. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115270.
- [13] 张旋, 余永刚, 张欣尉. 火炮在不同介质中发射的膛口流场特性分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(10): 103901. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0056.
ZHANG X, YU Y G, ZHANG X W. Analysis of muzzle flow field characteristics of gun fired in different media [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(10): 103901. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0056.
- [14] 张京辉, 余永刚. 弹道枪不同水深下全淹没式发射膛口流场的数值分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(10): 104201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0478.

- ZHANG J H, YU Y G. Numerical investigation on the muzzle flow field of an underwater submerged launched ballistic gun at different water depths [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(10): 104201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0478.
- [15] LI P F, ZHANG X B. Numerical research on adverse effect of muzzle flow formed by muzzle brake considering secondary combustion [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(4): 1178–1189. DOI: 10.1016/j.dt.2020.06.019.
- [16] QIN Q Y, ZHANG X B. Numerical investigation on combustion in muzzle flows using an inert gas labeling method [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 101: 91–103. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.009.
- [17] 李子杰, 王浩. 膛口初始流场对火药燃气射流的影响 [J]. *含能材料*, 2017, 25(4): 282–290. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.04.003.
- LI Z J, WANG H. Effect of precursor flow field of muzzle on the combustion gas jet flow of gun propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(4): 282–290. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.04.003.
- [18] 郭则庆, 王杨, 姜孝海, 等. 膛口初始流场对火药燃气流场影响的数值研究 [J]. *兵工学报*, 2012, 33(6): 663–668. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2012.06.005.
- GUO Z Q, WANG Y, JIANG X H, et al. Numerical study on effects of precursor flow on muzzle propellant flow field [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(6): 663–668. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2012.06.005.
- [19] 杨丽, 徐笑阳. 基于 CFD 仿真的炮口制退器性能影响因素研究 [J]. *装备环境工程*, 2024, 21(3): 1–10. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.03.001.
- YANG L, XU X Y. Influencing factors of muzzle brake performance based on CFD simulation [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2024, 21(3): 1–10. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.03.001.
- [20] 王丹宇, 南风强, 廖昕, 等. 考虑化学反应的大口径火炮炮口流场特性 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(8): 1624–1630. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.08.006.
- WANG D Y, NAN F Q, LIAO X, et al. Characteristics of muzzle flow field of large caliber gun considering chemical reaction [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(8): 1624–1630. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.08.006.
- [21] 李福龙, 孔德仁, 王良全, 等. 海拔高度对化爆冲击波压力分布规律影响分析 [J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(2): 158–165. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2024.02.020.
- LI F L, KONG D R, WANG L Q, et al. Analysis of the effect of altitude on the pressure distribution pattern of chemical explosion shock wave [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(2): 158–165. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2024.02.020.
- [22] 朱冠南, 王争论, 马佳佳, 等. 低压环境下膛口冲击波实验研究 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(6): 808–813. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.06.009.
- ZHU G N, WANG Z L, MA J J, et al. Research on muzzle shock wave in low pressure environment [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(6): 808–813. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.06.009.
- [23] 陈龙明, 李志斌, 陈荣, 等. 高原环境爆炸冲击波传播特性的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(5): 053206. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0279.
- CHEN L M, LI Z B, CHEN R, et al. An experimental study on propagation characteristics of blast waves under plateau environment [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(5): 114–124. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0279.
- [24] WANG L Q, KONG D R. Research on the distribution characteristics of explosive shock waves at different altitudes [J]. *Defence Technology*, 2023, 24: 340–348. DOI: 10.1016/j.dt.2022.03.002.
- [25] 孙艳馥, 王欣. 爆炸冲击波对人体损伤与防护分析 [J]. *火炸药学报*, 2008, 31(4): 50–53. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2008.04.022.
- SUN Y F, WANG X. Analysis of human body injury due to blast wave and protection method [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(4): 50–53. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2008.04.022.
- [26] 杨志焕, 王正国, 唐承功, 等. 炮口冲击波的生物效应及其对人员内脏损伤的安全限值 [J]. *振动与冲击*, 1994(4): 39–45.
- YANG Z H, WANG Z G, TANG C G, et al. Biological effect of muzzle shock wave and its safety limit for human viscera damage [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 1994(4): 39–45.
- [27] YELVERTON J, RICHMOND D, FLETCHER E, et al. Bioeffects of simulated muzzle blasts [C]//Proceedings of the Eighth International Symposium on Military Application of Blast Simulation. Spiez, Switzerland, 1992.
- [28] 李晓炎, 宁心, 杨志焕, 等. 高原与平原冲击波物理参数和生物效应的比较研究 [J]. *中国危重病急救医学*, 2005, 17(2): 102–104. DOI: 10.3760/j.issn:1003-0603.2005.02.012.

- LI X Y, NING X, YANG Z H, et al. Comparative study on physical parameters and biological effects of blast wave on plateau and on plain [J]. *Chinese Critical Care Medicine*, 2005, 17(2): 102–104. DOI: 10.3760/j.issn.1003-0603.2005.02.012.
- [29] 李森, 王海燕, 龙在云, 等. 特殊环境冲击伤研究现状与展望 [J]. *中华诊断学电子杂志*, 2020, 8(2): 73–77. DOI: 10.3877/cma.j.issn.2095-655X.2020.02.001.
- LI S, WANG H Y, LONG Z Y, et al. Research status and prospects of blast injury in special environment [J]. *Chinese Journal of Diagnostics (Electronic Edition)*, 2020, 8(2): 73–77. DOI: 10.3877/cma.j.issn.2095-655X.2020.02.001.
- [30] 国防科学技术工业委员会. XXXX 脉冲噪声和冲击波对人员听觉器官损伤的安全限值: GJB XX-XX [S]. 1996.
- [31] 中央军委装备发展部. 炮口冲击波对人员非听觉器官损伤的安全限值: GJB 1158A-2021 [S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2021.
- [32] JIANG X H, CHEN Z H, FAN B C, et al. Numerical simulation of blast flow fields induced by a high-speed projectile [J]. *Shock Waves*, 2008, 18(3): 205–212. DOI: 10.1007/s00193-008-0155-9.
- [33] LEI H X, ZHAO J L, WANG Z J. Numerical simulation and experiments on muzzle blast overpressure in large-caliber weapons [J]. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2016, 9(5): 111–116. DOI: 10.25103/jestr.095.17.
- [34] ZHAO X Y, ZHOU K D, HE L, et al. Numerical simulation and experiment on impulse noise in a small caliber rifle with muzzle brake [J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019: 5938034. DOI: 10.1155/2019/5938034.
- [35] 魏胜程, 钱林方, 徐亚栋, 等. 车载炮驾驶室表面炮口冲击波超压特性 [J]. *兵工学报*, 2024, 45(11): 1–14. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0687.
- WEI S C, QIAN L F, XU Y D, et al. Muzzle blast overpressure characteristics on the surface of vehicle-mounted howitzer's crew compartment [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(11): 1–14. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0687.
- [36] 栗志杰, 由小川, 柳占立, 等. 爆炸冲击波作用下颅脑损伤机理的数值模拟研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(1): 100–111. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0348.
- LI Z J, YOU X C, LIU Z L, et al. Numerical simulation of the mechanism of traumatic brain injury induced by blast shock waves [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(1): 97–108. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0348.
- [37] DU Z B, LI Z J, WANG P, et al. Revealing the effect of skull deformation on intracranial pressure variation during the direct interaction between blast wave and surrogate head [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2022, 50(9): 1038–1052. DOI: 10.1007/s10439-022-02982-5.
- [38] LI Z J, DU Z B, YOU X C, et al. Numerical study on dynamic mechanism of brain volume and shear deformation under blast loading [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2019, 35(5): 1104–1119. DOI: 10.1007/s10409-019-00875-w.
- [39] YANG F Y, LI Z J, ZHUANG Z, et al. Evaluating the blast mitigation performance of hard/soft composite structures through field explosion experiment and numerical analysis [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2022, 38(1): 121238. DOI: 10.1007/s10409-021-09001-x.
- [40] YANG F Y, LI Z J, LIU Z L, et al. Shock loading mitigation performance and mechanism of the PE/wood/PU/foam structures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 155: 103904. DOI: 10.1016/J.IJIMPENG.2021.103904.
- [41] 刘念祖, 戴劲松, 王茂森, 等. 基于流固耦合的某摆膛炮膛管间隙研究 [J]. *弹道学报*, 2019, 31(3): 62–65. DOI: 10.12115/j.issn.1004-499X(2019)03-012.
- LIU N Z, DAI J S, WANG M S, et al. Research on a pendulum gun-tube clearance based on fluid-structure coupling [J]. *Journal of Ballistics*, 2019, 31(3): 62–65. DOI: 10.12115/j.issn.1004-499X(2019)03-012.
- [42] 赵耀, 郑海文, 刘胜超, 等. 自行高炮自动机身管热特性研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(10): 114–119. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.10.016.
- ZHAO Y, ZHENG H W, LIU S C, et al. Study on thermal characteristics of automatic mechanism tube of self-propelled anti-air gun [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(10): 114–119. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.10.016.
- [43] 王鸿, 高俊宏, 岳红, 等. 某新型火炮冲击波的生物效应研究 [J]. *职业与健康*, 2014, 30(11): 1466–1467, 1470. DOI: 10.13329/j.cnki.zyyjk.2014.11.042.
- WANG H, GAO J H, YUE H, et al. Study on biological effects of the new-type gun blast waves [J]. *Occupation and Health*, 2014, 30(11): 1466–1467, 1470. DOI: 10.13329/j.cnki.zyyjk.2014.11.042.
- [44] 杨志焕, 姚德胜, 王正国, 等. 炮口冲击波对炮手的影响 [J]. *第三军医大学学报*, 1991, 13(4): 412–413. DOI: 10.16016/j.1000-5404.1991.04.046.

(责任编辑 张凌云)