

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202504006

新型石油射孔弹结构与数值模拟

李巧歌¹, 梁增友¹, 董鹏飞²

(1. 中北大学 机电工程学院, 太原 030051;

2. 山西江阳化工有限公司, 太原 030051)

摘 要: 针对石油射孔弹因装药量受限、炸高不足导致射流速度低、侵彻性能差的问题, 提出一种基于逆向环形起爆大锥角的新型装药结构并将其应用于石油射孔弹中。通过构建 LS-DYNA 三维仿真模型, 系统研究了爆轰波传播路径调控与药型罩锥角参数对射流质量的影响规律。在仿真过程中, 装药大端面处共设置 8 个均布起爆点, 以实现逆向环形爆轰波传播; 此外, 建立药型罩锥角为 $80^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 连续可调的装药模型, 开展了不同锥角下射流成形质量以及穿孔孔径和深度的研究。结果表明: 采用逆向环形的起爆方式逆转了爆轰波的传播方向, 使其近似以平面传播, 在提高炸药能量利用率的同时, 形成高速射流; 当药型罩锥角为 90° 时, 射流头部速度最高可达 6 603 m/s, 较传统顶端中心点起爆方式提升约 91.6%, 穿深约为 19 倍药型罩口径, 证明了逆向环形起爆与大锥角设计的协同作用可以有效平衡射流速度与稳定性, 为高密度射孔完井工具的小型化设计提供了理论依据与技术参考。

关键词: 采油技术; 新型石油射孔弹; 数值模拟; 逆向环形起爆;
大锥角药型罩

中图分类号: TE355

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2025)04-051-09



听语音
与作者互动
聊科研

Structural Design and Numerical Simulation of a New Type of Oil Perforating Charge

LI Qiaoge¹, LIANG Zengyou¹, DONG Pengfei²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Jiangyang Chemical Co., Ltd., Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: Low jet velocity and poor penetration performance due to limited charge size and insufficient explosion height are common problems associated with oil perforating charges. To address these issues, a new charge structure based on reverse annular initiation with a large cone angle was proposed. Using an LS-DYNA three-dimensional simulation model, the influence of

收稿日期: 2025-01-02

修回日期: 2025-03-05

录用日期: 2025-04-03

基金项目: 山西省 2024 年度研究生教育创新计划 (2024YZ27); 山西省研究生科研创新项目 (2024KY592)

第一作者: 李巧歌 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事高效毁伤理论与技术、弹箭结构设计研究。

E-mail: S202301020@st.nuc.edu.cn

引用格式: 李巧歌, 梁增友, 董鹏飞. 新型石油射孔弹结构与数值模拟[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (4): 51-59. LI Qiaoge, LIANG Zengyou, DONG Pengfei. Structural design and numerical simulation of a new type of oil perforating charge[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (4): 51-59.

detonation wave propagation path control and the cone angle parameters of the liner on jet quality was systematically studied. In the simulation, eight evenly distributed initiation points were set on the large end face of the charge to achieve reverse annular detonation wave propagation. Additionally, a charge model with a continuously adjustable cone angle, ranging from 80° to 110° , was established to investigate jet forming quality, perforation diameters, and penetration depths at various cone angles. The results show that the propagation direction of the detonation wave is reversed by the annular initiation method, causing it to propagate approximately in a flat plane. A high-speed jet is formed, improving the energy utilization rate of the explosives. When the cone angle of the liner is increased to 90° , the velocity of the jet head can reach 6603 m/s, approximately 91.6% higher than that of the traditional apical center initiation method. Furthermore, the penetration depth is approximately 19 times the diameter of the liner. These findings demonstrate that the synergistic effect of reverse annular initiation and a large cone angle design can effectively balance jet velocity and stability, providing a theoretical basis and technical reference for the miniaturization of high-density perforation completion tools.

KEYWORDS: oil recovery technology; new type of oil perforating charge; numerical simulation; reverse annular initiation; large cone angle liner

石油是一个国家生存和发展不可缺少的战略资源^[1]。在石油开采中,根据生产层的地质特点,采用的完井方式主要有以下4种:射孔完井、裸眼完井、割缝衬管完井和砾石充填完井。其中,射孔完井是目前国内外广泛使用的一种完井方式,其过程为射孔弹在射孔枪内引爆,在炸药爆轰驱动下,药型罩产生高速射流,依次穿透枪管、井液、套管,然后穿入富含油气资源的地下岩层。石油射孔弹的作用原理是利用聚能效应^[2]形成射流来打开油气井和产油层岩土介质之间的通道,穿孔深度和穿孔半径决定了石油开采的产油率。自19世纪起,聚能射孔技术被广泛应用于破甲弹中,大大提高了其破甲效果,是一项非常成熟的技术,后又被应用在石油射孔弹中,但聚能效应受炸高影响显著^[3]。石油射孔弹的特征是装药量少且炸高低,装药量少是为了减小爆炸对油井套管的损伤,但也会导致作用在药型罩上的能量有限,形成的金属射流速度较低,从而影响穿孔深度;炸高低是由于油井套管和射孔枪内径(有枪身射孔器)的限制,会导致石油射孔弹产生的射流在未能充分拉伸的状态下,其头部已经开始侵彻靶板,浪费了射流的有效速度以及持续作用时间。石油射孔弹主要由药型罩、炸药和弹体3个部分组成,其作用效果主要体现为穿孔的深度与孔径大小,故影响射孔弹穿深和穿孔孔径的主要因素有药型罩材料、壳体材料、炸药性能、爆轰波形和炸高等^[4]。

现阶段,从大孔径、高密度、高穿深、无杵堵等角度出发,研究者们提出了多种新型石油射孔弹的设计理念。朱杰^[5]列举了几种新型射孔弹的设计构想,如采用高燃值纳米金属、串联射孔弹、随进子弹射孔弹等,并探讨了影响射孔弹最终效果的几个因素。乔亚波等^[6]通过对新型装药结构、药型罩结构以及药型罩配方等进行改进,提高了炸药利用率,增加了炸药能量对药型罩的有效作用时间,从而提高了油田采收率。张小石等^[7]设计了一种新型弹体,并对结构强度进行校核,通过理论方法计算了射孔深度和孔径大小。除此之外,学者们还对射流成形的影响因素进行了大量研究,李东伟、张银等^[8-9]的研究结果表明,炸药装药的起爆方式主要对其能量输出具有显著影响。同时,起爆方式还会对爆轰波的传播和波形产生影响,进而影响射流质量。徐立新等^[10]将某破甲战斗部起爆点移动到大端开口处,由顶部一点起爆转为底部环形起爆。结果表明,采用爆炸网络替代隔板和副药柱,不仅起爆可靠,可以精确控制并获得理想的爆轰波形,而且还大幅度提高了破甲弹的破甲威力及其稳定性。古海波等^[11]通过合理改善爆轰波阵面形状,由传统的点起爆形成的球面散心爆轰转为近似一维平面爆轰,提高了射流质量。同时,通过改变起爆方式提高了炸药装药利用率,与传统改变爆轰波形的方式相比,节省了加装平面波发生器的空间,更适合射孔弹空间有限的结构特点。孙善政等^[12]探

究了岩土介质中爆炸冲击波的反射机理。李发伯等^[13]通过试验证实了逆向环形起爆和大锥角小长径比聚能装药可以产生高速射流。石健等^[14]对逆向起爆射孔弹进行了多种方案的试验, 提出起爆同步性对逆向起爆形成的射流质量具有显著影响。

目前, 针对提高穿深和开孔大小的研究主要是以破甲弹为对象, 且药型罩锥角大小一般选取 90° 或 120° , 对于锥角变化对射流性能的影响规律并未开展详细研究。同时, 针对石油射孔弹的结构设计仍停留在理论分析层面, 并没有结合石油射孔弹装药量少、炸高低的特点。因此, 本文提出应用小口径逆向环形起爆方式, 采用 LS-DYNA 进行仿真计算, 探究了 $80^\circ \sim 110^\circ$ 锥角下石油射孔弹射流成形质量, 以论证此结构应用在石油射孔弹上的合理性。

1 理论分析

1.1 射流形成理论

聚能装药结构在炸药引爆后, 爆轰波产生的高压瞬间作用于铜质药型罩, 罩体在微秒级时间内经历剧烈塑性变形, 沿轴向被压垮汇聚, 形成头部速度极高尾部速度较低的金属射流。图 1 为不同起爆方式下射流的形成过程。其中, α_1 和 α_2 分别为正向起爆和逆向起爆时药型罩的半锥角; φ 为转折角; β 为压垮角。图中箭头指向即为爆轰波传播方向。

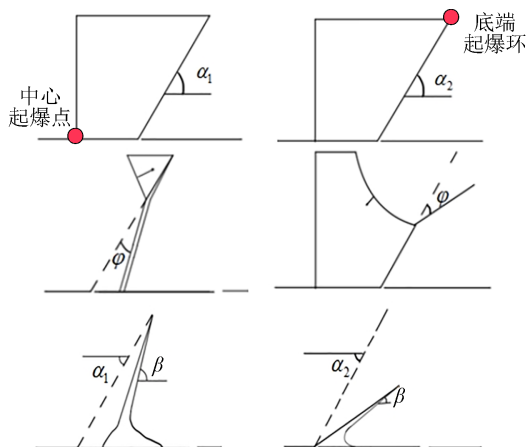


图 1 不同起爆方式下射流形成过程

Fig. 1 Process of jet formation with different detonation methods

由射流成形理论及聚能效应分析可知, 随着药型罩半锥角 α 的增大, 压垮角 β 也随之增大, 正

向起爆时, 大锥角药型罩聚能装药形成的射流短粗低速, 易形成爆炸成型弹丸 (explosively formed projectile, EFP), 达不到高速侵彻的效果。在金属药型罩形成射流的过程中, 当爆轰波扫过药型罩表面时, 使药型罩产生一个转折角 φ , 正向点起爆时压垮角 β 为药型罩半锥角 α 与转折角 φ 之和, 而逆向环形起爆的压垮角 β 为药型罩半锥角 α 与转折角 φ 之差。由流体动力学与射流形成理论分析可知, 逆向环形起爆时药型罩各微元的压垮角比正向点起爆时药型罩各微元的压垮角小, 因此可获得较高的压垮速度, 从而可以获得更高速度的金属射流。

1.2 炸药装药与爆轰波形

根据爆轰物理学原理, 平面波发生器可以通过调控爆轰波阵面形态使其趋近于理想平面波, 可显著降低药型罩微元压垮角, 从而提高金属射流速度。然而, 石油射孔弹结构紧凑, 难以实现在有限空间中安装平面波发生器, 若采用逆向起爆方式, 爆轰波从药型罩罩底向罩顶方向运动, 使药型罩在短时间内产生折转, 此时药型罩各微元的压垮角比正向起爆时的压垮角小得多, 进而可以在不增加平面波发生器的情况下提高射流速度, 从而提升炸药能量的利用率。

2 数值模拟

石油射孔弹的研发与改进基本上是按照设计、理论分析和试验验证的流程进行。然而, 爆炸试验费用昂贵, 且试验过程漫长复杂, 测量手段和观测条件在很大程度上限制了爆破试验的推广应用。数值仿真能够突破控制方程的限制, 得到更加接近于实际情况的解。因此, 利用计算机对聚能装药爆破形成的射流及其侵彻靶板过程进行数值仿真成为一种重要的研究方法。

2.1 石油射孔弹作用过程

石油射孔弹产生的射流依次穿透枪管、井液、套管, 然后进入到地下岩层中, 其三维仿真模型如图 2 所示。在地面混凝土靶试验中, 用混凝土靶代替地下岩层^[14]。为了计算方便, 通常将石油射孔弹的射流穿孔作用过程简化为射流侵彻混凝土靶板或钢靶板。然而, 石油射孔弹的作用过程涉及多种靶板材料, 还有固液靶板之间的转变, 所以简化计算是不合适的, 建立真实数值分析模型是保证计算结果有效的关键步骤。根据真实作用

环境, 石油射孔弹的结构参数如表 1 所示。

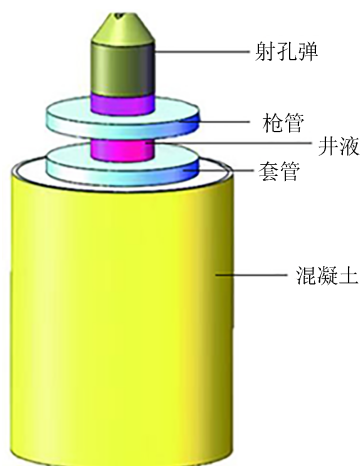


图 2 石油射孔弹及靶板三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of oil perforating charge and target plate

表 1 结构参数

Table 1 Structural parameters					mm
装药高度	药型罩高度	枪管厚度	井液厚度	套管厚度	
20	20	4	16	7.8	

2.2 数值仿真模型建立

聚能射流形成及其侵彻靶板的过程是多种物质大变形的复杂运动, 选择合适的计算方法是仿真结果接近真实有效的前提条件^[15]。针对不同区域, 选用不同的网格划分方法, 即枪管、套管、混凝土靶板采用 Lagrange 有限元网格进行划分, 药型罩、炸药装药、空气、井液采用 ALE 有限元网格^[16]进行划分。同时, 采用流固耦合方式来计算射流侵彻枪管、套管和混凝土的过程。考虑模型对称性以及计算效率, 建立四分之一石油射孔弹以及靶板三维仿真模型, 并对其进行网格划分, 对网格收敛性进行分析^[15]。不同区域的网格尺寸划分如下: 药型罩中心部分及与其共节点的炸药和空气网格尺寸为 0.2 mm, 其余部分由中心过渡至药型罩底部, 尺寸为 0.8 mm; 靶板采用中心密、周围稀疏的形式, 将半径为 10 mm 以内的靶板网格尺寸划分为 0.5 mm, 剩余部分向外过渡, 网格尺寸为 1 mm。

2.3 材料与状态方程的选取

石油射孔弹的结构涉及药型罩、炸药装药、空气、井液、钢靶板以及混凝土靶板, 因此要选用恰当的本构状态方程来定义不同材料的性质。其中, 药型罩材料选取密度为 8.93 g/cm³ 的紫铜, 本构模型为 Steinberg, 状态方程为 Gruneisen^[17];

炸药装药选取 8701 炸药 (黑索金: 二硝基甲苯: 聚醋酸乙烯酯: 硬脂酸=95:3:2:0.5), 密度为 1.717 g/cm³, 爆速为 7 980 m/s, 采用 JWL 状态方程来描述爆轰产物的压力、体积和能量特性^[18]; 空气材料选用 Null 本构模型和 Linear Polynomial 状态方程^[19]。在地面混凝土靶板试验中, 通常在模拟枪管与套管的钢靶间填充水, 以模拟真实射孔环境中的井液。数值计算中, 水材料选用 Null 本构模型和 Gruneisen 状态方程来进行描述^[20]。此外, 枪管和套管材料均为 45 # 钢, 采用应变率相关和失效相结合的各向同性塑性随动硬化模型, 并选用 Johnson-Cook 本构模型和 Gruneisen 状态方程来进行描述。混凝土材料模型的选取对计算结果尤为重要, 选取 Johnson-Holmquist-Concrete 本构模型来描述混凝土材料^[21]。

3 数值模拟结果分析

3.1 逆向环形起爆爆轰波传播过程

逆向环形起爆方式改变了爆轰波的传播方向, 改善了爆轰波形, 使得药型罩从底部向顶部压垮, 药型罩两侧炸药爆炸的能量充分作用于药型罩, 在罩顶形成类似平面波, 提高形成射流的质量, 节约了增设平面波发生器的空间, 从而在保证射流成形质量的同时, 有效提高装药量^[22]。90° 锥角下逆向环形起爆爆轰波传播过程如图 3 所示。

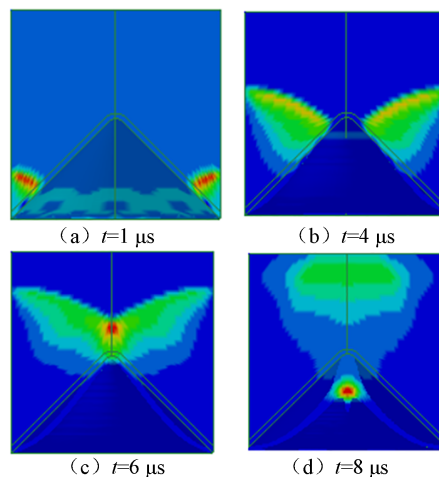


图 3 逆向环形起爆爆轰波传播过程

Fig. 3 Propagation process of reverse annular detonation wave

仿真过程中, 通过在大端口端面处均匀设置 8 个同步起爆点 (起爆时间偏差小于等于 0.1 μs), 构建以轴线对称的环形爆轰波传播体系。由图 3 可

知, 在起爆后约 $1\ \mu\text{s}$ 内形成了稳定扩展的环形波阵面, 随后在 $4\sim 6\ \mu\text{s}$ 内相邻爆轰波之间发生正碰撞, 在碰撞点处触发马赫反射效应, 生成局部压力高达几万兆帕的球面汇聚高压区。该高压区通过定向压力梯度场驱动药型罩动态压垮, 使罩体微元压垮角降至 $8^\circ\sim 15^\circ$, 并在 $10^6\ \text{s}^{-1}$ 量级高应变率下实现材料绝热剪切变形。爆轰产物动量矢量叠加, 显著提升能量耦合效率至 $78\%\sim 82\%$, 促使罩顶形成准平面波加载条件, 最终生成头部速度高达 $4.5\sim 7.6\ \text{km/s}$ 、径向分散角小于等于 1.8° 的高质量层流射流, 其连续长度较常规结构提升约 $30\%\sim 40\%$, 充分验证了逆向环形起爆在波形调控与能量定向传输方面的技术优势。

3.2 射流形成及穿靶过程的模拟结果与分析

射孔弹的穿靶效果主要用穿孔孔径和穿深进行描述, 以评估石油射孔弹的性能, 其作用过程可以分为 6 个重要节点, 即爆轰波传播、药型罩变形、射流成形、射流拉伸并作用于枪管、在井液中传播以及侵彻混凝土靶板。由于射流在形成和作用靶板的不同阶段中所关注到的重点不同, 因此本文仅展示了各阶段的特征性内容。利用 ANSYS/LS-DYNA 程序计算得到石油射孔弹射流形成及其穿靶过程各阶段图像如图 4 所示。

图 4 (a) ~ (d) 分别为射孔弹初始情况、炸药起爆、爆轰波传播及射流形成过程的图像。在 $t = 0\ \mu\text{s}$ 时, 炸药起爆, 环形起爆点位于药型罩底部, 爆轰波汇聚, 汇聚区压力急剧升高, 形成球面汇聚爆轰波高压区, 然后经过药型罩挤压形成聚能射流。其中, 当 $t = 3\ \mu\text{s}$ 时, 药型罩开始产生变形, 但无射流产生; 当 $t = 5\ \mu\text{s}$ 时, 开始形成射流; $5\sim 10\ \mu\text{s}$ 时, 射流在炸高范围内进行拉伸。

图 4 (e) ~ (h) 分别为射流依次穿透枪管、井液和套管的过程图像。当 $t = 10\ \mu\text{s}$ 时, 射流到达枪管内壁 (碰靶); 当 $t = 11\ \mu\text{s}$ 时, 射流穿透枪管进入井液中; 当 $t = 14\ \mu\text{s}$ 时, 射流穿透井液, 到达套管内壁; 当 $t = 16\ \mu\text{s}$ 时, 射流穿透套管, 即将侵彻混凝土靶, 在入射冲击波的预压作用下, 混凝土靶已经有区域损伤。

图 4 (i) ~ (j) 分别为射流侵彻混凝土靶的穿孔过程图像。在这个过程中, 射流被逐渐拉伸。

图 5 为射流对混凝土靶侵彻终止时的穿孔图像, 图 6 为混凝土靶有限元模型失效单元示意图。

由图 5 和图 6 可知, 经过射流侵彻的混凝土靶

板, 其中心有限元单元发生连续失效, 形成贯通的中心孔洞, 说明可以实现石油流动传输; 径向混凝土靶单元失效集中在靶板初段和射流头部减速阶段, 压实带不明显且径向混凝土松动, 说明可实现石油高渗透。

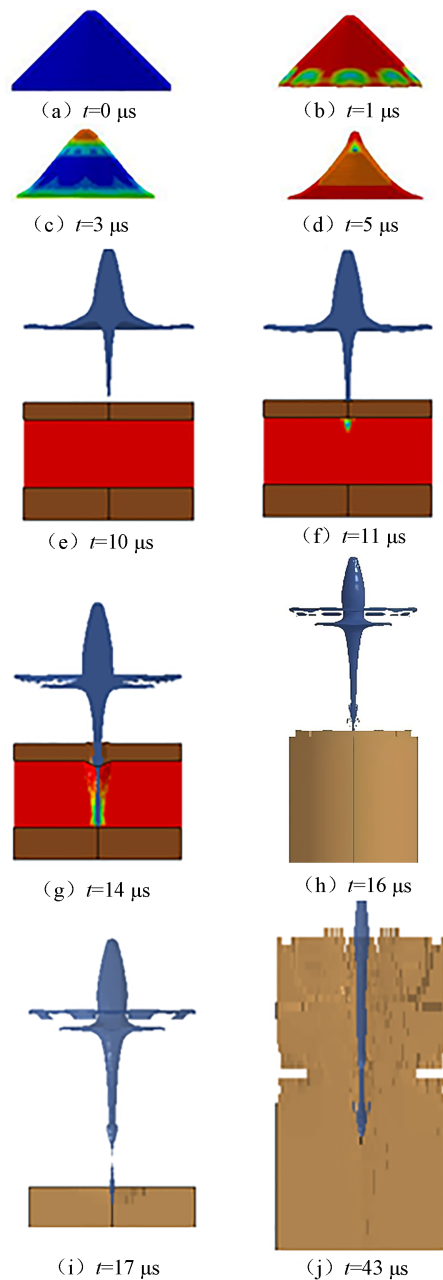


图 4 射孔弹射流形成及穿靶过程

Fig. 4 Jet formation and penetration process of perforating charges

按照射孔弹穿深的计量标准, 射流速度应大于 $1\ 000\ \text{m/s}$, 射孔弹的穿深值等于混凝土靶的穿深加上套管的厚度^[23]。当射孔弹侵彻强度为 $40\ \text{MPa}$ 的标准混凝土靶时, 在 $300\ \mu\text{s}$, 混凝土完全

失效侵彻深度为 760 mm, 约为 19 倍的装药直径, 套管上入口孔径为 10 mm。



图 5 侵彻终止时靶板的形态

Fig. 5 Shape of the target plate at the end of penetration

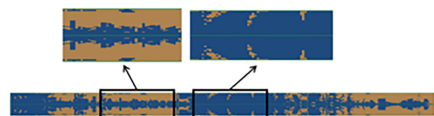


图 6 侵彻终止时靶板的局部失效单元

Fig. 6 Local failure unit of the target plate at the end of penetration

有枪身的石油射孔弹在完成射孔后, 需要将枪身从井中取出, 套管上的孔眼作为渗油的主要出口。因此, 大孔径射孔弹设计的主要目的是在有一定穿深的条件下, 尽可能在套管上产生较大的孔眼, 以便石油的流出。从模拟结果可以看出, 该射孔弹侵彻混凝土靶具有较好的穿深效果, 在枪管、套管上的入口孔径也较大, 能满足油田的开采要求。

3.3 锥角大小对侵彻混凝土特性的影响

分别设置药型罩锥角为 80° 、 90° 、 100° 和 110° , 如图 7 所示。通过观测射流头部速度、同一时间下的射流直径及穿孔孔径大小、射流侵彻混凝土效果以及最终穿深, 分析药型罩锥角对侵彻混凝土特性的影响^[24-25]。

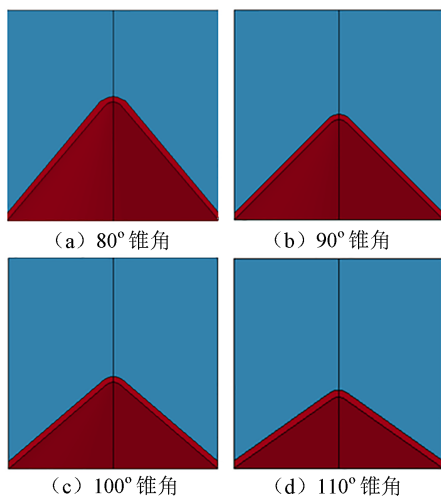


图 7 不同锥角的药型罩模型

Fig. 7 Models of the liner with different cone angles

3.3.1 锥角大小对形成射流速度的影响

锥角大小显著影响射流速度, 较小的锥角能够通过增强流线收缩效应和轴向压力梯度来提升射流速度, 而过大的锥角易引发流动分离与湍流耗散, 导致能量损失和速度下降, 不同药型罩锥角下所形成射流的速度如图 8 所示。射流最大头部速度随药型罩锥角的变化趋势如图 9 所示。

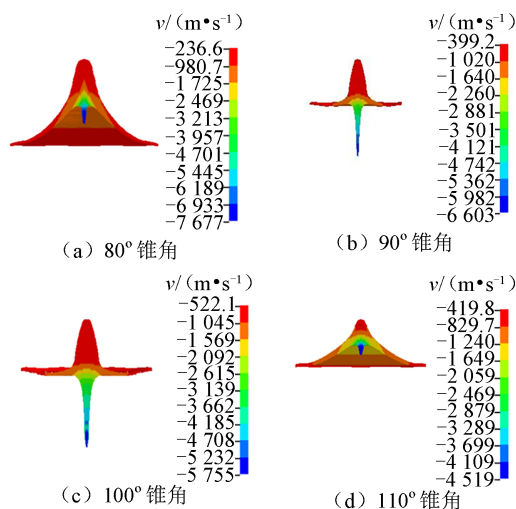


图 8 不同药型罩锥角下形成射流的头部速度

Fig. 8 Head velocity of the jet with different cone angles

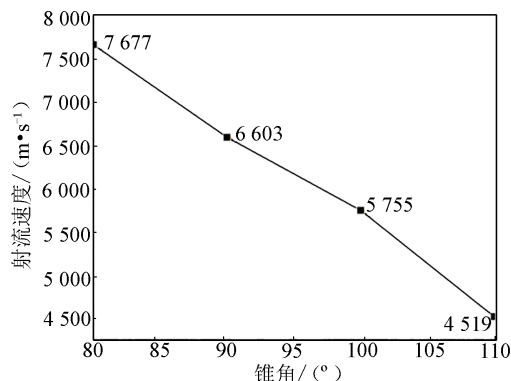


图 9 射流头部速度随药型罩锥角的变化趋势

Fig. 9 Variations in the trend of jet head velocity with different cone angles

随着药型罩锥角的增大, 形成射流的最大头部速度不断减小, 锥角每增加 10° , 射流最大头部速度依次减小约 1 000 m/s, 药型罩锥角的改变对头部速度影响较大。

3.3.2 锥角大小对射流粗细及穿孔孔径的影响

虽然在较小的锥角下所形成的射流头部速度更大且动能更加集中, 但其穿孔孔径却相对较小。本文选取在爆炸后 $24.999 \mu\text{s}$ 时, 通过对不同药型罩锥角在相同时刻下所形成的射流粗细及穿孔孔

径进行对比, 来分析锥角大小对射流及其穿孔效果的影响, 计算结果如图 10 所示, 统计结果如表 2 所示。

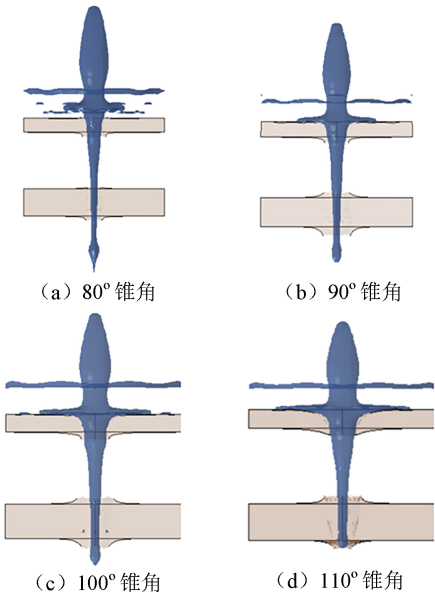


图 10 不同药型罩锥角下射流粗细及穿孔孔径
Fig. 10 Jet thickness and perforation aperture with different cone angles

表 2 不同药型罩锥角下射流粗细及穿孔孔径统计结果
Table 2 Statistical results of jet thickness and perforation aperture with different cone angles

药型罩 锥角/(°)	射流 直径/mm	穿孔 孔径/mm	开孔 直径/mm
80	6	8	13
90	7	10	15
100	10	11	20
110	11	12	21

由图 10 可知, 随着药型罩锥角的增大, 同一时间下的射流拉伸长度变短, 射流变粗, 对枪管和套管的穿孔孔径变大, 表明药型罩锥角的改变对射流粗细及穿孔孔径大小影响较为明显。射流射穿套管的孔眼是产油的主要出口, 因此应在套管上形成足够大的孔眼, 以保证油井产能。

在侵彻结束时, 由于杆体会进入到混凝土靶中, 导致开孔直径变大, 但考虑到射流速度梯度, 杆体速度过低会堵塞孔道, 影响石油流出。90° 锥角下射流杆体可以到达穿深较深的位置, 对孔道通畅影响较小。

3.3.3 锥角大小对穿深的影响

随着药型罩锥角的增大, 射流的侵彻效果变化不明显, 都可以造成混凝土靶完全失效, 但混

凝土失效单元在逐渐减少, 在 300 μ s 时的穿深也相应减小。

如表 3 所示, 药型罩锥角为 90° 时的穿深最大, 随着锥角的增加, 穿深在大幅减小, 当药型罩锥角为 110° 时, 穿深仅为 5.7 倍的药型罩口径。

表 3 不同药型罩锥角下射流穿孔深度统计结果
Table 3 Statistical results of jet penetration depth with different cone angles

药型罩 锥角/(°)	药型罩端 口径/mm	穿深/mm	穿深与药型 罩口径之比
80	40	736	18.4
90	40	760	19.0
100	40	613	15.3
110	40	228	5.7

3.4 逆向环形起爆对射流速度的影响

对相同结构的顶端中心点起爆方式进行数值模拟, 所形成射流的速度分布如图 11 所示。经过计算, 药型罩锥角为 90° 时的射流头部速度最高为 3 446 m/s, 而逆向环形起爆方式的射流头部速度最高可达 6 603 m/s, 相比顶端中心点起爆的方式提高了约 91.6%。

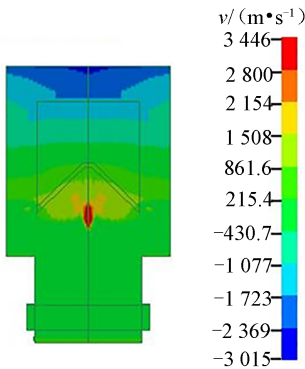


图 11 顶端中心点起爆时的射流速度
Fig. 11 Velocity of detonation jet of the apical center point

4 结论

本文通过理论分析与数值仿真的方法, 验证了逆向环形起爆及大锥角的新型装药结构应用于石油射孔弹的可行性, 并对此结构下爆轰波传播机理和药型罩锥角参数对射流成形质量的影响规律进行了探究, 得到如下结论。

1) 设计 80° ~ 110° 大锥角逆向环形起爆结构新型石油射孔弹。经对比, 当药型罩锥角为 90°

时,可以有效提高射流的速度和质量,并提升采油率。

2) 药型罩锥角大小对射流头部速度具有显著影响。随着锥角增大,射流头部速度逐渐降低,动能减少。当药型罩锥角为 90° 时,射流头部速度最高可达 $6\,603\text{ m/s}$,且穿深约为药型罩口径的 19 倍。

3) 随着药型罩锥角增大,射流穿孔孔径逐渐增大,有益于石油的流出。当药型罩端口锥角为 90° 时,穿孔直径可达 10 mm 。

4) 逆向环形的起爆方式改变了爆轰波的传播方向,对药型罩的压垮作用接近平面波,从而提高了炸药装药的能量利用率,克服了石油射孔弹装药量少的问题,有效提高了药型罩微元压垮速度。相比于顶端中心点起爆方式,逆向环形起爆的射流头部速度提高约 91.6% 。

参考文献

- [1] 黄冠. 高新技术在采油工程中的应用现状及展望[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(19): 160-162.
- [2] 尹建平, 王志军. 弹药学[M]. 第3版. 北京: 北京理工大学出版社, 2017: 200-210.
- [3] 谭力犁, 张团, 乔立刚, 等. 聚能射流侵彻运动钢靶的数值仿真[J]. 兵工自动化, 2021, 40(10): 6-9. TAN L L, ZHANG T, QIAO L G, et al. Numerical simulation of shaped jet penetrating moving steel target[J]. Ordnance Industry Automation, 2021, 40(10): 6-9.
- [4] 柏中秋. 影响石油射孔弹穿孔深度的几个主要因素[J]. 化学工程与装备, 2019(9): 136, 138.
- [5] 朱杰. 对多种新型石油射孔弹的讨论[J]. 化工管理, 2020(4): 223.
- [6] 乔亚波, 于秋来, 贺建磊, 等. 新型超深穿透射孔弹[J]. 油气井测试, 2021, 30(4): 62-66. QIAO Y B, YU Q L, HE J L, et al. A new type of ultra-deep penetrating perforating charge[J]. Well Testing, 2021, 30(4): 62-66.
- [7] 张小石, 王宪升, 喻翔. 石油射孔弹威力计算与设计[J]. 化学工程与装备, 2022(5): 105-107.
- [8] 李东伟, 亢慧, 熊国松, 等. 起爆方式对炸药爆炸冲击波压力场影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(5): 79-83. LI D W, KANG H, XIONG G S, et al. Study on effects of initiation modes on pressure of shock wave[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(5): 79-83.
- [9] 张银, 周春桂, 王志军, 等. 起爆方式对半球型药型罩射流形成影响的数值模拟[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(12): 55-57.
- [10] 徐立新, 刘红利. 爆炸网络在聚能装药战斗部上的应用技术研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(10): 1383-1388. XU L X, LIU H L. Research on the application of explosive network in the shaped charge warhead[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(10): 1383-1388.
- [11] 古海波, 姜伟华, 赵会. 射孔弹起爆方式探析[C]// 中国石油学会测井专业委员会射孔分会第五届年会论文集. 北京: 中国石油学会, 2006: 64-68.
- [12] 孙善政, 王伟, 刘渊, 等. 分层岩土介质中的爆炸地冲击横向传播规律[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(6): 12-22. SUN S Z, WANG W, LIU Y, et al. Transverse propagation law of explosion ground shock in layered geotechnical medium[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(6): 12-22.
- [13] 李发伯, 晏成立, 周光前, 等. 聚能炸药逆向环形起爆形成高速射流研究[J]. 爆炸与冲击, 2000(3): 270-273. LI F B, YAN C L, ZHOU G Q, et al. Investigation of shaped charge jet with reverse initiation at liner base[J]. Explosion and Shock Waves, 2000(3): 270-273.
- [14] 石健, 王宝兴, 汪长栓. 逆向起爆小长径比聚能射孔弹试验与数值计算研究[J]. 测井技术, 2006(1): 40-43, 100. SHI J, WANG B X, WANG C S. On experiment and numerical simulation calculation of converse detonating small length diameter ratio shaped charges[J]. Well Logging Technology, 2006(1): 40-43, 100.
- [15] 王树山. 终点效应学[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2019: 134-169.
- [16] QI S B, HUANG G Y, ZHI X D, et al. External blast flow field evolution and response mechanism of single-layer reticulated dome structure[J]. Defence Technology, 2023, 24: 241-253.
- [17] 孟海洋. 油田完井方式工艺技术研究[J]. 化工设计通讯, 2021, 47(12): 28-29. MENG H Y. Study on well completion mode and technology in oilfield[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2021, 47(12): 28-29.
- [18] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. TrueGrid和LS-DYNA动力学数值计算详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 180-200.

- [19] 徐浩. 超高速金属射流侵彻高强混凝土靶 ALE 仿真[D]. 西安: 西安石油大学, 2021: 25-29.
- XU H. ALE simulation of ultra-high speed metal jet penetration into high strength concrete target[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021: 25-29.
- [20] 胡绪腾, 张雪强, 宋迎东. 状态方程对叶片外物损伤数值模拟结果的影响[J]. 航空计算技术, 2013, 43(1): 21-24.
- HU X T, ZHANG X Q, SONG Y D. Effect of equation of state on numerical simulation results of outer object damage to aeroengine blades[J]. Aeronautical Computing Technique, 2013, 43(1): 21-24.
- [21] 崔浩, 郭锐, 宋浦, 等. 基于遗传算法辨识炸药 JWL 状态方程参数的研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(9): 174-180, 209.
- CUI H, GUO R, SONG P, et al. Identification of parameters of explosive JWL state equation based on genetic algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(9): 174-180, 209.
- [22] 傅磊, 王伟力, 李永胜, 等. 组合药型罩水介质中成型的数值仿真[J]. 鱼雷技术, 2015, 23(5): 367-373.
- FU L, WANG W L, LI Y S, et al. Numerical simulation of combined liner formation in water[J]. Torpedo Technology, 2015, 23(5): 367-373.
- [23] 李耀, 李和平, 巫绪涛. 混凝土 HJC 动态本构模型的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(8): 1244-1248.
- LI Y, LI H P, WU X T. Research on the HJC dynamic constitutive model for concrete[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2009, 32(8): 1244-1248.
- [24] 朱俊杰, 卢永刚, 冯星奎, 等. 壳单元和实体单元模拟爆炸荷载作用钢板动力响应的差异性比较[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(5): 18-22.
- ZHU J J, LU Y G, FENG X K, et al. Comparison of differentiation with the steel plates' dynamic response subjected to blast loads using shell element and solid element modeling methods[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(5): 18-22.
- [25] 金玮玮, 张昭, 张洪武. 药型罩锥角对射孔枪射流冲击过程的影响[J]. 计算力学学报, 2011, 28(S1): 43-48.
- JIN W W, ZHANG Z, ZHANG H W. Effect of liner cone angle on perforation and impact process of perforating guns[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(S1): 43-48.

(编辑: 刘建民)