

doi: 10.7690/bgzdh.2024.11.019

攻坚战斗部前级装药的优化设计

李学岭, 韩明蕾, 刘明敏, 胡 渊

(安徽方圆机电股份有限公司, 安徽 蚌埠 233010)

摘要: 针对攻坚战斗部前级装药侵深兼顾孔径的双重要求, 基于 80 mm 口径装药平台设计正交优化方案, 并运用有限元软件 AUTODYN 进行 2 维数值模拟, 分析攻坚战斗部前级药型罩及隔板结构参数对射流形成及对混凝土靶板侵彻的影响规律。提出用侵彻深度 L 和无量纲数 γ 作为评价指标, 找出各结构参数对 2 个指标影响的主次顺序, 并获得了药型罩壁厚、罩顶高、隔板厚度、隔板直径等最佳组合, 在此基础上进行对钢筋混凝土靶的静态试验。结果表明: 数值模拟与试验吻合较好, 优化后的侵彻孔径较原结构提高了 20%, 该方法可为攻坚战斗部装药技术的进一步研究提供参考。

关键词: 攻坚战斗部; 数值模拟; 正交优化; 侵彻

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Optimization Design of Forward Charge for Fortification Warhead

Li Xueling, Han Minglei, Liu Mingmin, Hu Yuan

(Anhui Fangyuan Mechanical and Electrical Co., Ltd., Bengbu 233010, China)

Abstract: According to the dual requirements of the penetration depth and aperture of the front charge of the fortification warhead, the orthogonal optimization scheme was designed based on the 80 mm caliber charge platform, and the two-dimensional numerical simulation was carried out by using the finite element software AUTODYN to analyze the influence of the structural parameters of the front charge liner and clapboard of the fortification warhead on the jet formation and penetration into the concrete target. The penetration depth L and the dimensionless number γ are proposed as the evaluation indexes, and the order of the influence of the structural parameters on the two indexes is found out, and the best combination of the wall thickness of the liner, the top height of the liner, the thickness of the clapboard and the diameter of the clapboard is obtained. On this basis, the static test of the reinforced concrete target is carried out. The results show that the numerical simulation is in good agreement with the experiment, and the optimized penetration aperture is increased by 20% compared with the original structure. This method can provide a reference for the further study of the charge technology of the fortification warhead.

Keywords: fortification warhead; numerical simulation; orthogonal optimization; penetration

0 引言

钢筋混凝土结构广泛应用于现代防御工程, 攻坚弹是侵彻钢筋混凝土防御工事的重要武器之一, 随着混凝土工事的不断加强, 如何增强攻坚战斗部的前级侵彻能力已成为学者们研究的热点。王辉^[1]对混凝土材料在聚能射流作用下的动态响应及侵彻机理进行了分析; 张雷雷等^[2]通过试验研究了爆炸成型杆式侵彻体对混凝土靶的侵彻特性; 王静等^[3]应用球形空腔理论得到了混凝土靶的阻力计算模型, 并与数值模拟结果进行了对比; 段卓平等^[4]研究了多点环形起爆对混凝土靶的侵彻威力影响, 对比研究了铝药型罩和铜药型罩侵彻混凝土的过程; 肖强强等^[5]研究了聚能装药对混凝土侵彻的径向扩孔规律; 林华令等^[6]研究了混凝土侵彻数值模拟的影响因素; 王成等^[7]开展了不同药型罩材料、不同

锥角、不同壁厚的聚能装药在不同炸高下对混凝土的侵彻; 陈闯等^[8]用数值模拟研究了串联战斗部前级 K 装药的形成, 并进行了优化设计。

以往的研究中, 关于攻坚战斗部前级装药在原结构基础上进行主要参数的匹配优化并进行试验验证的较少; 为此, 笔者应用 AUTODYN 有限元软件, 对某攻坚战斗部前级装药射流形成及侵彻过程进行数值模拟, 并通过正交优化设计方法, 分析药型罩壁厚、罩顶高、隔板厚度、隔板直径等 4 个关键参数对聚能侵彻体形成及侵彻混凝土的影响规律, 获得最佳装药结构, 并通过试验验证优化结果的可靠性。

1 数值模拟模型

1.1 装药结构模型

战斗部结构如图 1 所示, 装药直径 80 mm, 装

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-07-22

第一作者: 李学岭(1969—), 男, 安徽人, 硕士。

药高度为 105 mm，药型罩采用单锥罩，锥角为 90°，其他主要结构参数包括罩顶高 a 、隔板厚度 b 、隔板直径 D 、药型罩壁厚 h 。拟通过改变 4 种参数研究不同组合对聚能侵彻体形成及侵彻混凝土的影响规律。

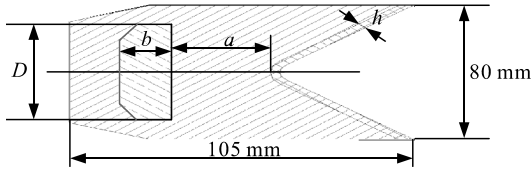


图 1 装药结构模型

1.2 计算模型

数值模拟结构模型为 2 维轴对称模型。其中药型罩结构为钛合金，密度 4.5 g/cm^3 ，本构模型为 Johnson-Cook 模型，状态方程为 Gruneisen 方程；装药材料为 8 701，密度 1.70 g/cm^3 ，爆速 8350 m/s ，本构模型选用 HIGH-EXPLOSIVE-BURN 模型，状态方程选用 JWL 方程；隔板采用尼龙，密度 1.14 g/cm^3 ，材料模型为 von-Mises 模型，状态方程为 Shock 方程。射流形成后，将射流进行映射，侵彻混凝土靶，混凝土靶板采用 RHT 本构模型^[9]，该模型综合考虑了混凝土失效面的压力相关性、应变率效应、压缩损伤软化等特性，混凝土强度为 40 Mpa。射流形成计算模型如图 2 所示。

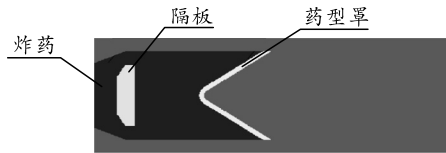


图 2 射流形成有限元模型

2 正交设计分析

该结构原参数为罩顶高 29 mm，隔板厚度 21 mm，隔板直径 62 mm，药型罩壁厚 3.5 mm。文献[10]基于包覆原参数的原则选取正交优化所需各参数的范围：罩顶高 a 取值范围选择为 18~51 mm，隔板厚度 b 取值范围选择为 12~27 mm，隔板直径 D 取值范围选择为 23~33 mm，药型罩壁厚 h 取值范围选择为 3.2~3.8 mm。选择 a 、 b 、 D 、 h 这 4 个参数作为正交优化设计的 4 个因素，每个因素取 4 个水平，各因素水平如表 1 所示。

表 1 正交试验各因素水平 mm

因素	a	b	D	h
水平 1	48	12	46	3.2
水平 2	38	17	52	3.4
水平 3	28	22	58	3.6
水平 4	18	27	66	3.8

若将所有不同水平进行组合计算，需进行 $4^4=256$ 次试验，利用正交分析法，文献[11]用 $L_{16}(4^4)$ 安排 4 个因素对应的 16 个水平，只需进行 16 次数值计算，形成的射流结果如图 3 所示。

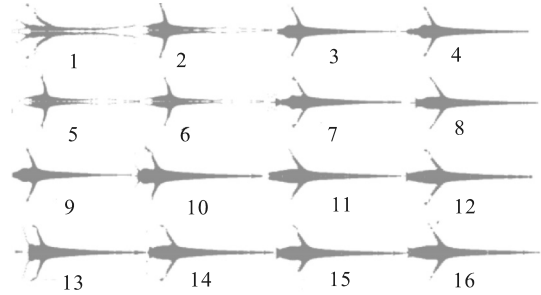


图 3 不同组合侵彻体成型结果

由上图可知：方案 1、2、5、6 射流头部分离且径向离散，成型效果差，方案 13 射流呈三角形结构，尾部杆体最小，速度最大，成型效果最优^[12-13]。

射流成型后，将侵彻体进行映射并侵彻混凝土靶板，得到各组侵彻结果。本次优化目的是得到侵彻深度兼顾孔径的装药结构，根据能量守恒原理，射流在混凝土中消耗的能量等于射流动能时，侵彻即完成，而射流在混凝土中侵彻分为轴向侵彻和径向扩孔 2 个行为，遂提出无量纲数 γ 代表扩孔孔径，其中 γ 为侵彻体的能量 E 对侵彻深度 L 的比值。 γ 值反应射流对混凝土的侵彻孔径，越大表示扩孔平均孔径越大，越小表示扩孔平均孔径越小。由此将侵彻体的侵彻深度 L 和 γ 作为评价指标，形成方案与结果如表 2 所示。对表中的结果做极差分析，求得各个因素影响下指标的极差，得到极差分析如表 3 所示。由表 3 可得各个因素对指标的影响主次顺序，即对穿深 L 的影响由主到次依次为 D 、 a 、 h 、 b ，对孔径 γ 的影响由主到次依次为 D 、 a 、 b 、 h ；因此，可以看出，隔板直径 D 是影响侵彻深度和孔径最重要的因素，其次是罩顶高 a 。

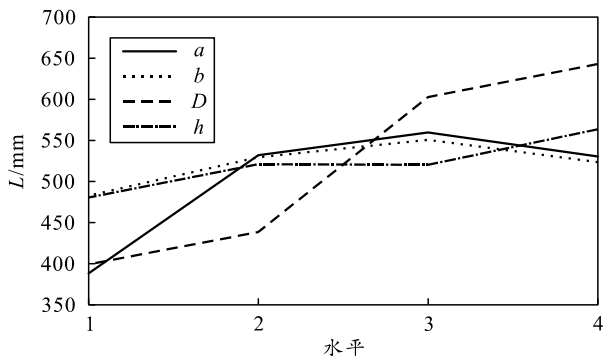
表 2 $L_{16}(4^4)$ 正交阵列方案与结果

方案	a/mm	b/mm	D/mm	h/mm	L/mm	E/kJ	γ
1	48	12	46	3.2	157	320	2.03
2	48	17	52	3.4	348	486	1.39
3	48	22	58	3.6	606	594	0.98
4	48	27	66	3.8	612	605	0.98
5	38	12	52	3.6	358	436	1.21
6	38	17	46	3.8	477	498	1.04
7	38	22	66	3.2	638	626	0.98
8	38	27	58	3.4	560	520	0.93
9	28	12	58	3.8	640	583	0.91
10	28	17	66	3.6	645	632	0.98
11	28	22	46	3.4	423	464	1.09
12	28	27	52	3.2	451	470	1.04
13	18	12	66	3.4	655	688	1.05
14	18	17	58	3.2	552	548	0.99
15	18	22	52	3.8	449	470	1.04
16	18	27	46	3.6	369	444	1.20

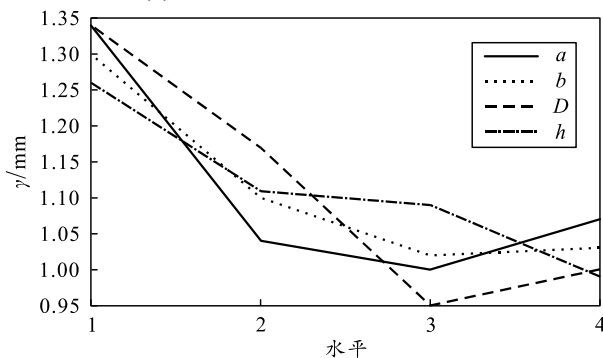
表 3 极差分析 mm

	L				γ			
	a	b	D	h	a	b	D	h
I	1 723	1 810	1 426	1 798	5.38	5.20	5.36	5.04
II	2 033	2 022	1 606	1 986	4.16	4.40	4.68	4.46
III	2 159	2 116	2 358	1 978	4.02	4.09	3.81	4.37
IV	2 025	1 992	2 550	2 178	4.28	4.15	3.99	3.97
I/4	344	452	356	449	1.34	1.30	1.34	1.26
II/4	508	505	401	496	1.04	1.10	1.17	1.11
III/4	539	529	589	494	1.00	1.02	0.95	1.09
IV/4	506	498	634	544	1.07	1.03	1.00	0.99
极差	195	77	278	95	0.34	0.28	0.39	0.27

分析每个因素中各水平对 2 个指标的影响及同因素对 2 个指标的影响差别，根据表 3 作出图 4。



(a) 各因素的不同水平对 L 的影响



(b) 各因素的不同水平对 γ 的影响

图 4 各因素不同水平对 L 和 γ 的影响

由图 4(a)可知，罩顶高较大时对穿深影响较大，原因是装药高度不变，罩顶高太大导致辅药柱过薄，能量不足所致；随隔板直径 D 增加，穿深 L 显著增大，这是由于隔板直径越大，作用在罩上的压力冲量越大，同时对罩的作用范围增大，有利于提高破甲穿深。由图 4(b)可知，各因素由水平 1 至水平 2，侵彻孔径整体急速减小；各因素由水平 2 至水平 3，侵彻孔径整体缓速减小；除壁厚 h 外，各因素由水平 3 至水平 4，侵彻孔径缓速增加。

分析各因素的最优水平组合，根据表 2 得到方案 13 穿深最大，且侵彻孔径相对较大，其各因素水平分别为：罩顶高 a 取水平 4，隔板厚度 b 取水平 1，隔板直径 D 取水平 4，药型罩壁厚 h 取水平 2。

结合图 4，隔板厚度 b 和药型罩壁厚 h 由水平 1 至水平 2 穿深变化不大，孔径急速降低，可知保持其他参数不变，将药型罩壁厚 h 取水平 1，侵彻孔径将显著增大。由此得到最优方案为：a=18 mm，b=12 mm，D=66 mm，h=3.2 mm。

将通过正交优化得到的最优组合重新进行数值模拟，得到射流及侵彻结果如图 5 所示，穿深 550 mm，γ 系数 1.25，侵彻通道孔径约为 28 mm，侵彻效果优于方案 13。

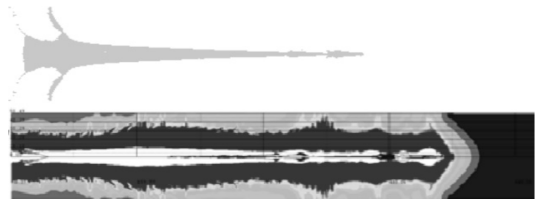


图 5 优化后射流成形及侵彻结果

3 试验验证

为验证数值模拟及正交优化结果的可靠性，进一步对优化后结构的毁伤能力进行了试验验证。试验靶板为 500 mm 厚 C40 钢筋混凝土墙，试验弹外径 80 mm，长度 105 mm，装药为 8701，密度 1.70 g/cm³。图 6 为试验弹的侵彻情况。钢筋混凝土靶墙被穿透，侵彻通道的孔径较为均匀。由于混凝土易碎，入口和出口处均产生较大的崩落，其中出口崩落半径大于入口，这是射流穿透靶墙产生拉伸波，由于混凝土的抗拉能力较弱，导致出口产生较大崩落。数值模拟及试验结果对比如表 4 所示。



(a) 入孔 (b) 出孔

图 6 侵彻混凝土墙破坏结果

表 4 数值模拟同试验对比 mm

方案	靶墙	炸高	侵彻孔径
新结构数值模拟	透	160	28
新结构试验	透	160	30
原结构试验	透	160	25

由上表可以看出，数值模拟与试验结果吻合较好，并且侵彻孔径较原结构提高了 20%，说明该优化方案可以有效的提高前级装药的侵彻能力。