

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.03.013

# 药型罩轴向密实度分布对射孔弹性能的影响研究\*

赵云涛 周 明 徐文新 鲁 坤 王 喜 李尚杰 李万全 段嘉庆

西安物华巨能爆破器材有限责任公司(陕西西安,710061)

[摘 要] 针对射孔弹研制过程中,钢靶穿深显著提高而混凝土靶穿深未能同向提高的现象,测试了药型罩轴向密实度的分布,并利用脉冲 X 光照相观测了射孔弹起爆后的射流形态,分析了药型罩轴向密实度分布不均匀对射流的影响。通过优化前后的射孔弹性能对比试验可知:距药型罩口部约 2/5 的部分密实度偏低,易造成尾部射流的过早断裂,将降低射孔弹在混凝土靶中的穿深。药型罩轴向密实度分布的均匀性提高 5.3%,射孔弹在钢靶中的穿深未受影响,但混凝土靶穿孔深度提高约 20.5%。

[关键词] 粉末药型罩;密实度;射流形态;穿孔性能

[分类号] TJ45+9

## 引言

常用的射孔弹性能测试方法有钢靶试验<sup>[1]</sup>和美国石油学会(API)推荐的混凝土靶试验<sup>[2]</sup>,在研制初期,一般用方法简便的钢靶试验来验证设计。为了了解射孔弹在油气地层的实际穿孔性能,行业内普遍采用混凝土靶试验进行验证。通常钢靶的穿深提高时,混凝土靶的穿深也会同时提高。但是,笔者在某型射孔弹的研制过程中发现:在工艺优化过程中,钢靶的穿深性能明显提升,而混凝土靶的穿深未能按预期提高。笔者推测可能是粉末药型罩制造过程中轴向密实度的分布不均匀所致。因此本文通过测量药型罩轴向各部分的密度,得出其轴向密实度的分布,又通过脉冲 X 光照相观测起爆后药型罩形成的金属射流形态。分析药型罩轴向密实度分布不均匀对金属射流穿混凝土靶性能的影响。

## 1 药型罩性能测试试验研究

### 1.1 药型罩轴向密实度分布测试

粉末药型罩本质上属于多孔材料,由于其可压缩性,具有传统密实材料所不具备的力学性能<sup>[3]</sup>。在此借用工程上的密实度概念。密实度反映了材料的致密程度,密实度的值愈大,材料的致密程度愈高。其计算方法见式(1)。

$$D = \frac{v}{v_0} \times 100\% = \frac{\rho_0}{\rho} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $v$  为固体部分的体积;  $v_0$  为总体积;  $\rho_0$  为堆积密度;  $\rho$  为体积密度(在此以理论密度代替)。

虽然药型罩的壁厚差(圆周上的最大壁厚值与

最小壁厚值之差)也是影响药型罩质量的因素<sup>[4]</sup>,但由于壁厚差在控制范围内,且在一个圆周方向的密实度分布是均匀的,因此不将壁厚差作为本文的研究内容。

采用轴向环形切割的方法,将药型罩沿轴线方向环形切割均分成 5 等份,测量药型罩的轴向各部分的密度。切割后药型罩见图 1 和图 2。

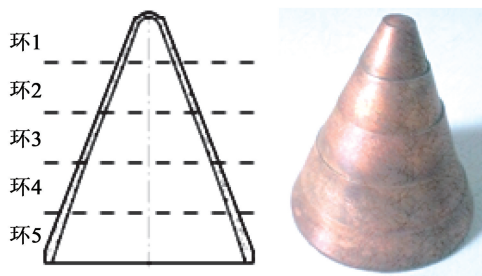


图 1 药型罩环形切割示意图

Fig. 1 An annular cutting liner



图 2 药型罩环形切割分解图

Fig. 2 Decomposition charts of an annular cutting liner

采用排水法测量药型罩各部分的体积,为了防止孔隙对结果的影响,采用石蜡封孔;用精密天平称量各部分的质量,并计算其平均密度(表1)。取同型号药型罩4发,依次编号为A1~A4,每个药型罩从上至下切割成5部分,编号为环1~环5,分别测

\* 收稿日期:2014-09-16

作者简介:赵云涛(1976~),男,硕士,高级工程师,主要从事石油爆破器材及射孔技术研究。E-mail:zyt21305@126.com

表 1 A 型药型罩密度分布

Tab. 1 Compactness distribution of A type liner

序号	环 1		环 2		环 3		环 4		环 5		均匀性
	平均密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	密实度	平均密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	密实度	平均密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	密实度	平均密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	密实度	平均密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	密实度	
A1	13.745	0.879	14.249	0.912	13.353	0.854	10.748	0.688	11.679	0.747	0.878
A2	13.571	0.868	13.762	0.880	13.324	0.852	10.851	0.694	11.741	0.751	0.892
A3	13.305	0.851	13.916	0.890	13.357	0.855	10.585	0.677	11.692	0.748	0.881
A4	13.416	0.858	14.067	0.900	13.409	0.858	10.749	0.688	11.676	0.747	0.884
平均值	13.509	0.864	13.999	0.896	13.361	0.855	10.733	0.687	11.697	0.748	0.884

注:本文中药型罩理论密度为 15.62 g/cm<sup>3</sup>。

量 5 个部分的平均密度,依照式(1)计算各个部分的密实度,其结果如表 1 所示。

粉末药型罩由不同密度和粒度的金属粉末混合后压制而成,密实度只反映粉末药型罩各部分的平均值,为了研究其密实度分布的优劣程度,引入均匀性的概念。均匀性  $H$  越高,说明药型罩轴向密实度的差异越小。计算方法见式(2)。计算结果见表 1。

$$H = (1 - \frac{s}{\bar{x}}) \times 100\%。 \quad (2)$$

式中: $s$  为标准差; $\bar{x}$  为平均值。

由表 1 数据和图 3 可知,药型罩沿轴线方向上的密实度分布不均匀,A 型药型罩在环 4 部分的密实度最低。4 发 A 型药型罩均匀性的平均值只有 0.884。

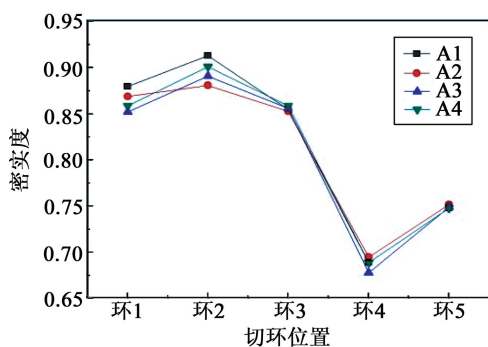


图 3 A 型药型罩密实度分布

Fig. 3 Compactness distribution of A type liner

## 1.2 药型罩金属射流脉冲 X 光成像测试

设定射孔弹起爆到脉冲 X 光闪光的时间间隔,拍摄并记录不同时刻金属射流的形态和位置。根据 2 幅照片拍摄的时间差及 2 幅底片上射流的不同位置计算金属射流在该段时间内的平均速度。

试验时 X 射线管分别安置在爆炸塔上的 2 个窗口,使射线管发射处的射线对准射孔弹;窗口后放置装有防护装置的射孔弹,射孔弹后面放置自制的木架,木架上均布铁钉,作为底片上的标尺和射流位

置的参考。感光底片安装在木架后面的底片盒内。试验示意图如图 4 所示。

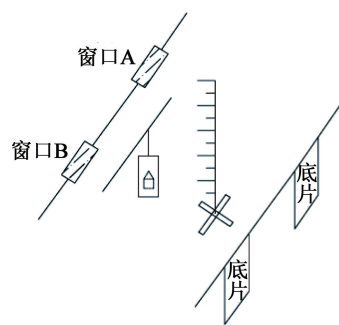


图 4 X 光照相试验装置

Fig. 4 The radiographic test device

射孔弹用长度 30 mm 的导爆索连接,使用雷管起爆,由同步装置记录起爆时间,作为计时零点,延迟装置依次启动第 1、第 2 个摄像管,射线管依次将射流的位置记录在底片上。在底片上可以看到该时刻的射流形态和位置。

因为 1 发射孔弹只能拍摄到 2 张射流形态的照片,取同状态的 2 发 A 型射孔弹进行 X 光拍摄,射流形成过程的照片见图 5、图 6,图中圆点为定位点,白色线条为参考位置,间距为 5 cm。

由图 5 可知,在  $t_1 = 28.0 \mu\text{s}$  时,药型罩处于压垮阶段的初期,其顶部闭合形成了头部射流,口部尚

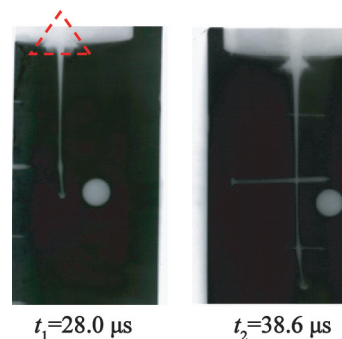


图 5 第 1 发 A 型射孔弹 X 光图

Fig. 5 X-ray film the first A type perforating charge

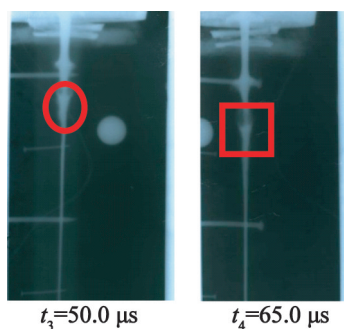


图6 第2发A型射孔弹X光图

Fig. 6 X-ray film the second A type perforating charge

未完成压合过程。在  $t_2 = 38.6 \mu\text{s}$  时,药型罩完成了闭合过程,射流部分不断延伸拉长。在  $t_1 = 28.0 \mu\text{s}$  至  $t_2 = 38.6 \mu\text{s}$  时间内射流平均速度约为  $5\ 300 \text{ m/s}$ ,射流连续未出现断裂和颈缩现象。

由图6可知,  $t_3 = 50.0 \mu\text{s}$  时,射流已出现雾化状的非凝聚射流,如图6中圆圈所示。  $t_4 = 65.0 \mu\text{s}$  时射流已经出现明显的断裂现象,如图6中方框所示。经过计算,该段时间射流的平均速度约为  $1\ 100 \text{ m/s}$ 。

## 2 测试结果分析

按照典型的聚能装药射流形成理论,当射流拉伸到一定长度后将会产生颈缩和轴向断裂。然而,图6中在  $t_3 = 50.0 \mu\text{s}$  时刻的射流却发生了径向扩散,形成雾化状的非凝聚射流。  $t_4 = 65.0 \mu\text{s}$  时刻,雾化状射流团出现明显的断裂。假定此A型射孔弹射流形成是从  $28.0 \sim 65.0 \mu\text{s}$ ,则断裂点出现的时间是  $50.0 \sim 65.0 \mu\text{s}$ ,占总时间的40%,大约为环4与环5的高度在药型罩总高度的比例。对于一般的锥形药型罩装药,从理论顶点算起,有30%~40%的药型罩形成了头部射流<sup>[5]</sup>。也即尾部射流大约由距药型罩顶部3/5以下的位置形成。侯秀成等通过数值仿真研究,也得出药型罩底部约为  $0.2 h$  ( $h$  为药型罩高度)范围内不形成有效射流<sup>[6]</sup>。徐永胜等<sup>[7-8]</sup>利用X光照相技术,从不同角度分析了射流形态的形成和原因,均得出药型罩结构与金属射流的形成有密不可分的关系。

笔者认为,如果是密实药型罩形成的射流,应该出现凝聚态射流的颈缩现象。图6中雾化状射流团的出现和断裂,是因为A型药型罩环4和环5部分的密实度偏低造成的。

当侵彻速度为零时,破甲停止,此时相应的射流速度为临界速度  $v_{jc}$ ,低于此值的射流不能破甲。假设射流处于连续状态,靶材的极限强度  $\sigma_b$  和相应的临界速度  $v_{jc}$  有如下关系<sup>[9]</sup>:

$$v_{jc} = 0.97 + 0.551 \times 10^{-3} \sigma_b + 1.243 \times 10^{-5} \times \sigma_b^2。$$

(3)

式中:  $\sigma_b$  为靶材的极限强度,  $\text{kg/mm}^2$ 。45#钢为  $600 \text{ MPa}$ ,混凝土靶的强度按 API 19B—2006 推荐标准定为  $5\ 000 \text{ psi}$  ( $34.5 \text{ MPa}$ )。

经过单位换算,代入式(3)计算,45#钢和混凝土靶的射流侵彻临界速度分别约为  $1\ 020 \text{ m/s}$  和  $970 \text{ m/s}$ 。对于45#钢,在考虑射流堆积时,其射流速度约为  $2\ 090 \text{ m/s}$ ,约为不考虑堆积作用时临界速度的2倍<sup>[4]</sup>。而对混凝土侵彻过程中,由于靶材的脆性,且孔隙较大,金属射流在孔底的堆积作用不明显,可认为其临界速度与计算值相差不大。

从图6中可以看出,在射流断裂处和杵体之间仍有一部分射流。射流断裂后,侵彻能力将大为下降。由图6的X光拍摄图片计算出的发生断裂时射流的平均速度约为  $1\ 100 \text{ m/s}$ ,与式(3)计算的混凝土靶临界速度相近。射流速度较低时,对屈服强度高的钢靶已无侵彻作用;但对混凝土靶仍有较强的侵彻能力。

以上分析可知,A型药型罩环4与环5位置的密实度偏低,造成尾部射流过早断裂,影响了金属射流尾部的质量,使得金属射流在混凝土介质的侵彻过程提前终止,降低了射流在混凝土靶中的穿深。

## 3 药型罩优化设计

### 3.1 药型罩结构设计优化

为了改善射流性能,提高破甲效果,实践中常采用变壁厚的药型罩<sup>[10]</sup>。但相对于单锥药型罩而言,结构复杂的粉末药型罩在制造时更容易产生药型罩轴向密实度分布的不均匀。段能全等<sup>[11]</sup>通过数值分析,也认为药型罩轴向密度分布对射流长度和断裂趋势有一定的影响。笔者通过优化药型罩结构来提高其密实度分布的均匀性。

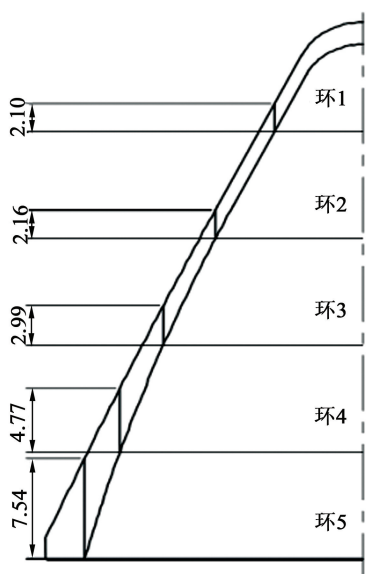
粉末药型罩采用了等静压的方式成型,所以在压缩行程一定的情况下,图7中标示的距离越小,其所在部分的密实度越高。将优化后的药型罩代号为B,保留A药型罩的基本形状,改变了环4、环5处的壁厚。将药型罩沿轴向5等分,在等分点与药型罩内表面的交点做垂线与药型罩外表面相交,测量此段距离。见图7所示。

由图7可知,在压缩行程相同的条件下,B型药型罩环4与环5部分的压缩比要大于A药型罩在该部分的压缩比。

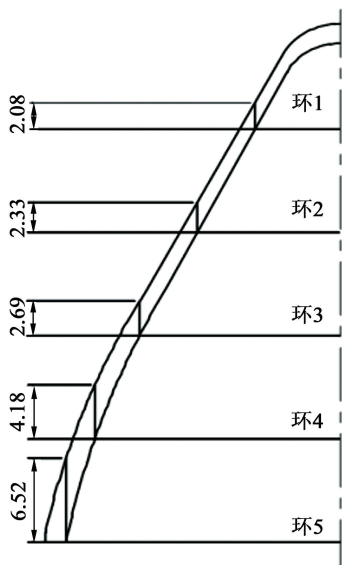
### 3.2 药型罩密实度分布测试

按照优化后的结构制造药型罩,取该药型罩4发,依次编号为B1~B4,每个药型罩沿轴向从上至





(a) A 型药型罩结构



(b) B 型药型罩结构

图 7 药型罩结构优化前后对比

Fig. 7 Structure comparison of liner before and after optimization design

下切割成 5 部分,编号为环 1 ~ 环 5,分别测量 5 个

部分的平均密度并计算其密实度,数据如表 2 所示。

由表 2 和图 8 可知,药型罩从 A 型结构优化为 B 型结构后,环 4 部分的密实度得到了提高。环 4 部分的平均密实度比优化前提高了 11.5%,药型罩轴向密实度分布均匀性较改进前提高了 5.3%。

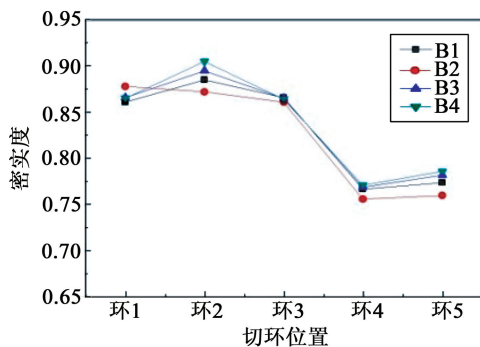


图 8 B 型药型罩密实度分布

Fig. 8 Compactness distribution of B type liner

#### 4 穿孔性能对比试验

保持试验条件不变,针对优化前后的 A、B 药型罩各压制 6 发射孔弹,每种各取 3 发分别进行射孔弹穿钢靶试验和射孔弹穿混凝土靶试验,试验结果见表 3。

从上述试验数据分析可知,优化后的 B 型药型罩相比优化前的 A 型药型罩钢靶穿深未发生显著改变,而混凝土靶穿深有较大幅度的提高。可见,增加药型罩轴线方向密实度分布的均匀性,消除密实度过低的区域有利于提高混凝土靶的穿深性能。优化后的药型罩压制成射孔弹后,其混凝土靶的穿深较优化前提高了近 20.5%。

#### 5 结论

1) 药型罩轴向密实度分布不均匀,易造成射流过早断裂,导致射流在靶体上的侵彻过程提前终止。

2) 药型罩结构优化后,其密实度分布均匀性提高了约 5.3%,钢靶的穿深未受影响,混凝土靶的穿深提高了约 20.5%。

表 2 B 型药型罩密实度分布

Tab. 2 Compactness distribution of B type liner

序号	环 1		环 2		环 3		环 4		环 5		均匀性
	平均密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	密实度	平均密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	密实度	平均密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	密实度	平均密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	密实度	平均密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	密实度	
B1	13.445	0.861	13.821	0.885	13.532	0.866	11.974	0.767	12.083	0.774	0.933
B2	13.716	0.878	13.627	0.872	13.451	0.861	11.816	0.756	11.875	0.760	0.925
B3	13.530	0.866	13.986	0.895	13.507	0.865	12.015	0.769	12.208	0.782	0.933
B4	13.516	0.865	14.132	0.905	13.502	0.864	12.041	0.771	12.275	0.786	0.932
平均值	13.552	0.868	13.892	0.889	13.498	0.864	11.962	0.766	12.110	0.776	0.931

表 3 A、B 型药型罩的射孔弹性能

Tab. 3 Penetration performance of A type and B type liner

编号	钢靶穿孔深度/mm		编号	混凝土靶穿孔深度/mm		两者穿深比值
	测试值	均值		测试值	均值	
A1	213	216.67	A4	884	888.00	4.10
A2	227		A5	910		
A3	210		A6	870		
B1	206	213.33	B4	1 035	1 070.00	5.02
B2	214		B5	1 075		
B3	220		B6	1 100		

3) 药型罩距口部约 2/5 的部分对钢靶侵彻作用不明显,但对于混凝土靶的侵彻作用显著,要提高射孔弹在混凝土靶上的穿深,需对这一部分的设计及制造质量加以关注。

参 考 文 献

[1] GB/T 20488—2006 油气井聚能射孔器材性能试验方法[S]. 北京:国家标准出版社出版,2006:18-19.

[2] API RP 19B—2006 Recommended practices for evaluation of well perforators [S]. American: API Publishing Services,2006:1-5.

[3] 李如江,沈兆武,刘天生. 多孔药型罩聚能射流低炸高大穿深机理研究[J]. 含能材料,2008,16(4):424-427. Li Rujiang, Shen Zhaowu, Liu Tiansheng. Deep penetration mechanism of jet produced by shaped charge with porous liner at low stand off distance[J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2008,16(4):424-427.

[4] 史慧生. 药型罩质量分布对射孔弹穿透性能的影响[J]. 爆破器材,1997,26(4):1-4. Shi Huisheng. Influence of liner density distribution on the penetration performance of oil well jet perforator[J]. Explosive Materials,1997,26(4):1-4.

[5] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000:215.

[6] 侯秀成,蒋建伟,陈智钢. 有效射流与药型罩材料的分配关系[J]. 兵工学报,2013,34(8):935-938,941. Hou Xiucheng, Jiang Jianwei, Chen Zhigang. Partiton between useful jet and liner material[J]. Acta Armamentarii,2013,34(8):935-938,941.

[7] 徐永胜,张丽雪. 大孔径深穿透射孔弹射流的 X 光片分析[J]. 测井技术,2007,31(3):303-306. Xu Yongsheng,Zhang Lixue. X-ray photo analyzing for jet of a perforating charge with big-hole and deep-penetration [J]. Well Logging Technology,2007,31(3):303-306.

[8] 于川,全延锦,晏成立,等. 侵彻岩石的成形装药设计与试验研究[J]. 高能量密度物理,2008(4):149-154.

[9] 爆炸及其作用编写组. 爆炸及其作用(下册)[M]. 北京:国防工业出版社,1979:134.

[10] 卢芳云,李翔宇,林玉亮. 战斗部结构与原理[M]. 北京:科学出版社,2009:69.

[11] 段能全,高永宏,王文涛,等. 粉末药型罩轴向密度分布对聚能粒子流影响[J]. 火箭与制导学报,2014,34(10):90-93. Duan Nengquan, Gao Yonghong, Wang Wentao, et al. Effect of powder liner's axial density distribution on shaped particle flow[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles, and Guidance,2014,34(10):90-93.

Effect of the Axial Compactness Distribution of Liner on Performance of Perforating Charge

ZHAO Yuntao, ZHOU Ming, XU Wenxin, LU Kun, WANG Xi, LI Shangjie, LI Wanquan, DUAN Jiaqing  
Xi'an Wuhua Ju'ne'ng Blasting Equipment Co. , Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710061)

[ABSTRACT] According to the phenomena appearing in the research of shaped charge that its penetration on steel targets was improved obviously, but failed on cement targets, the axial compactness distribution of liner was tested and impulse X-ray images of jet form were observed. The influence of uneven axial distribution of liner impact on metal jet was also analyzed. The performance of the optimized shaped charge was compared with the original one, and the results show that compactness of the 2/5 part nearby the bottom of liner is relatively low that readily causes early fracture of tail jet and accordingly reduces the penetration on cement target of shaped charge. If the uniformity of the axial compactness distribution raise 5.3%, penetration on steel target would not be influenced, but the depth of penetration on cement target would be increased 20.5%.

[KEY WORDS] powder liner; compactness; jet shape; penetration performance