

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.02.012

# 不同测试方法对射孔弹穿孔性能的评价<sup>\*</sup>

李尚杰<sup>①</sup> 李必红<sup>①</sup> 盛廷强<sup>②</sup> 王 喜<sup>①</sup> 赵云涛<sup>①</sup>

①西安物华巨能爆破器材有限责任公司(陕西西安,710061)

②中海油田服务股份有限公司(天津,300452)

[摘 要] 采用地面模拟装枪穿钢靶试验、整枪穿环形混凝土靶试验和地面模拟装枪穿砂岩靶试验 3 种不同的测试方法评价一种 114 型射孔弹穿孔性能。结果表明:在射孔弹方案研制阶段,选择地面模拟装枪穿钢靶试验,试验成本较低,对优化穿深性能有指导意义;地面模拟装枪穿砂岩靶试验作为射孔弹研制后期的评价方法,贴合射孔弹对地层的射孔效能,对油气增产和射孔弹应用更具指导意义。

[关键词] 射孔弹;评价方法;性能

[分类号] TJ55;TJ410.4;TE257

## Evaluation of Perforation Performances of the Shaped Charge by Different Methods

LI Shangjie<sup>①</sup>, LI Bihong<sup>①</sup>, SHENG Tingqiang<sup>②</sup>, WANG Xi<sup>①</sup>, ZHAO Yuntao<sup>①</sup>

① Xi'an Wuhua Ju'neng Blasting Equipment Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710061)

② China Offshore Oilfield Services Ltd. (Tianjin, 300452)

[ABSTRACT] In this paper, perforating performance of a Type 114 shaped charge was evaluated by three different test methods which are ground simulating gun penetrating steel target test, full gun penetrating annular concrete target test and ground simulated gun penetrating sandstone target test. The results show that in the perforation program developing stage, test cost of choosing ground simulation penetrating steel target is low, and the optimal penetration depth has guiding significance considering the perforation of realistic use of the environment. Ground simulated gun loading sandstone target test is the evaluation method of the developed stage of perforating bullet, matching the perforating efficiency of the formation, which is of more guidance to the oil and gas production and the shaped charge application.

[KEYWORDS] shaped charge; evaluation methods; performances

### 引言

目前,对射孔弹的穿孔性能评价研究通常采用地面固定炸高穿钢靶和混凝土靶。其中,静破甲穿钢靶由于具有试验方法简单、成本相对较低、试验装置和试验环境要求低等优点被国内各射孔弹厂所采用;而环形混凝土靶存在以下缺点:制靶周期长(28 d 以上),价格昂贵,靶体孔隙不均匀,靶体各部位的强度不一致等。这两种评价方法均不能真实反应射孔弹在实际储层条件下的穿孔性能。

国外一直致力于在一定条件下射孔弹对各种岩石的穿深变化以及射孔弹穿深性能对储层的射孔效能等方面的研究。1988 年,Halleck 等<sup>[1]</sup>研究了岩

石在压力条件下对射流穿深的影响;Grove 等<sup>[2]</sup>研究了高压条件下射孔弹对岩石的穿深情况。

国内部分油田专业机构对射孔弹在岩石穿深性能方面的研究也较多<sup>[3]</sup>。靳福顺等<sup>[4]</sup>翻译了靶板(混凝土靶和贝雷砂岩靶)结构对射孔弹侵彻深度的影响;潘永新<sup>[5]</sup>论述了射孔弹穿深性能的评价方法,介绍了不同材料靶板穿深的转换关系;董经利等<sup>[6]</sup>研究了不同温度和压力条件下砂岩靶、灰岩靶上的射孔试验,得出了穿深随不同温度、压力变化的基本规律。综上所述,国内射孔弹的穿深评价主要停留在钢靶穿深和混凝土靶穿深方面,射孔弹在一定条件下的应力岩石评价只有在部分专业机构中才能实现,而各射孔弹生产厂家很少将应力岩石的评价方法作为研制新型射孔弹的评价方法。从有限射

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-08-30  
作者简介:李尚杰(1985 - ),男,硕士研究生,主要从事石油射孔弹的研究。E-mail:zhdx04081401@163.com

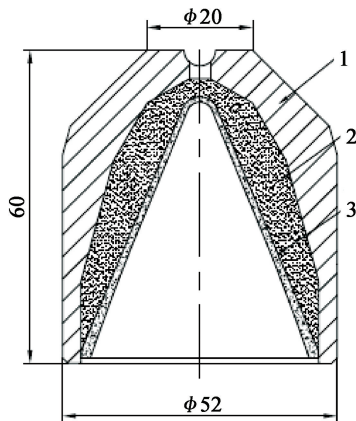
孔效果的研究看,工程技术人员更倾向于射孔弹对砂岩靶的穿深,因为它更接近在地层中的实际情况。

本文中,采用模拟装枪穿钢靶试验、整枪穿环形混凝土靶试验和模拟装枪穿砂岩靶试验对某 114 型深穿透射孔弹进行性能评价,希望通过这些试验数据对比,引起业内各专家对射孔弹评价方法的关注和思考,共同寻找一种在地层中更能充分发挥射孔弹效能的评价方法,这对提高石油采收和射孔行业的发展具有重大意义。

## 1 试验内容

### 1.1 射孔弹

该射孔弹适用于 114 型射孔枪,药型罩结构采用双锥加内层曲线结构,装药量 38 g,结构见图 1。



1 - 射孔弹壳; 2 - 主装药; 3 - 药型罩。

图 1 射孔弹结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of the shaped charge (Unit: mm)

## 1.2 目标靶

试验中目标靶主要选用钢靶、环形混凝土靶和砂岩靶。

钢靶主靶尺寸:  $\varnothing 120\text{ mm} \times 280\text{ mm}$ ; 副靶尺寸:  
 $\varnothing 120\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 。

按照 GB/T 20488—2006 油气井聚能射孔器材性能试验方法<sup>[7]</sup>中的相关要求制备环形混凝土靶, 养护至少 28 d。靶的尺寸:  $\varnothing 3\ 000\text{ mm} \times 1\ 500\text{ mm}$ , 靶的强度为 47.1 MPa。

砂岩靶尺寸:110 mm×110 mm×800 mm;材料选用海相紫色砂岩,见图2。砂岩靶部分性能参数见表1所示。

### 1.3 性能评价方法

射孔弹穿钢靶和砂岩靶采用地面模拟装枪穿钢靶和地面模拟装枪穿砂岩靶的试验方法,试验装配见图3。环形混凝土靶试验方法参照 GB/T 20488—



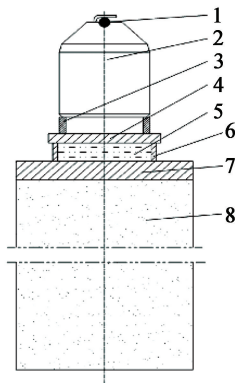
图2 砂岩靶

Fig. 2 Sandstone target

表 1 砂岩靶部分性能参数

Tab. 1 Partial performance parameters  
of the sandstone target

性能	测量值	平均值
孔隙度/%	11.3 ~ 12.4	11.8
密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	2.30 ~ 2.35	2.33
抗压强度/MPa	101.2 ~ 112.8	107.6



1 - 导爆索;2 - 射孔弹;3 - 枪内炸高;4 - 射孔枪  
盲孔;5 - 清水;6 - 套管间隙;7 - 套管;8 - 目标靶。

图3 试验装配示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the test

2006 油气井聚能射孔器材性能试验方法<sup>[7]</sup>中的要求进行;114 型射孔枪孔密度为 16 孔/m。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 模拟装枪穿钢靶试验

地面模拟装枪穿钢靶试验实物装配图及射孔弹穿钢靶后的效果见图4。穿钢靶试验数据见表2。

## 2.2 整枪穿环形混凝土靶试验

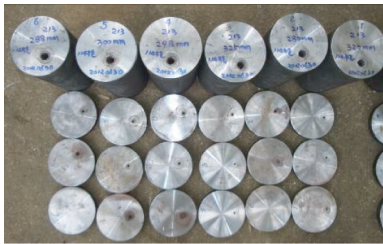
整枪穿环形混凝土靶试验效果见图 5。整枪穿环形混凝土靶穿深及孔径数据见表 3。

### 2.3 模拟装枪穿砂岩靶试验

地面模拟装枪穿砂岩靶装配图见图 6。穿紫色砂岩靶试验数据见表 4。



(a)装配图



(b)效果图

图 4 穿钢靶试验

Fig. 4 Test of penetrating steel target

表 2 地面模拟装枪穿钢靶试验

Tab.2 Ground simulation of gun penetrating steel target

序号	穿孔深度/ mm	枪身孔径/ mm	套管孔径/ mm
1 <sup>#</sup>	320	9.1	12.5
2 <sup>#</sup>	288	9.5	12.7
3 <sup>#</sup>	325	9.2	12.4
4 <sup>#</sup>	298	9.6	12.9
5 <sup>#</sup>	300	9.0	12.1
6 <sup>#</sup>	288	9.3	12.4
平均值	302.0	9.3	12.5
标准差	17.60	0.23	0.28



图 5 穿环形混凝土靶试验效果图

Fig. 5 Effect drawing of ring-shaped concrete target testing

2.4 试验结果分析

2.4.1 靶体强度对穿深的影响

114型深穿透射孔弹地面模拟装枪穿钢靶试验、整枪穿环形靶试验以及地面模拟装枪穿砂岩靶试验数据见表5。不同强度的目标靶,射流穿靶的临界速度 $v_{jc}$ 也不同。文中靶抗压强度从高到低依次为:钢靶、砂岩靶、环形混凝土靶。从表5中可得,

表 3 整枪穿环形混凝土靶试验

Tab.3 Test of perforating ring-shaped concrete target

序号	穿孔深度/ mm	序号	穿孔深度/ mm
第一	1 <sup>#</sup> 1 450	第三	3 <sup>#</sup> 1 480
相	5 <sup>#</sup> 1 510	七	7 <sup>#</sup> 1 449
位	9 <sup>#</sup> 1 429	相	11 <sup>#</sup> 1 387
	13 <sup>#</sup> 1 399	位	15 <sup>#</sup> 1 358
第二	2 <sup>#</sup> 1 442	第	4 <sup>#</sup> 1 442
相	6 <sup>#</sup> 1 420	四	8 <sup>#</sup> 1 398
位	10 <sup>#</sup> 1 459	相	12 <sup>#</sup> 1 420
	14 <sup>#</sup> 1 389	位	16 <sup>#</sup> 1 370
平均值	1 425		
标准差	40.7		



图 6 穿砂岩靶装配图

Fig.6 Schematic diagrams of penetrating the sandstone target

表 4 穿砂岩靶试验数据

Tab.4 Test data of perforating sandstone target

砂岩靶	穿孔深度/ mm	枪身孔径/ mm	套管孔径/ mm
紫色砂岩靶	624	9.2	12.5
	628	9.5	12.7
	610	9.1	12.4
平均值	621.0	9.3	12.5
标准差	9.40	0.21	0.15

表 5 3 种测试方法的试验数据对比

Tab.5 Test data comparison by three test methods

	穿孔深度		枪身孔径		套管孔径	
	均值/ mm	标准 差	均值/ mm	标准 差	均值/ mm	标准 差
钢靶	302	17.6	9.3	0.23	12.5	0.28
混凝土靶	1 425	40.7	9.1	0.57	11.7	0.51
砂岩靶	621	9.4	9.3	0.21	12.5	0.15

随着目标靶强度的增大,射孔弹穿深呈下降趋势。

#### 2.4.2 环形混凝土靶孔隙对穿深的影响

从整枪穿环形混凝土靶试验数据可知,环形混凝土的标准差较大,主要影响因素有:

1) 环形靶在制靶过程中混凝土振动次数和时间等都会影响靶体内的孔隙度和均匀性,史进伟等<sup>[8]</sup>研究了射流侵彻水夹层间隔靶的衰减情况,射流在侵彻不同密度的介质过程中,由于被侵彻介质密度不同,造成射流的断裂和飞溅。环形混凝土靶中气泡和泥浆交叉存在,空气气泡越多对环形混凝土靶评价射孔弹穿深性能越不利。

2) 环形混凝土靶在固化过程中受重力影响,使得强度存在差异,但未见有相关文献报道,从表 3 可知,环形靶上半部分的穿深高于下半部分的穿深。

#### 2.4.3 射孔弹穿钢靶与穿砂岩靶的穿深关系

文献[5]描述了地面钢靶与贝雷砂岩靶穿深的转换关系,见式(1)和式(2)。

$$L_1 = L_0 \sqrt{\frac{2 \ 462 + 8. \ 152 Y_s}{2 \ 462}} + 8. \ 152 \times 55. \quad (1)$$

式中: $L_1$  指不同屈服强度的钢靶穿深转换成标准强度 55 000 psi (379.5 MPa) 条件下的穿深,mm; $L_0$  为钢靶实际穿深,mm; $Y_s$  为钢靶的屈服强度/1 000,psi (5 000 psi = 34.5 MPa)。

将标准强度下的钢靶穿深转换成抗压强度为 8 000 psi 的贝雷砂岩靶的穿深  $T$ ,有

$$L_1 - 0. \ 976 = 0. \ 387 \ 5 \times T. \quad (2)$$

式中: $L_1$  为标准钢靶的穿深,mm; $T$  为 8 000 psi 强度贝雷砂岩靶的穿深,mm。

结合式(1)、式(2)和试验结果及砂岩靶强度得

$$\frac{T}{KL_2} = \frac{8 \ 000}{p}. \quad (3)$$

式中: $K$  为修正系数,取值范围 1.6 ~ 2.8,砂岩靶强度增加 10 MPa, $K$  增加 0.3; $L_2$  为射孔弹穿砂岩靶的实际穿深,mm; $p$  为砂岩靶的抗压强度,psi。

由于试验量有限,公式(3)仅适用于砂岩靶强度范围为 70 ~ 110 MPa 的穿深转换。

### 3 结论与建议

1) 考虑试验成本和试验效率等因素,地面钢靶试验更适合作为射孔弹研制前期阶段的主要评价方法,对穿深性能和稳定性有定性和定量的评价。

2) 通过钢靶与砂岩靶穿深的转换,可以预先评

估射孔弹在无约束条件下砂岩靶的穿深情况。

3) 整枪穿环形混凝土靶试验,由于环形混凝土靶制作成本高、周期长,每块靶的制作过程对穿深影响较大,不建议作为射孔弹性能评价的主要方法。

4) 由于受到试验条件限制,本文中,未对砂岩靶进行水饱和条件下的加温加压试验,而射孔弹设计和验收的评价方法应主要针对地质储层参数进行,因此在试验条件允许下,砂岩靶的测试评估方法更适合作为射孔弹后期研制测试评估方法。

#### 参 考 文 献

- [1] HALLECK P M, SAUCIER R J, BEHRMANN L A, et al. Reduction of jet perforator penetration in rock under stress[C]//Society of Petroleum Engineers. Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1988:627-641.
- [2] GROVE B, HEILAND J, WALTON I. Shaped charge penetration into stressed rock [C]//23rd International Symposium on Ballistics Tarragona. Spain:2007.
- [3] 李希忱,张浩杰,孙新波. 油气田射孔器材检测技术简介[J]. 爆破器材,1998,27(5):5-10.  
LI X C, ZHANG H J, SUN X B. A brief introduction to the inspection techniques for the oil and gas perforating devices [J]. Explosive Materials,1998,27(5):5-10.
- [4] WESSON D S, PRATT D W. 射孔弹的靶板结构对其侵彻深度的影响[J]. 靳福顺,刘存忠,译. 测井译丛,1992(4):48-55.
- [5] 潘永新. 射孔弹穿深性能评价方法初探[J]. 测井与射孔,2007(4):72-73.
- [6] 董经利,陈序三,邵在平,等. 高温高压条件下射孔效能试验研究[J]. 测井技术,2008,32(2):100-104,127.  
DONG J L, CHEN X S, SHAO Z P, et al. Experimental study on perforation effects under conditions with high temperature & high pressure[J]. Well Logging Technology, 2008,32(2):100-104,127.
- [7] 油气井聚能射孔器材性能试验方法:GB/T 20488—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [8] 史进伟,罗兴柏,蒋建伟,等. 射流侵彻水夹层间隔靶的理论和实验研究[J]. 含能材料,2016,24(3):213-218.  
SHI J W, LUO X B, JIANG J W, et al. Numerical simulation and experimental study on the cratering stage of shaped charge jet penetrating into target [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016,24(3):213-218.