

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.04.006

一种新型井间地震爆炸震源弹的研制与测试*

魏 领 鲁 坤 李必红 田 斌 王 喜 陈志伟 王雪艳
物华能源科技有限公司(陕西西安,710061)

[摘 要] 采用数值模拟方法计算了两种不同装药结构的 89 型震源弹在 10.0、21.0 mm 和 32.0 mm 不同间隙下对套管的侵彻伤害程度,并对满足技术要求的方案进行地面模拟侵彻套管和震源枪模拟井试验。结果表明:在 10.0 mm 间隙下,数值模拟计算侵彻深度比试验结果深 1.7 mm;在 21.0 mm 和 32.0 mm 间隙下,数值模拟和试验的侵彻深度相同,说明了数值计算结果与试验结果吻合性较好。新设计的震源弹在震源枪身形成平均直径为 22.3 mm 的孔眼,满足向地层迅速释放爆炸能量、激发地震波且不损伤套管的要求。

[关键词] 井间地震;爆炸震源;震源弹;间隙

[分类号] TJ510.3

Development and Test of a New Kind of Seismic Source Bomb Used in Crosswell Seismic Explosion

WEI Ling, LU Kun, LI Bihong, TIAN Bin, WANG Xi, CHEN Zhiwei, WANG Xueyan
Wuhua Energy Technology Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710061)

[ABSTRACT] The damage degree of casing penetration by two kinds of 89-type seismic source bombs with different charge structures under different clearance of 10.0, 21.0 mm and 32.0 mm was calculated by numerical simulation method. Ground penetrating casing and seismic gun simulation well tests were carried out for the schemes that meet the technical requirements. Results show that the simulated penetration depth at 10.0 mm clearance is 1.7 mm deeper than the test results, and the depth at 21.0 mm and 32.0 mm clearance is the same, which shows that the numerical results are in good agreement with the experimental results. The newly designed seismic source bomb forms holes with an average diameter of 22.3 mm in the seismic gun barrel. Which can release explosive energy to the ground quickly and excite seismic waves without damaging the casing.

[KEYWORDS] crosswell seismic; explosion seismic source; seismic source bomb; clearance

引言

井间地震技术是 20 世纪 80 年代在美国发展起来的地震勘探新技术。在一口井内放置震源,另一口井内放置接收检波器,通过改变震源和井中检波器的深度和位置,进行激发和接收,以获得井间地质剖面^[1-2]。该技术因避开了地表低速带对地震信号高频成分的吸收,具有高精度、高分辨率、高信噪比等优点。井间地震技术最关键的部分是井中震源^[3]。井中震源包括爆炸、径向辐射脉冲、电火花、机械脉冲、压电型机电换能和控频扫描振动等 6 种

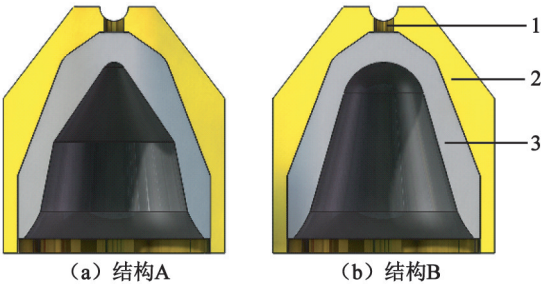
形式^[4]。其中,爆炸震源具有激发信号强、脉冲好、频带宽、耐高温和耐高压等优点而被广泛使用^[5-6]。爆炸震源通常为爆炸索和成型炸药等^[7]。Silverman^[8]基于速度匹配理论设计了一种细长震源药柱,该药柱由高爆速药柱与低爆速药柱相间连接而成,通过调节两部分元件的长度来调整爆速。阮传鹏^[9]从炸药起爆、爆轰理论和混合理论角度分析得出一种更适合粉状震源药柱生产的新型工艺,通过对混药工艺和装药结构的改进,提高了粉状震源药柱起爆和传爆的可靠性。但上述爆炸震源也存在着井下作业时可能对井壁产生破坏的问题,并且没有连续激发能力,成本高^[10]。

* 收稿日期:2022-01-16
第一作者:魏领(1979-),男,高工,从事石油射孔技术开发。E-mail:weiling1086@163.com
通信作者:鲁坤(1984-),男,高工,从事石油射孔技术开发。E-mail:289450504@qq.com

为了解决爆炸震源存在的不足之处,采用数值模拟和试验研究的方法,设计了一种新型井中爆炸震源弹。该震源弹安装于震源枪内。起爆时,产生的强能量爆轰波可以诱发储层形成高振幅的地震波,且不会伤害套管和水泥环,适用于 500 m 以上大井间距施工。同时,能够结合选择发射孔技术进行连续性激发,一次可在井下激发 20 次以上^[11]。适用于直井、斜井、大斜度井及水平井等不同类型井况的勘探。

1 设计原理和结构

新型爆炸震源弹主要由壳体、传爆药和主炸药组成。在保证震源枪管柱和套管安全的前提下,为了提高地震勘探数据采集效果和减少施工管串长度,单发爆炸震源弹激发药量设计越大越好。国内常规 89 型射孔器一般采用 40 型射孔弹。设计了 A、B 两种不同结构的 89 型震源弹,用于 89 型震源枪(Ø89.0 mm)内。如图 1 所示。



1 - 传爆药;2 - 壳体;3 - 主炸药。

图 1 两种新型的 89 型震源弹结构

Fig. 1 Structures of two new kinds of 89-type seismic resource bombs

爆炸震源弹工作时利用炸药的聚能效应。装药量过大,会造成射流破坏威力大,极容易伤害套管和水泥环。为了在大药量下形成短而粗的射流,并且只在射孔枪上穿孔而不伤害套管,通过改变装药结构的方式,设计了分别对应于图 1 的 A、B 两种多曲线形装药结构。二者采用 RDX 装药,并且装药量均为 25 g。具体装药结构如图 2 所示。图 2 中:结构 A 为锥形内腔;结构 B 为圆弧形内腔。

井下作业时,因为井斜的原因,震源枪会偏靠在套管内壁,使得一个相位上的爆炸震源枪与套管的间隙(以下简称枪套间隙)仅为盲孔深度 4.0 mm。由于间隙小,形成的聚能射流易对套管和水泥环造成损坏。因此,采用增加扶正接头外径的方式,以提高枪套间隙。扶正接头外径设计为 101.6 mm,震源

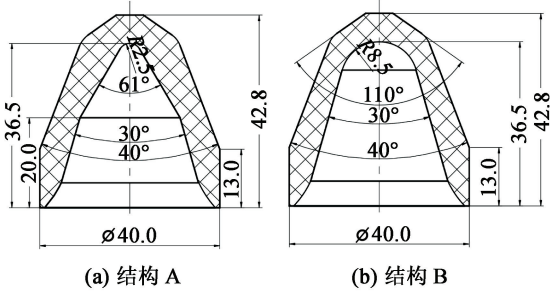


图 2 两种新型 89 型震源弹的装药结构(单位:mm)
Fig. 2 Charge structures of two new kinds of 89-type seismic resource bombs (Unit:mm)

枪外径为 89.0 mm,则震源枪紧靠套管内壁一侧的枪套间隙为 10.5 mm。图 3 为扶正接头外形图。

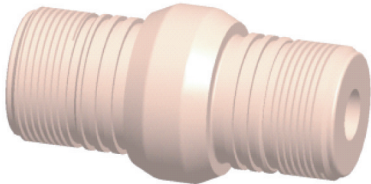
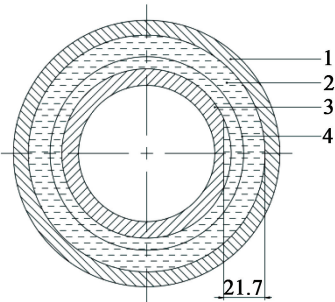


图 3 扶正接头外形结构
Fig. 3 Shape structure of stabbing joint

2 数值仿真分析

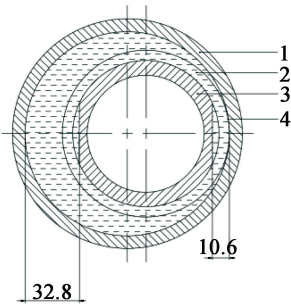
2.1 计算方案

采用数值仿真方法分别计算井下起爆时 A、B 两种不同装药结构的震源弹对套管的毁伤效果。图 4 和图 5 为 89 型震源枪在 Ø5.5"(Ø139.7 mm)套管(壁厚为 7.7 mm)中的两种不同位置示意图。居中状态下,枪套间隙(盲孔至套管内壁距离)为 21.7 mm。偏心状态下,枪套间隙最小为 10.6 mm;最大为 32.8 mm。为了保证震源效果 and 安全性,分别计算 89 型震源枪在套管中居中和偏心状态下的射流



1 - 套管(Ø139.7 mm);2 - 水;3 - 震源枪(Ø89.0 mm);
4 - 扶正接头(Ø101.6 mm)。

图 4 震源枪居中状态布置示意图(单位:mm)
Fig. 4 Layout diagram of the seismic gun in center position
(Unit: mm)



1 - 套管($\varnothing 139.7$ mm);2 - 水;3 - 震源枪($\varnothing 89.0$ mm);
4 - 扶正接头($\varnothing 101.6$ mm)。

图 5 震源枪偏心状态布置示意图(单位:mm)
Fig.5 Layout diagram of the seismic gun in eccentric position
(Unit: mm)

作用效果。

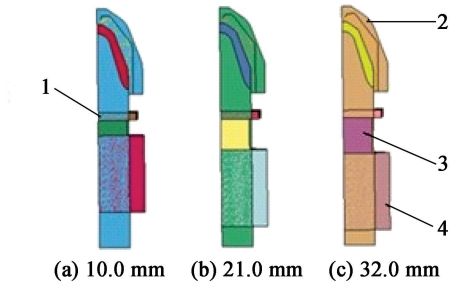
2.2 几何模型建立

有限元模型包括壳体、聚能装药、模拟枪片、靶板、空气和水,整体采用 1/4 轴对称模型。A、B 两种结构的新型震源弹的壳体外形和内腔尺寸相同,口径为 40.0 mm,高度为 51.0 mm,且装药量均为 25 g。炸高为 12.0 mm,模拟枪片厚度为 5.0 mm,枪套间隙充满水,水层厚度分别为 10.0、21.0、32.0 mm。有限元结构见图 6。

2.3 数值模拟算法和材料参数选择

2.3.1 数值模拟算法

壳体、模拟枪片和靶板材料均为 45# 钢;选用 RDX 炸药装药。炸药、空气和水采用欧拉网格,单元算法使用多物质 ALE 算法;壳体、模拟枪片和靶板建模采用 Lagrange 算法。整体模型通过 * Const-



1 - 枪片;2 - 空气;3 - 不同厚度水环境;4 - 靶板。
图 6 有限元结构示意图

Fig.6 Structure diagram of finite element

rained_Lagrange_in_Solid 实现流固耦合,单元以六面体网格为主,单元网格的尺寸为 1 mm \times 1 mm \times 1 mm。根据模型特点,设置对称边界条件、非反射边界条件^[12-13]。

2.3.2 材料参数选择

RDX 装药采用 JWL 状态方程;壳体、模拟枪片和靶板的 45# 钢材采用 Johnson_Cook 模型,并考虑高应变率条件下的应力、应变及失效关系;空气域和水选用无偏应流体动力学模型(null),状态方程选用 * Eos_Linear_Polynomial。具体参数如表 1 所示^[14-17]。

3 性能试验

3.1 模拟装枪侵彻套管试验

采用了与数值仿真分析相同的方案开展试验。表 2 为试验装配参数表。图 7 为试验装配示意图。

表 1 各物质材料模型参数

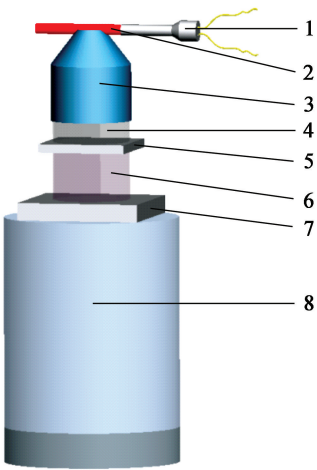
Tab.1 Model parameters of each material

RDX 炸药模型及其 JWL 状态方程参数 ^[14]								
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	p_{ej}/GPa	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	E_0/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	W
1.65	30	8 300	10	908.47	19.11	4.92	1.41	0.31
45#钢模型及其 Gruneisen 状态方程参数 ^[15]								
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	A/MPa	B/MPa	n	$C/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		m		
7.80	507	320	0.28	0.064		1.06		
空气模型及其线性多项式状态方程参数 ^[16]								
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	γ_0
1.30	0	0	0	0	0.4	0.4	0	1.0
水模型及其线性多项式状态方程参数 ^[17]								
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	
1.23	0	0.020	0.084	0.080	0.439	1.394	0	

表 2 模拟装枪侵彻套管试验方案

Tab.2 Test scheme of simulating loading gun penetrating casing

序号	枪内炸高/ mm	枪套间隙(含水)/ mm	模拟枪身(45#钢) 长×宽×高/(mm×mm×mm)	模拟套管(45#钢) 长×宽×高/(mm×mm×mm)
1 [#]	12.0	10.0		
2 [#]	12.0	21.0	50.0×50.0×5.0	70.0×70.0×10.0
3 [#]	12.0	32.0		



1 - 雷管;2 - 导爆索;3 - 89 型震源弹;4 - 枪内炸高(PVC 管);5 - 模拟射孔枪身;6 - 枪套间隙(含水,PVC 管);
7 - 模拟套管;8 - 钢靶。

图 7 试验装配示意图

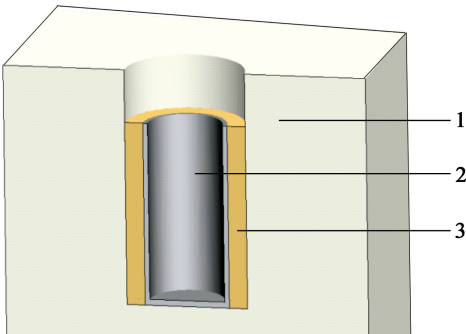
Fig. 7 Layout diagram of test

分别测试不同枪套间隙下 89 型震源弹对模拟套管的损害程度。

3.2 震源枪模拟井试验

在试验场建造了一个深度为 3.0 m 的竖井,下入长度为 2.0 m、壁厚为 7.7 mm 的 $\varnothing 139.7$ mm P110 套管,并用混凝土浇筑固定。图 8 为模拟井示意图。

将 12 发新型震源弹装入长度为 1.0 m 的 89 型震源试验枪,孔密度为 20 孔/m,相位 60° ,总装药量



1 - 试验场;2 - 套管;3 - 混凝土。

图 8 模拟井示意图

Fig. 8 Schematic diagram of a simulated well

为 200 g,两端装直径为 101.6 mm 的扶正接头。如图 9 所示。震源枪下入到试验井套管中后,在套管中灌满清水,模拟井口盖上盖板,并用泥土和沙袋封堵井口,然后起爆。



图 9 新型震源弹装配图

Fig. 9 Assembly drawing of the new type of seismic source bomb

4 结果与讨论

4.1 仿真计算结果与分析

根据 2.2 建立 3 种模型开展数值模拟,分别计算了 A、B 两种装药结构的震源弹在不同水层厚度(枪套间隙)条件下对套管的毁伤效应。见图 10。

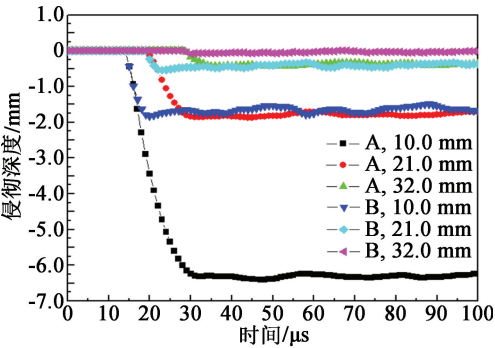


图 10 两种震源弹在不同时刻侵彻套管深度曲线

Fig. 10 Depth curves of two kinds of seismic source bombs penetrating casing at different time

由图 10 可知,随着枪套间隙的增加,A、B 新型震源弹对套管的毁伤效果均逐渐降低,说明枪套间隙与射流侵彻能力成反比。枪套间隙越小,侵彻套管深度越深;当枪套间隙为零时,侵彻深度达到最大。因此, $\varnothing 101.6$ mm 扶正接头的设计具有必要性和合理性。

对比两种结构爆炸震源弹,当水层厚度为 10.0

mm 时,结构 B 优于结构 A,结构 B 最大侵彻深度仅为 1.7 mm,对套管的损伤小,而结构 A 最大侵彻深度为 6.4 mm。当水层厚度为 21.0 mm 和 32.0 mm 时,结构 B 对套管均没有损伤,而方案 A 对套管的最大侵彻深度分别为 1.8 mm 和 0.5 mm。图 11 和图 12 为两种震源弹在 10.0 mm 枪套间隙下不同时刻的毁伤云图和射流速度曲线。

由图 11 和图 12 可见,两种装药结构的震源弹从顶部中心起爆后,生成爆轰波向轴线处挤压闭合,形成了高温、高压、高速聚能的气体流,向着靶板方向射出。由于气体流的能量密度比金属射流低很多,在 $t = 5\ \mu\text{s}$ 时,结构 A 震源弹头部速度为 7 700 m/s,结构 B 震源弹头部速度为 7 400 m/s。说明锥形内腔比圆弧形内腔装药的聚能效果好。聚能气体流穿过模拟枪片后,在 $t = 15\ \mu\text{s}$ 时,结构 A 震源弹气体流头部速度降为 3 800 m/s,结构 B 震源弹降为 2 900 m/s,两者均在水层中开始膨胀,后者比前者膨胀速度更快,能量密度和速度迅速下降。当 $t = 23\ \mu\text{s}$ 时,侵彻基本结束。因此,前者比后者对靶板的毁伤程度更大。

可见结构 B 震源弹能满足井间地震对爆炸震源的技术要求。

4.2 性能测试结果与分析

4.2.1 模拟装枪侵彻套管试验结果与分析

图 13 为结构 B 震源弹在 10.0、21.0 mm 和 32.0

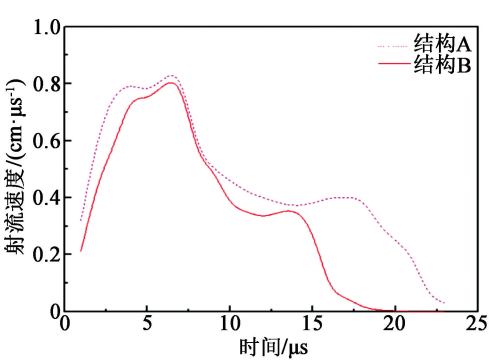


图 12 两种震源弹不同时刻射流速度曲线

Fig. 12 Jet velocity curves of two kinds of seismic source bombs at different time

mm 3 种水层厚度(枪套间隙)下模拟装枪侵彻套管的试验结果。经现场观察,模拟套片上只有 2~3 处破片撞击坑点和冲击波压痕,没有受到明显损伤,由于模拟枪片破损,孔径无法测量。

表 3 为不同枪套间隙下性能试验与数值计算中套管侵彻深度的对比分析。

从表 3 数据可知:在 10.0 mm 枪套间隙下,侵彻套管深度的计算值比试验值深 1.7 mm;在 21.0 mm 和 32.0 mm 枪套间隙下,深度相同。说明试验结果和数值计算结果吻合性较好,验证了数值模拟计算的正确性。

4.2.2 震源枪模拟井试验结果与分析

对模拟井试验后震源枪和套管进行测量,数据

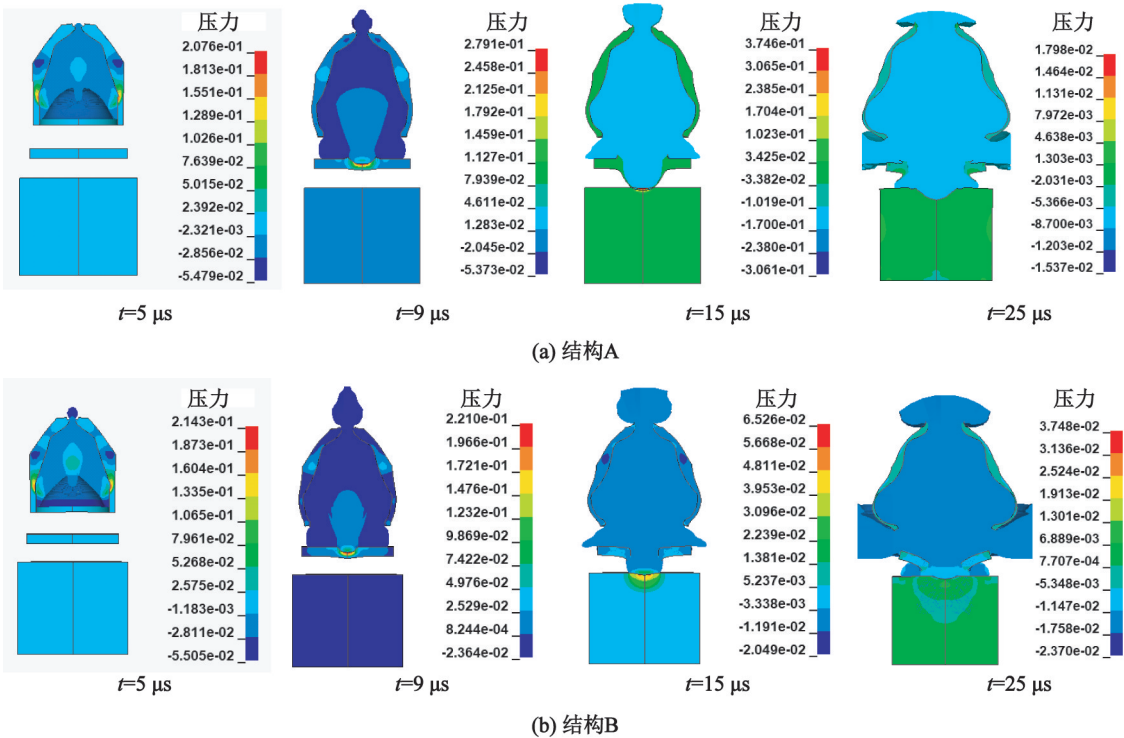
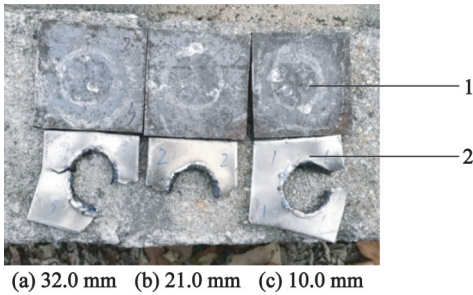


图 11 两种震源弹不同时刻毁伤云图

Fig. 11 Damage nephograms of two kinds of seismic source bombs at different time



1 – 试验后的模拟套片;2 – 试验后的模拟枪片。

图 13 B 结构震源弹试验结果

Fig. 13 Test results of seismic source bombs with structure B

表 3 套管侵彻深度的性能试验与数值计算结果对比

Tab.3 Comparison between performance test and numerical calculation of casing penetration depth

序号	枪套间隙/ mm	套管侵彻深度/mm		偏差/ mm
		性能试验	数值计算	
1 [#]	10.0	0	1.7	-1.7
2 [#]	21.0	0	0	0
3 [#]	32.0	0	0	0

如表 4 所示。

图 14 为试验后的震源枪照片。图 15 为试验后破除固井水泥的套管照片。

试验后,套管完好,未出现胀径和穿孔。结构 B 震源弹在井间地震作为爆炸震源时,可以保护套管不受伤害。震源枪上的穿孔孔眼平均直径为 22.3 mm,孔眼规则,无纵向和横向裂纹,盲孔内平均毛刺高度为 0.8 mm,枪身最大胀径为 2.0 mm。枪身上的开孔泄压面积共为 45.6 cm²,能够使震源枪内的爆炸能量充分释放到套管中,激发地层地震波,使在



图 14 试验后的 89 型震源枪

Fig. 14 89-Type seismic gun after test



图 15 试验后的套管

Fig. 15 Casing after test

邻井中的接收检波器足以可靠地采集到理想的地震数据。同时,∅101.6 mm 扶正接头的使用避免了震源枪紧靠套管内壁,增加了枪套间隙,保护了套管不受震源弹射流的伤害,提高了震源弹的使用效果。

5 结 论

1)采用数值仿真和模拟性能测试设计了井间地震震源弹的不同装药结构,研制了新型 89 型大药量爆炸震源弹;可在震源枪上形成大孔眼,能向井筒内迅速释放爆炸能量,激发地震波且不损伤套管。

2)在 10.0 mm 枪套间隙下,侵彻套管深度的计算结果比试验结果深 1.7 mm;在 21.0 mm 和 32.0 mm 枪套间隙下,深度相同。表明数值计算结果与

表 4 震源枪模拟井试验测试数据

Tab. 4 Test data of simulation well test of seismic gun

枪套含水间隙 10.6 mm(0°相位)			枪套含水间隙 32.8 mm(180°相位)		
序号	枪身孔径/mm	套管穿深/mm	序号	枪身孔径/mm	套管穿深/mm
1 [#]	22.0、22.3	0	1 [#]	22.3、22.5	0
2 [#]	22.5、22.5	0	2 [#]	22.6、22.5	0
枪套含水间隙 15.4 mm(60°、300°相位)			枪套含水间隙 27.5 mm(120°、240°相位)		
序号	枪身孔径/mm	套管穿深/mm	序号	枪身孔径/mm	套管穿深/mm
1 [#]	22.4、22.3	0	1 [#]	22.4、22.3	0
2 [#]	22.8、23.0	0	2 [#]	22.0、21.8	0
3 [#]	22.2、22.3	0	3 [#]	22.2、22.2	0
4 [#]	21.9、22.2	0	4 [#]	22.4、22.3	0

试验结果吻合性较好。

3)新型震源弹对套管的毁伤效应与枪套间隙成反比。当枪套间隙大于 10.0 mm,不会对套管产生损伤;管串采用 $\varnothing 101.6$ mm 扶正接头,满足套管不受损伤的基本要求。

4)虽然研制的 89 型井间地震爆炸震源弹从激发能量和安全性上满足勘探要求,但实际井下环境复杂,接收检波器受到多种因素干扰,还需要根据实际使用效果对其进一步优化。

参 考 文 献

[1] 段宝平,何正勤,叶太兰. 井间地震技术的研究现状及其工程应用前景[J]. 物探与化探,2010,34(5):610-615.
DUAN B P, HE Z Q, YE T L. Research progress and engineering application prospect of crosswell seismic technology [J] . Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(5): 610-615.

[2] 何惶华. 井间地震[M]. 北京:石油工业出版社,2008.

[3] 韩瑞民. 井间地震技术简介[J]. 石油仪器,1994,8(2):63-67.

[4] 陈世军,刘洪,周建宇,等. 井间地震技术的现状与展望[J]. 地球物理学进展,2003,18(3):524-529.
CHEN S J, LIU H, ZHOU J Y, et al. The current situation and prospect of crosswell seismic technique [J]. Progress in Geophysics, 2003,18(3):524-529.

[5] 范晓文,马向军,程峰,等. 井间地震各类震源特征分析[J]. 石油仪器,2012,26(6):33-35.
FAN X W, MA X J, CHENG F, et al. Characteristic analysis of various types of crosswell seismic[J]. Petroleum Instruments,2012,26(6):33-35.

[6] 张智,刘财,邵志刚. 地震勘探中的炸药震源药量理论与实验分析[J]. 地球物理学进展,2003,18(4):724-728.
ZHANG Z, LIU C, SHAO Z G. Theory and experimentation of the charge sizes in seismic-source for seismic exploration [J] . Progress in Geophysics, 2003, 18(4): 724-728.

[7] 曹辉. 井间地震技术发展现状[J]. 勘探地球物理进展,2002,25(6):6-10.
CAO H. Current status of crosswell seismic technology [J] . Progress in Exploration Geophysics, 2002, 25(6): 6-10.

[8] SILVERMAN D. Seismic wave generator: US 4497044 [P]. 1985-01-29.

[9] 阮传鹏. 新型粉状震源药柱的生产工艺及分析[J]. 科技与企业,2015(10):238.

[10] 槐永军,武永生. 可控震源的相关技术[J]. 物探装备,2009,19(1):30-32.
HUAI Y J, WU Y S. Correlation technique of vibroseis [J] . Equipment for Geophysical Prospecting, 2009, 19(1): 30-32.

[11] 王海东,唐凯,陈锋,等. 桥塞与分簇射孔联作工艺及其在川渝页岩气区的应用[J]. 测井技术,2017,41(3):373-377.
WANG H D, TANG K, CHEN F, et al. Technology of bridge plug and multi-cluster perforation and it's application in shale gas area of Sichuan and Chongqing area [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(3): 373-377.

[12] 孙建军. 爆炸反应装甲对聚能射流干扰作用的效能评估研究[D]. 太原:中北大学,2019.
SUN J J. Effectiveness evaluation of the effect of explosive reaction armor on shaped jet interference [D]. Taiyuan:North University of China, 2019.

[13] 陈志伟. 射孔枪射孔过程的数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2018.
CHEN Z W. Numerical simulation of perforation process of perforating gun [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

[14] ROLC S. Numercial and experimenal study of the defeating the RPG-7[C]//24th International Symposium Ballistics. New Orleans, LA,US,2008.

[15] 陈刚,陈小伟,陈忠富,等. A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的数值分析[J]. 爆炸与冲击,2007,27(5):390-397.
CHEN G, CHEN X W, CHEN Z F, et al. Simulations of A3 steel blunt projectiles impacting onto 45 steel plates [J]. Explosion and Shock Wave, 2007,27(5): 390-397.

[16] MARRS F, HEIGES M. Soil modeling for mine blast simulation [C]//13th International LS-DYNA Users Conference. Detroit, MI, US, 2014:1-16.

[17] LEE S G, BAEK Y H, LEE I H, et al. Numerical simulation of 2D sloshing by using ALE2D technique of LS-DYNA and CCUP methods [C]//Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing, 2010.