

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.06.011

一种破片高回收率射孔弹壳体破碎特性的设计方法研究^{*}

李尚杰 李必红 赵云涛 李万全 周 明 常梦倩 王 喜

西安物华巨能爆破器材有限责任公司(陕西西安,710061)

[摘 要] 针对油气井下作业后射孔弹壳体破片对井筒的污染等负面影响,文中对射孔弹壳体爆炸后形成大尺寸破片的影响因素进行了试验研究,通过改变壳体厚度、材料、外部刻槽参数,进而改变壳体破裂后的破片尺寸,增加破片回收率。结果表明:壳体厚度为 6.0 mm、材料为 20#钢、壳体外表面积刻 4 条槽、槽宽为 3.0 mm、槽深为 4.0 mm 时,通过单发射孔弹破片收集试验可得尺寸 ≥ 9.53 mm 的破片,回收率可达 83.1%,使得大部分壳体破片滞留在射孔枪体内,有效减少壳体破片对井筒的污染,降低射孔作业卡枪事故发生的风险。

[关键词] 射孔弹;壳体;大破片;刻槽;回收率

[分类号] TJ410.4

引言

随着油气开采科技的进步和人类对油气需求的增长,对提高油气井产量和油气藏采收率也提出更高的要求。大斜度井、水平井在开发油气田上是一项重要的技术,在经济效益上比常规直井更具优越性,已被广泛应用于油气藏的开发。

大斜度井和水平井在上提枪串过程中,大量的小破片可能通过枪身孔眼掉入井筒内,不仅污染井筒环境,而且会增加枪身与套管间的摩擦阻力,甚至出现卡枪事故。为减少卡枪事故的发生,大破片射孔弹应运而生,从而尽可能使破片留在枪体内,减少破片对射孔的负面影响。国外斯伦贝谢公司的 OrientXact 射孔系统在定向射孔技术中使用低碎屑聚能射孔弹,达到低碎屑的目的,主要技术手段是增加壳体的壁厚、用锌铝壳体等^[1-4]。国内采用内部刻槽的方法也可达到改变壳体破碎特性的目的^[5]。

本文主要研究了几种不同的射孔弹大破片壳体设计方法,其中在不影响穿深的条件下,将半预制破片技术应用在壳体上,其爆炸后所得的大破片回收率最高,将对井的污染程度降到最低,降低破片打捞作业难度,为大斜度井和大位移水平井提供了有效的施工保障。

1 方案设计

1.1 设计要求

经油田甲方在射孔弹使用过程中的反馈信息,

某井现正在使用 DP43-5 型射孔弹,希望在满足钢靶穿深 ≥ 190 mm、穿孔孔径 ≥ 11 mm 的穿孔性能,射孔弹壳体外径为 52 mm、高度为 60 mm 的条件下,壳体破片回收率提高到 80% 以上,并且破片回收率越高对井下作业越有利,减少对井污染,同时还可降低破片打捞作业难度和次数,即使还有部分碎屑未被回收,可通过其他相对简单的方法将剩余碎屑清理,极小的碎屑不影响作业过程。针对上述要求,做了以下壳体结构方案改进设计。

1.2 壳体结构设计

根据文献[6]可知,破片的大小由壳体材料特性、壳体厚度、密封性和炸药性能等决定。壳体在高压下产生环向膨胀,当膨胀变形超过材料的极限强度时,先在壳体外表面上出现裂纹,随即裂口开始由外向内表面发展成裂缝,此时爆轰产物泄露,破片伴随着爆轰气体飞出。根据壳体破裂机理和破片形成的几个重要因素,设计以下几个方案进行对比试验。本文以 114 型 DP43-5 射孔弹壳体为研究对象,壳体内径为 43 mm,壳体口部壁厚为 4.5 mm,壳体的理论质量为 412.7 g,装药型号为 SH931。射孔弹壳体材料为 45#钢,其外形示意图如图 1 所示。

通过对该方案的破片形状和尺寸进行观察分析,破片回收率仅有 34.4%,不能满足使用要求。

1.2.1 增加壳体壁厚

为保持该型号射孔弹的装配工艺及配套射孔枪

^{*} 收稿日期:2014-05-23

基金项目:陕西省科学技术研究发展计划工业攻关项目资助(2013K07-01)

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:zbdx04081401@163.com

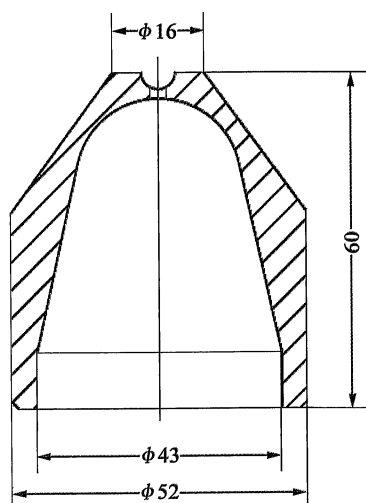


图1 DP43-5 壳体示意图

Fig.1 Schematic diagram of DP43-5 shell

的一致性,在结构设计上保持壳体外径和高度不变,将壳体内径减小到 40 mm,使得壳体口部壁厚增加到 6.0 mm。加厚壳体的理论质量为 438.9 g,增加 26.2 g,将该壳体命名为 DP40-3,壳体结构如图 2 所示。对比图 1 和图 2,可见图 2 壳体壁厚明显增加。

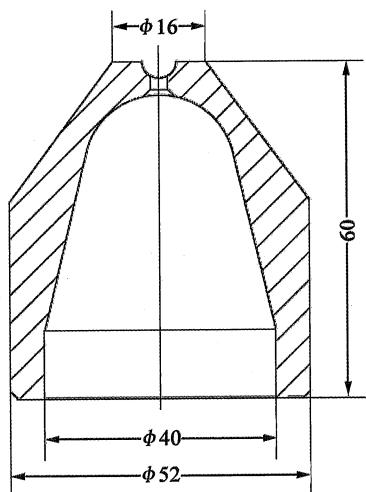


图2 DP40-3 壳体示意图

Fig.2 Schematic diagram of DP40-3 shell

1.2.2 改变壳体材料

以 DP40-3 壳体结构为基础,选择形成破片较好的壳体结构设计,通过改变壳体的材料进行筛选。原壳体材料为 45# 钢,现将材料改为 20# 钢^[7]。两种材料的性能对比如表 1 所示。

由表 1 可见,20# 钢的延伸率和断面收缩率均比 45# 钢提高了近 40%。

1.2.3 壳体外表面刻槽

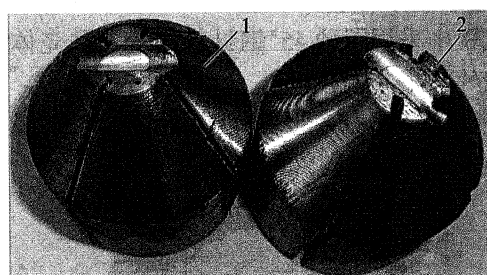
半预制破片技术通过特殊的技术措施控制或引导壳体的破碎,从而控制所形成破片的大小^[8]。根据文献[9]可知,内表面刻槽的破片虽然成型性优

表1 20#钢和 45#钢性能对比

Tab.1 Performance comparison of 20# and 45# steel

材料类型	强度极限/ MPa	延伸率/ %	断面收缩率/ %
20# 钢	275	25	55
45# 钢	355	16	40

于外刻槽,但后者更容易形成连片,便于形成大破片。本文采用 20# 钢、壁厚 6.0 mm 壳体外表面刻槽,在轴向上布数条矩形直槽,方案 1 的槽宽为 1.5 mm,槽深 4.0 mm;方案 2 槽宽为 3.0 mm,槽深 4.0 mm。壳体图如图 3 所示。



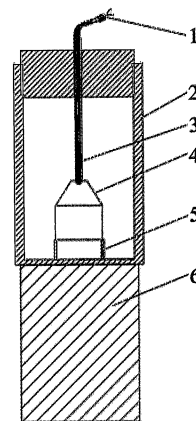
1 - 窄槽壳体;2 - 宽槽壳体

图3 壳体外表面刻槽外形图

Fig.3 Outline of the outer surface groove of shell

1.3 试验装置与方法

采用美国石油协会 (API) 公布的行业标准《Recommended Practices for Evaluation of Well Perforators》第 2 版中 5.4 部分的试验方法^[10],射孔弹壳体破片收集装置示意图如图 4 所示。



1 - 磁电雷管;2 - 密闭收集器;3 - 导爆索;

4 - 射孔弹;5 - 炸高;6 - 钢靶

图4 试验装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the tester

上述标准中关于计算破片回收率的方法为:

$$V = M_2 / M_1 \quad (1)$$

式中: V 为破片回收率,%; M_1 为收集到的破片质

量, g ; M_2 为 ≥ 9.53 mm 的破片质量, g , 其中 9.53 mm (0.375 in) 为 API 标准中 5.4 试验方法中提到的筛号孔眼规格, 作为衡量射孔枪起爆后的枪身孔眼直径的参考值。

1.4 射孔弹穿孔性能试验

根据油田甲方的要求, 破片回收率 $\geq 80\%$ 作为第一考核指标, 但射孔弹的穿孔性能包括钢靶穿深 ≥ 190 mm、穿孔孔径 ≥ 11 mm, 这些穿孔指标对油气井产量影响较大。因此, 对上述壳体设计方案需进行穿孔性能试验, 主要通过射孔弹地面穿钢靶试验验证钢靶的穿深和孔径。

2 结果分析与讨论

2.1 增加壳体壁厚对破片尺寸的影响

试验中采用同种 45# 钢材料加工两种壳体结构进行破片收集。

壁厚为 4.5 mm 的 DP43-5 壳体射孔弹爆炸作用后的破片收集情况如图 5 所示。



图 5 4.5 mm 壁厚壳体破裂后形成的破片

Fig. 5 Fragments formed by explosion of 4.5 mm thick shell

6.0 mm 壁厚的 DP40-3 壳体射孔弹爆炸作用后的破片收集情况如图 6 所示。



图 6 6.0 mm 壁厚壳体破裂后形成的破片

Fig. 6 Fragments formed by explosion of 6 mm thick shell

对比图 5 和图 6 可知, 上述两种结构的壳体爆炸后形成的破片均为自然破片, 破片没有形成特别的形状, 破碎特性不理想; 但 6.0 mm 壁厚的 DP40-3 壳体射孔弹爆炸后产生的破片尺寸明显大于薄壁壳体破片尺寸, 大破片筛分数据见表 2 所示, 表中 M

表 2 壳体壁厚尺寸对破片形成的影响

Tab. 2 Impaction of the shell thickness on the formation of fragments

名称	壁厚/mm	M/g	M_1/g	M_2/g	$V/\%$
45# 钢 DP43-5	4.5	412.5	382.6	134.3	35.1
		414.6	384.3	127.6	33.2
		411.3	376.5	131.5	34.9
平均值		412.8	381.1	131.1	34.4
45# 钢 DP40-3	6.0	435.7	397.6	168.4	42.4
		438.2	402.5	172.3	42.8
		438.6	403.8	176.4	43.7
平均值		437.5	401.3	172.4	43.0

为壳体质量。

表 2 结果显示, 4.5 mm 壁厚壳体爆炸后产生 ≥ 9.53 mm 破片回收率为 34.4%, 6.0 mm 壁厚壳体爆炸后产生的 ≥ 9.53 mm 的破片回收率为 43.0%, 但仍不满足使用要求。

2.2 材料对破片尺寸的影响

选用 6.0 mm 壁厚的 DP40-3 壳体为基础再进行改进, 将壳体材料改为 20# 钢。图 6 为 45# 钢壳体爆炸后的情况, 图 7 为 20# 钢壳体爆炸后形成破片的情况。



图 7 20# 钢壳体破片收集

Fig. 7 Fragments collection of 20# steel

在 6.0 mm 壁厚壳体结构基础上, 将该厚壁壳体材料分别采用 20# 钢和 45# 钢进行碎屑收集试验。

对比图 6 和图 7 可知, 图 7 中的破片尺寸更为明显, 大破片筛分数据见表 3 所示。

表 3 壳体材料对破片形成的影响

Tab. 3 Impaction of the shell material on the formation of fragments

名称	壁厚/mm	M/g	M_1/g	M_2/g	$V/\%$
20# 钢 DP40-3	6.0	435.6	401.4	207.6	51.7
		436.4	397.2	193.6	48.7
		437.5	407.3	201.2	49.4
平均值		436.5	402.0	200.8	49.9

根据表 3 结果显示,材料为 20# 钢的壳体在爆炸后产生 ≥ 9.53 mm 的破片回收率为 49.9%。因此选用 20# 钢作为壳体材料。

2.3 外表面刻槽参数对破片尺寸的影响

基于上述 2 个试验结果,选用 20# 钢、6.0 mm 壁厚 DP40-3 壳体,再根据破片形成机理和应力集中原理,在壳体外部刻制 4 条矩形槽。通过改变槽宽和槽深等参数进而控制破片的形状和大小。图 8 和图 9 分别是槽宽为 1.5 mm 和 3.0 mm、槽深均为 4.0 mm 的壳体在爆炸后产生的破片形状。



图 8 1.5 mm 槽宽壳体破片收集

Fig. 8 Fragments collection of shell with 1.5 mm groove width



图 9 3.0 mm 槽宽壳体破片收集

Fig. 9 Fragments collected of shell with 3 mm groove

对比图 8 和图 9 可知,图 9 中存在连片形状的破片,并且破片尺寸明显大于图 8 的破片。收集到的破片筛分数据见表 4 所示。

表 4 刻槽参数对破片形成的影响

Tab. 4 Effect of groove parameters on the formation of fragments

槽宽	M/g	M_1/g	M_2/g	$V/\%$
1.5 mm	421.2	392.7	311.4	79.3
	419.8	398.1	319.7	80.3
	423.6	383.3	308.5	80.5
平均值	421.5	391.4	313.2	80.0
3.0 mm	405.6	378.9	312.3	82.4
	408.7	382.1	319.1	83.5
	406.5	384.8	320.6	83.3
平均值	406.9	381.9	317.3	83.1

从表 4 中可见,刻槽参数对破片形成影响较大,3.0 mm 槽宽壳体在爆炸后破片回收率为 83.1%,比 1.5 mm 槽宽壳体的破片回收率高出 3.1%。因此,宽槽壳体的破片回收率更高。

2.4 穿孔性能试验分析

针对上述 5 种壳体设计方案,模拟装 114 型枪进行地面穿钢靶试验,验证了各种壳体设计方案对穿孔性能的影响情况,试验数据见表 5 所示。

表 5 地面穿钢靶对比试验

Tab. 5 Comparative tests of penetrating steel target

弹型	试验方案	装药量/ g	钢靶穿深/ mm	孔径/ mm
DP43-5	45# 钢,壳体 壁厚 4.5 mm	39	225	12
DP40-3	45# 钢,壳体 壁厚 6.0 mm	32	232	11
DP40-3	20# 钢,壳体 壁厚 6.0 mm	32	212	11
DP40-3	20# 钢,壳体 壁厚 6.0 mm,槽宽 1.5 mm,槽深 4.0 mm	32	205	11
DP40-3	20# 钢,壳体 壁厚 6.0 mm,槽宽 3.0 mm,槽深 4.0 mm	32	201	11

由表 5 可知,DP40-3 型 45# 钢、6.0 mm 壁厚壳体的射孔弹钢靶穿深最深为 232 mm,但该方案的破片回收率仅有 43.0%;外刻 4 条预制槽、槽宽 3.0 mm 的射孔弹钢靶穿深最浅为 201 mm,破片回收率为 83.1%。上述壳体设计方案对射孔弹的穿孔性能均产生一定影响,并且壳体外表面开槽设计对穿孔性能影响最大。

壳体外表面刻槽极大影响了壳体本身对爆轰的约束,使得炸药能量流失加快,从而减少了爆轰对药型罩的做功能量,直接导致穿深的降低。但整体的穿深性能均满足油田使用,对比破片回收率的性能指标,选择壁厚为 6.0 mm、壳体材料为 20# 钢、外刻 4 条槽、槽宽 3.0 mm、槽深 4.0 mm 的壳体结构作为最终的设计方案。

3 结论

1) 以 45# 钢壳体材料为基础,通过改变射孔弹壳体壁厚尺寸,得到 6.0 mm 壁厚壳体破裂后破片回收率为 43.0%,高于 4.5 mm 壁厚 45# 钢壳体的破片回收率。

2) 以 6.0 mm 壁厚壳体为基础,将壳体材料改为 20# 钢,经试验,该方案的破片回收率为 49.9%,破片性能优于 45# 钢。

3) 通过在厚壁壳体外部预刻不同槽宽、相同槽深的矩形槽, 得到槽宽为 3.0 mm 的壳体爆炸破裂后破片回收率为 83.1%, 破片回收率高出槽宽 1.5 mm 的壳体 3.1%。

4) 通过对 5 种壳体设计方案的地面穿钢靶试验对比, DP40-3 型 45# 钢、6.0 mm 壁厚壳体的射孔弹钢靶穿深性能最优, 穿孔孔径均 ≥ 11 mm, 穿孔深度为 232 mm; 外刻 4 条预制槽、槽宽为 3.0 mm 壳体的钢靶穿深性能为 201 mm。

综上所述, 在满足射孔弹穿孔性能条件下, 选用材料为 20# 钢、壁厚 6.0 mm、且壳体外部预刻 4 条宽度为 3.0 mm、槽深为 4.0 mm 的矩形槽壳体在爆炸后的破片回收率最高, 可达 83.1%, 该壳体结构设计更适合大斜度井、水平井的井况。

参 考 文 献

- [1] Walker J L. Debris reduction perforating apparatus and method for use of same: US, 20060102352A1 [P]. 2006-05-18.
- [2] Myers W, Sampson T, Hetz A. Low debris perforating gun

system for oriented perforating: US, 20070119327 [P]. 2007-05-31.

- [3] Zhan L, Lafontan J L, Williams H, et al. Method and apparatus for perforating with reduced debris in wellbore: US, 8424606B2 [P]. 2013-04-23
- [4] Ramos R, Leggett N. Method and apparatus for logging a well using a fiber optic line and sensors: US, 7900699B2 [P]. 2011-03-08.
- [5] 徐文新, 赵云涛, 姚志忠, 等. 一种大破片深穿透射孔弹: 中国, ZL 201220442437.7 [P]. 2013-04-03.
- [6] 王凤英, 刘天生. 毁伤理论与技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 97-116.
- [7] 栾燕, 唐一凡, 唐志柏, 等. GB/T 699-1999 优质碳素结构钢 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [8] 李向东, 钱建平, 曹兵, 等. 弹药概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 261-262.
- [9] 韩晓明, 高峰. 导弹战斗部原理及应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012: 96-98.
- [10] American Petroleum Institute. Recommended practices for evaluation of well perforators [S]. 2nd edition. 2006.

Design Method of High Recovery of Fragments about Shell of Shaped Charge in the Broken Features

LI Shangjie, LI Bihong, ZHAO Yuntao, LI Wanquan, ZHOU Ming, CHANG Mengqian, WANG Xi
Xi'an Wuhua Juneng Blasting Equipment Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710061)

[ABSTRACT] The factors that influence the forming of large size fragments after the perforating charge explosion were experimental studied against the negative impacts on the wellbore like shell fragments pollution after using perforating charge underground. Through changing the thickness, material, external groove parameters of the shell, the size of the fragments that result from the shell rupture will be changed, and the fragment recovery will be improved. The results show that when the shell thickness is 6.0 mm, the material is 20# steel and the number of external groove which is 3.0 millimeters wide and 4.0 millimeters deep is four, the mass of the shell fragments whose size are not less than 9.53 millimeters account for 83.1% of all the shell fragments obtained from the fragments collection test of single perforating charge, indicating that most of the shell fragments are stuck in the perforating gun body. So the shell fragments pollution can be reduced effectively and the occurrence rate of gun jams during the perforating job will decrease too.

[KEY WORDS] perforating charge; shell; large size fragments; groove; recovery

民爆专利信息

专利名称: 煤矿安全导爆索

专利申请号: CN200620136018.5 公开号: CN200967791

申请日: 2006.10.26 公开日: 2007.10.31

申请人: 陕西省军工(集团)秦东化工有限责任公司

本实用新型公开了一种煤矿安全导爆索, 它是由外壳、消焰剂层、内壳和中心炸药组成的圆形索状体, 中心炸药装在内壳内, 消焰剂层环状分布在内壳与外壳之间。本实用新

型结构设计合理, 提高了炮孔利用率, 加快了循环进尺速度; 减少了雷管使用数量, 替代起爆药包; 消除了炮孔内因煤粉或其他杂质带来的药卷与药卷之间隔离而引起的拒爆或半爆现象; 消除了管道效应引起的药卷密度增大而带来的不稳定传爆或拒爆; 改善了装药结构, 采用间隔装药, 减少了炸药用量, 降低了综合作业成本。

(王元荪)