

射孔弹射孔未穿孔的原因分析*

付代轩 雷新华 李 云

四川石油射孔器材有限责任公司(四川隆昌,642177)

[摘 要] 针对近期在四川油气田若干井次的施工中出现不完全射孔的现象进行了分析和试验,找出了射孔施工起爆率不能达到 100% 的主要影响原因,提出了相应的应对措施:加强射孔弹与射孔枪的匹配设计以避免装配过程导爆索受损,保证导爆索装配完成后处于绷直状态,选择合适感度的传爆药,优化压药工艺,降低传爆药压药密度,严格控制射孔弹装枪质量,提高导爆索本身质量,这些措施对有效提高射孔弹起爆率是很有必要的。

[关键词] 射孔弹 未穿孔 导爆索 爆轰感度

[分类号] TE257+.1 TJ45+7 TQ560.7

引言

射孔弹的起爆率对射孔施工作业的质量起着极为重要的作用。自 2010 年底起,在四川油气田若干井次的施工出现了数起不完全射孔的现象,不同井次未穿孔数从 1 发到 5 发不等。根据国标对射孔施工穿孔率不小于 95% 的要求^[1],尽管这些井次的穿孔率均达到了国标的要求,但是这一现象的频繁发生却对射孔施工质量带来了不利影响。

射孔未穿孔现象在国内并非少见^[2-3],在已报道的文献中对射孔施工未穿孔现象进行了分析和试验,但是均无法解释本案例发生的根本原因。为此,笔者对这一现象进行了分析和试验。

1 射孔弹未穿孔原因初步分析

通过对出现问题的井次所使用的器材进行统计后发现,出现未穿孔现象的射孔器均使用的是 A 弹型,该弹型为一种新弹型,采用了 HMX 及其混合炸药作为主装药,装枪孔密为 16 孔/m,射孔枪长度为 4.3m。对使用后的器材回收后发现未穿孔位置在射孔枪上呈无规律分布,绝大多数未爆射孔弹对应的盲孔处无变形,另有少数的盲孔处有轻微的变形。对射孔枪进行解剖,发现了残留壳体,其变形情况分别如图 1、图 2 所示。

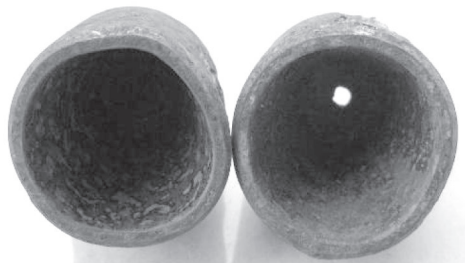


图 1 射孔弹壳体变形情况一



图 2 射孔弹壳体变形情况二

图 1 中,壳体受到前后方射孔弹爆炸后的破片冲击而出现明显撞击痕迹,但变形方向不明显,呈不规则形状。图 2 中,壳体撞击痕迹方向同图 1,但变形方向与受撞击方向垂直,沿射孔枪径向方向。

用空壳体替换一整只射孔枪中的某几发不相连的射孔弹进行模拟试验,起爆后残留壳体变形情况与图 1、图 2 均不一致,其变形沿射孔枪轴向,与撞击痕迹同方向。这说明壳体内有无装药其现象是有区别的,因此可以排除由于壳体内装药柱脱落而导致的未穿孔现象,进而也可以说明未穿孔的射孔弹其装药在这一过程中也发生了反应,否则其变形情况就应该像空弹壳一样沿射孔枪的轴向发生变形。

目前行业内比较公认的 6 个影响射孔弹起爆可靠性的主要因素有:

- 1) 传爆孔的形状和大小;
- 2) 传爆药的感度和密度;
- 3) 导爆索的径向起爆能力;
- 4) 导爆索和射孔弹的相对位置;
- 5) 爆轰波的扰动;
- 6) 介质的影响^[4]。

由于该型射孔弹的传爆孔的形状和大小都是沿

* 收稿日期:2011-12-31

作者简介:付代轩(1968~),男,高级工程师。主要从事油气井射孔器材技术的研究及开发。E-mail:fudaixuan001@163.com

用之前成熟产品的结构,且所使用的射孔枪并非高孔密射孔枪,在投入使用之前已经进行过大量的装枪试验,证明了其性能是稳定可靠的,而且弹架干扰主要体现在对穿深的大幅影响上^[5-6],与本案例情况不符合;此外该弹型所配射孔枪为通用型常规射孔枪,并经过了专门的检验,不会出现渗漏现象,因此可以首先排除第 1)、5)、6)点。

而第 2)、3)、4)点可以从炸药的起爆以及爆轰感度这一角度来进行分析和讨论。根据炸药的性能,影响殉爆的因素主要有如下两个方面^[7]:1)主发装药的药量及性质;2)被发装药的爆轰感度。

在本案例中,导爆索作为主发装药,射孔弹作为被发装药。下面将从导爆索和射孔弹两个方面来对射孔弹未穿孔现象进行系统和全面的分析。

2 射孔弹的结构和装药性能对起爆率的影响

2.1 射孔弹本身性能对起爆率的影响

将 A 型射孔弹与其它射孔弹从结构和工艺上进行分析对比后发现:1)其药型罩尖部到壳体内部传爆孔的距离(俗称肉厚)较小,基本都在 1 mm 以内;2)该型射孔弹药型罩的尖部为一半径较大的圆弧面;3)传爆孔相连接处的壳体内腔结构为直斜面;4)该型射孔弹为了追求更好的穿深性能,采用了增大压药压力来提高压药密度。

上述几点因素的同时作用会导致传爆孔内装药的压实密度过大。试验证明在一定范围内药剂密度不应大于理论密度的 95%,一般选在理论最大密度的 85%~95%之间^[8],一方面足以较快地成长为爆轰,另一方面又能避免感度下降。压实密度过高,其爆轰感度就会下降,为此设计了肉厚的变化对射孔弹起爆性能影响试验,采用与该弹型相同的压药压力 10 MPa,通过改变装药量的大小来调整肉厚大小,每样各压制 4 发,试验结果全部穿孔,见表 1。

表 1 射孔弹肉厚试验

装药量/g	平均裙距/mm	平均肉厚/mm
22	4.32	0.28
23	3.73	0.87
24	3.06	1.54
25	2.43	2.17

从表 1 可以看出,不同肉厚的射孔弹在装枪试验中全部正常起爆,但是考虑到试验是在常温状态下进行,而通常油气层分布存在一定的温度,炸药存在温度—时间曲线,即射孔弹装药的性能在高温下可能会受到一定的影响。A 型射孔弹采用了 HMX 的混合炸药作为主装药,它是一种性能极佳的耐热

炸药^[9],但是炸药长时间处于高温环境下药剂会缓慢分解并有可能释放出气体,这些气体的产生一方面使射孔弹内有效爆炸成分减小,另一方面由于射孔弹内高压气室的存在使药型罩发生变形、松动甚至脱落的现象,从而影响了射孔弹的稳定性和穿孔能力。当温度和密度两个影响因素综合作用的情况下,就有可能导致射孔弹在高温下起爆困难,因此在射孔弹的设计过程中,要合理地设计压药工艺,不能为了穿深而一味追求过高的压药密度。

2.2 射孔弹与射孔枪的匹配设计对起爆率的影响

通过该弹型与普通 89 弹的装枪结构进行对比后发现,该弹型由于在外径和高度上都要大于普通 89 弹,导致装枪后弹架管外侧的导爆索以及导爆索槽上端导爆索固定环与射孔枪内壁的间隙变小,其装枪示意图如图 3 所示。

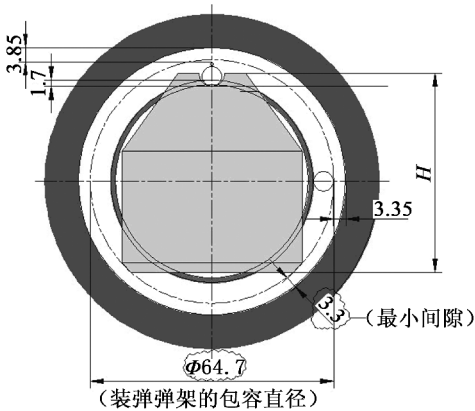


图 3 射孔弹装枪示意图(单位:mm)

该射孔器由于射孔弹的导爆索槽要低于弹架的外表面,因此在弹架上开了如图 4 所示的导爆索引槽,以确保导爆索和射孔弹 R 槽能很好地贴在一起。

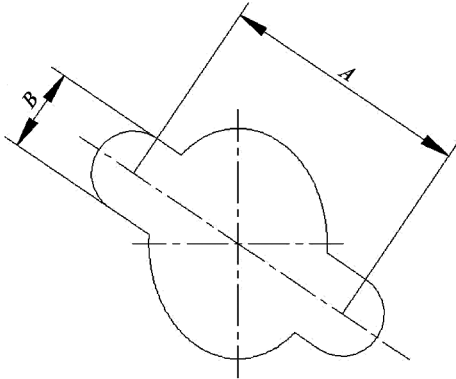


图 4 导爆索开槽示意图

但是在使用过程中发现由于弹架管上导爆索引槽的长度还不够长,导致导爆索处于下凹的状态,由于塑料皮的导爆索在高温状态下会收缩,因此下凹部分的导爆索在井下高温环境下会处在一种趋向于

绷直的状态,如果导爆索固定环的强度不够或者是导爆索固定环与射孔弹内壁发生刮擦、发生移位变形,就会导致导爆索与导爆索槽不能紧密贴合,在极端情况下甚至可能出现导爆索旁落的情况。如果导爆索与传爆孔的相对距离增大,导爆索会影响传爆药的起爆能力。

设计了如下试验,取 1m 长的弹架一只,装满射孔弹后将其中不相连的 4 发射孔弹传爆孔位置的导爆索从旁边绕过,如图 5 所示。将其装枪进行试验后打开射孔枪,发现导爆索旁绕处的射孔弹均未起爆,且残留壳体如图 6 所示。

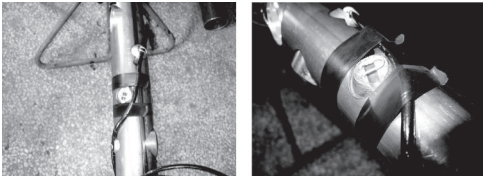


图 5 导爆索旁绕试验示意图

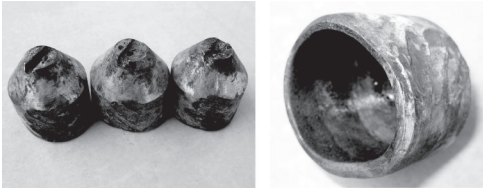


图 6 导爆索旁绕试验壳体变形情况

从图 6 可以看出在导爆索脱离导爆索槽后,射孔弹壳体变形情况也呈不规则状,将本试验残留射孔弹壳体与施工现场回收的射孔弹壳体(如图 1 所示)进行对比后发现,两种情况下残留壳体变形基本一致,这一试验结果在一定程度上证明了在射孔施工中出现的部分射孔弹未穿孔的情况,可能是由于导爆索从导爆索槽中脱离了出来。

3 导爆索对射孔弹起爆率的影响

导爆索的径向起爆能力在正常情况下是稳定的,但是不排除在装配的过程中可能会出现异常情况。通过模拟入枪的过程以及对施工现场装配过程进行观察,发现由于枪体内空间小,导爆索在入枪过程中容易受损,因此设计了试验,探讨当导爆索受损后是否还能可靠地殉爆射孔弹。试验示意图如图 7 所示,图中 L 为实际装枪时相邻射孔弹之间导爆索的长度。

图中破损处分两种情况进行,方案 1 使用刀片

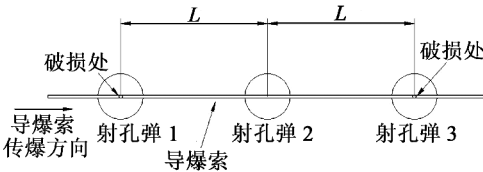


图 7 导爆索受损起爆试验示意图

割去约 10mm 长的导爆索的外皮,沿导爆索径向方向约 1.5 mm 深。方案 2 模拟了导爆索及导爆索固定环受到磕碰和挤压变形的情况,将导爆索放入导爆索槽后将压环使劲压实导爆索,然后沿导爆索槽方向拖拽导爆索,使导爆索外皮发生变形。试验分别采用 A 型射孔弹以及 102 型射孔弹,最终试验结果如表 2 所示。

表 2 导爆索受损起爆射孔弹试验

方案	弹型	第 1 发	第 2 发	第 3 发
1	A 型射孔弹	有穿孔	无穿孔	有穿孔
	102 型射孔弹	有穿孔	无穿孔	有穿孔
2	A 型射孔弹	有穿孔	无穿孔	有穿孔
	102 型射孔弹	有穿孔	有穿孔	有穿孔

由表 2 可以看出,两种弹型在导爆索异常的位置均正常起爆,在导爆索正常的位置却出现了不爆的情况。由于导爆索的爆速在一定范围内与药芯的装药密度呈线性关系^[10],可用下式表示:

$$D_{\rho}=D_{1.0}+M(\rho-1.0) \tag{1}$$

式中: ρ 为炸药的密度, g/cm^3 ; D_{ρ} 为炸药在密度 ρ 时的爆速, m/s ; $D_{1.0}$ 为炸药在密度 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时的爆速, m/s ; M 为与炸药性质有关的系数。

根据式(1),当导爆索药芯的密度降低,其爆速也会随之降低。此外导爆索外壳的破损会使炸药侧面的约束减弱,同样会导致导爆索的爆速降低^[11]。

因此当导爆索某一位置受损时将会影响该处导爆索爆轰波传递的稳定性,这就能够很好地解释表 2 中几组试验的结果。在正常情况下,导爆索的爆速是稳定的,但是当导爆索某处发生破损后或者受到挤压都会导致该处导爆索的装药密度发生变化,从而影响爆轰波传递的稳定性。由于其前端的爆速是稳定的,因此导爆索爆轰波传至破损处时仍然能够实现对射孔弹的起爆。然而当爆轰波继续传递,由于受到破损处密度或者有效药量减小的影响,其爆速降低,从而影响了导爆索的径向起爆能力,当爆轰波传递至图 7 试验中 2 位置处,由于此时爆轰波未能恢复稳定爆轰,就有可能无法可靠起爆该位置处的射孔弹;爆轰波继续传递至 3 位置,此时爆轰波已经成长为稳定爆轰,其径向起爆能力恢复正常,因而能够正常起爆 3 位置处的射孔弹。

采用相同试验方案,将间隔距离 L 调整为 $2L$ 后所有射孔弹全部被正常起爆,这也进一步验证了前面的分析,导爆索的破损会带来爆轰波的衰减,但是这种衰减对其径向起爆能力的影响将随着射孔弹之间的有效距离的增加而逐步减弱。

由于上述试验均在地面环境下进行,所有试验样品均处于常温状态,此时导爆索除了受到人为破损的影响,再无其它影响因素,但是在这种情况下仍然出现了射孔弹未起爆的现象。

而在井下施工作业时,导爆索和射孔弹均处于高温条件下,导爆索破损带来的不利影响将进一步放大。这是由于塑料皮导爆索在高温条件下滞留一定时间后,导爆索会产生收缩,由于导爆索两端被固定,导爆索会处于绷紧的状态,破损处在这种情况下就成了应力弱点,必然会导致该处的装药密度受到更大的影响。此外导爆索内装药在高温条件下会缓慢分解,塑料皮也会老化,使导爆索的径向约束力变小,同样会影响导爆索的径向起爆能力。因此在装枪的过程中要加强对导爆索的保护。

4 改进措施

为了避免再次发生类似的事情,提高射孔施工作业的质量,对该型射孔弹做了一定的调整和改进,并对装枪质量提出了更高的要求:

1)调整弹壳的内腔,改变压药方式,采用定程压制,保证射孔弹的肉厚稳定在 2.5mm;

2)严格控制压药过程,杜绝射孔弹传爆药冒高、过高的情况发生;

3)调整射孔弹壳体结构及在枪体内的位置,增大与内壁的间隙,增加弹架上导爆索引槽的长度,确保导爆索与导爆索槽贴合后导爆索处于绷直状态;

4)采用硬度更高的压环,确保压环能够压实导爆索,同时在发生刮擦的情况下压环不会发生较大的变形和移位;

5)加强施工过程中射孔枪的装配质量,增加装枪护套,防止导爆索与射孔枪内台阶处发生磕碰。

通过这一系列改进措施的实施,在随后的两个月,采用该弹型施工的井次中未出现未穿孔现象,证明了这些措施的有效性。

5 结论

通过对不同因素对射孔弹起爆率的影响进行分析和试验,得到了导致某型射孔弹在射孔施工作业中多次出现未穿孔现象的直接原因是导爆索受损以及导爆索脱离射孔弹导爆索槽。这两个问题的出现将影响导爆索的径向起爆能力,从而导致了射孔施工作业出现未穿孔现象。

参 考 文 献

- [1] 国防科学技术工业委员会民爆器材监督管理局. GB/T 20489—2006 油气井聚能射孔器材通用技术条件[S]. 2006.
- [2] 袁吉诚,程晏桥,杨俊. 鱼 1 井射孔作业 5 发弹未起爆的原因分析——也谈“丢弹”[J]. 测井与射孔,2007(3):72-73.
- [3] 李永基,徐建湘. 射孔作业“丢弹”现象的分析和试验[C]. 射孔分会第五届年会论文集. 中国石油学会测井专业委员会射孔分会,2006:69-72.
- [4] 王彦明. 石油民用爆破技术[M]. 西安:中国兵器工业二一三所,2011:112-120.
- [5] 李东传,金成福,刘亚芬,等. 弹间干扰消除方法初探[J]. 测井技术,2006(5):476-478.
- [6] 赖康华,杜明章,王庆兵,等. 钨铜粉末药型罩射孔弹对钢靶侵彻的数值模拟[J]. 爆破器材,2012,41(1):7-10.
- [7] 张宝坪,张庆明,黄凤雷. 爆轰物理学[M]. 北京:兵器工业出版社,2000:416-433.
- [8] Campbell A. W., Davis W. C., Ramsay J. B., et al. Shock Initiation of Solid Explosives[J]. Physics of Fluids, 1961,4(4):511-521.
- [9] 孙国祥,党兰. 油气井射孔弹用炸药[J]. 测井技术,1996(4):297-302.
- [10] 刘建军. 低能导爆索的试制[J]. 山西化工,2006(5):56-58.
- [11] 黄寅生,金建峰,张春祥,等. 小直径铅皮金属导爆索异常情况下的传爆[J]. 火工品,2002(2):8-11.

Analysis on the Puncherless Cause of Perforating Charge

FU Daixuan, LEI Xinhua, LI Yun

Sichuan Petroleum Perforation Material Co., Ltd. (Sichuan Longchang, 642177)

[ABSTRACT] Analysis and experiment were carried out aiming at clarifying the phenomenon of several incomplete perforations appearing recently in Sichuan Oilfield. The main reason that the initiation ratio of the perforation could not reach 100% was figured out. The corresponding measures were propounded: for example, improving the matching design of perforating charges and guns to avoid the breakage of detonating cord when loading, ensuring the detonating cord straight after the assembling, choosing the booster explosive with appropriate sensitivity, optimizing the parameters of perforating charges loading, reducing the density of booster explosive, strictly controlling the assemble of perforating charges and guns, and improving the quality of the detonating cord. All of these proposals would be necessary for increasing the detonation ratio of perforating charge.

[KEY WORDS] perforating charge, puncherless, detonating cord, detonation sensitivity