

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.02.007

# 含能射孔弹双层药型罩穿孔性能研究\*

潘文强 付代轩 赖康华 刘玉龙 赵世华

四川石油射孔器材有限责任公司(四川隆昌,642150)

[摘要] 含能射孔弹药型罩主要采用含能材料压制的单金属药型罩,该弹穿深性能低。而双层含能射孔弹内层采用高钨配方,外层采用含能材料,既提高了穿深性能,又清洁了孔道。本文中,设计了一种新结构的压罩模具,成功压制了双层药型罩,打靶结果为双层药型罩射孔弹的穿深为695 mm,单金属药型罩为400 mm,双层药型罩的穿深比单金属药型罩提高73.8%,表明与单金属含能射孔弹相比,双层含能射孔弹有明显的优势。

[关键词] 含能射孔弹;双层药型罩;穿深

[分类号] TJ410.3<sup>+</sup>33;TE257<sup>+</sup>.1

## Study on Penetration Performance of Bi-layer Liner in Energetic Penetrating Charge

PAN Wenqiang, FU Daixuan, LAI Kanghua, LIU Yulong, ZHAO Shihua

Sichuan Petroleum Perforating Materials Co., Ltd. (Sichuan Longchang, 642150)

[ABSTRACT] Metal liner of energetic penetrating charge, which has a single layer, is usually made of energetic materials. Its penetration depth is low. While the bi-layer energetic penetrating charge with energetic materials outside and high quality tungsten inside not only increases the depth, but also has a self-cleaning function. A shaped charge liner mold with a new structure was designed, which successfully fabricated bi-layer self-cleaning shaped charge liner. Concrete target test shows that the bi-layer self-cleaning perforating charge has a 695 mm penetration depth, increased by 73.8% compared with the single layer self-cleaning shaped charge having a 400 mm perforating depth. These results indicate that the bi-layer self-cleaning shaped charge has a greater advantage in perforating depth.

[KEYWORDS] energetic penetrating charge; bi-layer liner; penetration depth

## 引言

射孔弹主要由弹壳、炸药、药型罩3部分组成,炸药是能量驱动的来源,药型罩则是射流形成的核心部件。药型罩一般由钨铜粉末直接压制而成,国内射孔弹主要采用单金属药型罩,结构简单,功能单一。随着射孔技术的发展,压裂技术的广泛应用,对射孔孔道的孔径和深度都有新的要求,研究显示,双层药型罩在扩大孔径和提升穿孔深度方面有一定的优势<sup>[1-3]</sup>。

单金属药型罩射孔弹只能实现单一的功能,用深穿透材料制备的药型罩射孔弹,射孔穿深好,但孔道周围有一层压实致密层,对油气井的产出不利;用

含能材料制备的单金属药型罩射孔弹则射孔穿深低,同样不利于油气井的产出。双层药型罩则可以结合两者的优势,内层用深穿透材料,外层用自清洁材料,可实现穿深好且清洁的孔道。美国的 Haney 等<sup>[4]</sup>发明了外层为聚合物、内层为高密度金属的双层药型罩射孔弹,炸药爆炸后将内层金属形成射流后,在地层中形成孔道;同时,外层聚合物也沿轴线方向进入孔道,并且反应生成大量的高压气体,再次冲击孔道,或者形成酸性气体与岩层反应,扩大并清洁孔道。美国 GEO Dynamics 公司与壳牌集团、QinetiQ公司于2007年联合推出了自清洁聚能射孔技术——Connex射孔弹<sup>[5]</sup>,应用Connex射孔技术可增产30%以上;孔道几何形状得到优化,孔道的深度、表面积和流动体积均大幅增加;可在正压或负

\* 收稿日期:2016-07-13

作者简介:潘文强(1987-),男,硕士研究生,研究方向为射孔弹、射孔枪的制造。E-mail:651165826@qq.com

通信作者:刘玉龙(1981-),男,工程师,主要从事石油开采用射孔器材、传爆、起炸装置、油气井解卡等爆破器材研发。E-mail:250058753@qq.com

压条件下作业,即便在弱胶结或各向异性地层,也无需很高的压差就能产生清洁的孔道;无需高成本的孔道清洗作业,如酸处理、盐水冲洗、水力压裂等。因此,双层含能射孔弹有较大的应用潜力。

目前,国内没有关于双层药型罩生产应用的报道,主要是双层药型罩的制备很困难,还没有解决双层药型罩成型的问题。本文中,对一种新型的含能材料 A、高钨配方 B 制备的双层药型罩射孔弹进行了研究,探讨了其制备成型的方法,并对其射流的形成过程和机理进行了分析。

## 1 含能射孔弹双层药型罩制备

### 1.1 模具设计

试验设计依据:Tamer 等<sup>[6-8]</sup>的研究结果表明,双层药型罩形成射流的部分为与内表面有一定角度的一层药型罩,其余的形成杵体,射孔弹对靶材的侵蚀起作用的部分是射流部分。因此,采用外层为含能材料 A 形成杵体,杵体虽然不能提供穿深,但在孔道内部通过化学反应形成高温高压的气体,起到清洁与扩孔的功效;内层为高钨配方 B 粉末,形成射流,这样在保证穿深性能的情况下,同时提供孔道清洁及扩孔功能,如图 1 所示。射孔弹整体结构如图 2 所示。

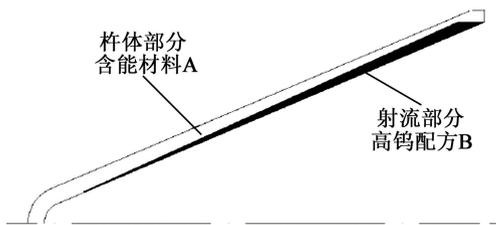
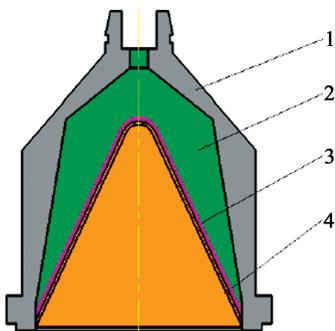


图 1 Tamer 射流与杵体分布的模拟结果

Fig. 1 Simulation of Tamer jet portion and slug distribution

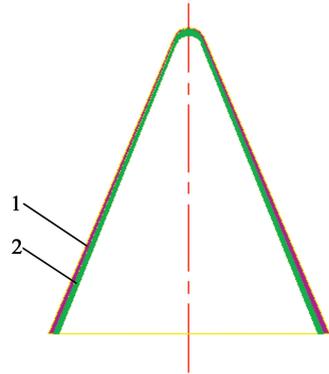


1 - 壳体;2 - 炸药;3 - 含能材料;4 - 金属药型罩。

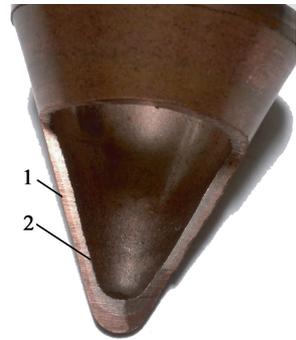
图 2 双层药型罩射孔弹结构

Fig. 2 Structure of penetrating charge with bi-layer liner

双层药型罩的结构如图 3 所示,双层药型罩内外层分布均匀,材料界面结合良好,未出现裂纹等缺陷。其中,外层材料 A 为含能材料,内层材料 B 为高钨配方材料,新设计的模具结构能够顺利制备双层含能药型罩。



(a) 设计结构



(b) 外观形貌

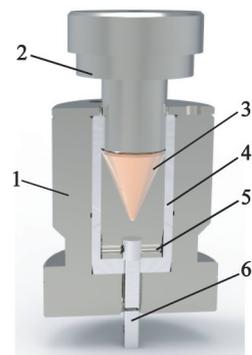
1 - 含能材料;2 - 高钨配方 B。

图 3 含能双层罩

Fig. 3 Energetic bi-layer liner

为了实现制备这种结构的药型罩,设计了双层药型罩模具,结构如图 4 所示,双层罩模具与普通模具的区别是普通模具没有旋转阴模套。

如果选用普通模具制备双层药型罩,过程如下:



1 - 压罩模套;2 - 压罩阳模;3 - 药型罩;

4 - 旋转阴模套;5 - 销钉;6 - 传动方杆。

图 4 双层罩模具设计

Fig. 4 Mold designing of bi-layer liner

先分别压制内外层材料,并分别顶出,再将压制好的外层与内层药型罩分别放入模具,然后压制、粘在一起。这种制备方法的缺点是有弹型后效<sup>[9]</sup>的作用,药型罩膨胀,再次放入模具不容易放进,强行放入容易产生裂纹,且轴对称性差,影响射孔弹穿深。

双层药型罩具体实现过程如下:向图4的模具中倒入含能材料A(粉末)即外层材料,阴模旋转,用2~5 MPa的压力压制成型,压机回程,阴模不顶出;继续倒入内层深穿透材料B,阴模旋转,在工艺规定的压制压力(大压力)下压制成型,压机回程,阴模顶出,内层药型罩与外层药型罩粘在一起,形成双层含能药型罩。

新设计的模具与普通模具设计相比,优点主要有:1)阴模与旋转壳套之间没有相对转动,降低了阴模口部位置与含能层的摩擦力,降低了压制风险;压制内层高钨配方层时,粉末在阴模中仍然能够甩得起来,使内层药型罩成分分布更加均匀,轴对称性好。2)阴模不容易拉伤。

## 1.2 试验方案

为了使对比试验可靠,分别压制单组分药型罩及双层药型罩作为同种工艺条件下的试验对比,以消除其他因素的影响。选用89型射孔弹进行试验,药型罩口径为39 mm,射孔弹外径为48 mm。研究人员郑宇等<sup>[10]</sup>的模拟研究结果表明,当内外层金属的厚度比为1时,射孔弹穿深性能最好;随着厚度比的增加,射流头部的速度不断增加,但增加的程度不断减小。因此,笔者选用厚度 $\varepsilon = 0.8$  mm、厚度比 $\eta = 1$ 的89型射孔弹药型罩进行试验,对单金属含能射孔弹和双层含能89型射孔弹作对比试验。试验设计如表1所示。

表1 双层材料设计

Tab.1 Material composition of bi-layer liner

材料	单金属含能药型罩粉质量/g	双层含能药型罩粉质量/g
含能材料A	48	24
高钨配方B	0	33

## 2 结果与讨论

### 2.1 双层药型罩射孔弹的穿深性能

用压制的药型罩分别在同种条件下压制射孔弹,并进行打靶试验。射孔弹打靶条件:目标靶为直径160 mm、长度1 m的API 19B混凝土靶;炸高为12 cm;间隙为18 cm;模拟枪管和套管的厚度均为

10 cm。穿深数据如表2所示,图5为双层含能射孔弹的射孔效果。

表2 穿深数据对比

Tab.2 Comparison of penetration depth

序号	穿深/mm	
	单金属含能89型弹	双层含能89型弹
1 <sup>#</sup>	410	700
2 <sup>#</sup>	390	706
3 <sup>#</sup>	400	680
平均值	400	695



(a) 孔道入口



(b) 射孔孔道

图5 双层药型罩射孔效果

Fig.5 Perforation effect of bi-layer

从表2中可以看出,双层药型罩与单金属药型罩的穿深差异较大,双层含能射孔弹的射孔深度比单金属含能射孔弹的穿深高73.8%。从图5中可以看出,双层含能射孔弹孔道大且均匀。

双层含能药型罩穿深性能比单金属含能药型罩穿深性能显著提高,主要由于内层药型罩由高钨配方的金属组成,在药型罩压垮过程中,形成高密度射流,射流动能显著增加,穿深增加。

### 2.2 数值模拟

射孔弹药型罩在爆轰波作用下压垮过程,具有大应变、高应变速率特性。处理大应变、高应变速率问题时,Euler算法比Lagrange算法更适合,本研究中,选用Ls-Dyna的Euler算法进行模拟。计算模型如图6所示,其中,内层为高钨配方材料,外层为含能材料。

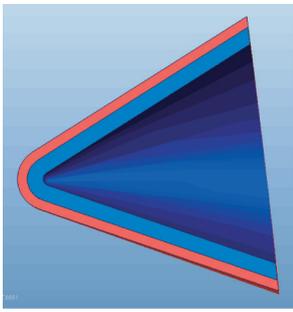


图 6 计算模型

Fig. 6 Calculation model

炸药采用 High-Explosive-Burn 模型及 JWL 状态方程加以描述,空气采用 Null 材料模型及 Liner-Polynomial 状态方程加以描述<sup>[11]</sup>。

药型罩的强度在爆轰过程中可以忽略不计,因此不需要建立药型罩的强度模型, Mie-Gruneisen EOS 状态方程非常适合爆轰过程中各种粉末冶金药型罩、冲压板罩的 Ls-Dyna 处理。Liu 和 Shen<sup>[12]</sup> 使用 EOS 状态方程模拟药型罩的冲击过程,分析结果表明,模拟结果与其试验结果非常符合。基于 Hugoniot 冲击方程的 Mie-Gruneisen EOS 方程如下所示:

$$p = p_H + \Gamma \rho (E - E_H) \quad (1)$$

式中:  $\Gamma$  为 Gruneisen Gamma 系数,  $\Gamma = B_0 / (1 + \mu)$ ,  $B_0$  为一个常数;  $\rho$  为金属药型罩的密度;  $p_H$  和  $E_H$  为 Hugoniot 压力和能量。

其中

$$p_H = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2}; \quad (2)$$

$$E_H = \frac{p_H}{2\rho_0} \left( \frac{\mu}{1 + \mu} \right) \quad (3)$$

式中:  $C_0$  为声音在材料中的传播速度;  $\mu$  为可压缩系数,  $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ ;  $s$  为常数。

Mie-Gruneisen EOS 状态方程模拟弹壳的爆轰过程,弹壳的强度采用 Johnson-Cook 方程表示。

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) (1 + C \ln \varepsilon^*) (1 - T_H^m) \quad (4)$$

式中:  $\sigma$  为流变应力;  $\varepsilon$  为塑性应变量;  $\varepsilon^*$  为应变速率;  $T_H$  是同系温度;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $m$  为常数。

$$T_H = \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \quad (5)$$

图 7 是双层药型罩压垮、射流形成、延展和断裂的过程。外层罩没有形成射流,只是形成了杵体的一部分,射流还是由密度较高的内层金属构成,因此,双层含能药型罩能够实现内层深穿透、外层含能材料清洁和扩孔的结构。

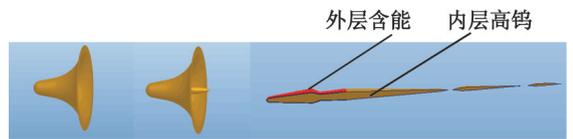


图 7 双层罩射孔弹的爆炸模拟结果

Fig. 7 Stimulation results of penetrating charge with bi-layer liner

### 3 结论

1) 理论研究了双层药型罩的作用机理,即内层药型罩形成射流,外层药型罩形成杵体。

2) 设计了新的压罩模具结构,并利用该结构压制了外层为含能材料 A、内层为高钨配方 B 的双层药型罩,双层药型罩界面结合良好,药型罩强度高,界面材料厚度分布均匀。

3) 双层含能药型罩射孔弹与单金属含能射孔弹相比,双层含能射孔弹的射孔深度比单金属含能射孔弹的穿深高 73.8%,能够实现深穿透、清洁扩孔的功能。

### 参考文献

- [1] GROVE B, WALTON I. Shaped charge jet velocity and density profiles [C]//23rd International Symposium on Ballistics. Tarragona, Spain, 2007: 103-110.
- [2] HELD M. Liners for shaped charges [J]. Journal of Battlefield Technology, 2001(4): 1-3.
- [3] PFEFFER G. Determination par simulations numériques de l'état et des lois de fragmentation des jets de charges Creusses [C]//5th International Symposium on Ballistics. Toulouse, France, 1980.
- [4] HANEY J, WESSON D. Shaped charge: US 7044225B2 [P]. 2006-05-16.
- [5] GEO Dynamics. Connex reactive perforating clean tunnels fractured tips [EB/OL]. [2016-12-16]. <http://www.perf.com/connex-reactive-perforating.html>.
- [6] TAMER E. The factors affecting the performance of explosive reactive Armours [D]. Cairo, Egypt: Master of Science Thesis, Military Technical College, 2004.
- [7] LEE W H. Oil well perforator design using 2D Eulerian code [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(5): 535-559.
- [8] CURTIS J P, SMITH F T, WHITE A. The formation and stretching of bi-material shaped charge jets [J]. American Institute of Physics Conference Proceedings, 2011, 1426(10): 116-119.

乳化基质、用户使用和储存乳化基质。

### 3 结 论

该新型乳化基质具有一定流动性,其爆炸性能稳定,具有良好的爆炸性能,能满足装药车现场装药要求;经长距离 (> 700 km) 运输后,不破乳、不老化,且性能没有明显衰减,并在 30 d 的储存期内,性能衰减较小,可以满足长距离运输现场装药车装填的需要。解决了爆破一体化过程中的集中制药、远程配送后装药车现场机械化装填对散装乳化基质的要求,为爆破一体化服务打通了瓶颈。

### 参 考 文 献

[1] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 2 版. 北京:冶金工业出版社, 2008.  
WANG X G. Emulsion explosive[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2008.

[2] 祁茂富,程飞,刘晓明. 乳胶基质远程配送可行性研究[M]//吕春绪. 民用爆破器材理论与实践. 北京:兵器工业出版社, 2012:169-172.  
QI M F, CHENG F, LIU X M. Research on related techniques of long-distance delivering system of emulsion matrix[M]//LÜ C X. Theory and Practice of Industrial Explosive Materials. Beijing: Weapons Industry Press, 2012:169-172.

[3] 李宏兵. 乳胶远程配送系统相关技术研究[J]. 爆破, 2010, 27(2): 88-91.  
LI H B. Research on related techniques of long-distance delivering system of emulsion matrix [J]. Blasting, 2010, 27(2): 88-91.

[4] 韦锦初,开俊俊. 乳胶基质远程配送及储存技术的探

讨[J]. 煤矿爆破, 2011(4): 35-36.

WEI J C, KAI J J. Discussion on the techniques of long-distance delivery and storage of emulsion matrix[J]. Coal Mine Blasting, 2011(4): 35-36.

[5] 王艳平,陈锐. 推进我国民爆生产与爆破服务一体化实质性发展的对策研究与实践探讨[J]. 煤矿爆破, 2015(3): 1-7.

WANG Y P, CHEN R. Countermeasures research and practical discussion on promoting industrial explosive materials' production combined with blasting services[J]. Coal Mine Blasting, 2015(3): 1-7.

[6] 戴佑林. 水相 pH 值对一号岩石乳化炸药爆速和猛度的影响[J]. 爆破器材, 2006, 35(1): 8-10.

DAI Y L. Effect of the pH value of water phase on the detonation rate and brisance of rock emulsion explosive [J]. Explosive Materials, 2006, 35(1): 8-10.

[7] 陈银良. 影响乳化炸药稳定性的因素分析[J]. 爆破器材, 2011, 40(2): 17-19.

CHEN Y L. Analysis on the factors affecting the stability of emulsion explosive[J]. Explosive Materials, 2011, 40(2): 17-19.

[8] 陈丽花. 浅谈如何提高乳化炸药的稳定性[J]. 能源与环境, 2012(4): 135-136.

[9] 马平,谭本岭,叶辉,等. 乳胶基质黏度影响因素研究[J]. 工程爆破, 2015, 21(3): 9-12.

MA P, TAN B L, YE H, et al. Studies on the influence factors of emulsion matrix viscosity[J]. Engineering blasting, 2015, 21(3): 9-12.

[10] 李文艺,任流润,袁治雷,等. 化学发泡条件下对乳化炸药性能的影响[J]. 爆破器材, 2013, 42(5): 35-37.

LI W Y, REN L R, YUAN Z L, et al. Research on impact factors of chemical foaming of emulsion explosive [J]. Explosive Materials, 2013, 42(5): 35-37.

(上接第 34 页)

[9] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 2 版. 北京:冶金工业出版社, 2006: 201-202.

[10] 郑宇,王晓鸣,李文彬,等. 双层药型罩射流形成的理论建模与分析[J]. 火炸药学报, 2008, 31(3): 10-14.  
ZHENG Y, WANG X M, LI W B, et al. Theoretical modeling and analysis on jet formation of double-layered conical liner [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(3): 10-14.

[11] 石少卿,康建功,汪敏,等. ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011: 20-30.

[12] LIU Y B. SHEN Z W. Numerical simulation on formation and penetration target of powder metal shaped charge jet[C]//2010 International Conference on Computer Application and System Modelling. IEEE, 2010: V9-518-V9-521.