

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.01.008

装药与药型罩分离对射孔弹穿深影响的规律研究^{*}

吴焕龙

四川石油射孔器材有限责任公司(四川内江,642177)

[摘 要] 采用数值模拟计算和实验分析研究了某 60 型射孔弹聚能装药与药型罩在不同的装配分离间隙下穿深的下降规律。仿真计算得到的穿深与间隙关系曲线与实验得到的变化趋势相似,即随间隙的增大,60 型射孔弹的穿深呈现出快速下降、略有上升、平缓不变的过程。揭示了穿深曲线在装药和药型罩分离间隙增大至 3.5 mm 后要经历一个先上升后平缓的特殊过程的事实,并根据数值计算过程分析了分离间隙在 4.0~5.0 mm 范围内穿深增加现象的原因。

[关键词] 射孔弹;分离间隙;穿深;仿真计算;粉末药型罩;孔隙度

[分类号] TE257+.1;TJ45+9

引言

射孔弹作为一种打开油气储集层与井筒之间流体通道的产品,其穿深直接影响油气井的产能。然而在实际生产或其它环节中,常常会出现同种弹型不同个体间的药型罩开口端面距壳体大端面的距离存在差异较大的现象,将此现象称为“拔罩”。拔罩是药型罩和药柱相分离、两者存在接触间隙的反映,它是影响射孔弹穿深稳定性的重要因素。若不采取防止措施,则可能出现药型罩的完全脱离,进而导致施工中不穿孔的严重工程后果。因此,通过研究拔罩总结出拔罩间隙对射孔弹穿深影响的规律是很有必要的。本文就该问题以某 60 型射孔弹作为研究样本,以常见的拔罩分离间隙范围 0~5 mm 为例,结合数值仿真计算与实验进行探讨。

1 数值仿真

1.1 数值计算模型

本文采用显式有限元分析软件 LS-DYNA 的 ALE 流固算法进行仿真计算,针对 60 型射孔弹

DP26RDX9-2 射流的形成和侵彻钢靶特性进行模拟研究,考核对象为其在不同拔罩间隙时的穿深。60 型射孔弹尺寸小,可大大提高计算速率,建立几何模型(图 1 为零间隙标准弹)及网格划分原则^[1],最终有限元模型单元总数为 36.6 万。

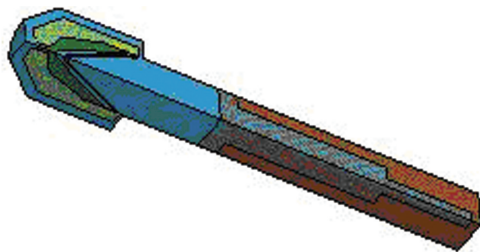


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

1.2 材料模型及参数选取

有限元模型各材料强度模型及状态方程见表 1,其中对药型罩和靶板材料本构的选择作如下讨论。

表 1 材料模型

Tab. 1 Material models

组成部件	材料	强度模型	状态方程	密度/(g·cm ⁻³)
炸药	RDX	HIGH_EXPLOSIVE_BURN	JWL	1.65
药型罩	单质铜	STEINBURG	GRUNEISEN	8.93
靶、壳体	45#钢	JOHNSON_COOK	GRUNEISEN	7.85
空气	理想气体	NULL	LINEAR_POLYNOMIAL	1.225×10 ⁻³

^{*} 收稿日期: 2013-06-19

作者简介: 吴焕龙(1985~),男,工程师,主要从事石油射孔器材制造研发工作。E-mail:whliangtian@163.com

1.2.1 药型罩材料本构 STEINBURG^[2]

药型罩选 STEINBURG 建模,该材料模型适用于塑性应变率高于 10⁵ 实体单元,屈服强度是温度和压力的函数,状态方程由压力决定,高压本构模型 STEINBURG 对冲击波加载有较好的描述能力,剪切模量 G 和屈服强度 σ_y 作为压力 p 和温度 T 的函数分别定义如式(1)、式(2):

$$G = G_0 \left[1 + bpV^{1/3} - h \left(\frac{E_i - E_c}{3R'} - 300 \right) \right] e^{-fE_i/(E_m - E_i)} \quad (1)$$

式中: G_0 、 b 、 h 和 f 是需试验确定的材料常数; p 是压力; V 是相对体积; E_i 是初始体积比能; E_c 、 E_m 分别是冷压缩能和融化能; $R' = R\rho/A$, R 是气体常数, ρ 是初始密度, A 是原子量, 如果 R' 未定义, LS-DYNA 程序将默认以 cm-g-ms 单位制来计算得 R' 。

$$\sigma_y = \sigma'_0 \left[1 + bpV^{1/3} - h \left(\frac{E_i - E_c}{3R'} - 300 \right) \right] e^{-fE_i/(E_m - E_i)} \quad (2)$$

式(2)中,当 E_m 超过 E_i 时,有式(3):

$$\sigma'_0 = \sigma_0 [1 + \beta(\varepsilon_i + \varepsilon_p)]^n \quad (3)$$

式中: σ'_0 为强化屈服应力; σ_0 为初始屈服应力; β 、 n 为加工硬化参数; ε_i 为初始塑性应变; ε_p 为等效塑性应变。

若冷作强化屈服应力 σ'_0 超过 σ_m , 则 σ'_0 设置成与 σ_m 相等。当材料融化后, σ_y 和 G 均设置为初始值的一半。

1.2.2 靶板材料本构 JOHNSON-COOK^[2,3]

在冲击爆炸效应数值计算分析中,材料的失效

破坏参量是材料行为描述的一个重要方面。1983 年第 7 届国际弹道会议上,Johnson 和 Cook 在其报告中描述了用于计算金属变形的 JOHNSON-COOK 模型。它考虑了应变硬化、应变率和温度等影响因素,且由于计算结果和试验数据吻合度高而使得 JOHNSON-COOK 材料模型中的损伤失效模型成为应用较广的专用失效准则。金属壳体及靶板材料 45# 钢的强度依赖于应变、应变率和温度,适用 J-C 模型。

Johnson 和 Cook 将流变应力表示为:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n) (1 + c\ln\dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (4)$$

式中: A 、 B 、 c 、 n 、 m 均为需通过实验确定的材料常数; ε_p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ 为无量纲的等效塑性应变率($\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$),同系温度 $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$ 。

1.2.3 数值计算材料参数

数值计算用的材料参数见文献[4-6]的数据。其中,紫铜、空气、靶板都有标准材料参数可供直接选用;而实际生产用炸药、壳体的参数受工艺条件等影响并无现成的材料参数。因此,计算时采用的是在结合相关因素的情况下,经过大量验算修正而积累起来的一组符合实践模型计算的取值。

1.3 计算结果

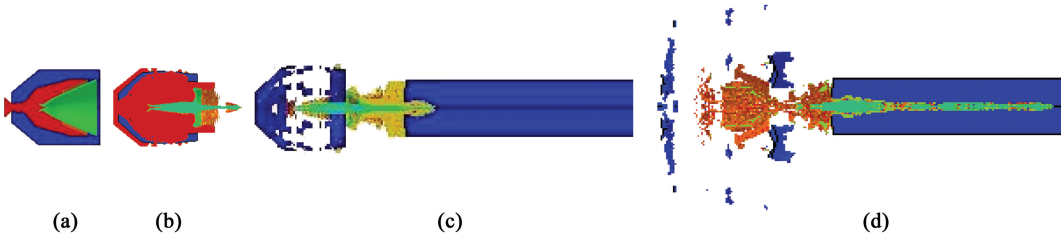
各拔罩间隙下模拟计算数据见表 2。

图 2 给出了拔罩间隙为 4 mm 的聚能射流形成、侵彻钢靶板的数值计算过程图像;图 3 给出了 3 种代表性拔罩间隙下最先接触冲击靶面的射流头部单元速度历程曲线和 4 种间隙时药型罩动能变化曲线。

表 2 各拔罩间隙时 60 型紫铜罩射孔弹模拟穿深

Tab.2 Simulation penetration depths of 60 copper liner perforating charge at different separation gaps

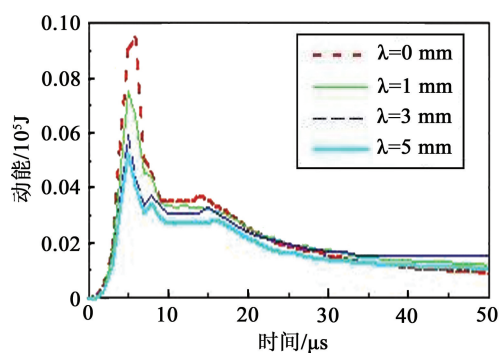
拔罩间隙/mm	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
穿深/mm	70.5	63.4	58.0	53.9	49.6	46.4	43.0	41.9	44.6	45.5	45.1



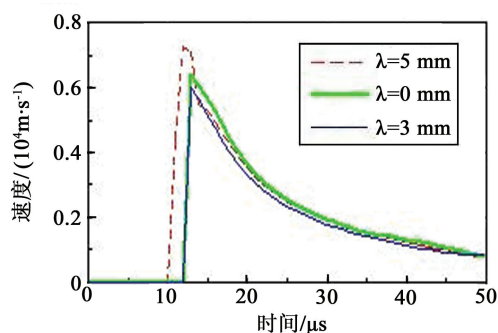
(a) 罩顶出现压垮开口;(b) 闭合后射流延伸;(c) 靶面开坑;(d) 侵彻基本结束

图 2 不同时刻仿真结果图像

Fig.2 Simulation results at different times



(a)



(b)

(a) 药型罩动能历程曲线; (b) 射流头部
单元速度历程曲线图 3 几种典型拔罩间隙时药
型罩侵彻能力参数比较Fig. 3 Parameter comparison of liner penetration
ability at some representative separation gaps

从图 2 可以看出,此间隙下,在射流的最初形成阶段出现一个显著特征:射孔弹起爆后药型罩顶端最先被压垮,形成缺口,爆轰产物从中喷出。已有研究表明,受高速产物飞出的影响,药型罩并不会立即形成闭合,但形成射流头部的药型罩微元在碰靶前却拥有了更高的侵彻速度,并最终得到更长的侵彻孔道,这一点可以从图 3(b)中看出。

从图 3 可以看出,药型罩从爆轰产物获得的动能随着拔罩间隙的增大而减小,且减小速度变慢。但是射流头部速度却呈现不一样的规律,先是随着拔罩间隙增大而减小,随后又突然增大。因此,最终的侵彻深度要由药型罩动能和射流头部速度两个可表征侵彻能力的参数共同来影响和决定。结合表 2 说明,在分离间隙 4~5 mm 范围内,由于药型罩压垮参数的变化,射流头部速度变化的正面影响大于药型罩冲击驱动能损失带来的负面影响,故出现了穿深提高的反常现象。

2 侵彻实验

2.1 实验装置和方案

按图 4 进行地面静破甲射孔检测试验,消除了

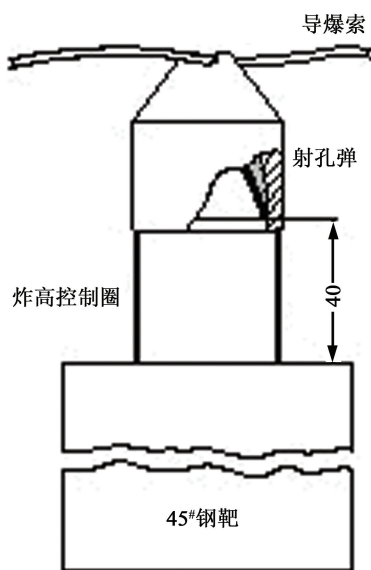


图 4 实验装置示意图(单位:mm)

Fig. 4 Sketch of test equipment(unit:mm)

间隙给炸高带来的变化。

实验用射孔弹(含特定的药型罩与药柱分离间隙)的具体制作方法可参考作者其它相关文章的论述。其中实验压装用药型罩为粉末罩,为了有利于与数值计算的结果进行对比分析,特从生产用电解铜粉中筛分出 200 目的中粒级与粗粒级粉末以提高压制密度,降低孔隙度,以便制造出尽可能接近单质铜性质的铜粉末药型罩^[7]。

粉末罩孔隙度的测定方法如下:在精度为 10^{-4} g 的光学分析天平上,用石蜡封孔来防止孔隙对结果的影响,采用阿基米德原理,测出粉末药型罩密度。铜粉末药型罩的密度 $\rho_{\text{测}}$ 是对 3 个样品测量后取平均值得到的。根据单质铜的理论密度 $\rho_{\text{理}}$,制备的铜粉末药型罩的孔隙度 ψ 可用式(5)计算:

$$\psi = 1 - \frac{\rho_{\text{测}}}{\rho_{\text{理}}} \quad (5)$$

最终测得实验粉末罩孔隙度为 13.5%。

2.2 实验参数及结果

实验用射孔弹 DP26RDX9-2 装药口径为 26 mm,药型罩质量 10.6 g,药柱所用炸药是 R852,炸药质量 9 g,依据 GB/T 20488—2006 进行实验,炸高取 40 mm。其中标准弹(零间隙)的穿深是 77.9 mm,各拔罩间隙时的穿深数据列于表 3 中,数据保留精度为 0.1 mm。

3 结果分析和讨论

图 5 给出了 60 型聚能射孔弹射流侵彻钢靶的仿真计算值和实验结果的对比关系。

从图 5 中可以看出,在同一拔罩间隙值大小时,数值模拟的穿深值要低于实验值,但两种研究方法

表 3 各拔罩间隙时 60 型纯铜粉末罩射孔弹地面静破甲穿深数据

Tab. 3 Ground static penetration depths of 60 copper powder liner perforating charge at different separation gaps

拔罩间隙/mm	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
穿深/mm	77.9	69.8	65.8	59.7	55.1	51.3	47.0	44.9	49.4	50.3	50.5

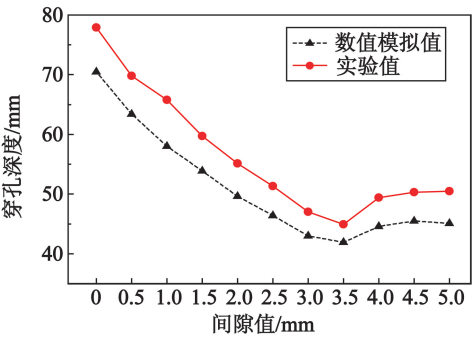


图 5 穿深与拔罩间隙的散点折线关系
Fig. 5 Scatter line diagram of penetration depth changing with separation gaps

得到的数据点折线变化趋势几乎相同,对此作下述讨论。

模拟值低于实验值源于 3 个方面。

第一,LS-DYNA 有限元程序计算聚能射流类问题存在模拟速度低的客观误差。

第二,冲击波在使多孔药型罩的微孔洞崩塌过程中实现了对其中气体的绝热压缩,使得药型罩的温度急剧上升,可提高射流韧性、延迟射流断裂;同时,在本研究中的装药口径和炸高条件下,铜粉末罩形成的射流,其性能也要优于紫铜药型罩,国内中科大的李如江等^[8-9]在这方面做过较多的研究。

第三,拔罩间隙(轴向测量)是将药柱大端面作为测量起点,而实际上由于回弹的不一致,药柱锥形穴顶部距药型罩顶部的轴向间隙相比计量值要小,而数值法在建模时却忽略了这一点。

从图 5 可以看出,两种研究方法得到的关于拔罩间隙大小对射孔弹穿深影响的规律是近似的。大致可归纳为:当间隙在 3.5 mm 内时,其对射孔弹穿深的影响程度较大,曲线下落很快;当轴向间隙在 3.5~5.0 mm 时,穿深曲线先反向上升,接着维持一近似水平段。穿深增加并在一定间隙范围内保持微小变化的机理从数值计算的过程可以得到:在间隙值位于 4.0~5.0 mm 时[图 2(a)],当导爆索从起爆孔引爆射孔弹传爆药后,爆轰波以球面波的形式在装药中传播,冲击波斜入射药型罩,并在罩顶发生了马赫反射,随之产生的高于 C-J 压力的瞬态高压($p_{C-J}=28\text{ GPa}$, $p_M=35.7\text{ GPa}$)使得药型罩材料动态响应性态出现压力突跃,5mm 间隙时罩顶甚至被迅

速冲击出一个明显的孔洞,部分爆炸产物从孔洞中飞出,约 4 μs 后罩壁才完全闭合。马赫反射效应虽然延迟了药型罩的闭合,但其形成的射流头部速度更高,提高了破甲性能[图 3(b)]^[4,10]。

由于数据点是离散的,无法判断间隙值 3.5 mm 就是穿深由降到升的变化转折点。因此,再选取一个采样点 3.75 mm 进行数值计算,计算结果为 41.4 mm。据此可推断,穿深在拔罩间隙 3.5~4.0 mm 之间必须经过一个先降后升的连续过程。鉴于结合生产实际,本文仅研究了常见拔罩间隙 5 mm 内的情况,由此可以预测:在间隙值持续增大至某一值时,侵彻深度将出现一次骤降,随后缓慢下降,逐渐与横轴平行。

4 结论

对于本文研究的 DP26RDX9-2 型射孔弹拔罩问题,通过数值仿真计算和设计试验两种方法研究,可以得到如下结论:

1)孔隙度 13.5% 的铜粉末药型罩射流拥有比紫铜药型罩射流更强的侵彻能力,这在一定层面上印证了聚能装药爆炸压缩下铜粉末药型罩比紫铜药型罩具有更高的冲击温升的事实,多孔特性提高了射流的延伸能力。

2)若不考虑发生马赫反射的间隙值区段,整体来看,射孔弹穿深随拔罩间隙值的增大而下降,且下降速度变慢。药型罩与装药分离间隙的存在对射孔弹穿深性能的影响不容忽视。

3)鉴于冲击波对药型罩的斜入射作用受拔罩间隙的增大发生了非正规马赫反射,穿深曲线在装药和药型罩分离间隙增大至 3.5mm 后要经历一个先上升后平缓的特殊过程。

参 考 文 献

[1] 吴焕龙,杜明章,杨超,等.射孔弹聚能射流侵彻钢靶的数值仿真与实验分析[J].爆破器材,2012,41(2):30-33.
Wu Huanlong, Du Mingzhang, Yang Chao, et al. Numerical simulation and experimental analysis of shaped charge jet penetrating into steel target[J]. Explosives Materials, 2012, 41(2): 30-33.
[2] 张子敏,许碧英,阎峰,等.活性金属药型罩射孔弹破甲试验研究[J].爆破器材,2013,42(4):53-56.
Zhang Zimin, Xu Biying, Yan Feng, et al. Penetrating

- test of active metal charge liner perforating bullet [J]. Explosive Materials, 2013, 42(4): 53-56.
- [3] 陈刚, 陈忠富, 徐伟芳, 等. 45 钢的 J-C 损伤失效参量研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(2): 131-135.
Chen Gang, Chen Zhongfu, Xu Weifang, et al. Investigation on the J-C ductile fracture parameters of 45 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(2): 131-135.
- [4] 张宝平, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001.
- [5] 桂毓林, 于川, 刘仓理, 等. 带尾翼的翻转型爆炸成形弹丸的三维数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 314-318.
Gui Yulin, Yu Chuan, Liu Cangli, et al. 3D simulation of over-turned explosively formed projectile(EFP) with star-shaped fins[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 314-318.
- [6] 杨秀敏. 爆炸冲击现象数值模拟[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
Yang Xiumin. Numerical simulation on blast shock[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010.
- [7] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 134, 141, 173-174, 378.
- [8] 李如江, 沈兆武, 王凤英. 药型罩初始孔隙度对聚能射流行为的影响[J]. 高压物理学报, 2008, 22(4): 445-448.
Li Rujiang, Shen Zhaowu, Wang Fengying. Initial porosity effect on the jet behavior of shaped charge[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 22(4): 445-448.
- [9] 李如江, 沈兆武, 刘天生. 多孔药型罩聚能射流低炸高大穿深机理研究[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 424-427.
Li Rujiang, Shen Zhaowu, Liu Tiansheng. Deep penetration mechanism of jet produced by shaped charge with porous liner at low standoff distance[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(4): 424-427.
- [10] 张洋溢, 龙源, 何洋扬, 等. 爆轰波斜冲击金属介质理论在聚能装药药型罩设计中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7): 214-217, 274.
Zhang Yangyi, Long Yuan, He Yangyang, et al. Application of oblique impact theory of detonation waves at the explosive-metal interface in design of shaped charge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 214-217, 274.

Law Study on the Influence of Charging and Liner Separation to Penetration Depth of Perforating Charge

WU Huanlong

Sichuan Petroleum Perforating Materials Co., Ltd. (Sichuan Neijiang, 642177)

[ABSTRACT] The penetrating depth decline law of a 60 type perforating charge with different separation gaps between shaped charge and liner was studied by numerical simulation and experimental analysis. The trends of the penetration depth changing with separation gap, which are obtained by simulation calculation and experimental result, are consistent. As the gap increases, the penetration depth of the 60 perforating charge exhibits a rapid initial decrease, then a little rise, and almost invariance at last. When the gap between charge and liner increases to 3.5mm, the penetration depth curve would go through a special process, in which it first increases and then keeps stable. The reason that the penetration depth increases with the gap in a range of 4.0-5.0mm was analyzed according to the details of numerical procedure.

[KEY WORDS] perforating charge; separation gap; penetration depth; simulation calculation; powder liner; porosity

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部