

doi: 10.7690/bgzdh.2016.12.012

## 复合射孔器爆燃气体压力计算模型

张 飞<sup>1</sup>, 贾居红<sup>1</sup>, 蔡 薇<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081; 2. 中国兵器工业集团导航与控制研究所, 北京 100089)

**摘要:** 为获得适合工程应用的爆燃气体压力计算方法, 并分析装药燃烧形式以及爆燃气体压力变化过程, 对复合射孔器爆燃气体压力计算模型进行了研究。基于装药燃烧满足几何燃烧定律, 燃气体特性参数均匀分布, 注水区和岩石区在爆燃气体作用下分别发生弹性压缩和塑性压缩等假设, 考虑装药燃烧、射孔扩展过程、注水区运动和压缩过程等因素对爆燃气体压力的影响, 推导出了计算模型微分方程组。算例分析表明: 该模型能正确反映爆燃气体压力的基本特性, 并具有操作性强、能够反映压力变化过程等特点。

**关键词:** 复合射孔; 爆燃气体; 几何燃烧定律; 压力波; 数值计算

**中图分类号:** TJ202 **文献标志码:** A

## Calculation Model for Detonation Gas Pressure in Compound Perforation

Zhang Fei<sup>1</sup>, Jia Juhong<sup>1</sup>, Cai Wei<sup>2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Navigation & Control Research Institute of China North Industries Group Cooperation, Beijing 100089, China)

**Abstract:** In order to acquire detonation gas pressure calculation method for engineering application, analyze charging powder combustion mode and detonation air pressure changing process, research on compound perforation device detonation air pressure calculation model. Based on charging powder detonation satisfying the geometric combustion law, the air character parameters is equally distributed. Influenced by detonation gas, hypothesis such as flexibility compression and plasticity compression exist in water injection area and rock area by detonation gas. Considering influence of charging powder combustion, perforation expansion process, water injection area movement, and compression process on detonation air pressure, deduce calculation model differential equations. The example analysis shows that the model can correctly reflect basic characteristics of air pressure, and have features such as easy operation, and reflection of pressure variation process.

**Keywords:** compound perforation; detonation gas; geometric combustion law; pressure wave; numerical calculation

### 0 引言

复合射孔技术是在特种射孔枪的射孔弹间填充一定量的复合推进剂, 当引爆射孔弹后, 其爆轰产物和高温高速碎片点燃复合推进剂装药, 复合推进剂燃烧产生的高温高压气体随射孔孔道或射孔枪泄压孔作用于油田井下地层, 使射孔孔道周围的地层产生裂缝扩展, 对射孔地层污染实施高能气体压裂, 解堵并改善射孔效率, 从而提高油田采油效率<sup>[1]</sup>。

爆燃气体压力变化规律直接影响射孔扩展、岩层压实以及流道清洗等复合射孔器的工作性能, 是复合射孔器装药设计的重要内容。由于爆燃气体作用过程涉及火药燃烧、注水层的影响以及岩石压裂等复杂过程, 准确地计算和测试爆燃气体压力变化规律存在困难。目前国内外从模拟实验、井下爆燃气体流动、爆燃气体驱动裂缝扩展等角度出发开展了大量研究<sup>[2-5]</sup>, 提出了多种计算分析模型, 但这些模型大都比较复杂, 在设计中应用较为困难; 另一些研究基于试验数据和工程推导给出了较为简捷的

计算模型, 研究了装药类型、装药量以及射孔枪结构等因素对爆燃气体峰值压力的影响<sup>[6-8]</sup>, 但对装药燃烧形式以及爆燃气体压力变化过程介绍不多。

笔者从爆燃气体特性参数在空间分布均匀的零维模型出发, 在一定假设基础上推导了复合射孔器装药爆燃过程的基本方程, 并给出计算示例, 为复合射孔器装药压力分析提供简捷、实用的计算方法。

### 1 模型与假设

在计算模型中忽略爆燃气体流动引起的参数分布, 认为爆燃气体填充空间内物性参数保持一致, 同时忽略聚能射孔形成岩层裂缝的不规则性, 如图 1 所示。

在图 1 中, 设注水区高度为  $H$ , 套管内截面积为  $A$ , 裂缝平均直径为  $d = 2r_0$ , 裂缝平均深度为  $l$ , 裂缝数  $N$  与射孔数相等。为推导模型基本方程, 进行如下假设:

假设 1: 爆燃气体参数在空间上分布均匀, 即

收稿日期: 2016-08-10; 修回日期: 2016-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51306019)

作者简介: 张 飞(1987—), 男, 河南人, 在读硕士, 工程师, 从事燃气射流流体力学研究。

爆燃气体填充区内瞬时压力、密度、温度等相等。

假设 2: 爆燃气体作用在套管整个周向区域, 气体与注水区界面为套管横截面; 不考虑裂缝的详细扩展过程, 只考虑裂缝扩展引起的爆燃气体填充体积变化对气体压力的影响, 因此所有射孔均视为具有等效直径的圆柱孔。

假设 3: 由于注水区高度一般达到几百米甚至上千米, 远大于爆燃气体在套管中的填充高度(约等于井口溢出量), 因此可忽略注水区运动引起的井口溢出, 注水区运动过程中质量不变。

假设 4: 注水区在爆燃气体作用下的压力波沿套管轴向传播, 并引起波后注水区域体积压缩。

假设 5: 爆燃气体作用区域远离地表, 可视为无限均匀介质中波源作用, 爆燃气体作用下的岩层响应主要以纵波形式扩展; 考虑到复合射孔引起的岩石剪切变形并不影响填充体积, 因此采用射孔压实效应对应的岩层塑性压缩表示射孔扩展过程, 将射孔扩展过程视为纵波传递过程中引起的岩层塑性压缩。

假设 6: 装药燃烧满足几何燃速定律。

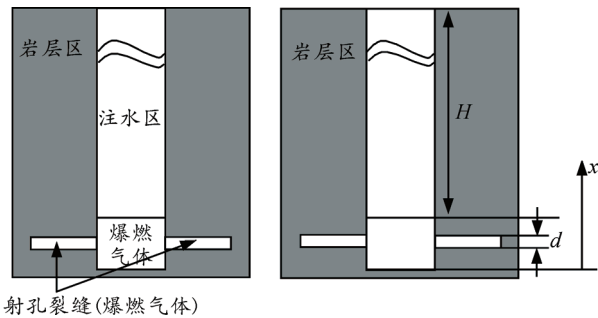


图 1 基本模型

## 2 基本方程

### 2.1 燃气生成率

在火药燃烧满足几何燃速定律的条件下, 燃气生成率主要与火药密度、燃烧表面积和燃烧速度有关<sup>[9]</sup>, 即

$$\frac{dm_{\text{power}}}{dt} = \rho_{\text{power}} \cdot S \cdot u \quad e > 0 \quad (1)$$

其中:  $m_{\text{power}}$  为已燃火药质量;  $\rho_{\text{power}}$  为火药密度;  $S$  为当前燃面面积;  $u$  为火药燃烧线速度;  $e$  为剩余火药肉厚。火药燃速主要与火药成份、密度、初温以及燃烧室压力等因素有关, 考虑这些因素的影响, 火药燃烧线速度可表示<sup>[9]</sup>为:

$$u = (a_0 + a_1 p^n)(1 + \delta \Delta T) \quad (2)$$

式中:  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $n$  和  $\delta$  是与火药性质相关的常数;  $p$  为压力;  $\Delta T$  为点火初温与参考温度的差值。

### 2.2 状态方程

装药燃烧后, 爆燃气体分子所占的比例较大, 分子间的斥力不可忽视, 所以爆燃气体不再遵从理想气体的状态方程, 而是范德瓦尔状态方程, 但由于火药燃烧时温度很高, 分子之间引力作用不明显, 参照内弹道学<sup>[9]</sup>, 采用如下所示的状态方程:

$$p(V - \alpha) = RT \quad (3)$$

其中:  $p$  为爆燃气体填充区压力;  $V$  为爆燃气体填充体积;  $\alpha$  为余容;  $R$  为气体常数;  $T$  为爆燃气体温度。在大多数情况下, 可假设火药燃烧过程是绝热的, 同时在燃烧过程中爆燃气体温度变化不大, 可视为常值。引入热损失修正系数  $\gamma$ , 计算模型中爆燃气体温度可表示<sup>[9]</sup>为:

$$T = \gamma T_0 \quad (4)$$

其中  $T_0$  为装药的定压爆温。在多数情况下,  $\gamma$  可认为是常数, 一般为 0.9~0.95。

### 2.3 质量守恒方程

由质量守恒定律, 在爆燃填充区火药燃去质量等于生成爆燃气体质量, 考虑单位时间的燃气生成量, 式(1)进一步可作如下推导:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dm_{\text{power}}}{dt} = \rho_{\text{power}} \cdot S \cdot u \quad (5)$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V - m_0)}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{dV}{dt} \quad (6)$$

$$V = V_1 + NV_2 + V_3 = A(x_0 + X_f + Z_f) + NV_2 + \frac{m_{\text{power}}}{\rho_{\text{power}}} \quad (7)$$

式中:  $m$  为爆燃气体质量;  $m_0$  为爆燃气体填充区内由聚能射孔过程产生的气体质量;  $V$  为爆燃气体填充区体积;  $V_1 = A(x_0 + X_f + Z_f)$  为套管填充区体积;  $V_2$  为单个射孔填充区体积;  $X_f$  为假设注水区不可压缩时的运动距离;  $Z_f$  为注水区在压力波作用

下的压缩长度;  $V_3 = \frac{m_{\text{power}}}{\rho_{\text{power}}}$  为已燃装药体积。

### 2.4 爆燃气体填充体积变化

#### 2.4.1 注水区运动

以注水区为考察对象, 其所受的作用力包括爆

燃气体压力、大气压力和重力，依据牛顿运动定律，可以得到如下方程：

$$M \frac{d^2 X_f}{dt^2} = pA - Mg - p_{out} A. \quad (8)$$

式中  $M = \rho_{water} AH$  为注水区质量。

### 2.4.2 注水区压缩

由于注水区运动速度相对压力波传递速度为小量，且注水区高度对当地水密度影响很小，可认为在整个注水区内压力波运动速度为定值<sup>[3]</sup>，表示为

$$c = \sqrt{\frac{E_{water}}{\rho_{water}}} = \sqrt{\frac{1}{\beta \rho_{water}}}. \quad (9)$$

式中： $E_{water}$  为水的体积弹性模量； $\beta$  为水的体积压缩系数。考察如图 2 所示注水区压力波微小区域内的体积压缩情况，压力波传递到该位置的时间为  $\tau$ ，传播距离为  $h = c\tau$ ，压力波峰值在套管中传递满足指数衰减规律<sup>[10]</sup>，则微小区域内压力扰动  $\Delta p_h$  如图 2 所示。注意表达式中： $p(t - \tau)$  表示爆燃气体在  $t - \tau$  时刻压力； $p_0$  为初始时刻压力； $\kappa$  为指数衰减系数，可依据实验测定或经验选取。注水区微段压缩长度可表示<sup>[4]</sup>为：

$$dZ_f = \beta \Delta P_h dh, \quad (10)$$

因此整个注水区压缩长度可表示为

$$Z_f = \begin{cases} \int_0^t \beta [p(t - \tau) - p_0] c e^{-\kappa c \tau} d\tau & t \leq \frac{H}{c} \\ \int_{t-\frac{H}{c}}^t \beta [p(t - \tau) - p_0] c e^{-\kappa c \tau} d\tau & t > \frac{H}{c} \end{cases}. \quad (11)$$

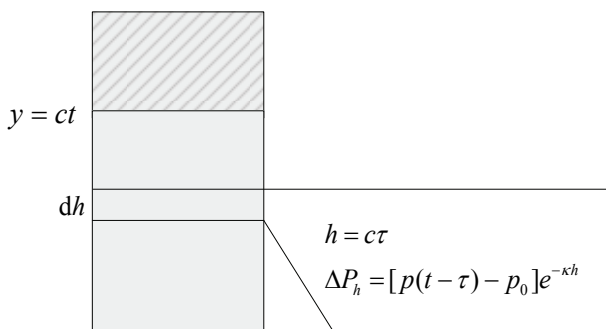


图 2 注水区压缩示意

### 2.4.3 射孔扩展

忽略井下岩层区复杂结构，并近似为无限均匀理想弹性介质，在这种情况下爆燃气体作用在岩层上形成的纵波传播速度可用下式<sup>[4]</sup>表示：

$$C = \sqrt{\frac{E_{rock}(1 - \mu_{rock})}{(1 + \mu_{rock})(1 - 2\mu_{rock})\rho_{rock}}}. \quad (12)$$

其中  $E_{rock}$ 、 $\mu_{rock}$ 、 $\rho_{rock}$  分别为岩石弹性模量、泊松比和密度。考察如图 3 所示射孔周围纵波传递。依据岩层对纵波传递的衰减规律<sup>[11]</sup>，考虑纵波传播到微小区域的时间  $\tau$ ，即  $r_p = C\tau$ ，可获得在微小区域上压力扰动为：

$$\Delta p_{r_p} = [p(t - \tau) - p_0] \left( \frac{C\tau}{r_0} \right)^{-\xi}. \quad (13)$$

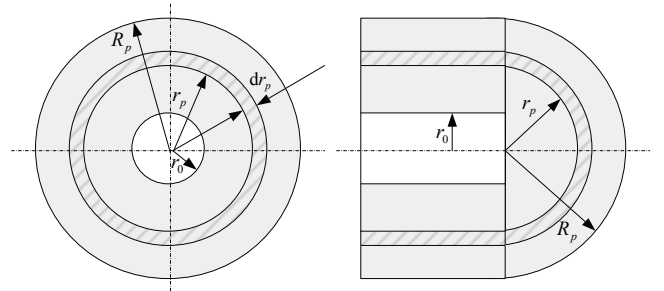


图 3 岩石区纵波传播

式中， $\xi$  为纵波在岩层中的衰减系数，可依据实验测定或经验选取； $p(t - \tau)$  表示爆燃气体在  $t - \tau$  时刻的压力。为便于处理，将岩层压实表示为弹性体的不可恢复压缩，即当压缩波作用时，岩层受到压缩，当膨胀波作用时，岩层压缩量保持不变。利用体积压缩公式，单个射孔体积可表示为：

$$V_2 = \frac{\pi d^2 l}{4} + \int_0^{R_p} 2\pi r_p (l + r_p) G_{rock} \Delta p_{r_p}^+ dr_p = \frac{\pi d^2 l}{4} + \int_0^t 2\pi (l C^{2-\xi} \tau^{1-\xi} + C^{3-\xi} \tau^{2-\xi}) G \Delta p^+(t - \tau) r_0^2 d\tau. \quad (14)$$

其中： $\Delta p^+ = \begin{cases} \Delta p & \Delta p > 0 \\ 0 & \Delta p \leq 0 \end{cases}$ ； $\Delta p(t - \tau) = p(t - \tau) - p_0$ ；

$G$  为岩石体积压缩模量。

## 3 计算方法与算例分析

### 3.1 计算方法

由于注水区压缩长度和岩层压实体积计算式是一个含未知量的卷积计算，给求解计算带来一定困难，需要在数值计算上进行相应处理，以数值积分和数值微分形式获得相应变量的数值解。

考察函数  $f(x)$  和  $g(x)$  的卷积  $z(t) = \int_0^t f(t - x)g(x)dx$ ，其数值积分和数值微分可表示<sup>[12]</sup>为：

$$Z(N\Delta t) = \sum_{n=1}^N f((N - n)\Delta t)g(n\Delta t)\Delta t; \quad (15)$$

$$\frac{dZ}{dt} \Big|_{t=N\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Z(N\Delta t) - Z((N-1)\Delta t)}{\Delta t} \approx \frac{Z(N\Delta t) - Z((N-1)\Delta t)}{\Delta t} \quad (16)$$

将上式代入关于注水区长度和岩层压缩的微分式，将前面建立各微分方程联立构成一阶微分方程组，在给定初值后，即可求解微分方程组。

### 3.2 算例分析

笔者基于以上理论公式，利用四阶龙格-库塔 (Runge-Kutta) 方法<sup>[12]</sup>，编写了 Fortran 语言计算程序，结合复合射孔器井下工作状态进行模拟计算，计算结果在 Origin 软件中进行了后处理。

输入参数如下：注水区高度为 1 000 m；装药长度为 1 m；射孔数为 16；参考文献[5]，选取注水区压力波峰值指数衰减系数为 0.003 8；岩层纵波峰值衰减系数为 2.8。

在计算模型中，考虑射孔过程引起的装药破碎，采用具有减面燃烧特性的多个立方体装药模拟破碎燃烧时的燃面变化。求解模型方程获得爆燃气体压力和爆燃气体填充体积随时间的变化曲线如图 4 和图 5 所示。从图中可以看出：由于装药燃烧初期，注水区和岩层区内能够填充爆燃气体的空间很小，同时装药本身属于减面燃烧，初始燃面大；因此压力上升迅速，最大压力约为 65 MPa。爆燃气体压力增加引起填充区体积变化，包括注水区运动体积 (V\_WM)、注水区压缩体积 (V\_WC) 以及岩层压缩体积 (射孔等效扩展体积 V\_RC)。在装药燃烧初期，注水区由于惯性作用来不及运动，爆燃气体填充区的体积变化主要来源于注水区在压力波作用下的体积压缩。在装药燃烧后期或装药燃尽后，注水区在压力作用下运动，成为影响爆燃气体填充区体积变化的主要因素。而岩层压缩空间很小，对爆燃气体填充区的影响可忽略。

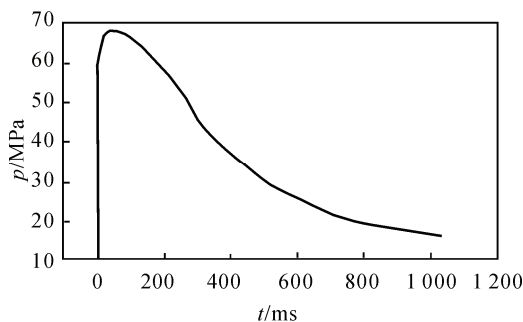


图 4 爆燃气体压力变化曲线

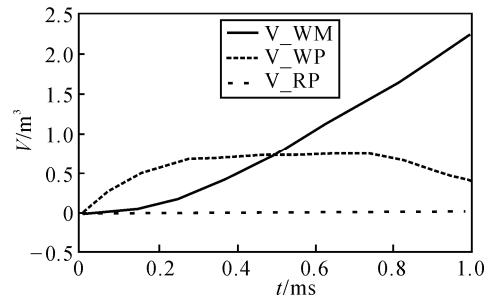


图 5 爆燃气体体积变化曲线

### 4 结论

1) 燃气生成率和爆燃气体填充体积变化是影响爆燃气体压力的主要因素。通过忽略其他次要因素，能够获得较为简捷的爆燃气体压力计算模型。模型计算所需的装药特性、岩层和注水区特性能够较为容易地从工程实践和经验中获得；因此，该模型具有较强的可操作性。

2) 利用卷积计算压力波 (或纵波) 传递过程中对介质的压缩程度，能够较为准确地反映装药燃烧初期的压力变化情况。

3) 岩层压缩在装药燃烧过程中对爆燃气体填充体积影响较小，在计算时可忽略。

### 参考文献：

- [1] 赵开良, 罗仁杰, 于敬文. 复合射孔技术及其应用[J]. 断块油气田, 2000, 7(2): 62-65.
- [2] 成建龙, 周志华, 乔晓光. 复合射孔器动态压力测试方法研究[J]. 测井技术, 2005, 29(2): 55-58.
- [3] 赵旭, 柳贡慧, 张涛. 不同体积高压气体对复合射孔压井液运动的影响[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 295-299.
- [4] 陈莉静. 油井岩层复合射孔爆燃气体压裂机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006: 10-25.
- [5] R. H. Nilson. Gas-driven fracture propagation. Journal of Applied Mechanics[J]. 1981, 48(12): 757-762.
- [6] 赵莉, 赵开良, 申梅英, 等. 不同类型复合射孔器火药燃烧特征研究[J]. 测井技术, 2006, 30(1): 44-46.
- [7] 李文魁, 吴宏利, 赵蔚. 高能气体压裂最佳装药量与峰压设计计算[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(3): 91-94.
- [8] 成建龙, 孙宪宏, 乔晓光, 等. 复合射孔枪泄压孔及装药量对环空动态压力的影响研究[J]. 测井技术, 2007, 31(1): 50-55.
- [9] 谭大成. 弹射内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 103-125.
- [10] 于洋, 任锋. 封隔器在复合射孔中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(3): 423-426.
- [11] 朱小明, 宋宏伟, 刘辉. 岩石中爆炸应力波衰减规律[J]. 山西建筑, 2007, 33(31): 112-113.
- [12] 丁丽娟, 程杞元. 数值计算方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 265-300.