

# 内装药管运动特性的理论计算

王伟力

陈生玉

(西安西北核技术研究所, 西安 710024)(西安二炮工程学院, 西安 710025)

**摘要** 在圆管与圆管的爆炸复合研究中, 需要对管的动态参数做定量的估计。本文从工程应用角度出发, 将管看成由一系列微圆环组成, 给出微圆环在爆炸作用下的运动规律, 用准一维流模型给出管中爆轰产物流动方程, 并考虑管材强度及管间空气阻力影响, 建立了内装药管动态参数理论计算方法。用这种方法对几种材料进行了计算, 其结果与实测结果符合良好。本文建立的方法对工程上的实际应用有参考价值。

**关键词** 爆炸复合 爆炸焊接窗口 炸药爆轰。

## 1 前言

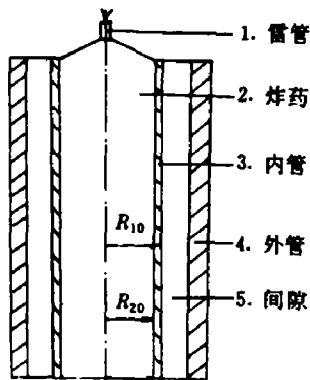


图1 爆炸复合装置图

Fig. 1 The installation scheme of explosion welding

1. Detonator; 2. Explosive charge;
3. Internal tube; 4. External tube;
5. Interval

不同金属管材进行爆炸焊接时, 常常内管装填炸药, 如图1所示, 其内管在炸药爆轰产物的作用下向外高速扩散, 并与管外以一定的碰撞角、碰撞速度相碰撞, 来实现爆炸焊接。要实现良好的焊接, 这些焊接参数必须满足“爆炸焊接窗口”。对不同装药、不同管材、不同内外管间隙、以及不同管壁厚度来说, 其碰撞角和碰撞速度不同。按目前的测试技术, 测定爆炸焊接参数并不困难, 还可用复杂的二维计算方法, 寻求理论计算结果。但是, 要寻得合适的焊接参数必须进行相当数量的测试或二维计算工作, 这样做费时费力, 很不经济。对实际的工程应用来说, 未必有很大价值。

本文从工程应用角度出发, 建立了一种简单计算模型和方法, 并对铁、铜、铝管材进行了计算, 计算结果与实测结果符合良好, 这表明该方法准确可靠。

## 2 基本假设与守恒方程

工程上常见的管与管爆炸复合, 其内管管壁很薄, 通常小于2mm, 管的径向尺寸满足  $(R_{10} - R_{20}) \ll R_{20}$  (参见图1), 在这种情况下, 我们假定管为薄壁管, 管材为不可压缩介质, 不计及冲击波在管壁内多次反射效应, 并假定管材在爆炸高压作用下立即进入塑性状态, 且满足刚塑性材料薄膜应力关系<sup>[1]</sup>

$$\sigma_R - \sigma_\theta = -\sigma_y \quad (1)$$

式中:  $\sigma_R$  为径向应力,  $\sigma_\theta$  为周向应力,  $\sigma_y$  为屈服极限。

大量实验发现,圆管爆炸复合前后,其管的长度几乎没有什么变化。基于这种事实,作为轴对称问题的一个近似,可以把内管看作由一系列微圆环组成,每个微圆环在爆轰波及其产物作用下,仅作轴对称的径向扩张,而对径向扩张的微圆环,可建立如下方程

$$RdR = R_0dR_0 \quad (2)$$

$$\rho_{T0} \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_R}{\partial R} + \frac{\sigma_R - \sigma_\theta}{R} \quad (3)$$

式中:  $R_0$  为 Lagrange 坐标,  $\rho_{T0}$  为管材密度。其中  $R$ 、 $\sigma_R$  和  $\sigma_\theta$  都是  $R_0$  和  $t$  的函数。利用(2)式可将(3)式写成

$$\rho_{T0} \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \frac{\partial R}{\partial R_0} = \frac{\partial \sigma_R}{\partial R_0} + \frac{\sigma_R - \sigma_\theta}{R} \frac{\partial R}{\partial R_0} \quad (4)$$

积分(2)式得

$$R^2 = R_0^2 + f(t) \quad (5)$$

其中  $f(t)$  为时间  $t$  的任意函数,由(5)式得

$$\frac{\partial R}{\partial R_0} = \frac{R_0}{[R_0^2 + f(t)]^{1/2}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial t^2} = \frac{1}{2} \frac{f''(t)[R_0^2 + f(t)] - \frac{1}{2}[f'(t)]^2}{[R_0^2 + f(t)]^{3/2}} \quad (7)$$

将(1)、(5)、(6)和(7)式代入(4)式,再对  $R_0$  积分得

$$f''(t) \times \frac{1}{4} \ln \frac{R_{10}^2 + f}{R_{20}^2 + f} - [f'(t)]^2 \times \frac{1}{8} \frac{R_{10}^2 - R_{20}^2}{[R_{20}^2 + f(t)][R_{10}^2 + f(t)]} + \frac{1}{\rho_{T0}} (p_{out} + p_r - p_{in}) = 0 \quad (8)$$

积分时已考虑了边界条件

$$\sigma_R|_{R_0=R_1} = -p_{out}, \quad \sigma_R|_{R_0=R_2} = -p_{in}$$

这里  $p_{out}$  和  $p_{in}$  分别表示管外和管内压强。(8)式中

$$p_r = \frac{\sigma_y}{2} \ln \frac{R_{10}^2 + f}{R_{20}^2 + f}$$

由(5)式得

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1^2 = R_{10}^2 + f(t) \\ R_2^2 = R_{20}^2 + f(t) \\ R_1^2 - R_2^2 = R_{10}^2 - R_{20}^2 \\ f'(t) = \frac{d}{dt}(R_1^2) \\ f''(t) = \frac{d^2}{dt^2}(R_1^2) \end{array} \right. \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式得

$$2 \ln \frac{R_1^2}{R_1^2 - (R_{10}^2 - R_{20}^2)} \frac{d^2}{dt^2}(R_1^2) - \frac{R_{10}^2 - R_{20}^2}{R_1^2 [R_1^2 - (R_{10}^2 - R_{20}^2)]} \left[ \frac{d}{dt}(R_1^2) \right]^2 + \frac{8}{\rho r_0} (p_{out} + p_r - p_{in}) = 0 \quad (10)$$

其中:

$$p_r = \sigma_r \ln \frac{R_1}{[R_1^2 - (R_{10}^2 - R_{20}^2)]^{1/2}} \quad (11)$$

初始条件为

$$\begin{cases} R_1|_{t=0} = R_{10} \\ \frac{dR_1}{dt}|_{t=0} = v_0 \end{cases} \quad (12)$$

应用 Runge-Kutta 法可求解方程(10),得到内管运动规律。

### 3 边界条件及初始条件

#### 3.1 内边界压强 $p_{in}$

假定炸药起爆后为稳定的平面爆轰,并且爆轰产物满足方程

$$p = B\rho^k \quad (13)$$

其中: $B, k$ 为常数<sup>[2]</sup>。

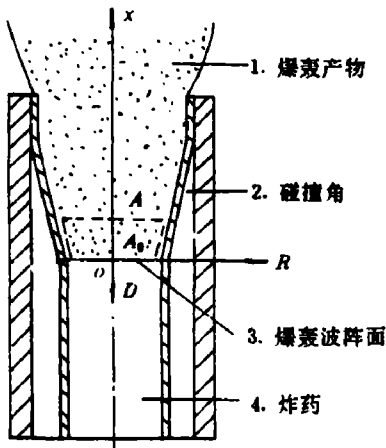


图 2 爆炸复合示意图

Fig. 2 The sketch of explosion welding

1. Detonation product;
2. Colliding angle;
3. Detonation wave front;
4. Explosive charge

管内爆轰产物的流动,严格地说,是一个二维流动。为了简单起见,把它看成准一维变截面管流<sup>[3]</sup>, 随爆轰波阵面运动的坐标系  $zOR$ , 爆轰产物为定常等熵流,如图 2 所示,其流动方程为

$$\rho u A = \rho_{20} u_0 A_0 = C_1 \quad (14)$$

$$\rho u du + dp = 0 \quad (15)$$

$$dp = c^2 d\rho \quad (16)$$

其中: $A_0$ 和  $A$ 分别为图 2 所示的控制面面积, $\rho_{20}$ 和  $u_0$ 为  $A_0$ 处的爆轰产物密度和速度。 $\rho, u, p$ 和  $c$ 分别为  $A$ 处爆轰产物的密度、速度、压强和声速, $C_1$ 为常数。

将(13)式和(16)式代入(15)式,然后积分得

$$u^2 = \frac{2}{k-1} c^2 = u_0^2 = \frac{2}{k-1} c_0^2 = C_2 \quad (17)$$

式中: $C_2$ 为常数, $c_0$ 为  $A_0$ 处爆轰产物初始声速。

$$\text{由(13)式得} \quad c^2 = Bk\rho^{k-1} \quad (18)$$

$$\text{由(14)式得} \quad \rho = \frac{C_1}{uA} \quad (19)$$

将(18)式和(19)式代入(17)式得

$$u^{k+1} A^{k-1} - C_2 u^{k-1} A^{k-1} + \frac{2Bk}{k-1} C_1^{k-1} = 0 \quad (20)$$

且有

$$\begin{cases} A = \pi R_2^2 \\ A_0 = \pi R_0^2 \end{cases} \quad (21)$$

从(14)式和(17)式不难看出,常量  $C_1$  和  $C_2$  可由图 2 所示的坐标系中  $A_0$  面处的  $u_0$ 、 $\rho_{E0}$  和  $c_0$  求得。确定了  $C_1$  和  $C_2$  后,可由(13)式和(18)~(21)式求得  $A$  面处的爆轰产物参量  $p, c, \rho$  和  $u$ , 这里求得的  $p$  就是  $p_m$ 。

### 3.2 外边界压强 $p_{out}$

若不考虑内外管之间的空气影响,可取  $p_{out} = 0$ ,若考虑管间空气的影响,用轴对称特征线法可计算  $p_{out}$ 。为了简单起见,这里考虑到通常管的外径  $R_{10}$  比管间距大得多,故近似用一维特征线法<sup>[3]</sup>计算,则

$$\begin{cases} \frac{c_a}{c_{a0}} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \frac{v}{c_{a0}} \\ \frac{p_a}{p_{a0}} = \left( \frac{c_a}{c_{a0}} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \end{cases} \quad (22)$$

其中: $c_{a0}$  和  $p_{a0}$  为常态下空气的声速与压强, $c_a$  为空气的声速, $p_a$  为所要求的管外压强  $p_{out}$ ,  $v$  为管外壁面的扩张速度。即

$$v = \frac{dR_1}{dt}$$

### 3.3 管外壁面初速 $v_0$ 的确定

炸药爆炸后,在管壁内应产生冲击波,而在薄壁管假设下,不考虑波在管内的作用过程,认为冲击波作用下管内外壁瞬态获得初速。这样,初速作为计算的初始条件,按冲击波守恒关系式,管内壁面初速  $v_r$  与压强  $p_r$  有关系式

$$p_r = \frac{\rho_{r0} \rho_r}{\rho_r - \rho_{r0}} v_r^2 \quad (23)$$

取管材状态方程为 Murnagham 形式<sup>[4]</sup>

$$p_r = B' \left[ \left( \frac{\rho_r}{\rho_{r0}} \right)^n - 1 \right] \quad (24)$$

其中: $\rho_r$  和  $\rho_{r0}$  为材料的密度和初始密度, $B'$  和  $n$  为与材料相关的常数。

由于平面爆轰波为垂直于壁面的滑移爆轰波,爆轰波与壁的作用,将在爆轰产物中产生入射稀疏波,稀疏波后产物的径向速度  $v_E$  和压强  $p_E$  由下式给出,即

$$v_E = \frac{2k}{k^2 - 1} \left\{ 1 - \left[ \frac{(k+1)p_E}{\rho_{E00} D^2} \right]^{\frac{k-1}{2k}} \right\} D \quad (25)$$

式中  $\rho_{E00}$  为炸药初始密度, $D$  为爆速。

依据界面匹配条件:

$$v_E = v_r, \quad p_E = p_r \quad (26)$$

由(23)~(26)式可得:

$$\begin{aligned} v_r = D & \left[ \frac{\rho_{E00}}{(k+1)\rho_{r0}} \right]^{\frac{1}{2}} \left( 1 - \frac{k^2 - 1}{2k} \frac{v_r}{D} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ & \times \left\{ 1 - \left[ 1 + \frac{\rho_{E00} D^2 \left( 1 - \frac{k^2 - 1}{2k} \frac{v_r}{D} \right)^{\frac{2k}{k-1}}}{(k+1)B'} \right]^{-\frac{1}{n}} \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (27)$$

求解此式可得管内壁面初速  $v_T$ 。

由(9)式不难求得管内外壁面初速度关系

$$v_0 = \frac{2R_{20}}{R_{10}}v_T \quad (28)$$

式中系数 2 为自由面反射的增值系数。

考虑管的径向初始速度后,管内爆轰产物初始状态由 C-J 态变为如下方程描述状态

$$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = \frac{\rho_{E00}D^2}{k+1} \left[ 1 - \frac{k^2-1}{2k} \cdot \frac{v_T}{D} \right]^{\frac{2k}{k-1}} \\ c_0 = \frac{kD}{k+1} - \frac{k-1}{2}v_T \\ \rho_{E0} = \frac{k+1}{k} \rho_{E00} \left[ \frac{(k+1)p_0}{\rho_{E00}D^2} \right]^{\frac{1}{k}} \\ u_0 = \sqrt{\left( \frac{kD}{k+1} \right)^2 + v_T^2} \end{array} \right. \quad (29)$$

由于在与爆轰产物连动的坐标系,波后流动为声速,因此,沿轴向 C-J 态爆轰产物速度取声速  $kD/(k+1)$ ,而不是取  $D/(k+1)$ 。另外,由于爆轰产物气体沿径向获得初速  $v_E = v_T$ ,因此,将两向速度平方和的平方根做为爆轰产物气体初始速度,当然,这仅是处理方法之一。

#### 4 计算结果

为了检验本文所建立模型的正确性,首先对铁进行了计算。其管内装填炸药的成份、密度、爆速、以及管外形尺寸均采用文献[5]所述之值,计算中所用到的其它参量见表 1 和表 2。

表 1 材料参数表

Table 1 Parameters of materials

材料	$\sigma_r$ /GPa	$\rho_{r0}$ /(g/cm <sup>3</sup> )	$n$	$B'$ /GPa
铁	0.8	7.8	4.16	45.0
铜	0.3	8.9	4.92	30.7
铝	0.2	2.7	5.36	14.7

表 2 空气参数表

Table 2 Parameter of air

$\gamma$	$c_{a0}$ /(km/s)	$p_{a0}$ /Pa
1.4	0.34	$9.8 \times 10^4$

计算结果分别以图 3、图 4 和图 5 给出,(计算参数为: $D=7.64$ km/s,  $\rho_0=1.5$ g/cm<sup>3</sup>,  $R_{10}=5.78$ mm,  $R_{20}=4.78$ mm)。图 3 为在爆炸作用下管形扩张曲线,即管形曲线,图中示出了实验测定结果,由图 3 可见,计算结果与实验结果符合得很好。图 4 和图 5 分别给出管内、外径与其扩张速度的关系。

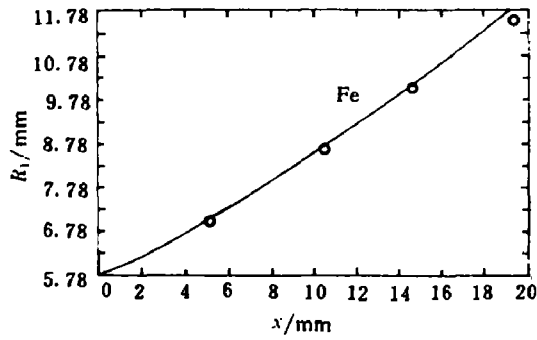


图 3 管形曲线  
Fig. 3 Curve of the tube shape

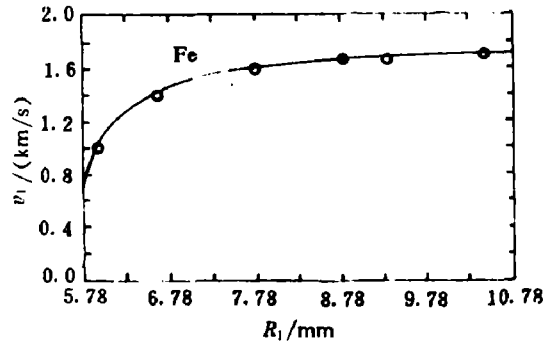


图 4 管外径与其速度变化曲线  
Fig. 4 Curve of the velocity variation  
vs outer radius

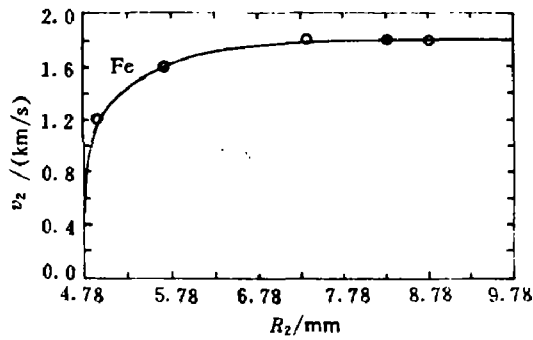


图 5 管内径与其速度变化曲线  
Fig. 5 Curve of the velocity variation  
vs inner radius

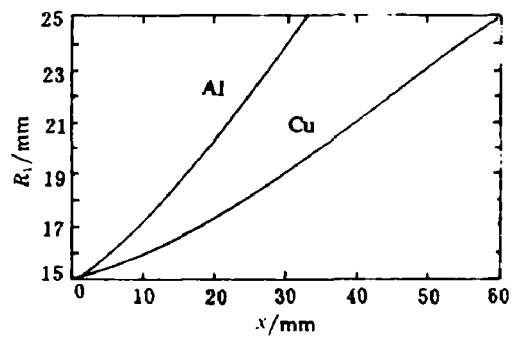


图 6 管形曲线  
Fig. 6 Curve of the tube shape

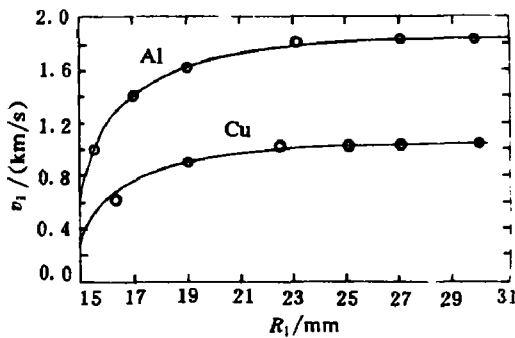


图 7 管外径与其速度变化曲线  
Fig. 7 Curve of the velocity variation  
vs outer radius

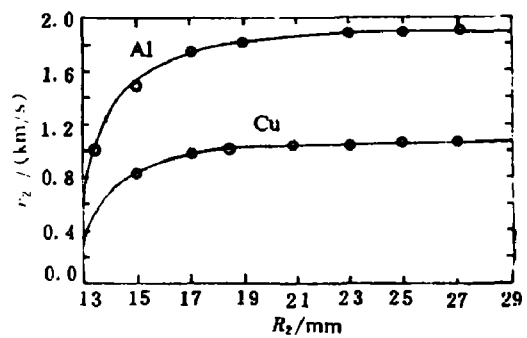


图 8 管内径与其速度变化曲线  
Fig. 8 Curve of the velocity variation  
vs inner radius

图 6、图 7 和图 8 (计算参数为:  $D=5\text{km/s}$ ,  $\rho_{\text{Fe0}}=1\text{g/cm}^3$ ,  $R_{10}=15\text{mm}$ ,  $R_{20}=13\text{mm}$ )。给

出在相同装药条件下,铝管和铜管的计算结果,所用炸药参数值如图 6~8 中所示。

本文所建立的模型,能比较容易地计算出管与管之间的爆炸复合参数,为了得到最佳焊接,可通过选择装药爆速、管壁厚度和间隙得到。应该指出,当管扩张到一定程度时,可能会发生破裂,此时,上述计算模型不再适用,但实际爆炸复合情况,内管不可能扩张到这种程度。

### 参 考 文 献

- 1 布罗贝格 К В 著;尹详瑞译. 弹性及弹塑性介质中的冲击波. 北京:科学出版社,1965. 67~75
- 2 德列明 А Н,特罗菲莫夫 В С,等著;沈金华,马耀贤等译,凝聚介质中的爆轰波,北京:原子能出版社,1986. 117~118
- 3 Philip A Thompson. Compressible-Fluid Dynamics. New York: McGRAW-Hill Book Company, 1972. 374~402
- 4 经福谦,等. 实验物态方程导引. 北京:科学出版社,1986. 7~8
- 5 Сансарян И С. Ф Г В. 1974,7(4),600~608

## THEORETICAL COMPUTATION FOR MOVING CHARACTERISTICS OF AN INNER TUBE WITH EXPLOSIVE

Wang Weili

(North-west Institute of Nuclear Technology, Xian, 710024)

Chen Sengyu

(The Second Artillery Engineering College, Xian, 710025)

**ABSTRACT** In the research of explosive welding between tubes, it is necessary to evaluate quantitatively the parameters of the moving tube. For engineering, we consider the tube as consisting of a series of elemental rings in this paper, and give the moving law of the elements under the condition of detonation. We describe the equation of detonation product with the model of quasi-one-dimensional flow, considering the strength of the tube and air resistance, and establish the method of calculation about parameters of the moving tube. Three sorts of materials are used in calculation. The results are compared well with the experimental data.

**KEY WORDS** explosive welding, detonation of explosive, explosive welding-ability window