

金属圆管在炸药滑移爆轰作用下的运动姿态

赵国民 张若棋[✓] 王诚洪

(国防科学技术大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 采用二维 Lagrange 数值模拟方法, 计算在管内装填岩石硝铵炸药滑移爆轰作用下, 20# 无缝钢管的运动过程, 计算结果与用斜电阻丝法测量得到的结果基本相符。

关键词 数值模拟 爆炸焊接

中图分类号 O382.3

爆轰 金属管

1 引言

对任何爆炸焊接工作来说, 要想得到良好的焊接质量, 必须严格控制动态焊接参数飞板与基板的碰撞角 β 和碰撞速度 v_0 。因此, 在金属管(飞板)-管板(基板)的爆炸焊接中, 探求金属管在炸药滑移爆轰作用下的运动姿态是十分重要的, 然而这是一个十分复杂的问题, 国内外许多学者都对它进行过研究^[1], 得到了一些近似的计算公式。例如, 1943年, R. W. Gurney 在考虑弹壳爆炸时建立了一维膨胀模型, 得到了一个近似的计算公式。1976年 Richter 提出了二维近似模型, 给出了一个简便的工程计算公式。1985年, 邵丙璜提出了滑移爆轰作用下复板运动的一个二维近似解^[2]。这些近似的计算公式已被许多爆炸焊接工作者采用。

我们采用二维 Lagrange 数值模拟方法, 使用我们独立编制的二维计算程序, 计算了金属圆管在炸药滑移爆轰作用下运动过程, 在程序设计时采用 Wilkins 提出的差分格式^[3]。考虑到炸药爆炸后, 爆轰产物的向外飞散速度远大于金属管的运动速度, 为了较好地模拟炸药的滑移爆轰过程, 在炸药和金属管的交界面处设置了滑移线。在我们的计算模型中, 主介质(金属)位于从介质(炸药)之上, 在两者的界面处设置的是正置滑移线^[3]。通过计算金属圆管在炸药滑移爆轰作用下的运动过程, 不仅可以得到动态焊接参数, 还可以对整个流场有更细致的了解, 这对于实验装置的设计有一定的指导作用。

2 金属圆管动态焊接参数的实验测量简介^[4]

实验装置如图1。实验中用的金属管为20# 无缝钢管, 内径4.6cm, 外径5.2cm。金属管内装有岩石硝铵炸药, 装药密度为0.99g/cm³, 实验测得爆速为0.33cm/ μ s。当炸药爆炸后, 爆轰产物形成高压脉冲载荷, 直接作用在金属管上, 金属管被加速。在很短时间内, 金属管可达到每秒几百米的速度, 并以碰撞速度 v_0 和碰撞角 β 由左向右运动。

用斜电阻丝法测量动态焊接参数,需对电阻丝供给恒定电流。金属管在运动过程中,首先与斜电阻丝的上升分支 12 接触,然后再与下降分支 23 接触。随着这种过程的发展,电阻丝与金属管接触的部分越来越多,剩余电阻越来越小。由于流经电阻丝的电流是恒定的,因此电阻丝上的电压值也相应下降。电阻丝上的电压由示波器记录。

在斜电阻丝的上升分支,金属管与电阻丝的闭合速度 v_1 为

$$v_1 = \frac{v_p}{\sin(\beta - \eta)} \quad (1)$$

在下降分支,金属管与电阻丝的闭合速度 v_2 为

$$v_2 = \frac{v_p}{\sin(\beta + \eta)} \quad (2)$$

显然 $v_1 > v_2$, 这样示波器记录下来的信号由斜率截然不同的两部分组成。如在上升分支和下降分支金属管与电阻丝碰撞持续时间分别为 t_1 和 t_2 , 则

$$\beta = \text{tg}^{-1} \left[\frac{h(t_1 + t_2)}{a(t_1 - t_2)} \right] \quad (3)$$

$$v_p = \frac{2ah}{[h^2(t_1 + t_2)^2 + a^2(t_2 - t_1)^2]^{1/2}} \quad (4)$$

若 $h/a \ll 1$, 则(4)式可简化为

$$v_p = \frac{2h}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

图 2 是斜电阻丝法测量动态焊接参数的典型示波器记录信号。图中横坐标为时间: $5\mu\text{s}/\text{格}$; 纵坐标为电压: $0.1\text{V}/\text{格}$ 。由此, 实验换算得到的参数为 $\beta = 8.89 \pm 0.18^\circ$; $v_p = 0.054 \pm 0.003\text{cm}/\mu\text{s}$ 。

3 爆轰波的数值模拟^[5]

我们利用 CJ 模型建立爆轰波的数值模拟方法。CJ 模型假定爆轰波是一个包含化学反应的强间断面, 化学反应在一个极薄的区域内完成, 反应区的厚度可以忽略不计。爆轰波的波前、波后满足质量、动量及能量守恒关系, 其质量和动量守恒关系式与冲击波波面上的质量、动量守恒关系式相同, 能量守恒关系式比冲击波波面前后的能量守恒关系式多了一项单位质量炸药爆炸时所释放的化学能 Q 。如爆轰产物的物态方程取

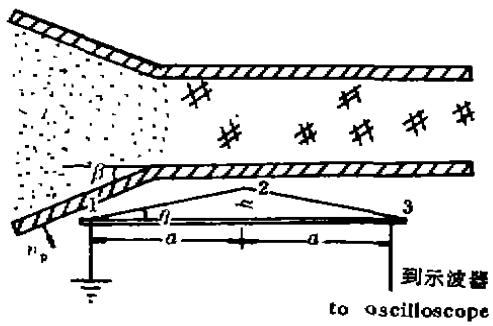


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Scheme of experimental set-up

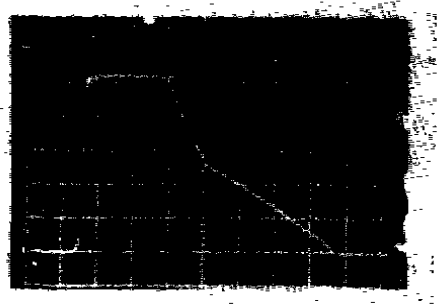


图 2 典型波形图
Fig. 2 Typical oscillogram

$$p = (k - 1)\rho e \quad (6)$$

其中: k 为绝热指数, p 、 ρ 、 e 分别表示压力、密度和比内能, 则

$$Q = \frac{D_0^2}{2(k^2 - 1)} \quad (7)$$

这里 D_0 为 C J 爆轰波速度。

在爆轰波前的炸药初始能量中加入化学能 Q , 则爆轰波波面和冲击波波面上的能量守恒关系式就完全一致。爆轰过程可类似于冲击波的传播过程一样用间断解光滑化的方法来处理, 并用统一的差分格式计算。在爆轰数值计算时, 要设法形成一个过渡区, 在过渡区中的物质被看成是某种不完全的爆轰产物。为将未反应炸药、过渡区及爆轰产物三个区域中的状态连结起来, 引入起爆函数 F , 并将三个区域内物质的物态方程统一表示为

$$p = (k - 1)\rho e F \quad (8)$$

起爆函数 F 的表达形式为

$$F = [\max(F_1, F_2)]^{n_2} \quad (9)$$

其中 n_2 是可调参数。 F_1 为

$$F_1 = \begin{cases} 0, & \text{未反应炸药} \\ \frac{v_0 - v}{v_0 - v_1}, & \text{过渡区} \\ 1, & \text{爆轰产物} \end{cases} \quad (10)$$

这里 $v_0 = v_0 k / (k + 1)$ 是 C J 比容。在爆轰波波头到达之处, 炸药受压, 比容减小, 炸药释放能量, $F_1 > 0$, 过渡区内压力增大; 当 v 变到 v_1 时, $F_1 = 1$, 炸药反应完毕。 F_2 为

$$F_2 = \begin{cases} 0, & \text{未反应炸药} \\ \frac{D_0(t - t_0)}{n_1 \Delta R}, & \text{过渡区} \\ 1, & \text{爆轰产物} \end{cases} \quad (11)$$

式中 t_0 是爆轰波波头刚到达某计算网格的时间, t 是计算时间, ΔR 是该计算网格在爆轰波传播方向上的长度, n_1 是可调参数。

4 计算结果分析

依照前面所述的爆轰波数值模拟方法, 结合 Wilkins 提出的二维流体——弹塑性流动的差分格式, 用我们独立编制的程序对图 1 所示的实验装置进行了二维数值模拟。下面给出一些计算结果, 并作简要分析。计算时管中炸药的左端面同时起爆点火。

图 3 和图 4 上时间分别为 14.27 μs 和 29.45 μs 时, 爆轰波扰动到达区域的网格图, 图中标有黑点的网格为过渡区网格。图 5 是 14.27 μs 时爆轰产物的流向图。图中的小箭头“ \rightarrow ”表示其起点位置处爆轰产物的速度, 箭头的方向和长短分别代表爆轰产物的飞散方向和飞散速度的大小。在此需要说明的是, 图 5 中画出了所有横坐标小于零的炸药节点处的速度矢量, 而对横坐标大于零的炸药节点, 为避免代表速度的小箭头重迭, 沿 x 方向隔一排节点画一组箭头。

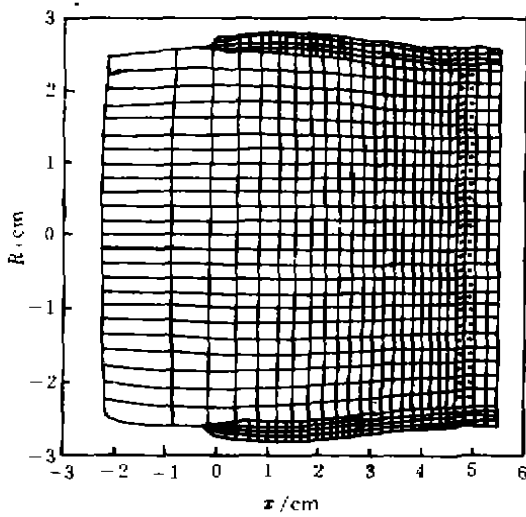


图3 14.27μs时的网格图

Fig. 3 Grid at 14.27μs

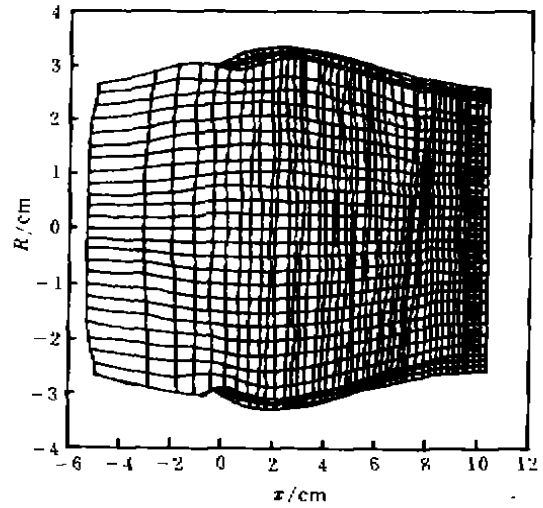


图4 29.45μs时的网格图

Fig. 4 Grid at 29.45μs

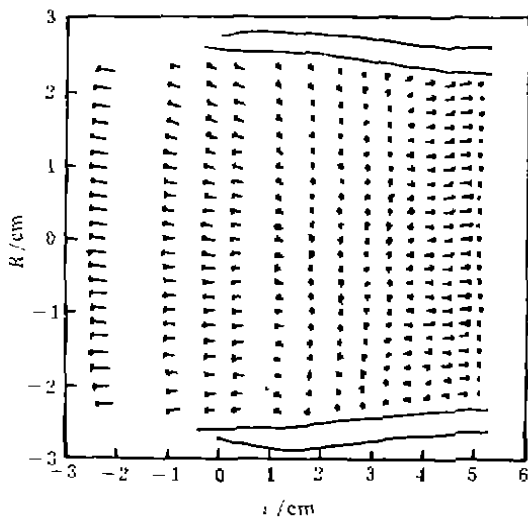


图5 14.27μs时速度流向图

Fig. 5 Velocity at 14.27μs

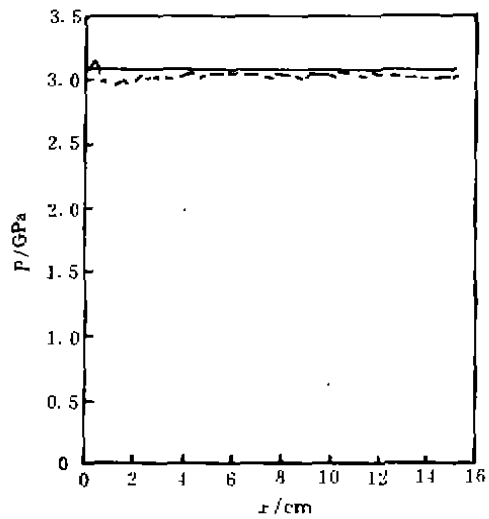


图6 爆压随x的变化

Fig. 6 Detonation pressure vs. x

计算结果反映出当炸药起爆后,爆轰产物与金属管壁之间出现很大滑移,计算出的滑移过程清晰,界面光滑。金属管在管内炸药滑移爆轰作用下膨胀,在起爆端口处,炸药在点火后迅速向外飞散,导致端口的金属膨胀速度低于中间处金属管的膨胀速度。如图3、图4所示。在滑移线的计算处理中,从界面节点要向主界面拟合,对于滑出主界面的从节点,我们采用了如下的处理方法^[6]:对滑出主界面的从节点,按自由面格式计算,一般不再向主界面拟合;但对刚刚滑出主界面的从节点(即与该节点相邻的从节点尚未滑出主界面),仍

需向主界面拟合。由此导致出口处的爆轰产物不能立刻向 R 方向扩散、膨胀。

在对爆轰产物飞散及金属管膨胀有了定性的直观的印象后,再来定量地看一看爆轰波的数值模拟结果。根据 C J 爆轰模型,炸药起爆后向内传播一个稳定的爆轰波,波阵面上的压力为^[7]

$$p_1 = \frac{\rho_0 D_1^2}{\lambda + 1} \quad (12)$$

在数值计算中,炸药内各网格的状态由未反应炸药经过渡区变为爆轰产物,其起爆函数从 0 变到 1。如将某网格的 F 首次达到 1 时的压力记作该网格的爆压,图 6 是金属管中心轴处各网格的爆压沿 x 坐标的变化曲线。图中实线为由(12)式计算出的 p_1 值,虚线为数值模拟结果。由图可见数值模拟结果与 C J 模型的解析解相符,相对偏差约 3%。

在金属管爆炸焊接实验中,在碰撞角不变的假定下,导出了碰撞角及碰撞速度的计算公式(3)和(4)。我们的数值模拟结果表明,在钢管膨胀运动一段时间后,确实有一段钢管外壁的碰撞角几乎不变,并且此碰撞角也基本不随时间改变,如图 7 中半径 R 介于 3.0~3.5cm 之间的一段。若在 $t=46.48\mu s$ 时,对 $R=3.0\sim 3.5\text{cm}$ 之间各节点的碰撞角 β 及碰撞速度 v_p 取平均,可得到 $\beta=9.58^\circ$; $\bar{v}_p=0.566\text{cm}/\mu s$ 这与实测值基本相符。

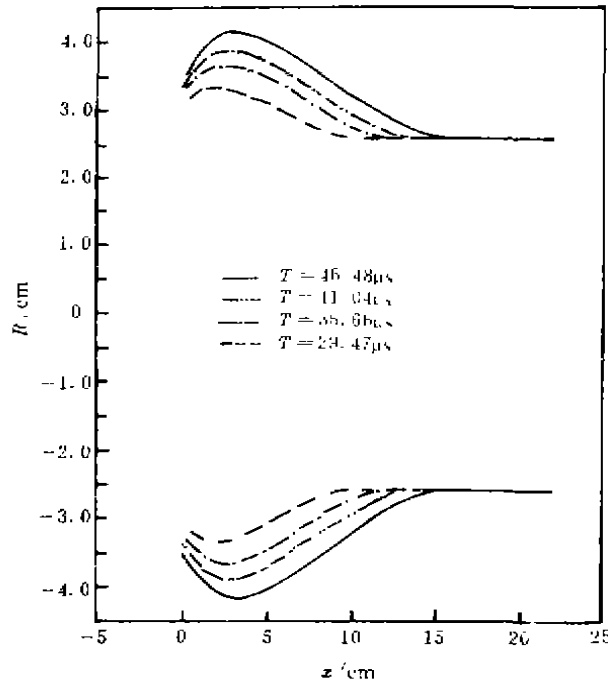


图 7 钢管轮廓图

Fig. 7 Outline of steel tube

5 结束语

用爆轰波的 C J 模型和起爆函数结合 Wilkins 的二维流体——弹塑性流动 Lagrange

数值计算方法,可以较好地模拟金属圆管在管内炸药滑移爆轰作用下的运动姿态,计算动态焊接参数。另外,从数值模拟结果的分析还可以看出,为了测得稳定的动态焊接参数,斜电阻丝应安装在碰撞角基本不变的区间内,即斜电阻丝的顶点(图1中的2点)应离开金属管外壁适当距离, h 值也不应太大。

参 考 文 献

- 1 张 凯,等.爆炸与冲击,1984,4(3):20~26
- 2 邵丙璜,等.爆炸与冲击,1985,5(3):1~12
- 3 Wilkins M L. UCRL-7322, Rev. 1, 1969.
- 4 王诚洪,等.国防科技大学学报,1987,(1):31~36
- 5 李德元,等.二维非定常流体力学数值方法.北京:科学出版社,1987.95~98.
- 6 周连胜,等.计算物理,1985,2(2):214~219
- 7 经福谦,等.实验物态方程导引.北京:科学出版社,1986.121~128

MOTION OF METAL TUBE UNDER ACTION OF EXPLOSIVE SLIDE DETONATION

Zhao Guomin, Zhang Ruoqi, Wang Chenghong

(Department of Applied Physics, National University of
Defence Technology, Changsha, 410073)

ABSTRACT In this paper, the motion of 20# seamless steel tube which was acted by the slide detonation of Trimonite charge in the tube, was calculated by using two-dimensional Lagrange numerical simulation method. The results were in accord with the experimental results obtained by using slanted resistance wire method.

KEY WORDS numerical simulation, explosive welding