

内爆法制备双金属管复合参数的计算机辅助设计*

杨 扬,李志鹏,胡 彬

(中南大学材料科学与工程学院,湖南 长沙 410083)

摘要: 根据爆炸复合窗口理论和内爆轰作用下管的飞行姿态计算公式,编制计算机程序来确定双金属管内爆复合的工艺参数,使得复合参数的选取大为简化。结果表明,该方法可以用于指导内爆法制备双金属管复合工艺参数的选择。

关键词: 爆炸力学;爆炸复合参数;计算机辅助设计;双金属复合管

中图分类号: O389

国标学科代码: 130*3599

文献标志码: A

将爆炸复合技术应用于制备双金属复合管,可生产出内层抗磨损和耐烧蚀的小口径速射炮的内膛、核动力装置内的钛-不锈钢复合管、化工装置中输送氢气和硫化氢的锆复合管、加速器真空箱壁用的大口径的铜-钢复合管等等。在工业生产中,需选取合理的爆炸复合工艺参数,将一种内、外半径分别为 R_{20} 、 R_{10} 的金属管内复到另一种厚度为 δ 的金属管上,见图 1。由于管的爆炸复合是一个比平板爆炸复合更为复杂的过程,在以往往往是通过大量的实验来获得最佳的复合工艺参数。本文中依据现有的爆炸复合理论以及管的运动方程编制出计算机程序,确定出炸药厚度 H 和两管间距 δ 等工艺参数,来提高设计的效率,降低生产的成本。

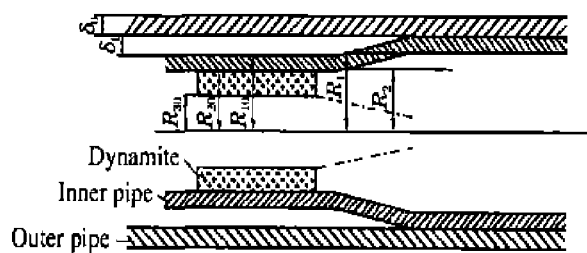


图 1 双金属管爆炸复合示意图

Fig. 1 Sectional map of inner explosive cladding pipe

1 双金属管内爆复合装药量的确定

首先按照目标产品的要求选定两金属板的组合,并且两金属板厚度分别与双金属管基、复层厚度相同,然后确定出双金属板爆炸复合的最佳装药量,最后对结果进行修正,再得到双金属管内爆复合的装药量。

1.1 复层最小飞行速度

如果复层飞行速度过小,所产生的压力不足,不能实现复合。要在碰撞点产生足够的压力,复层飞行速度 v_p 应大于最小临界速度 $v_{p,\min}$ 。对单一金属有^[1]

$$v_{p,\min} = 0.6 \sqrt{H_v / \rho} \tag{1}$$

$$p_{\min} = \rho \left[v_s + \lambda_1 \frac{v_{p,\min}}{2} \right] \frac{v_{p,\min}}{2} \tag{2}$$

式中: H_v 为材料维氏硬度, ρ 为材料的密度, v_s 为材料体积声速, λ_1 为材料线性拟合系数。由上式分别计算基、复层对应的最小压力 $p_{b,\min}$ 和 $p_{f,\min}$ 。取 $p_c = \max(p_{b,\min}, p_{f,\min})$, 可得复层最小飞行速度^[1]

$$v_{p,\min} = \frac{-v_{sb} + \sqrt{v_{sb}^2 + 4\lambda_{1b} \frac{p_c}{\rho_b}}}{2\lambda_{1b}} + \frac{-v_{sf} + \sqrt{v_{sf}^2 + 4\lambda_{1f} \frac{p_c}{\rho_f}}}{2\lambda_{1f}} \tag{3}$$

* 收稿日期: 2003-12-24; 修回日期: 2004-10-09

作者简介: 杨 扬(1963—),男,教授,博士生导师。

1.2 复层最大飞行速度

复层飞行速度 v_p 也不能太高, 太高的碰撞速度会产生大量的热量使复合界面产生过度熔化, 导致界面强度降低。为了限制界面的熔化量, 使界面不致由于拉伸波的作用而分离, 或由于严重的熔化而导致界面强度降低, 确定复层最大飞行速度^[3]

$$v_{p, \max} = \frac{1}{0.082} \frac{(T_m v_{sf})^{1/2}}{v_{cp}} \left[\frac{\lambda}{\rho c h_f} \right]^{1/4} \quad (4)$$

式中: T_m 为材料的熔点, K; λ 为热导率, W/(m·K); c 为比热容, J/(kg·K); v_{cp} 为碰撞点移动速度, m/s; h_f 为复板厚度, m。应取界面容易熔化的材料。熔点低, 导热系数 $a = \lambda/(\rho c)$ 大的材料界面容易熔化。用 T_m 与 a 的比值衡量界面熔化的难易程度, 比值小的材料界面容易熔化

$$\frac{T_m}{a} = \frac{T_m \rho c}{\lambda} \quad (5)$$

1.3 碰撞点移动速度

为了在界面处形成结合强度高的波状结合, 碰撞点移动速度 v_{cp} 应大于临界值 v_T ^[2-3]

$$v_{cp} > v_T = \left[\frac{2Re(H_{vf} + H_{vb})}{\rho_f + \rho_b} \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中: Re 为当量雷诺数。按照爆炸复合的流体力学模型, 当量雷诺数为 Re 时, 界面由平直状过渡到波状, v_T 表示这一特征的临界速度。根据实验确定^[2]: MS-MS (软钢)、Cu-Cu、Cu-MS、Al-Al、Al-MS、Al-Cu 普通适用的平均值为 10.6; Mg-Mg 为 12, Ti-Ti 为 11, Ni-Ni 为 8.7, Cu-Al 为 13.1, Ti-Al 为 8.1, Ti-MS 为 8.7, Ni-MS 为 10.5。

v_{cp} 的值由下式^[4] 确定

$$v_{cp} = \begin{cases} v_T + 200\text{m/s} & v_T \leq 2000\text{m/s} \\ v_T + 100\text{m/s} & 2000\text{m/s} < v_T \leq 2500\text{m/s} \\ v_T + 50\text{m/s} & v_T > 2500\text{m/s} \end{cases} \quad (7)$$

在金属管爆炸复合中, 由于两管平行放置, 因而 v_{cp} 与炸药的爆轰速度相等。在炸药选定以后, v_{cp} 的值也就确定了。在生产中, 常常用到的是二号岩石炸药, 可以通过在炸药里加入不同比例食盐来调整二号岩石炸药的爆速, 以获得与 v_{cp} 相近的炸药爆轰速度。

为形成稳定的再入射流, 碰撞点移动速度 v_{cp} 还须小于两种材料的体积声速 v_s 。

1.4 碰撞角

碰撞角

$$\beta = \arcsin(v_p/v_{cp}) \quad (8)$$

当碰撞角小到某一值时, 粘性阻力形成的冲量与再入射流的动量相等, 再入射流不再形成, 而再入射流的形成是实现复合表面产生“自清理”效应的必要条件。一般地, 碰撞角 β 在 $5^\circ \sim 25^\circ$ 之间^[5]。

1.5 平板爆炸复合的装药量

平板爆炸复合的装药量采用装药质量比 R (单位面积装药质量除以单位面积复板质量) 衡量。则利用下式可求解平板爆炸复合的炸药厚度^[2-3]

$$v_p = v_{p, \min} + 0.1(v_{p, \max} - v_{p, \min}) \quad (9)$$

$$R = \frac{27}{32} \left[\left(\frac{1.2v_d + v_p}{1.2v_d - v_p} \right)^2 - 1 \right] \quad (10)$$

$$h_e = \frac{R \rho_f h_f}{\rho_e} \quad (11)$$

式中: v_d 为炸药爆速, ρ_e 为炸药的密度, h_e 为平板爆炸复合的炸药厚度。

1.6 双金属管内爆复合装药量

内复法爆炸产物的飞散条件与外复法和平板爆炸复合不同。同时由于产物的径向飞散受到了限

制,在复层与基层碰撞后,产物压力并没有立刻降为大气压,而是依然保持着高压,所以在材料组合及厚度相同的条件下,内复法的药厚 H 通常比相同条件下的平板爆炸复合小。一般情况下,内复法取相同条件下平板爆炸复合药厚的 60%^[4]。内复法的单位面积的药量 Y 由下式确定^[4]

$$Y = \rho_e H \left[1 - \frac{H}{R_{20}} \right] \quad (12)$$

式中: H 为相同条件下平板爆炸复合药厚 h_e 的 60%, R_{20} 为复层的内径。

2 内复法间隙的确定

忽略材料的强度和波的多次反射效应,假定材料为不可压缩流体和爆轰产物按径向扩散,内管承受的压力使用列契脱简化模型的压力公式,从而建立了内金属管在爆炸载荷作用下的一维轴对称流体模型。通过下式可以确定内管内壁径向位移 R_2 和其径向膨胀速度 dR_2/dt 的关系^[5]

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} \ln \frac{x+u}{x} - \left[\frac{dx}{d\tau} \right]^2 \frac{u}{2x(x+u)} - \frac{4}{\rho(\gamma+1)} \exp \left[-\frac{bR+c}{(\gamma+1)\beta} \sqrt{1 + \left[\frac{dx}{d\tau} \right]^2 \tau} \right] = 0 \quad (13)$$

由于把金属近似看作不可压缩的流体,则有

$$\frac{dR_1}{dt} = \frac{R_2}{R_1} \frac{dR_2}{dt} \quad (14)$$

式中: $\rho = \frac{\rho_f}{\rho_e}$, $\beta = \frac{H}{R_{20}}$, $\tau = \frac{v_d t}{R_{20}}$, $x = \frac{R_2^2}{R_{20}^2}$, $u = \frac{R_{10}^2 - R_{20}^2}{R_{20}^2}$, $b = \frac{\sqrt{3}}{4} \frac{1}{\sqrt{1-\gamma} \sqrt{\gamma^2-1}}$, $c = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sqrt{\gamma^2-1}}{\sqrt{\gamma^2-\gamma} \sqrt{\gamma^2-1}}$, γ

为炸药多方指数, t 为时间。

通过(13)~(14)式即可求得内管外壁径向位移 R_1 和径向膨胀速度 dR_1/dt 的关系。如果内外管之间间隙太小,复管往往不能充分加速,其结果是达不到碰撞所需的压力,同时在爆速一定的情况下,也可能造成碰撞角 β 过小,难以形成再入射流。但间隙也不能太大,太大的间隙有可能造成复管飞行的速度过快而造成基、复管复合的过度熔化。事实上,随着管半径的扩大膨胀,材料被拉伸的程度增大,材料的损伤程度加大。因此,在碰撞的速度和碰撞角都满足爆炸复合条件的前提下,应当选择较小的间隙,以减少内管的变形所带来的对材料性能的影响。在选择间隙时,先确定出内复法装药量,然后求出复管的飞行姿态,即各个时刻的复管外壁大小 R_1 和其相应时刻的速度 v_p , 通过 $v_{p,\min}$ 、 $v_{p,\max}$ 就很容易确定间距 \hat{q} 。

3 编程和实例

按照上述方法,确定出双金属管内爆复合的工艺参数。考虑到在编程过程中需要解常微分方程,故使用数值计算功能强大的 Matlab 语言编制好计算机辅助设计程序。图 2 为用计算机来实现计算的流程图。

现需将一根外半径 $R_{10}=12.85\text{mm}$, 内半径 $R_{20}=11.8\text{mm}$ 的纯钛 TA2 管用内爆法复在一根厚度 $\hat{q}=16.7\text{mm}$ 低碳钢 A3 管上, 须求装药量和两管间隙。A3 低碳钢和 TA2 纯钛的性能见表 1^[7]。生产中采用二号岩石炸药, 性能如下: $\rho_e=700\text{kg/m}^3$, $v_d=2176\text{m/s}$, $\gamma=1.7$ 。把材料和炸药的性能参数以及材料的尺寸参数代入编制好的程序中即得钛-钢双金属管的内爆复合的动、静态复合工艺参数, 其值如下: $v_{p,\min}=353\text{m/s}$, $v_{p,\max}=1013\text{m/s}$, $v_{cp}=2176\text{m/s}$, 碰撞角 $\beta=9.3^\circ$, 质量比 $R=0.60$, 单位面积药量 $Y=0.24\text{g/cm}^2$, 两管间隙值 $\hat{q}=0.78\text{mm}$ 。实践证明, 程序提供的工艺参数能够成功将上述尺寸的钛-钢双金属管复合, 两金属管界面处形成结合强度高的波状结合。

表 1 材料的性能参数

Table 1 Parameters of two materials

材料	$\rho / (\text{kg/m}^3)$	$v_s / (\text{m/s})$	H_v / MPa	T_m / K	$c / (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	$\lambda / (\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	λ_1
A3	7850	4800	1176	1803	494	50.2	1.92
TA2	4500	4786	1823	1640	544	16.3	1.09

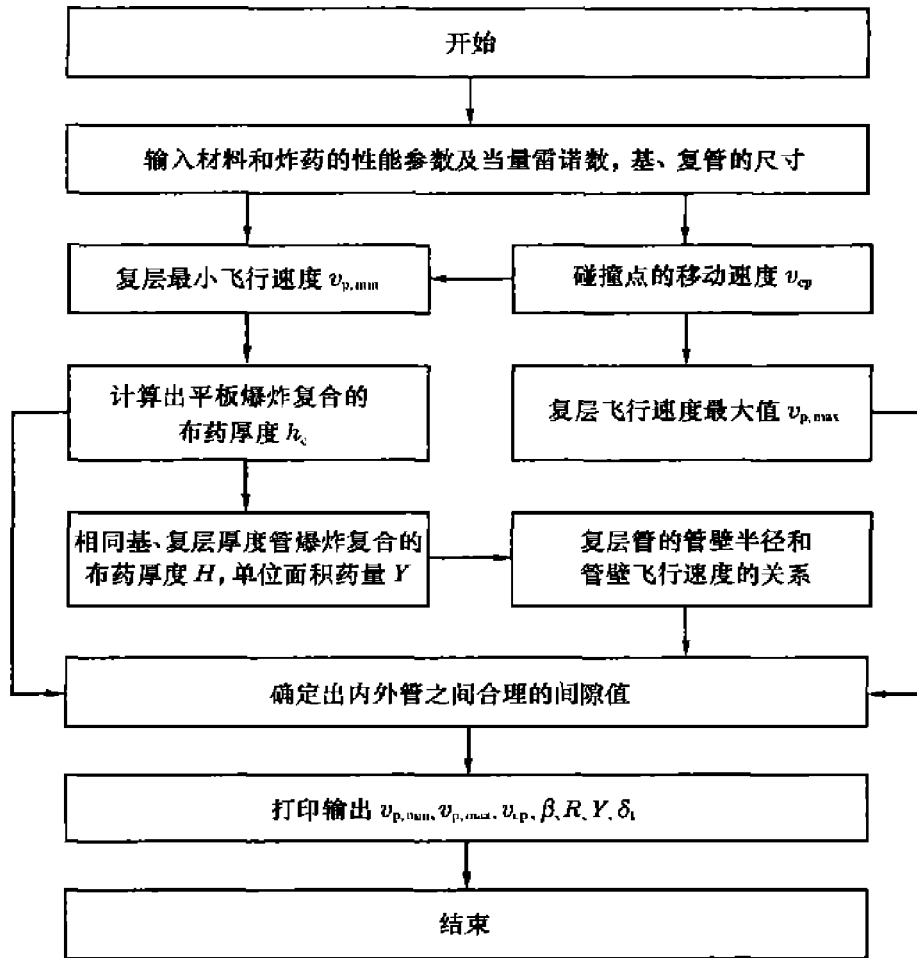


图 2 参数计算的流程图

Fig.2 The flow chart of parameter calculation

4 结 论

根据爆炸复合理论以及管的运动方程编制出来的计算机程序能方便、快捷地提供内爆法制备双金属复合管的各种动、静态参数。实践证明,用编制出的计算机程序来计算各种参数不仅能节省设计的时间,同时也提高了生产的效益,具有一定的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 李晓杰. 双金属爆炸复合下限[J]. 爆破器材, 1999(6):22-26.
LI Xiao-jie. The lower limit of explosive welding parameters for bimetal[J]. Explosive Material, 1999(6):22-26.
- [2] 张振逵. 爆炸复合参数计算机辅助设计[J]. 船舶科学技术, 1996(1):28-33.
ZHANG Zhen-kui. Computer aided design of parameters of explosive cladding[J]. Ship Science and Technology, 1996(1):28-33.
- [3] 樊新民, 张越. 爆炸复合参数的计算机辅助设计[J]. 南京理工大学学报, 1996, 20(6):509-512.
FAN Xin-min, ZHANG Yue. Computer aided design of parameters of explosive cladding[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1996, 20(6):509-512.
- [4] 郑哲敏, 杨振声. 爆炸加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981:446-450.
- [5] 邵丙璜, 张凯. 爆炸焊接原理及期工程应用[M]. 大连: 大连工学院出版社, 1987:160-168.
- [6] 王沫然. Matlab 5. x 与科学计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [7] 曾正明. 实用工程材料技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

Computer aided design for the parameters of inner explosive cladding pipe

YANG Yang^{*}, LI Zhi-peng, HU Bin

(School of Material Science and Engineering, Center South University,
Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: The optimum parameters of inner explosive cladding pipe are usually obtained by means of experiment or experience, and in this work, a computer aided design is constructed, which calculates the parameters based on the “windows” theory for explosive cladding. Examples are presented, and easier and quick choice of parameters is indicative.

Key words: mechanics of explosion; explosive cladding parameter; computer aided design; bi-metal cladding pipe

* Corresponding author: YANG Yang

Telephone: 0731-8830770

第九届全国岩石动力学学术会议通知

中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会拟定于 2005 年 8 月在三峡大学召开第九届全国岩石动力学学术会议,会议主题为西部大开发建设中的岩石动力学问题,欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃投稿并参加会议。

会议内容

1. 岩石动力学学科发展与展望
2. 岩石动态力学性质与本构关系
3. 岩石和岩体中应力波的传播与衰减规律
4. 岩石动态断裂机理与数值模拟
5. 岩石动力学与防护工程
6. 边坡动态稳定性分析
7. 锚杆、锚索、土钉抗动载效应
8. 岩石爆破与控制爆破技术
9. 岩爆与冲击地压机理研究
10. 岩石动力参数的测试技术及设备与方法研究
11. 桩基动测技术与应用
12. 其它与岩石动力学相关的研究

会议论文与出版

第九届全国岩石动力学学术会议论文征稿截止日为 2005 年 4 月 30 日。论文格式与要求参见《岩石力学与工程学报》征稿启示,论文经评审合格后将刊登在《岩石力学与工程学报》2005 年增刊上,部分优秀论文将刊登在《岩石力学与工程学报》正刊上。按惯例,本次学术会议仍对优秀论文进行评奖。

联系人 黄理兴

电 话:027-87198263

传 真:027-87198216

手 机:13907148025

E-mail: lxhuang@whrsm.ac.cn