

爆炸焊接有效多方指数 γ 及可焊窗口

谢飞鸿¹, 关惠平¹, 王军^{2,3}, 罗冠炜⁴

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070; 2. 窑街煤电公司, 兰州 730084; 3. 西安交通大学, 西安 710049; 4. 兰州交通大学 机电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 基于对爆炸焊接复板运动形态的基本假定及爆炸气体动力学方程建立冲击波方程, 将爆炸气体的作用视作固壁(基板)的正反射, 建立运动冲波方程, 根据现有的研究成果资料及爆炸焊接理论指导工程实践中存在的问题, 从而推导出有效多方指数 γ 的限定使用范围, 为金属爆炸焊接工程应用的参数计算提供可靠依据。以铝材作复板, 低碳钢作基板以此作为金属爆炸焊试件, 分别使用2号岩石硝铵炸药、泰乳炸药和梯恩梯炸药, 利用列契脱飞板运动公式, 可以计算出复板厚度与炸药厚度的近似关系式。

关键词: 爆炸焊接参数; 有效多方指数; 固壁反射; 运动方程

中图分类号: TG444 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2004)04-35-04



谢飞鸿

0 序 言

目前, 金属爆炸焊接参数确定常采用经验法或通过试验测定。爆轰产物的有效多方指数 γ 是描述爆炸复合过程的重要参数。 γ 通常随炸药品种、密度、复合板安装方式的不同而变化, 并在爆炸过程中因爆轰产物压力的衰减而变化。对于爆炸焊接试件的有效加工, 选择合理的爆炸能量(即有效作用)十分必要, 有效作用指数 γ 的使用范围的确定, 对于爆炸焊接参数的计算至关重要。利用列契脱近似方程以及其它关系式进行数值分析, 从而给出指导工程实践的可靠数值, 为工程实践提供便利。

1 基本假定及物理模型

1.1 基本假定

(1) 忽略平板(复板)运动过程中空气阻力的影响, 认为平板在真空中飞行。即空气阻力与外载荷相比是一个小量。

(2) 在爆炸产物作用下复板为不可压缩流体, 认为与外载荷比较复板材料的压缩变形能是一个可忽略的无穷小量。

(3) 认为复板具有足够大的面积, 其上覆盖的炸药也具有足够大的加载面积, 在实际的板材爆炸

焊接工程中, 常见的复板厚度为 2~4 mm, 最小边宽度一般大于 40~60 mm^[1], 一般来说, 工程上将炸药均匀布满整个复板, 忽略侧向边界稀疏波对爆炸载荷的影响。

1.2 物理模型

复板在滑移爆轰作用下的运动姿态可以用图 1 来描述。 D 为炸药的爆轰速度, 当爆轰波到达任意一点 O 时, 复板上任意一点 M 的弯折角为 α 。在稳定爆轰的情况下, 将坐标原点 O 置于爆轰阵面与复板的交点上, 这将是一个定常运动。

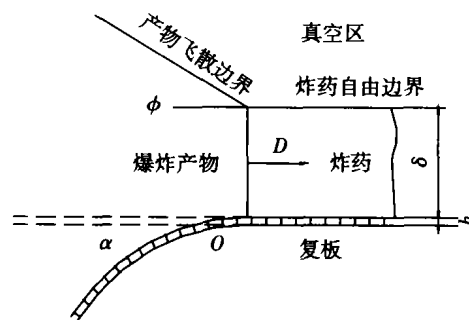


图 1 爆轰作用下复板运动状态图

Fig. 1 Motive graph of upset-plate on explosion

2 有效多方指数 γ 的推导

根据质量守恒、动量守恒、能量守恒定律建立运动冲击波的基本方程, 即

$$\rho_1(v_1 - D) = \rho_2(v_2 - D), \quad (1)$$

收稿日期: 2003-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10172042); 甘肃省自然科学基金重点资助项目(ZS-031-A25-007-Z)

$$\rho_1(v_1 - D)^2 + p_1 = \rho_2(v_2 - D)^2 + p_2, \quad (2)$$

$$u_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{1}{2}(v_1 - D)^2 = u_2 + \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{1}{2}(v_2 - D)^2, \quad (3)$$

式中： ρ_1, v_1, p_1, u_1 和 ρ_2, v_2, p_2, u_2 分别为右传冲击波和左传冲击波的密度、质点运动速度、压强和内能； D 为爆轰速度。

由式(1)~式(3)可以得到

$$\frac{p_2 - p_1}{\tau_1 - \tau_2} = \rho_1^2 (D - v_1)^2, \quad (4)$$

式中： $\tau = \frac{1}{\rho}$ 为比容； $\rho_1(D - v_1)$ 为跨过冲波单位面积的质量流量，是一个常数。因此式(4)在 p 平面上表示为一直线，也就是瑞利直线，该直线的斜率恒为负。由于该直线是由质量方程和动量方程导出，因此它适用于无粘的任何气体，而与有无能量加入无关。

同样由式(1)~式(3)联立求解可得

$$(D - v_1)^2 (D - v_2)^2 = \frac{(p_2 - p_1)}{\rho_1}. \quad (5)$$

式(4)、(5)导出的冲击波关系式均未涉及到能量方程，它们适用于任何性质的介质，与热力学性质无关

引入雨贡纽^[2] (Hugoniot) 绝热压缩方程为

$$u_2 - u_1 = \frac{1}{2}(\tau_1 - \tau_2)(p_1 + p_2). \quad (6)$$

对于完全气体

$$u = c_v T = \frac{1}{\gamma - 1} p \tau, \quad (7)$$

式中： c_v, T 分别为比热、温度； γ 为有效多方指数。

代入式(6)得

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2 \rho_1}{p_1 \rho_2} = \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^2 = \frac{\frac{p_2}{p_1} + \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} + \frac{p_1}{p_2}}. \quad (8)$$

可以看出，不论是运动冲波还是驻立正冲波或斜冲波，它们的雨贡纽方程完全相同。因为这组方程只表示冲波前后状态参量之间的关系。

引入波前运动的马赫数^[2] 为

$$Ms = \frac{D - u_1}{C_1},$$

式中： Ms, D 为马赫数、爆炸速度； C_1 为介质传播速度。

代入式(8)得

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} Ms^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}. \quad (9)$$

式(8)、(9)联立，可得

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{(3\gamma - 1)\frac{p_2}{p_1} - (\gamma - 1)}{(\gamma - 1)\frac{p_2}{p_1} + (\gamma + 1)}. \quad (10)$$

初始应力 p_1 由经两次冲击压缩突跃至 p_3 的压力比为

$$\frac{p_3}{p_1} = \left(\frac{p_3}{p_2} \right) \left(\frac{p_2}{p_1} \right). \quad (11)$$

式(11)代入式(10)得

$$\frac{p_3}{p_1} = \frac{\frac{p_2}{p_1} \left[(3\gamma - 1)\frac{p_2}{p_1} - (\gamma - 1) \right]}{(\gamma - 1)\frac{p_2}{p_1} + (\gamma + 1)}. \quad (12)$$

在金属爆炸焊接工程中，基板一般平铺在砂基上，而基板的运动速度相对复板的运动速度是一个小量。因此，假定复板碰撞基板时，基板是固定不动的刚壁，同时应满足入射波的绝对速度 $|D_+|$ 大于反射波的绝对速度 $|D_-|$ ，见图2。用下标 1、2 分别表示入射波前、后的状态，下标 2、3 表示反射波前后的状态，按照固定刚壁的边界条件有 $V_1 = V_3 = 0$ 。

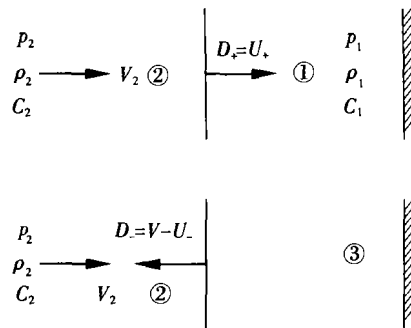


图2 运动冲波在固壁的反射

Fig.2 Motive shock wave reflected on fixed wall

建立反射波速度方程(参看图2)，即

$$D_+ = V_1 + U_+, \quad D_- = V_2 - U_-, \quad (13)$$

式中： U_+, U_- 分别为入射波和反射波相对与波前气体的传播速度； V_1, V_2 分别为入射波和反射波的介质传播速度。

将式(12)、(13)联立得

$$D = - \frac{\left(\frac{3\gamma + p_1}{\gamma + 1 + p_2} \right) \left(\gamma - 1 + \frac{p_1}{p_2} \right)}{\gamma \left(1 + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \frac{p_1}{p_2} \right)} D_+. \quad (14)$$

当 $\frac{p_2}{p_1} \gg 1$ 时，

$$D_- = -\frac{(3\gamma-1)(\gamma-1)}{\gamma(\gamma+1)}D_0 \quad (15)$$

又因为 $|D_-| \leq |D_+|$,

所以 $(3\gamma-1)(\gamma-1) \leq \gamma(\gamma+1)$,

即 $2\gamma^2 - 5\gamma + 1 \leq 0$,

$$\gamma \leq \frac{5 + \sqrt{5^2 - 8}}{4} = 2.2808 \text{ (略去另一根)}.$$

从上面的分析结果可以看出,只有当 $\gamma \leq 2.28$ 时,才能满足反射波速小于入射波速的现象,否则计算的反射波速大于入射波速结果应用于爆炸焊接工程,焊接试件将会被反射波掀开(或复板被弹回),或焊接界面产生过熔现象。然而,有些资料中^[3,4]对有效多方指数 $\gamma = 2.28$ 是在炸药爆速高达约 6 500 m/s 以上,这是立据不足的,因为有效多方指数 γ 不仅与炸药的覆设厚度、飞板的厚度(质量比 R)有关,同时 γ 还与爆速(一般来说爆速与炸药的厚度)以及复板与基板之间的安装间距有关,特别低能炸药,爆速随炸药密度的变化而变化,这可以从大多研究爆炸力学与冲击波的书籍^[5,6]中查找到有关证据。因而笼统地将高爆速炸药最大有效多方指数取为 2.28 是不科学的。另一方面为了避免有效多方指数太低,致使飞板与基板焊接时碰撞压力太

低而影响焊接质量,爆炸焊接所用的凝聚炸药有效多方指数应大于气相爆轰的多方 γ 指数 1.4。所以实际应用时,有效多方指数应在 $\gamma = 1.4 \sim 2.28$ 之间取值。

3 实例分析

以铝材作复板,低碳钢作基板的金属爆炸焊接件,分别使用 2 号岩石硝铵炸药、泰乳炸药和梯恩梯炸药的情况,利用列契脱飞板运动经验公式^[7],即

$$\frac{1}{\alpha_{\max}} = \frac{1}{b} + \frac{c}{R}, \quad (16)$$

式中: α_{\max} 为飞板运动最大碰撞角;

$$b = \frac{\sqrt{3}}{4\sqrt{1 - \frac{1}{\gamma}\sqrt{\gamma^2 - 1}}};$$

$$c = \frac{\sqrt{3(\gamma^2 - 1)}}{2\gamma\sqrt{1 - \frac{1}{\gamma}\sqrt{\gamma^2 - 1}}};$$

R 为炸药质量与复板质量之比; γ 为有效多方指数, $1.4 \leq \gamma \leq 2.28$ 。

$$\alpha_{\max} = \sin^{-1} \left[\frac{\left(\frac{\sqrt{\rho_{01}^2 c_{01}^2 + 4\rho_{01}\lambda_1 p_s} - \rho_{01}c_{01}}{2\rho_{01}\lambda_1} + \frac{\sqrt{\rho_{02}^2 c_{02}^2 + 4\rho_{02}\lambda_2 p_s} - \rho_{02}c_{02}}{2\rho_{02}\lambda_2} \right)}{v_d} \right], \quad (17)$$

式中: ρ_{01} 、 c_{01} 、 ρ_{02} 、 c_{02} 、 λ_1 、 λ_2 分别为基、复板材料常数^[7]; p_s 为基、复板之间的压力。对某一特定厚度(密度)的炸药,炸药爆炸速度 v_d 为一定值。

利用式(16)、(17),通过数值计算可求出某种炸药在一定密度条件下的炸药厚度与复板厚度的关系。见图 3,同时可以利用下式求出符合工程应用

的安装间距^[8],即

$$y = \delta(1 + \gamma) \frac{\alpha_{\max}}{R} \int_0^{\alpha} \frac{\sin\alpha}{\alpha_{\max} - \alpha} d\alpha, \quad (18)$$

式中: y 为基、复板之间的间距。

求出合理的符合工程应用的安装间距。图 3 分别为 2 号岩石硝铵炸药(密度 0.7 g/cm^3)、泰乳炸

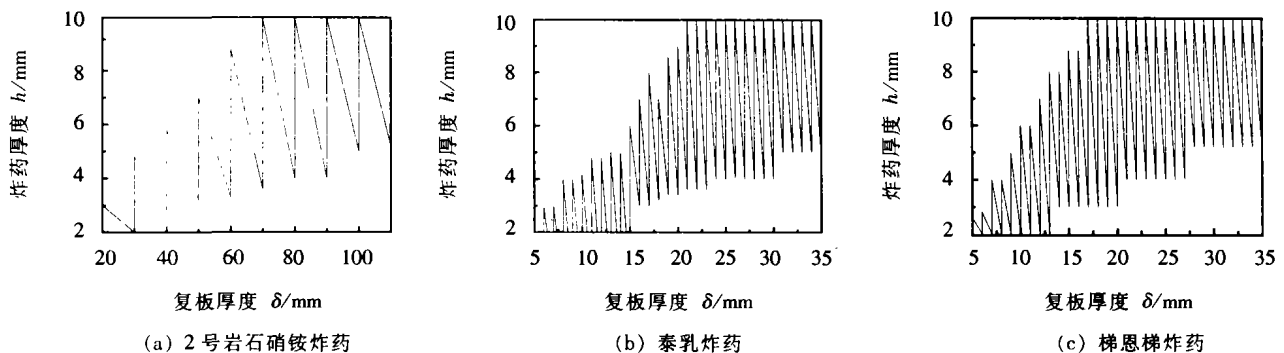


图 3 炸药厚度与复板厚度的关系图

Fig. 3 Relation graph of explosive and upset plate thickness

药(密度为 0.9 g/cm^3)、梯恩梯炸药(密度为 1.3 g/cm^3),在 $1.4 \leq \gamma \leq 2.28$ 时用以上关系式计算的炸药厚度与复板厚度的关系图。图中折线为可焊接范围。

4 结 论

作者在全面分析研究国内外学者对金属爆炸焊接研究成果的基础上,根据现有的研究成果资料及爆炸焊接理论解决工程实践中存在的问题,着重研究爆炸焊接参数与所选用的炸药性质、厚度及爆速之间的关系,以及基、复板材料的物理力学性质等。基于冲波运动方程及运动冲波在固壁的正反射模型,推导出统一使用的有效多方指数 γ 阈,并进行了参数计算,对于有效多方指数 γ 阈、炸药与金属板厚度的运算过程,是基于基本假定和列契脱(Richter)的近似方程。适用于解决大块(复板抗弯极限弯矩与爆炸载荷最大弯矩之比是一个高阶小量)金属板爆炸焊接的参数计算,该计算模型的计算参数可满足实际爆炸焊接工程选取参数的要求。

参考文献:

- [1] 郑哲敏,杨振声. 爆炸加工[M]. 北京:国防工业出版社, 1981. 349-354.
- [2] 张连玉. 爆炸气体动力学基础[M]. 北京工业学院出版社, 1986.
- [3] 邵丙璜. 炸药在滑移爆轰作用下多方指数值的确定,[J]. 爆炸与冲击 1981,1(2):30-36.
- [4] 陈火金. 爆炸焊接界面碰撞压力计算[J]. 爆炸与冲击,1984, 4(4):10-19.
- [5] 邵丙璜,张 凯. 爆炸焊接原理及其应用[M]. 大连:大连工学院出版社,1987. 22-31.
- [6] 鲍亦兴,毛昭宙. 弹性波的衍射与动应力集中[M]. 刘殿魁,苏光越译. 北京:科学出版社,1993. 65-72.
- [7] Grossland B. Explosive welding of metals and Its application [M]. Oxford, Clarendon, 1982.
- [8] 谢飞鸿. 爆炸焊接及其相关问题研究[D]. 西安:西安交通大学,1997. 36-39.

作者简介: 谢飞鸿,男,1965年出生,工学硕士,副教授。主要从事岩土力学、爆炸力学和复合材料力学的研究和教学工作,发表论文16篇。

Email: feihong_xie@163.com