

爆炸焊接参数的计算机辅助设计^{*}

王铁福

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏南京 210094)

摘要: 根据爆炸焊接理论, 综合分析了相关爆炸焊接参数的计算方法, 利用 Visual C++ 语言编制了爆炸焊接参数计算机辅助设计程序, 该程序采用菜单和视图形式对输入、输出命令结果进行操作, 方便直观。与有关实验结果的对比表明, 计算所给出的焊接窗口及最佳焊接参数具有很高的准确度。爆炸焊接 CAD 方法对于减少实验次数, 摆脱经验设计方法, 选择最佳焊接参数将是非常有用的工具。

关键词: 爆炸; 爆炸焊接; 爆炸复合; 计算机辅助设计

中图分类号: TG456.6

文献标识码: A

1 引言

爆炸焊接是瞬时发生的物理力学现象, 它涉及到爆炸力学、金属物理学、热力学等多个学科。因此人们迄今还不能完全从理论上预知不同材料的焊接参数所对应的结合强度。大部分焊接参数的确定都是根据经验积累, 以及大量的实验摸索。例如人们利用相似率模拟实验法、半圆柱实验法、小倾角法、台阶法等来确定一种新组元的焊接参数。但是, 要做这些试验一方面费时费力, 另一方面由于装药结构的局限, 真正生产过程中的许多物理力学现象难以发现。因此, 能否通过理论计算和计算机辅助设计比较精确地给出参数的变化范围, 再通过少量试验找到最佳的焊接参数, 一直是从事爆炸焊接工作者的追求。本文作者根据爆炸焊接过程的理论分析并参照有关经验公式, 对主要爆炸焊接参数进行了计算, 以 Win 2000 为平台, 采用 Visual C++ 语言编制了计算机辅助设计程序。通过实验验证, 计算结果与实验符合较好。

2 爆炸焊接窗口的理论计算

根据爆炸焊接理论可知, 最主要的爆炸焊接参数有 3 个, 即飞板速度、动态碰撞角、炸药爆速。而这 3 个参数之间又满足一定的几何关系。如图 1 所示, 根据飞板速度方向不同的假定, 速度关系可写成: $v_p = v_f \sin \beta$, 也可写成 $v_p = 2v_f \sin(\beta/2)$ 。在此情况下, 假如飞板与基板平行安装, 则: $v_f = v_D = v_C$, 即炸药爆速、来流速度与碰撞点移动速度相等。爆炸焊接窗口是由爆炸焊接下限参数和上限参数构成的可焊参数范围。为了更直观和方便, 这里选择了 v_p - β 坐标平面。

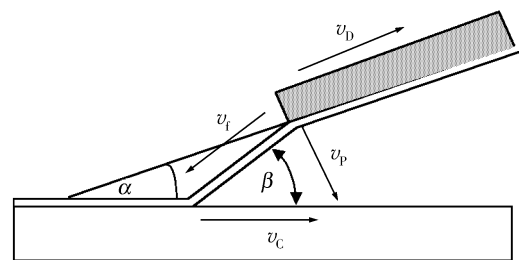


图1 速度关系简图

Fig. 1 The sketch of velocity analysis

^{*} 收稿日期: 2003-04-19; 修回日期: 2003-07-08

基金项目: 国防科技重点实验室基金(51453020103ZS3305)

作者简介: 王铁福(1946—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为终点弹道学, 爆炸与冲击动力学。

E-mail: wtf@public1.pptt.js.cn

2.1 确定最小飞板速度 v_{Pmin}

实践证明,较好的焊接质量往往发生在爆炸焊接参数下限条件,因此飞板最小速度是爆炸焊接中最重要的参数之一。飞板最小速度计算模型理论,大约完成于 20 世纪 80 年代以前,本文中选取 4 种不同模型,以供比较。

2.1.1 Deribac 模型^[1]

Deribac 等人在研究金属粘性对再入射流的抑制作用时得到关系式

$$\sin(\beta/2) = f(H_V/\rho v_f^2) \quad (1)$$

式中: H_V 为维氏硬度。由于维氏硬度与材料强度有一定的倍数关系,于是便有 $\sin(\beta/2) = f(\sigma_u/\rho v_f^2)$, 式中隐含的 $\rho v_f^2/(2\sigma_u)$ 为比强度,它的大小对焊接界面的形态起着非常重要的作用。特里伯斯通过大量实验数据对(2)式进行处理,得到了简单关系式 $\beta = k\sqrt{H_V/\rho v_f^2}$, 式中 k 为一常数,取值范围为 0.6~1.2。这个公式为我国广大爆炸焊接工作者所熟知。由于大多数金属材料的维氏硬度与强度有着简单的倍数关系,于是该式可写为

$$v_P = k' \sqrt{\sigma_u/\rho} \quad (2)$$

式中: k' 是一个常数。

2.1.2 Wittiman 模型^[2]

从压力观点来看,爆炸焊接往往与一定的压力条件相对应。但当压力条件已知时,按照什么样的力学模型进一步计算飞板速度,是一些专家和学者们最关心的问题。不同的模型有不同的计算结果,是采用流体模型,还是等效正碰撞的激波模型? 假定基板和复板为同一材料,按照不可压缩流体模型,压力为 $p_1 = \rho v_f^2/2$; 按等效不可压缩正碰撞激波模型,压力为 $p_2 = (\rho v_{sf} v_f \sin\beta)/2$, 此处 v_{sf} 为体波波速。比较两个计算公式可以看到,激波模型压力随 β 增加而增加,而流体模型的驻点压力只与来流速度有关,与 β 无关。据此,可以推断一定存在一个 β_c , 当 $\beta = \beta_c$ 时, $p_1 = p_2$ ^[1], 此时便有 $\sin\beta_c = v_f/v_{sf}$ 。在来流一定的情况下,当 $\beta > \beta_c$ 时,正碰撞的激波压力随 β 增加而增加,因此 $\beta = \beta_c$ 既是等效正碰撞激波压力的最小点,也是有无再入射流形成的分界点,对于正碰撞激波模型来说,此处的飞板速度也是最小值。假定当 $\beta = \beta_c$ 时,可焊压力为 p_K , 则 $p_K = \rho v_{pc}^2/2(\sin\beta_c)^2 = (\rho v_{sf} v_f \sin\beta_c)/2$, 此处 v_{pc} 为飞板速度。Wittiman 曾提出可焊压力应大于材料动态屈服极限的 5 倍, Ezra 等人提出应大于静态屈服强度的 10 倍。根据 Wittiman 的条件,考虑到 $\sin\beta_c = v_f/v_{sf}$, 且对于大多数金属来说,体波波速约为 6 km/s, 常用炸药爆速约为 2~2.5 km/s, 于是便有

$$v_{Pmin} = n \sqrt{\sigma_u/\rho} \quad (3)$$

式中: n 为常数,取值范围为 1~1.3, σ_u 为 Hugoniot 弹性极限,也可用材料极限强度代替。比较(2)式与(3)式,两者在形式上完全相同。当 $n=1$ 时,(3)式便是 Wittiman 关于相同材料焊接的最小飞板速度模型。对于不同材料的焊接, Stivers 和 Wittman^[3] 提出如下计算方法

对于不同材料有

$$v_{P1} = \sqrt{\sigma_{u1}/\rho}, \quad v_{P2} = \sqrt{\sigma_{u2}/\rho}$$

根据等效正碰撞激波压力计算公式分别有

$$p_1 = v_{s1} \rho_1 v_{P1}/2, \quad p_2 = v_{s2} \rho_2 v_{P2}/2$$

式中: p_1 、 p_2 为驻点碰撞压力, v_{s1} 、 v_{s2} 为材料体波波速。在 p_1 、 p_2 碰撞压力中选择压力最大者,重新计算最大压力下的飞板质点速度,并假设这一速度为 v_{Pnew} , 则

$$\text{当 } p_1 < p_2 \text{ 时, } v_{Pnew} = p_2/v_{s1}\rho_1; \text{ 当 } p_1 > p_2 \text{ 时, } v_{Pnew} = p_1/v_{s2}\rho_2$$

最后得到如下计算结果,即

$$\text{当 } p_1 < p_2 \text{ 时, } v_{Pmin1} = v_{Pnew} + v_{P2}/2; \text{ 当 } p_1 > p_2 \text{ 时, } v_{Pmin1} = v_{Pnew} + v_{P1}/2 \quad (4)$$

2.1.3 最小正碰撞激波压力模型^[4]

爆炸焊接参数下限的试验数据表明,在考虑爆炸焊接下限的压力条件时,应当按等效正碰撞来计算碰撞压力^[1]。而在正常的焊接参数范围内,由于再入射流的存在而使激波压力计算失真,应当以流体驻

点压力表征其界面的碰撞压力。下式便是等效正碰撞激波模型^[4]

$$v_{p1} = 2p_{\min}/v_{st}\rho_t \tag{5}$$

式中: $p_{\min}$ 为碰撞点的最小压力; v_{st} 为体波波速。碰撞点的最小压力 $p_{\min}$ 由实验确定,它约为材料强度的 7~8 倍。对于不锈钢和普碳钢的复合,可取 4.5 GPa。

2.1.4 最小能量模型

从事爆炸焊接的专业人员知道,随着飞板厚度的增加,相应的装药比应有所减少,反之薄板所要求的装药比有所增大。但上述飞板最小速度计算模型都没有涉及飞板厚度,因此人们只好凭经验对装药比进行调整。而最小能量模型从实现爆炸焊接所需要的单位面积总动能出发来计算飞板速度^[5],其计算公式为

$$v_{p2} = \sqrt{2E_1/\rho_t t_f} \tag{6}$$

式中: t_f 为飞板厚度, ρ_t 为飞板材料密度, E_1 为实现焊接单位面积所需最小能量。参数 E_1 可通过冲裁实验得到,也可通过经验公式求得,冲裁试验的方法可参阅文献[11]。由于大多数实验是在飞板厚度大于 15 mm 的条件下进行的,因此该模型对厚板复合的精度较好。对于不锈钢, E_1 可取作 3.2 MJ/m²。表 1 列出了一些有关 E_1 的数据仅供参考^[6,7]。为了便于对上述几种模型进行比较,表 2 列举了一些常用金属组元的计算结果。

表 1 E_1 的数据

Table 1 Value of E_1 (MJ/m ²)				
Cu-Cu	Al-Al	Al-Cu	Cu-MS	MS-MS
1.02	1.08	1.08	2.11	2.04

表 2 最小飞板速度不同模型计算结果比较

Table 2 Comparison between the minimum flyer velocities calculated from different models (m/s)				
Model	Stainless steel(5 mm)/Steel	Stainless steel(15 mm)/Steel	Cu(5 mm)/Steel	Al(5 mm)/Steel
Deribac	280($k=0.6$)	280($k=0.6$)	189($k=0.8$)	200($k=0.6$)
Wittiman	258	258	168	478
Shock	249	249	87	409
Energy	323	233	307	—

从计算结果可以看出,对于性能接近的相容金属,前三种模型的计算结果相差不大,但对性能相差很大的不相容金属,Deribac 模型的计算结果和 Wittiman 模型以及激波模型的计算结果相差很大。对于厚板复合,四种模型的计算结果相差不大,但在薄板复合时,能量模型计算结果大于前三种模型的计算结果,因此能量模型可供随飞板厚度增加进行装药量调整的参考。

2.2 确定最大飞板速度 v_{pmax}

在爆炸焊接过程中,当飞板速度 v_p 和碰撞角 β 足够大时,塑性畸变所引起的热能不仅使界面层熔化,而且在界面层脱离高压区后,仍然保持熔融或热软化状态,这种现象称为过熔。相应的,避免形成过熔界面的最大飞板速度便是可焊参数的上限条件。本文中选择了两个模型,以供比较。

2.2.1 基于热传导理论的模型

为了便于问题的分析,通常作如下假定,即:(1) 仅考虑碰撞点附近的塑性畸变功对界面温度的影响;(2) 认为碰撞变形的过程是绝热的,热源是瞬时形成的;(3) 把焊接过程简化为一维热传导问题。在对称碰撞情况下,设板厚为 h ,在 $t_0=0$ 初始时刻,边界 $\pm h$ 上的温度为室温 T_0 。在爆炸焊接过程中,复合板上下表面的温度有所提高,但变化不大,近似认为仍接近常温 T_0 。如令 $\varphi(y)$ 表示初始时刻焊接界面沿 y 方向(即板厚方向)的温度分布函数。据此可建立如下热传导方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} dy \right) dt &= \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dt dy \\ T(y,0) &= \varphi(y), \quad T(-h,t) = T_0 \\ T(h,t) &= T_0 \end{aligned} \tag{7}$$

式中: κ 为热传导系数, T 为温度, ρ 为材料密度, c 为比热。该式表示 dt 时间内流入 dy 间距内的热量等于在 dt 时间内该 dy 间距内材料的热量增加。采用分离变量法求解上述方程, 并引进格林函数, 便得到如下形式的解

$$T(y, t) = \int_{-h}^h \varphi(\xi) G(y, t, \xi) d\xi \quad (8)$$

式中: $G(y, t, \xi)$ 为格林函数, 它的物理意义是: $t=0$ 时刻, 在点 ξ 处有一瞬时的点热源, 其单位质量内的热能为 $c\rho T_1$ 。之后 t 时刻的温度在 y 方向的分布规律则由格林函数 $G(y, t, \xi)$ 表示, 其积分形式为

$$G(y, t, \xi) = \int_0^\infty \frac{1}{h} \exp(-a^2 p^2 t) \sin(p\xi) \cdot \sin(py) dp$$

其中

$$a^2 = \kappa / \rho c, \quad p = n\pi / h$$

由于所讨论的初始温度分布 $\varphi(\xi)$ 不是在整个板厚范围, 而仅仅是在 $-y_0 \leq \xi_0 \leq +y_0$ 狭窄界面附近。其单位体积发出的热量为 Q , 相应材料的比热为 c , 密度为 ρ , 则 $\varphi(\xi) \approx \varphi(0) = Q/\rho c$, 对 (8) 式进行积分, 于是得到相应的温度分布为

$$T(y, t) = \frac{Q}{\rho c} \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4a^2 t}\right)$$

斯铁尔等人采用上述瞬时点热源一维模型, 建立了飞板与基板平行安装时飞板速度上限表达式, 即

$$v_{pmax}^2 = \frac{4t_{mp} v_{sf}}{\eta v_D^2} \sqrt{\frac{2\pi\kappa v_{sf}}{\rho h}}$$

式中: κ 为熔点较低的金属板的热传导系数, c 为熔点较低的金属板的比热, v_{sf} 为飞板材料的体积声速, v_D 为爆速, t_{mp} 为飞板和基板两者中较低的熔点温度。如取 $\eta \approx 0.5$, 经运算得到最大飞板速度为

$$v_{pmax1} = 1.22 \frac{(t_{mp} v_{sf})^{0.5}}{v_D} \left(\frac{\kappa v_{sf}}{h\rho} \right)^{0.25} \quad (9)$$

2.2.2 基于能量原理的模型

由飞板单位面积的最大能量来决定飞板最大速度, 是经常采用的另一种方法。Wylie^[5]等人通过对爆炸焊接试件的冲裁实验, 并考虑到飞板材料的比焊接强度, 得到了由飞板单位面积的最大能量所决定的最大飞板速度计算公式

$$v_{pmax2} = (2E_2 / \rho_i t_i)^{0.5} \quad (10)$$

式中: E_2 为材料在可焊条件下, 飞板单位面积所具有的最大能量。对于不锈钢/普碳钢的复合, 由于缺乏相应数据, 近似以钢/钢的数据代替, 取作 7.54 MJ/m^2 。表 3 列出了一些有关 E_2 的数据, 仅供参考^[6]。

表 3 E_2 的数据

Table 3 Value of E_2 (MJ/m ²)				
Cu-Cu	Al-Al	Al-Cu	Cu-MS	MS-MS
5.1	4.07	1.88	5.86	7.54

2.3 确定碰撞角

Bahrani 和 Crossland^[8] 在研究爆炸焊接界面波的波幅与碰撞角的关系时指出, 只有碰撞角处于某一值域, 即 $\beta_L \leq \beta \leq \beta_H$ 时, 才会呈现波形界面, 引入比

压 p_s , 且 $p_s = 2\sigma_y / \rho v_i^2$, 于是碰撞角与比压有 $\beta = \lambda p_s^m$ 。式中: σ_y 为理论屈服强度, λ 和 m 为实验常数。假如以 β_L 表示界面波形成的最小临界角, β_w 表示波形界面最大极限角, Meyer^[6]等人根据大量的实验资料, 采用最小二乘法分别得到了 β_L 、 β_w 的表达式, 即

$$\beta_L = 6 p_s^{-0.4} \quad (11)$$

$$\beta_w = 32 p_s^{-0.5} \quad (12)$$

将前面经过计算得到的最小飞板速度和最大飞板速度代入上式, 便可求得碰撞角的取值范围。于是以飞板速度和碰撞角为参数的爆炸焊接窗口便被描绘出来。

3 装药工艺参数确定

3.1 选择炸药

国内外曾经相当普遍地认为, 比强度、碰撞角、及反映粘性流体性质的雷诺数等是影响爆炸焊接界

面形态的重要参数。根据流体力学理论,粘流的流速 v 、密度 ρ ,特征厚度 δ ,及粘性系数 μ 所构成的雷诺数,即 $Re=\rho v\delta/\mu$,是流体从层流过渡到紊流的分界点。将它用于再入射流分析,取碰撞点移动速度为 v_c ,密度为飞板和基板材料的平均密度,根据特里伯斯把 $\mu\dot{\epsilon}$ 用维氏硬度 H_V 代替^[1](这里 $\dot{\epsilon}$ 为碰撞点处的平均应变率),以及令 $\dot{\epsilon}=v_c/\delta$ 的假定,于是便有 $\mu=(H_{V_1}+H_{V_2})\delta/v_c$,分别代入雷诺系数公式,并整理得到再入射流从层流过渡到紊流时流速分界点的表达式^[2,6,7]

$$v_T = \left[2 \times 10^6 Re (H_{V_1} + H_{V_2}) \frac{1}{\rho_1 + \rho_2} \right]^{0.5} \quad (13)$$

式中: Re 为适用于流动过程的雷诺数, ρ 为材料密度, H_V 为维氏硬度,下标1和下标2分别代表飞板和基板。(13)式表明:从平直界面到波形界面,碰撞点移动速度 v_c 必须大于由上式计算出的 v_T 。对于大多数金属,雷诺数约为10.6。Christensen等人^[2]提出,对于钢, $v_c = v_T + 400$ m/s。Stivers和Wittman^[3]等人提出下列计算方法可供应用

$$\begin{aligned} v_c &= v_T + 200 & v_T &< 2000 \text{ m/s} \\ v_c &= v_T + 100 & 2000 \text{ m/s} &< v_T < 2500 \text{ m/s} \\ v_c &= v_T + 50 & v_T &> 2500 \text{ m/s} \end{aligned}$$

根据驻点移动速度便可计算出所选炸药的爆速。当平行安装时, $v_c = v_D$ 。

3.2 确定飞板速度和初始安装角

在确定了最大与最小飞板速度后,最佳飞板速度可用下式进行选择

$$v_P = v_{P_{\min}} + 0.1 \Delta v_P \quad \Delta v_P = v_{P_{\max}} - v_{P_{\min}}$$

当炸药爆速及飞板速度确定以后,在给定的炸药爆速及飞板速度下,还要进一步利用(14)式和(15)式对设计方案进行校核,以便核准设计参数是否在焊接窗口之内

$$\beta = 2 \sin^{-1} (v_P / 2v_D) \quad (14)$$

$$\beta_L = 6 p_s^{-0.4} = 6 (2\sigma_y / \rho v_P^2)^{-0.4} \quad (15)$$

校核时 v_P 的取值从10 m/s增加到1500 m/s,增幅为10 m/s,分别带入上面两式。

当 $\beta < \beta_L$ 始终成立,爆炸焊接应该采取斜安装,初始角 $\theta = \beta_L - \beta$;当 $\beta > \beta_L$ 始终成立,爆炸焊接应该采取平行安装,如令校核的飞板速度为 v_{P5} ,则 $v_{P5} = 10$ m/s;当 β 在某一个值域内大于 β_L ,而在另一个值域内小于 β_L ,则找到一个 v_P ,使得 β_L 满足等式 $\beta = \beta_L$,此时的 v_P 值便是 v_{P5} 。将 v_{P5} 与前面计算出的 $v_{P_{\min}}$ 比较,如 $v_{P5} > v_{P_{\min}}$,则 $v_{P_{\min}} = v_{P5}$ 。

3.3 确定装药比和炸高

装药比就是炸药和飞板的面密度之比,其表达式为: $R = \rho_e t_e / (\rho_f t_f)$, ρ_e 为炸药密度, ρ_f 为飞板密度, t_e 为炸药厚度, t_f 为飞板厚度,根据Chandwick得出的飞板速度经验计算公式^[10]

$$v_P = (0.612R/2 + R) v_D$$

通过变换,则得到了装药比 R 的计算公式 $R = 2v_P / (0.612v_D - v_P)$,只要确定了飞板速度的取值范围和所选用的炸药,就可以求得装药比 R 的取值范围。

炸高是飞板可加速的距离,它决定了飞板的最终飞行速度。确定炸高的经验和半经验公式有几个,但笔者认为,对于厚板的爆炸复合,适宜用半经验公式^[2], $s = (0.5 \sim 1)t_f$ 。

至此,在完成了焊接窗口计算的基础上,又完成了炸药爆速、最佳飞板速度、装药比和炸高的计算。

4 爆炸焊接窗口程序设计

根据第2节所介绍的爆炸焊接窗口计算公式编写了计算程序,程序的开发平台是Win 2000,开发工具是Visual C++。程序采用面向对象的编程思想。整个程序由视图、文档、计算三大类组成。视图类包括初始对话框、计算结果输出窗口、绘图窗口和菜单、工具栏等。通过初始化对话框向程序输入各种初始参数,经计算机程序计算出结果后,在输出窗口显示主要的计算资料,并在绘图窗口中绘出对应

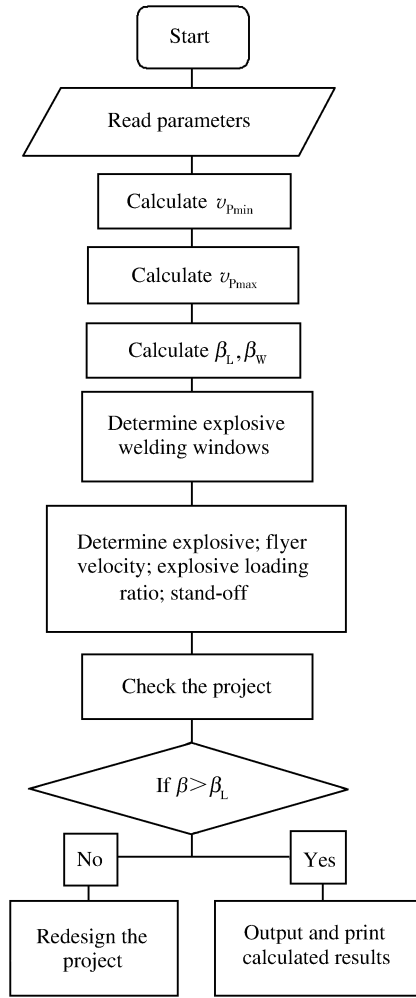


图 2 爆炸焊接计算机辅助设计框图
Fig. 2 Flow chart of CAD for explosive welding parameter

的爆炸焊接窗口。菜单和工具栏列出了计算所需的一些命令,方便用户的操作。计算类是整个程序的核心,包括飞板速度计算函数、碰撞角计算函数以及各种辅助计算函数,它通过视图类接受初始参数,并将计算得到的结果传给视图类和文档类。图 2 是整个程序的设计框图。

利用计算程序,可以得到不同金属材料间的爆炸焊接窗口。图 3 为 15 mm 不锈钢与普碳钢爆炸复合的焊接窗口,图中曲线 1、曲线 2 和曲线 3 分别代表爆速为 3 km/s、3.3 km/s 和 3.8 km/s 的炸药所对应的参数曲线。直线 A 和直线 B 分别代表基于热传导理论模型和基于能量原理模型计算的最大飞板速度。在用能量模型计算不锈钢与普碳钢复合的最大飞板速度时,由于缺乏 E_2 的数据而用钢/钢的数据代替,因此直线 B 的计算误差较大。表 4 是计算结果与有关实验结果的比较^[8,9]。

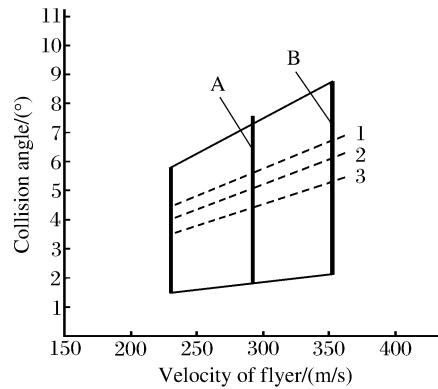


图 3 爆炸焊接窗口计算结果
Fig. 3 Calculated results of explosive welding windows

表 4 实验结果与计算结果比较

Table 4 Comparison between experiment and calculation

Method	Thickness /(mm)	Material	v_D /(m/s)	v_{pmin} /(m/s)	v_{pmax1} /(m/s)	v_{pmax2} /(m/s)	β_L	β_w	$v_{optimum}$ /(m/s)
Calculation	5	Stainless steel/Steel	3 000	280	375	550 *	6.1	10.5	307
Experiment	5	Stainless steel/Steel	3 000	313			5.9		330
Calculation	15	Stainless steel/Steel	3 000	231	285	353 *	4.4	6.8	243
Experiment	15	Stainless steel/Steel	3300	239	322 (v_{pmax})		4.5	5.8	255
Calculation	7	Cu/Steel	3 000	300	473	507	5.8	9.7	325
Experiment	7	Cu/Steel	3 000	297			5.7		320

Note: E_2 of steel substituted for E_2 of stainless steel for lack of corresponding data.

5 结 论

通过少量试验找到最佳的爆炸焊接参数,一直是从事爆炸焊接工作者的追求。本文作者根据爆炸焊接过程的理论分析,并参照有关经验公式,对主要爆炸焊接参数进行了计算,以 Win 2000 为平台,采

用 Visual C++ 语言编制了计算机辅助设计程序。通过实验验证,计算结果与实验吻合很好。借助本文中所提出的 CAD 方法,用户可以很方便地输入各种初始参数,输出各主要的计算数据,并可在绘图窗口中绘出对应的爆炸焊接窗口。这为摆脱传统的经验设计方法,减少实验浪费,尽快找到最佳焊接参数无疑是非常有用的工具。

References:

- [1] Shao B H, Zhang K. Explosive Welding Principle and Its Application [M]. Dalian: Dalian University of Science and Technology Press, 1987. (in Chinese)
邵丙璜, 张 凯. 爆炸焊接原理及其工程应用 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1987.
- [2] Blazynski T Z. Explosive Welding Forming and Compaction [M]. London: Application Science Publishers Ltd, 1983.
- [3] Stivers S W, Wittman R H. Computer Selection of the Optimum Explosive Loading and Welding Geometry [A]. Proc 5th Int Conf on High Energy Rate Forming [C]. Denver: University of Denver, 1975. 4. 2. 1—4. 2. 16.
- [4] Salwan S K, Prasad S. Application of Explosive Welding [J]. J Indian Weld, 1981; 21(1): 7—14.
- [5] Wylie H K, Williams P E G. Further Experimental Investigation of Explosive Welding Parameters [A]. Proc of 3rd Int Conf of the Center for HEF [C]. Denver: University of Denver, 1971. 1. 3. 1—1. 3. 43.
- [6] Vaiddyanathan P V, Ramannathan A R. Computer-Aided Design of Explosive Welding System [J]. J Materials Processing Technology, 1993, 38: 501—516.
- [7] Krishnan J, Kakodkar A. An Explosive Investigation into Tube to Tuber-Plate Welding Using the Impactor Method [J]. J Materials Processing Technology, 1990, 22: 191—201.
- [8] Bahrani A S, Crossland B. Further Experiments on Explosive Welding and Cladding with Particular Reference to the Strength of the Bond [A]. (Applied Mechanics Convention), Proc Inst Mech Engrs [C]. 1966, 180(31): 31—46.
- [9] Meyer M D. Impact Welding Using Magnetically Driven Flyer Plates [A]. Proc 4th Int Conf of the Center for High Energy Forming [C]. Denver: University of Denver, 1973. 5. 3. 1—5. 3. 23.
- [10] Chandwick M D. Some Aspect of Explosive Welding in Different Geometries [A]. Proc of the Select Conf on Explosive Welding Institute [C]. 1968.
- [11] Zheng Y M. Explosive Welding and Metallic Composite and the Engineering Application [M]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University Press, 2002. 116. (in Chinese)
郑远谋. 爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用 [M]. 广州: 中山大学出版社, 2002. 116.
- [12] Rao C Q. Explosive Cladding of Thick Stainless Steel to Low-Carbon Steel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)
饶常清. 不锈钢/普碳钢厚板坯的爆炸复合 [D]. 南京: 南京理工大学, 2003.

Computer-Aided Design of Explosive Welding Parameter

WANG Tie-Fu

(National Key Laboratory of Transient Physics,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A computer-aided design program for explosive welding parameter was developed. Using Visual C++, it is convenient to import and export data by menu as well as visual operations. In comparison with the result of explosive welding test, it was shown that the optimum value of the parameter calculated with the CAD program was in agreement with the experimental result exactly. Using the CAD proposed here, it will be useful to both select the optimum parameter for explosive welding and reduce trial-and-error.

Key words: explosive; explosive welding; explosive cladding; computer-aided design