

文章编号: 1006-7051(2020)05-0001-13

# 双金属爆炸焊接参数设计理论

李晓杰, 王宇新, 王小红, 闫鸿浩

(1. 大连理工大学运载工程与力学学部工程力学系, 辽宁 大连 116024; 2. 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 针对爆炸焊接参数设计问题, 从爆炸焊接基本理论出发, 分步介绍了飞板爆轰驱动的理论 and 双金属爆炸焊接窗口理论。首先归纳总结了一维爆轰驱动飞板的终速公式, 并详细说明了其应用范围与原因。对于二维滑移爆轰驱动飞板问题, 主要针对 Richter 理论和特征线法进行了介绍, 并推导出新的近似计算公式。接着, 对于爆炸焊接参数窗口理论, 详细比较了以往传统单一金属爆炸焊接窗口理论与公式, 并针对部分已有公式进行了重新推导与修正, 重新界定了其适用范围。利用这些爆炸焊接窗口的基本理论, 作者对所发展的双金属可焊下限、双金属可焊上限、双金属流动限以及声速限构成的双金属爆炸焊接窗口理论进行了系统地介绍。最后, 以飞板爆轰驱动和爆炸焊接窗口构建成了整个爆炸焊接工艺技术参数设计理论, 并结合二元合金相图进行爆炸焊接设计, 针对调控原材料硬度的必要性、焊接界面波纹及气孔的控制方法等问题进行了讨论。

**关键词:** 爆炸焊接; 爆炸加工; 爆炸复合; 爆炸焊合; 爆炸焊接窗口

**中图分类号:** O389; TG456.6; TB41 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1006-7051.2020.05.001

## Theory on the design of bimetal explosive welding parameter

LI Xiao-jie, WANG Yu-xin, WANG Xiao-hong, YAN Hong-hao

(1. Department of Engineering Mechanics, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian 116024, Liaoning, China)

**Abstract:** Aiming at parameter design of explosive welding, the theory of detonation driving flyer and bimetal explosive welding window are introduced step by step based on the basic theory of explosive welding. First, the ultimate velocity formula of one dimensional detonation driven flyer plate is summarized, and its able range and reasons are explained in detail. Furthermore, Richter theory and characteristic method are mainly introduced for the problem of flyer driven by two-dimensional grazing detonation, and a new approximate calculation formula is derived also. Then, for the theory of explosive welding parameter window, the traditional single metal explosive welding window theory and formula are compared in detail, and some existing formulas are re-deduced and modified, and its application scope is defined again. Based on these basic theories of explosive welding windows, the author systematically introduced the theory of bimetal explosive welding window, which is composed of bimetal welding lower limit, bimetal welding upper limit, bimetal flow limit and sonic limit. Finally, the whole design theory of explosive welding process parameters is built up with detonation driven flyer and explosive welding window. In addition, explosive welding design based on binary alloy phase diagram, the necessity of controlling the hardness of processed metals, the method of controlling waves and pore defects of welding

**收稿日期:** 2020-07-05

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11672067, 12072067)

**作者简介:** 李晓杰(1963—), 男, 博士, 教授, 从事爆炸力学和特种爆破方面的研究。E-mail: robinli@dlut.edu.cn

interface are briefly discussed.

**Key words:** explosive welding; explosive working; explosion cladding; explosive bonding; explosive welding window

爆炸焊接 (Explosive Welding, Explosive Bonding), 又称爆炸复合 (Explosion Cladding), 是以炸药爆炸驱动金属板件之间产生高速斜碰撞, 金属之间产生冶金结合的特种焊接方法。爆炸焊接具有两大优点, 一是适于对金属材料进行大面积复合; 二是可以控制金属间反应, 焊合常规焊接方法无法焊接的异种金属。所以该技术已广泛用于制造各种爆炸金属包覆材料, 如: 各种包覆金属板、管、棒等, 也用于焊接异种金属接头, 以及快速焊接、极端环境下的快速密封等。近年以来, 爆炸焊接理论和产业技术都得到了长足的发展与进步, 计算机数值技术促进了理论的进步<sup>[1]</sup>。工业领域对金属复合材料的大量需求促进了产业发展, 目前我国爆炸金属复合材料年产量已达 60 余万吨, 近世界总产量的一半, 在化工设备、能源、铁路、冶金、矿山、舰船、航天、核工业等领域中得到广泛应用。

上世纪五六十年代爆炸焊接还只是作为爆炸加工的小分支, 之后开始逐渐显现其工业应用潜力。60 年代研究主要以试验研究和理论探索为主<sup>[2-3]</sup>, 至 80 年代爆炸焊接的基本理论构架已经出现。即借助军事上已有的研究成果, 研究和计算爆炸驱动飞板、飞管等元件的撞击速度、碰撞角度等; 参考射流破甲, 以爆炸力学、流体动力学的研究成果, 建立了“爆炸焊接参数窗口”初步理论<sup>[4-5]</sup>, 并逐步出版了爆炸焊接的专著<sup>[6-7]</sup>。自上世纪八九十年代起, 爆炸焊接技术进入高速发展时期, 理论成果也不断涌现, 从爆炸金属物理、爆炸焊接新方法、爆炸复合材料分析等诸多方面都有专著出版<sup>[8-18]</sup>。中国爆破行业协会组织了《爆破手册》编写<sup>[19]</sup>, 连续召开了第 125 场和第 188 场工程科技论坛<sup>[20-21]</sup>, 对我国近年来的爆炸加工科研成果进行总结交流, 集中展现了我国对爆炸焊接理论和工程技术的贡献。近年来, 作者通过对爆炸焊接“过熔”现象和双金属界面冲击塑性变形的理论研究, 将之前仅适于同种金属的爆炸焊接窗

口理论, 推广到了更适于实际的双金属范畴, 以爆炸焊接下限、上限、流动限和声速限构成了双金属爆炸焊接窗口理论<sup>[13-16]</sup>。再通过对爆炸焊接飞板的理论计算和数值计算, 逐步应用 C++ 和 OpenGL 研制开发了爆炸焊接 CAE 软件系统, 应用于爆炸焊接生产中。

## 1 爆炸焊接的基本原理

普通复合板爆炸焊接的平行布置形式如图 1 所示。放置在上方的金属板称之为覆板或飞板, 下方的称为基板。在覆板上敷设等厚的炸药, 基覆板之间用支撑物保持加速用的间隙 (架高或炸高)。当在左端起爆后, 炸药中的爆轰波以爆速  $v_d$  沿覆板传播。爆轰波所到之处, 爆轰高压驱动覆板弯折加速飞行, 直至与基板发生倾斜碰撞。高速倾斜碰撞会在基覆板表面产生喷离母材的金属微射流, 0.1%~1% 母材厚度的微射流会带走结合面上的污物与氧化物, 起到焊接必要的“自清理”条件; 再加之, 碰撞点高压、高应变率和大塑性应变造成热量沉积, 就使基覆板材间达到冶金结合, 形成爆炸焊接。爆炸焊接的必要条件就是产生微射流。这就要求基覆板的碰撞呈一定角度, 该角被称为碰撞角  $\beta$ , 覆板也必须被加速到一定碰撞速度  $v_p$ , 并且基覆板的碰撞点以一定速度移动, 称为碰撞点移动速度  $v_c$ ; 在如图 1 的平行爆炸焊接时,  $v_c$  等于炸药爆速  $v_d$ 。对于任意两种材料组合, 产生的焊接条件是  $\beta$ 、 $v_p$ 、 $v_c$  值达到固定的范围, 而根据滑移爆轰驱动飞板的几何关系, 有:

$$v_p = 2v_d \cdot \sin \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

产生焊接条件的  $\beta$ 、 $v_p$ 、 $v_c$  达到某固定值的条件, 就变成了  $\beta$ 、 $v_p$ 、 $v_c$  中任意两参数组合的平面条件, 在平面参数中构成的可焊接区就是“爆炸焊接参数窗口”。实验获得的 1Cr18Ni9Ti 与普通钢板的爆炸焊接窗口如图 2 所示。因此, 爆炸焊接参数设计就自然地分为两个部分:



药质量与飞板质量的比值 $[\text{=}(\rho_0\delta_0)/(\rho\delta)\text{=}(\text{炸药密度}\times\text{炸药厚度})/(\text{飞片密度}\times\text{飞片厚度})]$ ;  $v_{p\max}$  是飞片的最终抛掷速度; Gurney 公式中的  $E_g$  被称为格尼能。

表 1 一维爆轰驱动飞片终速计算公式汇总

Table 1 Calculation formulas for ultimate velocity of flyer driven by one dimensional detonation

名称	公式	起爆形式
Gurney 公式	$v_{p\max} = \sqrt{2E_g} \left[ \frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R} \right]^{\frac{1}{2}}$	等容
Gurney 推广	$\frac{v_{p\max}}{v_d} = \frac{1}{\sqrt{k^2-1}} \left[ \frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R} \right]^{\frac{1}{2}}$	等容
谭-孙公式	$\frac{v_{p\max}}{v_d} = \sqrt{\frac{3}{k^2-1}} \frac{18+12R+R^2-6\sqrt{9+12R+2R^2}}{R^2+6R}$	等容
Aziz 公式	$\frac{v_{p\max}}{v_d} = \frac{\sqrt{1+32R/27}-1}{\sqrt{1+32R/27}+1}$	上端 $k=3.0$
Deribas 公式	$\frac{v_{p\max}}{v_d} = 1.2 \frac{\sqrt{1+32R/27}-1}{\sqrt{1+32R/27}+1}$	上端 $k\approx 2.6$
Aziz 推广	$\frac{v_{p\max}}{v_d} = \frac{4}{\sqrt{2(k^2-1)}} \frac{\sqrt{1+32R/27}-1}{\sqrt{1+32R/27}+1}$	上端

Gurney 公式是 1943 年 R. W. Gurney 在研究弹壳爆炸时用最简单的一维膨胀力学模型推导出,对于任何炸药的计算都必须先确定其 Gurney 能,高能炸药的  $E_g$  接近爆热,工业炸药的  $E_g$  远小于爆热,需要专门测定。Gurney 能是军事上评定炸药抛掷弹片能力的指标,可查阅相关资料获得。表中的 Gurney 推广公式是用形式爆热  $Q_v = v_d^2 / \sqrt{2(k^2-1)}$  取代了 Gurney 能,计算相对方便得多。谭-孙公式是用  $k=3$  等容爆轰得到的一维解析解<sup>[24]</sup>,经乘  $k$  值修正因子  $4/\sqrt{2(k^2-1)}$  推广得到的。Aziz 公式是基于  $k=3$  的单面(平面)起爆炸药得到的理论解。Deribas 公式是 Aziz 公式的推广,在俄文爆炸焊接文献中使用较广,Deribas 公式是在当时对工业炸药  $k$  值变化不甚了解时采用的,事实上只适于  $k$  值在 2.6 左右的情况。Aziz 推广公式是在原公式上乘以炸药  $k$  值修正因子  $4/\sqrt{2(k^2-1)}$  得到的。实际上,只有在质量比  $R$  较大时,飞板的最终速度才与驱动形式相关。在质量比  $R$  小于 3 时,各种一维爆轰驱动形式的计算结果相差不大;甚至于在炸药  $k$  值大于 2 时,一维爆轰驱动模型的终速计算结果与二模型的误差会在 15% 以内;当  $k$  值小于 2 时,误差相对较大。由于爆炸焊接时质量比  $R$  很少会大于 3,

所以可以用表 1 中的计算公式估算飞板终速  $v_{p\max}$ ,进而使用 Taylor 公式(1)计算最大抛掷角  $\beta_m$ 。

## 2.2 滑移爆轰驱动飞板的二维理论

二维滑移爆轰驱动飞板的计算方法很多,有简化的列契脱(Richter)模型、特征线差分方法和大型弹塑性流体程序数值模拟。对于如图 1 平板爆炸焊接可以简化成图 3 的二维滑移爆轰驱动飞板模型。图 3 是将动坐标系放置在爆轰波头上获得,在动坐标系中,炸药与飞板就会以与爆速  $v_d$  相同稳定的速度,流经爆轰波面处。炸药在流经驻定的爆轰波后,发生爆轰、膨胀;飞板流过爆轰波平面后,在爆轰压力作用下逐渐发生转向弯曲,Richter 假定飞板上所承受的爆炸压力  $p$  与抛掷角  $\beta$  始终呈简单的线性关系  $p/p_H = 1 - \beta/\beta_m$ ,可从飞板运动微分方程求出了如下积分公式

$$\begin{cases} \frac{x}{\delta_0} = (k+1) \frac{\beta_m}{R} \cdot \int_0^\beta \frac{\cos \beta}{\beta_m - \beta} d\beta \\ \frac{y}{\delta_0} = (k+1) \frac{\beta_m}{R} \cdot \int_0^\beta \frac{\sin \beta}{\beta_m - \beta} d\beta \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\delta_0$  为炸药厚度; $x$  为飞板的水平坐标; $y$  为飞板向下抛掷的距离,即实际爆炸焊接中的炸高。Richter 公式本质上是在  $0\sim\beta_m$  间找到了抛掷角  $\beta$

与  $x, y$  坐标的插值表达式。由于不知道  $\beta_m$ , 所以 Richter 又单独提出了最大抛掷角的经验公式

$$\frac{1}{\beta_m} = b + \frac{c}{R} \quad (5)$$

式中:  $b, c$  为炸药性能的常数, 是  $k$  值的函数。一般  $b, c$  系数可以通过爆炸实验确定, 也可以用以下经验公式计算

$$\begin{cases} b = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot (1 - \sqrt{1 - k^{-2}})^{-\frac{1}{2}} \\ c = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{1 - k^{-2}} \cdot (1 - \sqrt{1 - k^{-2}})^{-\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)在  $k = 2.5 \sim 3.2, R \leq 2$  范围内有较好的计算精度。在  $k \geq 2$  和  $R \leq 3$  时, 也可以用一维公式估算最大抛掷角  $\beta_m$ , 直接代入到式(4)中积分求解出  $x, y$  与  $\beta$  的关系, 可得到整个飞板的加速过程。

由于  $k$  值小于 2 时一维公式和 Richter 公式计算误差较大, 而且 Richter 假设的  $\frac{p}{p_H} = 1 - \frac{\beta}{\beta_m}$  线性关系, 也不是真实的压力分布, 飞板加速区的误差较大, 所以更精确的设计需要采用可压缩流体动力学二维超声速定常流的特征线解法。对图 3 模型编制特征线差分程序, 以计算机模拟飞板的抛掷过程, 特征线差分网格如图 4 所示, 用特征线差分方法计算的飞板抛掷角与炸高  $y$  的关系如图 5 所示。对  $0.25 \leq R \leq 1.5, 1.6 \leq k \leq 3.2$  范围内的飞板姿态, 作者对特征线差分计算结果拟合、整理得到经验公式如下:

$$\begin{cases} \frac{y}{\delta_0} = \frac{(k+1)\beta_m}{R} \left[ \frac{\beta^3}{18} + \frac{\beta_m \beta^2}{12} + (\beta_m^2 - 1)\beta + \left( \frac{\beta_m^3}{6} - \beta_m \right) \cdot \ln \left( 1 - \frac{\beta}{\beta_m} \right) \right] \\ 1/\beta_m = 0.5634k + 0.4509 + (1.0785k - 0.2598)/R \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中抛掷角  $\beta$  的单位取弧度。式(7)是将 Richter 的积分关系进行 Taylor 展开得到的, 是  $\beta$  的四阶精度, 公式计算值与程序解的误差小于  $\pm 6\%$ , 平均误差在  $\pm 3\%$  左右, 完全可以满足常规工程需求, 更高精度要求时, 则需采用计算机程序模拟计算。

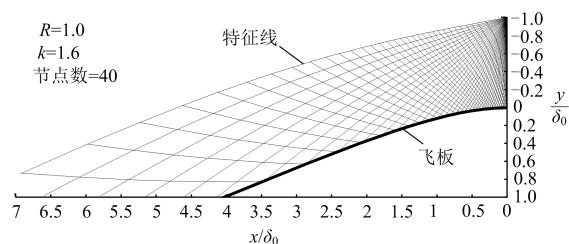


图 4 飞板抛掷的特征线差分网格

Fig. 4 Characteristic differential grid of flyer plate driven by detonation

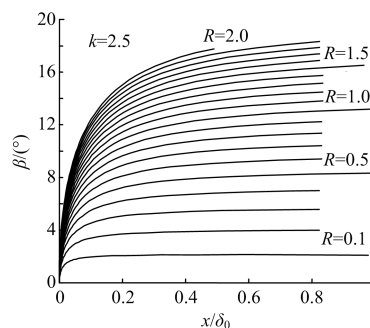


图 5 特征线计算的飞板动态抛掷角

Fig. 5 Dynamic driven angles of flyer plate calculated by characteristic method

### 3 爆炸焊接参数窗口理论

如前所述, 在确定飞板速度之后, 爆炸焊接的另一项重要工作就是如何确定爆炸焊接参数窗口。通常可以通过爆炸焊接实验获得, 也可以通过理论分析进行估算。较为普遍的研究结果认为, 爆炸焊接理论窗口可用如图 6 中的四条边界限定, 即: ①焊接下限 (Low Limit): 基覆板间的碰撞速度  $v_p$  必须大于最小速度值  $v_{p, \min}$ , 以形成焊接微射流。②流动限 (Flowing Limit): 碰撞点速度  $v_c$  必须超过一定值  $v_{c, \min}$ , 否则也不会产生微射流。③声速限 (Sonic Limit): 保证爆炸焊接的碰撞流动是在能形成射流的亚声速状态。④焊接上限 (Upper Limit): 是对焊接界面最大能量的限制。当碰撞动能过大时, 焊接界面处沉积的热量过高。在冲击压力卸载后, 界面仍处于热软化或熔化状态, 会造成焊接“过熔”失效。

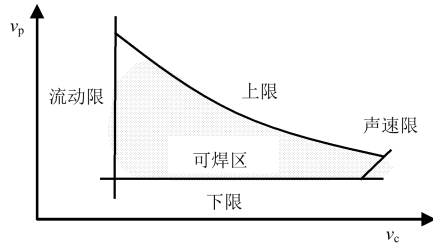


图 6 爆炸焊接参数窗口与理论边界限

Fig. 6 Explosive welding parameter window and theoretical boundary limits

### 3.1 爆炸焊接下限

早期爆炸焊接研究就提出过各种可焊下限的理论公式,但得到广泛应用的是 1971 年 Deribas 等提出的焊接下限公式

$$\beta = K \sqrt{HV / (\rho v_i^2)} \quad (8)$$

式中: $HV$  为维氏硬度; $\rho$  为金属密度; $v_i$  为金属覆板流进碰撞点的速度,在平行焊接时等于爆速  $v_d$  和  $v_e$ ;  $K$  为经验系数,Deribas 推荐取 1.14。实践证明, $K$  的大小取决于被焊金属表面粗糙度与射

流厚度的比值,对表面处理很好的基覆板可取  $K=0.6$ ;在厚板焊接时,较厚的射流可以减小表面粗糙度的影响,也可取  $K=0.6$ 。用  $\beta$  小角度近似处理 Taylor 公式 (1) 成为  $v_p = 2v_d \sin(\beta/2) \approx v_i \beta$ ,就可将 Deribas 公式改写为完全由焊接金属的物理性能参数表示的下限公式

$$v_{p \min} = K \sqrt{HV / \rho} \quad (9)$$

对于大多数金属维氏硬度  $HV$  与布氏硬度  $HB$  相差不大,一些黑色金属的  $HV$  约为  $(2.8 \sim 3.0)R_m$  (抗拉强度),所以在缺少  $HV$  数据时也可以用布氏硬度  $HB$  或简单取  $(2.8 \sim 3.0)R_m$  代替。在取  $HV = (2.8 \sim 3.0)R_m$  且取  $K=0.6$  时,还可以得到用抗拉强度表示的下限:

$$v_{p \min} \approx \sqrt{R_m / \rho} \quad (10)$$

一些金属材料的性能参数和用式 (9) 计算的焊接下限如表 2 所示, $v_{p \min}$  与实验相符的很好,表中  $p_{\min}$  是对应的界面最小正碰撞压力,用冲击波关系导出的公式  $p_{\min} = \rho (C_0 + \lambda v_{p \min} / 2) \cdot v_{p \min} / 2$  计算得到。

表 2 部分金属的物理性能与爆炸焊接下限

Table 2 Physical properties and explosive welding lower limit of partial metals

材质	状态	密度 $\rho /$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$HV^{1)}$ / MPa	$v_{p \min} /$ ( $km \cdot s^{-1}$ )	$C_0^{2)}$ / ( $km \cdot s^{-1}$ )	$\lambda^{2)}$	$p_{\min} /$ GPa	$v_{p \min}^{3)}$ / ( $km \cdot s^{-1}$ )
纯铝	供态	2.71	270	0.189	5.392	1.341	1.417	0.132
纯铝	硬态	2.71	366	0.220	5.392	1.341	1.656	0.179
LY12 铝合金	硬态	2.79	1 098	0.377	5.328	1.338	2.927	0.528
纯钛	供态	4.51	1 600	0.357	4.695	1.146	3.949	0.540
纯钛	硬态	4.51	2 323	0.431	4.695	1.146	4.799	0.784
1Cr18Ni9Ti	供态	7.90	1 960	0.299	4.580	1.490	5.669	0.387
20 号钢	退火	7.85	1 010	0.215	4.595	0.454	3.923	0.200
20 号钢	硬态	7.85	1 539	0.266	4.595	0.454	4.854	0.305
16Mn 钢	正火	7.85	1 137	0.228	4.595	0.454	4.165	0.225
16Mn 钢	硬态	7.85	1 754	0.284	4.595	0.454	5.187	0.347
镍及合金	退火	8.88	1 100	0.211	4.590	1.440	4.445	0.193
镍及合金	硬态	8.88	1 509	0.247	4.590	1.440	5.235	0.264
紫铜	供态	8.93	588	0.154	3.910	1.510	2.768	0.120
紫铜	硬态	8.93	833	0.183	3.910	1.510	3.312	0.170
纯金	退火	19.30	250	0.068	3.070	1.540	2.058	0.030
纯金	硬态	19.30	600	0.106	3.070	1.540	3.217	0.072
纯银	退火	10.50	320	0.105	3.270	1.550	1.843	0.067
纯银	硬态	10.50	880	0.174	3.270	1.550	3.105	0.183

注: 1): 为了计算量纲统一,表中将常用的硬度  $HV$  单位  $kg/mm^2$  转换为 MPa 单位。2):  $C_0$  和  $\lambda$  是金属中冲击波关系式  $D=C_0+\lambda u$  中的系数,一般  $C_0$  为体波声速。3): 公式(11)计算的单金属下限。

尽管式(9)和式(10)计算较为准确,但只能用于单一金属。而爆炸焊接主要是进行双金属焊

接,即使进行同种金属焊接,基覆板的强度、硬度等性能也不尽相同。因此人们一直在进行双金属

焊接下限研究。文献[5]曾提出一种由金属界面正冲击压力推出的双金属的下限,但其公式推导过程发生了错误,作者修正后的公式推导如下,即在弹性近似下,有

$$p \approx \rho_1 C_{01} u_1 \approx \rho_2 C_{02} u_2 \Rightarrow v_p = u_1 + u_2 = p [(\rho_1 C_{01})^{-1} + (\rho_2 C_{02})^{-1}] \quad (11)$$

在取界面压力为抗拉强度的 10 倍后,可得:

$$v_{p \min}^{\text{Bi}} = 10 R m_1 [(\rho_1 C_{01})^{-1} + (\rho_2 C_{02})^{-1}] \quad (12)$$

使用上式计算对于钢、镍、铜有一定的精度,对于其他材料误差较大(见表 2)。为此,作者通过运用式(9)计算的单金属下限速度  $v_{p \min}$ ,再以  $v_{p \min}$  计算出该金属界面最小碰撞正压力  $p_{\min}$ ,作为双金属同时产生射流的判断条件,得到如下双金属可焊下限公式<sup>[13,15,19]</sup>:

$$p_{\min} = \max(p_{\min 1}, p_{\min 2})$$

$$u_1 = \frac{C_{01}}{2\lambda_1} [\sqrt{1 + 4\lambda_1 p_{\min} / (\rho C_{01}^2)} - 1]$$

$$u_2 = \frac{C_{02}}{2\lambda_2} [\sqrt{1 + 4\lambda_2 p_{\min} / (\rho C_{02}^2)} - 1]$$

$$v_{p \min}^{\text{Bi}} = u_1 + u_2 \quad (13)$$

式中: $p_{\min}, u, C_0, \lambda$ 的下标 1,2 分别代表两种金属的相应参数; $u$  为金属碰撞后相对界面的垂向质点速度。

按式(13)计算出的部分双金属爆炸焊接下限如表 3 所示。表中纵横栏交叉点的数据即是两种金属的爆炸焊接下限,表中已经将  $v_p$  速度的单位转换成为 m/s。例如:要查找 LY12 铝合金和退火态 20 号钢的焊接下限,在表纵向栏中找到“LY12 铝合金”,然后沿横向栏找到“20 号钢”和“退火态”,两者交叉的格中显示这两种金属间的可焊速度下限  $v_{p \min}$  为 356 m/s,而实验值在 340 m/s 左右。

表 3 部分金属组合的爆炸焊接下限

Table 3 Explosive welding lower limit of bimetallic pairs

材质	(m/s)																		
	纯银	纯银	纯金	纯金	紫铜	紫铜	镍及合金	镍及合金	16Mn 钢	16Mn 钢	20 号钢	20 号钢	1Cr18Ni9Ti	纯钛	纯钛	LY12 铝合金	纯铝	纯铝	
	硬态	退火	硬态	退火	硬态	供态	硬态	退火	硬态	正火	硬态	退火	供态	硬态	供态	硬态	硬态	供态	
纯铝	供态	289	175	262	170	306	258	454	389	470	381	441	360	505	520	432	379	220	189
纯铝	硬态	289	175	262	170	306	258	454	389	470	381	441	360	505	520	432	379	220	
LY12 铝合金	硬态	286	270	259	237	304	270	450	386	465	377	437	356	501	516	429	377		
纯钛	供态	288	288	243	243	287	287	358	306	374	302	351	287	402	431	357			
纯钛	硬态	347	347	293	293	346	346	358	329	374	347	351	347	402	431				
1Cr18Ni9Ti	供态	303	303	241	241	303	303	283	283	304	304	304	304	299					
20 号钢	退火	216	216	172	172	215	215	267	227	284	228	266	215						
20 号钢	硬态	266	266	212	212	265	265	267	248	284	266	266							
16Mn 钢	正火	229	229	182	182	228	228	267	227	284	228								
16Mn 钢	硬态	283	283	226	226	283	283	267	264	284									
镍及合金	退火	228	228	178	178	227	227	247	211										
镍及合金	硬态	267	267	208	208	266	266	247											
紫铜	供态	173	155	142	123	183	154												
紫铜	硬态	184	184	146	146	183													
纯金	退火	138	92	106	68														
纯金	硬态	143	143	106															
纯银	退火	174	105																
纯银	硬态	174																	

### 3.2 爆炸焊接流动限

Cowan(1971 年)在研究爆炸焊接界面卡门涡街成波机理时,由雷诺数  $Re$  定义了双金属的成波限<sup>[25]</sup>

$$v_{\text{ccr}} = [2Re(HV_1 + HV_2) / (\rho_1 + \rho_2)]^{1/2} \quad (14)$$

雷诺数  $Re$  取值为 8~13。上式在国外文献中

应用很广,但作为  $v_c$  下限式(14)计算值明显偏大。究其原因是卡门涡街成波机理是针对粘性流体性质的描述,因此对低  $v_c$  材料强度作用明显的邻近下限焊接段明显不适用。由于是针对流体模型描述,则式(14)可作为高  $v_c$  可忽略材料强度效应

的爆炸焊接界面成波范围的判断式。

作为爆炸焊接的流动限应是碰撞射流刚产生的条件,是理论驻点压力( $p_c = \frac{\rho v_c^2}{2}$ )须要远大于材料强度,以使材料在射流区达到流动状态。流动状态的驻点压力应大于材料静强度  $R_m$  的 10 倍,于是单一金属的流动限表示为

$$\frac{\rho v_c^2}{2} \geq 10R_m \text{ 或 } v_{c \min} = \sqrt{20R_m/\rho} \quad (15)$$

对于双金属情况,驻点压力由密度低的一方决定,焊接要求驻点压力必须大于强度高的一方。以此作为判断条件,求出表 3 的金属材料在相应  $R_m$  强度级限制下流体流动限,公式如下<sup>[15,19]</sup>:

表 4 部分金属的爆炸焊接流动限

Table 4 Explosive welding flowing limit of partial metals

强度级 $R_m/\text{MPa}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	
驻点压力 $p_c/\text{GPa}$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	
材料 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	流动限值 $v_{c \min}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$										
镁 Mg	1.74	1 072	1 516	1 857	2 144	2 397	2 626	2 837	3 032	3 216	3 390
铝 Al	2.70	861	1 217	1 491	1 721	1 925	2 108	2 277	2 434	2 582	2 722
钛 Ti	4.50	667	943	1 155	1 333	1 491	1 633	1 764	1 886	2 000	2 108
铁 Fe	7.85	505	714	874	1 010	1 129	1 236	1 335	1 428	1 514	1 596
镍 Ni	8.87	475	672	822	950	1 062	1 163	1 256	1 343	1 425	1 502
铜 Cu	8.93	473	669	820	946	1 058	1 159	1 252	1 339	1 420	1 497
银 Ag	10.50	436	617	756	873	976	1 069	1 155	1 234	1 309	1 380
金 Au	19.30	322	455	558	644	720	789	852	911	966	1 018

### 3.3 爆炸焊接声速限

随  $v_c$  升高,碰撞角  $\beta$  变小,基覆板碰撞会进入一种超声速状态,两板间直接发生“弹性”碰撞。对于理论声速限,可以通过建立碰撞模型,求取金属中的冲击波速度<sup>[26]</sup>。但由于通常材料  $v_c$  声速限都比较高,工程上可以简单地认为使  $v_c$  小于材料声速即可。对于双金属取最小声速作为对  $v_c$  的限制,双金属声速限公式如下<sup>[15,19]</sup>:

$$v_{c \max} = \min(C_{01}, C_{02}) \quad (17)$$

式中:基覆板材料体的波声速  $C_{01}, C_{02}$  可以在表 2 或资料中查到。由于大部分材料声速都在 4~5 km/s 左右,所以在爆炸焊接生产中超过声速限的情况很少;只有在焊接低声速的铅合金(声速在 2 km/s 左右)这类材料时,才会考虑声速限的影响。

### 3.4 爆炸焊接上限

当飞板速度或飞板厚度过大时,所携带动能过大,消耗沉积在焊接界面的能量过高,基覆板碰

$$p_c = \rho_{\min} v_c^2 / 2 \geq 10R_{m_{\max}} \rightarrow$$

$$v_{c \min} = \sqrt{20 \cdot R_{m_{\max}} / \rho_{\min}} \quad (16)$$

式中: $\rho_{\min}$  为两金属中的最小密度; $R_{m_{\max}}$  是两金属中的最高强度。

由式(16)计算出的双金属流动限如表 4 所示。可见只有低密度材料与高强度材料爆炸焊接时,或低密度材料自身强度很高时,才会对爆速下限产生实际的限制。比如:对铝材进行爆炸焊接时,应该注意两种被焊材料的强度级,如果铝材与 700 MPa 强度级的钢焊接,爆速下限不低于 2 277 m/s;铝材与同样强度级的铝合金、钛合金焊接时爆速也不应低于该值。

撞界面的压力卸载到很小甚至到拉伸状态时,界面依然处于熔化状态或热软化极低强度状态,界面就会被拉开,开裂的界面上有明显的熔化迹象,即是发生了所谓的“过熔”失效。这一点对于低熔点金属和厚板爆炸焊接时非常重要。

Wittman(1973 年)<sup>[27]</sup>提出了如下的爆炸焊接上限公式\*

$$v_{p \max} = \frac{1}{N_w} \left( \frac{T_m C_0}{v_c} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\lambda C_p}{\rho h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (18)$$

式中: $T_m$  为金属熔点; $\lambda$  为导热系数; $C_p$  为热容量; $h$  为覆板厚度; $N_w$  为常数,约取 0.1。

注:原公式为  $v_{p \max} = \frac{1}{N_w} \left( \frac{T_m C_0}{v_c} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\lambda C_0 C_p}{\rho h} \right)^{\frac{1}{4}}$ , 量纲有误。

式(18)说明了焊接上限与金属熔点、热性能有关, $v_c$  越大上限越低, $h$  越大上限越低。但式(18)并没有考虑基板的影响。张凯(1987 年)<sup>[27]</sup>

又提出了考虑基板影响的上限公式

$$v_{p \max} = \frac{4}{N^{\frac{1}{2}} v_c} \left[ \frac{\pi \lambda C_0^4 C_p (T_m - T_0)^2}{\rho_1 h_1 C_1} \left( \frac{h_1 + h_2}{h_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (19)$$

式中:下标 1 和 2 分别对应为覆板和基板的参数,  $N$  仍为与材料无关的常数,取 0.039。

对于双金属爆炸焊接情况,作者通过推导双金属界面热传导理论解,再对焊接的动力学过程、沉能过程、传热过程进行分析,并设焊接界面沉积热能  $Q$  是射流能量  $E_j$  的函数

$$Q = N (v_c / C_*)^n \cdot E_j \quad (20)$$

式中: $C_*$  为与基覆板声速有关的参考声速,可认为是两者小者; $N$  为界面沉积能量比例系数; $n$  为界面沉积能量的指数。

最后经过推导,可得到如下的双金属爆炸焊接上限公式<sup>[14,15,19]</sup>

$$v_{p \max} = \left\{ \frac{8\sqrt{2\pi}}{N} \left[ 1 + \left( \frac{\rho_2 C_{p2} \lambda_2}{\rho_1 C_{p1} \lambda_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + \frac{\rho_1 h_1}{\rho_2 h_2})^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \min(1, \frac{C_{01} h_2}{C_{02} h_1}) \right]^{\frac{1}{4}} \cdot \left( \frac{C_*}{v_c} \right)^{\frac{n}{2}} \cdot \left[ \frac{C_{p1} \lambda_1 (T_{m \min} - T_0)^2}{h_1 \rho_1 C_{01}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (21)$$

由式(20)可见,Wittman 式(18)是取  $n=1$  的上限表达式,且不考虑基板厚度影响的结果;式(19)是同种材料考虑基板厚度影响,且取  $n=2$  的结果。由于在上限附近进行爆炸焊接时,界面材料处于熔化状态,这时以粘性流体描述较为合理,故应取  $n=2$ 。从双金属上限式(21)中还可见,界面熔点取  $T_{m \min}$  即是两材料的二元合金相图中最低熔点。

由于式(21)中含大量的物性数据,公式十分复杂,为适于工程应用,作者将其简化为如下形式:

$$v_{p \max} = \frac{f}{v_c} \left( 1 + \frac{\rho_1 h_1}{\rho_2 h_2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \min(1, \frac{h_2 C_{01}}{h_1 C_{02}}) / h_1 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (22)$$

式中: $f$  是与两金属对的物性相关常数,量纲为

$L^{\frac{9}{4}} T^{-2}$  ( $L$  为长度,  $T$  为时间)。 $f$  值作为经验量必须通过爆炸焊接实验数据进行拟合。

从理论上,使用式(22)只需要以一次爆炸焊接上限试验即可确定该双金属对的  $f$  值,进而预测其他爆炸参数与厚度的可焊上限。但实际的双金属可焊上限不仅受式中所涉及参数的影响,界面的打磨状态、焊接长度上射流堆积与燃烧、界面化学反应的放热、材料的软硬化状态等都对  $f$  值有影响。所以实际使用双金属上限公式(22)时,要根据双金属中多个“过熔”开裂参数共同拟合  $f$  值,才能得到较精确的焊接上限。如下的式(23)、(24)即是用上述理论结合试验结果得到的纯铝、纯铜与普通低碳钢的可焊上限。

铝钢上限:

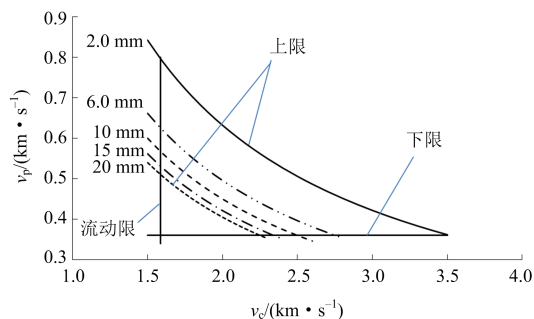
$$v_{p \max} = \frac{1.478}{v_c} (1 + 0.344 \frac{h_{Al}}{h_{Fe}})^{\frac{1}{4}} \cdot \left[ \min(1, 1.174 \frac{h_{Fe}}{h_{Al}}) / h_{Al} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (23)$$

铜钢上限:

$$v_{p \max} = \frac{2.014}{v_c} (1 + 1.138 \frac{h_{Cu}}{h_{Fe}})^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \min(1, 0.848 \frac{h_{Fe}}{h_{Cu}}) / h_{Cu} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (24)$$

式中:速度单位为 km/s,厚度单位为 mm。

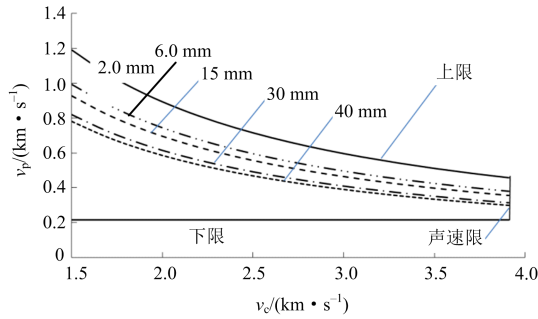
用以上双金属爆炸焊接窗口理论和实验参数绘制的纯铝、纯铜与普通低碳钢的爆炸焊接窗口分别如图 7 和图 8 所示。



注:上限数据为铝板厚度,普碳钢厚度为 20 mm。

图 7 纯铝与普碳钢的爆炸焊接窗口

Fig. 7 Explosive welding window of pure aluminum and mild steel



注:上限数据为铜板厚度,普碳钢厚度为 20 mm。

图 8 纯铜与普碳钢的爆炸焊接窗口

Fig. 8 Explosive welding window of pure copper and mild steel

## 4 爆炸焊接参数设计的其他问题

### 4.1 二元合金相图

由双金属爆炸焊接上限公式(21)可见,界面熔点  $T_{m \min}$  取两种被焊材料在二元合金相图中最低熔点,这就说低熔点或共熔点低材料爆炸焊接的上限较低。可焊上限的限制不只是说明铅、锌这类低熔点材料难于爆炸焊接,更应该注意在合金相图中的共熔点。以常用的钛钢爆炸焊接为例,铁的熔点是  $1583^{\circ}\text{C}$ ,钛的熔点是  $1670^{\circ}\text{C}$ ,可两者的最低共熔点温度只有  $1085^{\circ}\text{C}$ (见图 9),因此可焊上限式(21)的  $T_{m \min}$  应取最低共熔点的  $1085^{\circ}\text{C}$ 。对于铜铝,铜熔点为  $1085^{\circ}\text{C}$ ,铝为  $660^{\circ}\text{C}$ ,最低共熔点温度只有  $548^{\circ}\text{C}$ 。

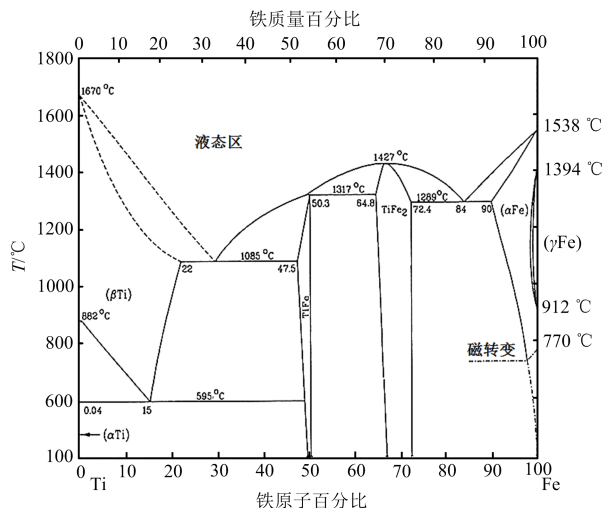


图 9 Ti-Fe 二元合金相图

Fig. 9 Phase diagram of Ti-Fe binary alloys

还应注意这类材料的相图中会含有多种金属间化合物,焊接界面产生大量的金属间化合物会释放化学反应热,也会造成焊接界面脆性化,这些都使焊接上限下降。再者,焊接界面过多的脆性金属间化合物还会影响后续热处理,在热处理时成为金属间化合物增多和长大的晶核,造成结合界面进一步脆性化<sup>[12,28]</sup>。

常用的钛钢、钛铜、锆钢、高强度铝合金与钢等都不同程度存在上述问题。因此,在爆炸焊接时参考合金相图是非常必要的,不仅是确定爆炸焊参数,确定热处理制度,还可以选择材料的过渡层。如:根据材料使用条件开发铝合金-纯铝-钢、纯铝-钛-钢、铝合金-纯铝-钛-镍-钢复合过渡接头等。

### 4.2 爆炸焊接原材料硬度

在实际生产中,爆炸焊接所采用的原材料往往是不同加工和热处理状态的,化学成分也在许可范围内浮动。化学成分变化与加工、热处理状态不同都使材料的机械力学性能发生很大的变化,而机械力学性能对爆炸焊接影响非常大。所以要制造优质的爆炸复合材料,就必须对原材料的机械力学性能有所了解 and 掌控。

在焊接上限式(21)中还含有常数  $N$ ,由式(20)可知, $N$  是界面沉积能量比例系数。由于材料强度越高,界面沉积能量也越大,所以  $N$  值其实并不是常数,其取值应与材料强度  $R_m$  或硬度  $HV$  正相关。这意味着,材料强度、硬度越高,可焊上限也越低。另外,从焊接下限式(9)、式(10)可知,材料强度  $R_m$  和硬度  $HV$  越高可焊下限也越高。所以爆炸焊接的原材料强度  $R_m$  和硬度  $HV$  升高,会使下限上升、上限下降,缩小可焊窗口的范围。对于易产生脆性金属间化合物的组合,再加之原材料的  $R_m$  和  $HV$  很高时,会影响爆炸焊接界面的结合强度,尤其是界面韧性,甚至会造成爆炸焊接及后续加工的失效。

所以在爆炸焊接生产中要严格地对原材料的机械力学性能进行分析与掌控,除了标准要求的复检项目外,应加强对原材料硬度的检验,掌控其

硬度范围和均匀性,可防止爆炸焊接次品的产生。对硬度值过高或硬度很不均匀的基覆板原料,应及时更换或采取必要的热处理措施调整其力学性能。

### 4.3 爆炸焊接界面波的控制

爆炸焊接界面波是其独有的特征所在,适当的小波纹也是优质复合界面的特征。对于爆炸焊接界面波的形成机理人们进行持久的研究。最初提出了刻入机理、“Karman 涡街”、“Helmholtz 失稳”和应力波机理。近年来,数值模拟计算与实验相结合使界面波的规律越来越清晰<sup>[29-30]</sup>。在实际生产中,对于相容性较好的复合板,爆炸焊接时容易出现界面大波纹问题。过大的界面波纹一则会影响复合板复层的腐蚀裕量;二则很多大波纹的波峰后方会存在有旋涡(见图 10),旋涡内还含有铸造组织、夹杂、氧化物和气孔,会使界面强度下降;对于复合层垂向( $z$  向)承载的复合工件、动载复合件、密封复合件和高质量要求复合产品等,这些界面焊接缺陷会影响其综合性能。因此,对于优质的爆炸复合材料应在焊接参数设计时就考虑界面波纹的大小和形态。

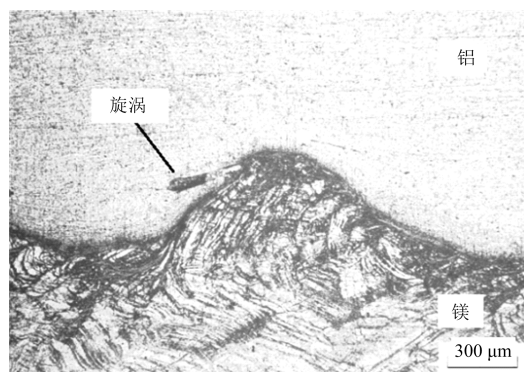


图 10 铝-镁合金爆炸焊接界面波

Fig. 10 Interface wave of Al-Mg alloys explosive welding

Cowan 所提出的由雷诺数  $Re$  定义的公式(14),作为双金属的成波限制有一定的精度。但控制无气孔的雷诺数  $Re$  取值范围应是  $3.6 \sim 25$ ,  $Re = 8 \sim 13$  是较优质界面波纹的区域。

另外的成波控制方法是利用比强度定义的式(16),界面无气孔波纹的范围应取驻点压力为  $10 \sim 70$  倍材料强度:

$$10 \leq \frac{\rho_{\min} v_c^2}{(2R_{m_{\max}})} \leq 70 \quad (25)$$

优质波纹区域范围与公式(14)相近,应取  $10 \sim 50$  倍比强度:

$$10 \leq \frac{\rho_{\min} v_c^2}{(2R_{m_{\max}})} \leq 50 \quad (26)$$

所以控制爆炸焊接界面波纹大小时,可选择式(14)、(25)、(26)计算  $v_c$  的最优取值范围后,再靠近爆炸焊接下限选取  $v_p$  即可。

## 5 结语

从爆炸焊接参数设计的爆轰驱动飞板计算和双金属爆炸焊接窗口理论两方面,作者对前人的工作进行了归纳总结与修正,并详细说明了其适用范围及原因。之后,还针对结合二元合金相图进行爆炸焊接设计、控制焊接界面波纹及气孔的方法、控制原材料硬度必要性等问题进行了必要的探讨。在爆炸焊接参数设计中应注意如下问题。

1) 由于等容和端部起爆的压力与滑移爆轰不同,一维爆轰模型计算的加速过程不能用于二维爆炸焊接计算,只能使用其终速公式。

2) Richter 理论和特征线法计算二维滑移爆轰驱动飞板的加速过程均有一定的精度,Richter 终速公式(5)的适用范围是  $k = 2.5 \sim 3.2$ ,  $R \leq 2$ 。

3) 爆炸焊接参数的理论窗口可由双金属可焊下限、双金属可焊上限、双金属流动限以及声速限构成。

4) 根据合金相图对于爆炸焊接设计十分必要,不仅是确定爆炸焊接参数,制定热处理制度,还可以选择过渡层材料。

5) 爆炸焊接中材料硬度上升会缩小可焊窗口范围,增加焊接界面的热量沉积,使焊接质量下降。在实际生产中,应加强对原材料硬度的检验,对于偏硬的原材料应在焊前进行热处理调整其力学性能。

6) 过大的界面波纹会影响复合板复合层的腐蚀裕量,波峰后旋涡中心会含有夹杂、氧化物和气孔的焊接缺陷,难以满足对高质量复合产品要求。

消除波峰后旋涡中心缺陷的方法是在 10~50 倍比强度的低  $v_c$  段,靠近可焊下限选择爆炸焊接参数。

### 参考文献(References):

- [1] 张勇,李晓杰,张越举. 爆炸加工的历史、现状及其未来发展[C]//刘殿书. 中国爆破新技术 II. 北京:冶金工业出版社,2008:17-22.  
ZHANG Y, LI X J, ZHANG Y J. The history, present and trend of explosive working industry[C]//LIU D S. New technology of blasting engineering in China II. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008:17-22.
- [2] RINEHART J S, PEARSON J. Explosive working of metals [M]. London: Pergamon Press Ltd., 1963: 305-313.
- [3] 《高能成形》编写小组. 高能成形[M]. 北京:国防工业出版社, 1969:228-245.  
*High energy forming* authoring group. High energy forming [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1969 :228-245.
- [4] 郑哲敏,杨振声. 爆炸加工[M]. 北京:国防工业出版社, 1981:324-496.  
ZENG Z M, YANG Z S. Explosive working[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981: 324-496.
- [5] BLAZYNSKI T Z. Explosive welding, forming and compaction [M]. Essex, England: Applied Science Publishers Ltd., 1983:219-343.
- [6] CROSSLAND B. Explosive welding of metals and its application[M]. Oxford: Clarendon Press, 1982.
- [7] 邵丙璜,张凯. 爆炸焊接原理及其工业应用[M]. 大连:大连工学院出版社,1987.  
SHAO B H, ZHANG K. Principle of explosive welding and its industrial application [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press,1987.
- [8] 杨扬. 金属爆炸复合技术与物理冶金[M]. 北京:化学工业出版社,2005.  
YANG Y. Metal explosive cladding technology and physical metallurgy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [9] 郑远谋. 爆炸焊接和爆炸复合材料的原理及应用 [M]. 长沙:中南大学出版社,2007.  
ZHENG Y M. Principle and application of explosive welding and explosive composite[M]. Changsha: Central South University Press,2007.
- [10] 王耀华. 金属板材爆炸焊接研究与实践[M]. 北京:国防工业出版社,2007.  
WANG Y H. Research and practice on explosive welding of sheet metal[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2007.
- [11] 史长根. 爆炸焊接下限原理与双立法[M]. 北京:冶金工业出版社,2015.  
SHI C G. The lower bound theorem and double vertical method of explosive welding[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [12] 韩顺昌. 爆炸焊接界面相变与断口组织[M]. 北京:国防工业出版社,2011.  
HAN S C. Phase transformation and fractography of interface of explosive welding[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [13] 李晓杰,杨文彬,奚进一,等. 双金属爆炸焊接下限 [J]. 爆破器材, 1999, 28(3):22-26.  
LI X J, YANG W B, XI J Y, et al. The lower limit of explosive welding parameter window for bimetal [J]. Explosive Materials, 1999, 28(3):22-26.
- [14] 李晓杰. 双金属爆炸焊接上限[J]. 爆炸与冲击, 1991, 11(2): 134-138.  
LI X J. The upper limit of bimetal explosive welding parameters[J]. Explosion and Shock Waves, 1991, 11(2): 134-138.
- [15] 李晓杰. 厚板爆炸焊接窗口理论的应用[J]. 爆破器材,1996,25(2):27-30.  
LI X J. Application of explosive welding window to thick metal plates [J]. Explosive Materials, 1996,25 (2):27-30.
- [16] 李晓杰,杨文彬. 爆炸焊接飞板运动速度的计算[J]. 爆破器材,1998,29(6):1-3.  
LI X J, YANG W B. Calculation of the moving velocity of flyer plate in explosive welding [J]. Explosive Materials, 1998,29(6):1-3.
- [17] 王宇新,李晓杰,闫鸿浩,等. 爆炸焊接 CAE 软件开发及工程应用[J]. 工程爆破,2018,24(1):1-7.  
WANG Y X, LI X J, YAN H H, et al. CAE software development and engineering application of ex-

- plosive welding [J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24 (1):1-7.
- [18] 王宇新. 爆炸焊接计算机辅助设计系统 EWCAD1.0 研制与开发[D]. 大连:大连理工大学, 2000.
- WANG Y X. Research and exploit on EWCAD1.0 software of explosive welding computer aided design [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2000.
- [19] 汪旭光. 爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.
- WANG X G. Blasting manual[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
- [20] 汪旭光. 爆炸合成新材料与高效、安全爆破关键科学与工程技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
- WANG X G. Key science and engineering technology on explosion synthesis of new materials, efficient and safe blasting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [21] 汪旭光. 爆炸合成纳米金刚石和岩石安全破碎关键科学与工程技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2014.
- WANG X G. Key science and technology on explosion synthesis of nano diamond and rock safety fragmentation [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
- [22] 李晓杰, 李瑞勇, 马玉馨, 等. 工业炸药线型聚能切割器的研制[J]. *工程爆破*, 2004, 10(4):5-8.
- LI X J, LI R Y, MA Y Q, et al. Development of a linear shaped charge loaded with an industrial explosive[J]. *Engineering Blasting*, 2004, 10(4): 5-8.
- [23] 李晓杰, 闫鸿浩, 赵雷, 等. 工业炸药聚能线型切割器: ZL200310120894. X[P]. 2003-12-31.
- LI X J, YAN H H, ZHAO L, et al. A linear shaped charge loaded with an industrial explosive: ZL200310120894. X [P]. 2003-12-31.
- [24] 谭多望, 孙承纬. 滑移爆轰作用下飞板运动的解析解[J]. *高压物理学报*, 1999, 13(2): 120-126.
- TAN D W, SUN C W. An analytic solution for flyer plate motion in grazing detonation [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1999, 13(2): 120-126.
- [25] COWAN G R, BERGMANN O R, HOLTZMAN A H. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals [J]. *Metallurgical Transactions*, 1971, 2: 3 145-3 155.
- [26] HUNT J N. Wave formation in explosive welding [J]. *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*, 1968, 17 (148): 669-680.
- [27] LYSAK V I, KUZMIN S V. Lower boundary in metal explosive welding evolution of ideas [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212: 150-156.
- [28] 郑远谋. 爆炸焊接与相图[J]. *爆炸与冲击*, 1989, 9 (1): 70 -83.
- ZHENG Y M. Explosive welding and phase diagram [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1989, 9(1): 70 -83.
- [29] 李晓杰, 莫非, 闫鸿浩, 等. 爆炸焊接界面波的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(6): 653 -657.
- LI X J, MO F, YAN H H, et al. Numerical simulation of interface waves in steel explosive welding[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(6): 653 -657.
- [30] 王宇新, 李晓杰, 范述宁, 等. 爆炸焊接研制核聚变用大厚度铜-不锈钢复合板[J]. *焊接学报*, 2018, 32 (12): 77-81.
- WANG Y X, LI X J, FAN S N, et al. Development of large thickness copper-stainless steel plate for nuclear fusion based on explosive welding technology [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 32(12): 77-81.