

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.02.021

异种金属爆炸焊接的研究与发展*

陈松^a, 李晓杰^{a,b}

(大连理工大学 a. 工程力学系; b. 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 大连 116024)

摘要: 爆炸焊接是一项以炸药为能源实现同种或异种材料固态连接的工艺, 高效快捷、经济实用, 能够实现大面积焊接及异种材料结合, 在层状金属复合材料制备中得到广泛应用。为阐明异种金属材料爆炸焊接的相关研究与发展, 回顾了爆炸焊接相关的概念和基本原理。通过对焊接窗口理论的介绍, 指出了在四个界限围成的焊接窗口内选择爆炸焊接参数, 可获得较为优质的波纹。基于国内外研究现状, 从爆炸焊接界面组织和力学性能、热处理对界面组织的影响、结合界面的影响因素三个方面, 对爆炸焊接界面的相关研究进行了详细的论述。研究发现: 界面结合处常出现裂纹、绝热剪切带及金属间化合物等缺陷, 可通过热处理、中间层使用、气体保护爆炸焊接等方法改善, 但其形成机理及控制途径仍需进一步深入研究。此外, 现阶段的数值模拟以 SPH 方法为主, 经对比分析, 该法能够有效模拟结合界面以及射流, 但也存在模拟过程单一的不足, 而且关于界面波的形成机理尚不清晰, 因此, 需建立科学完善的界面成波机理以及系统全面的数值模拟流程。随着新材料的不断涌现, 爆炸焊接技术将会在更多领域持续发挥重要作用。

关键词: 爆炸焊接; 焊接参数; 金相组织; 成波机理; 数值模拟

中图分类号: TG456.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)02-0144-09

Research and Development of Explosive Welding of Dissimilar Metals

CHEN Song^a, LI Xiao-jie^{a,b}

(a. Department of Engineering Mechanics; b. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Explosive welding is an efficient, economical and practical technique that uses explosives as energy to achieve solid-state connection of the same or dissimilar materials. Because it can achieve large-area welding and combination of dissimilar materials, it is widely used in the preparation of layered metal composites. In order to explain the research development of explosive welding of dissimilar metal materials, the related concepts and basic principles of explosive welding are reviewed. Through the introduction of welding window theory, it is pointed out that choosing explosion welding parameters in the welding window surrounded by four boundaries can obtain relatively high-quality corrugation. Based on the research status at home and abroad, explosive welding interface is discussed in detail from three aspects: the structure and mechanical properties of the explosive welding interface, the influence of heat treatment on the interface structure, and the influencing factors of the bonding interface. Studies have found that defects such as cracks, adiabatic shear bands, and intermetallic compounds often appear at the interface junctions, which can be improved by heat treatment, use of intermediate layers, and gas shielded explosive welding. However, the formation mechanism and control methods still need further in-depth research. In addition, the current numerical simulation is

收稿日期: 2023-01-22

作者简介: 陈松 (1998-), 男, 在读硕士, 从事高熵合金爆炸焊接方面的研究, (E-mail) 22003033@mail.dlut.edu.cn。

通讯作者: 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。

基金项目: 国家自然科学基金 (12072067、11672067)

mainly based on the SPH method. After comparative analysis, this method can effectively simulate the bonding interface and jet flow, but it also has the disadvantage of a single simulation process, and the formation mechanism of the interface wave is still unclear. Therefore, it is necessary to establish a scientific and perfect interface wave formation mechanism and a systematic and comprehensive numerical simulation process. With the continuous emergence of new materials, explosive welding technique will continue to play an important role in more fields.

Key words: explosive welding; welding parameters; microstructure; wave formation mechanism; numerical simulation

爆炸焊接, 是利用炸药的化学能释放瞬间产生的巨大能量, 使金属与金属或者金属与非金属之间发生高速碰撞, 从而实现固相连接的一种工艺。1944年, Carl 首先提出了这一焊接方法^[1]。多年后这一特种焊接技术由 Philipchuk 率先用于钢-铝的工业生产^[2]。此后, 爆炸焊接的研究突飞猛进, 实现了铝-铁、钛-钢、钛-铜等组合的结合^[3-5]。这一技术不仅可以完成大范围的复合, 还能将异种金属进行焊接, 在造船、机械、航空航天、化学和石油化工等领域都有着相当普遍的应用。

爆炸焊接的出现迄今已近百年, 在金属射流的形成、炸药爆轰下飞板的动态响应、碰撞区近邻的压力场, 以及爆炸焊接窗口理论等方面都有显著的成果。但是对界面波的形成机理和波纹参数的控制尚未有统一、明确的认识, 异种材料的选择及其界面组织的研究有待深入, 数值模拟相关工作不够全面。因此, 将从以上方面探讨爆炸焊接技术发展面临的问题和未来发展方向。

1 爆炸焊接的相关理论

1.1 爆炸焊接基本原理

爆炸焊接由多学科交叉而成, 其过程复杂。如图1所示, 常见的平行放置法通常包括引爆器(一般为雷管)、炸药、飞板、基板、间隙等。图2展现了炸药引爆之后, 一个逐渐趋于稳定的爆轰波扫过飞板表面, 产生的高压爆轰产物使得飞板发生弯折, 在数微秒时间内加速到每秒数百米的速度并撞击基板。根据流体力学的伯努利方程, 有

$$p = \frac{1}{2} \rho v_f^2 \quad (1)$$

式中: p 为碰撞点压力; ρ 为飞板密度; v_f 为飞板来流速度。

碰撞点的压力可达到几十 GPa, 高于常见金属材料的动态屈服极限。碰撞区发生强烈的塑性剪切变形, 在极短的时间内转化为热, 导致材料升温, 剪切强度也会相应降低, 最终使得金属呈现出熔化状态。因此, 碰撞区近邻的金属材料可以近似看作是流体模型。

飞板来流经过碰撞点后分为两个部分, 一部分为“再入射流”, 它以每秒数千米的速度流向右侧, 可以清除带有氧化物的金属表层, 露出洁净表面, 以便复合板的结合。因此, 再入射流也是爆炸焊接的必要条件。另一部分为“主体射流”, 它流向左侧, 代表着已焊合成成功的复合板^[6]。

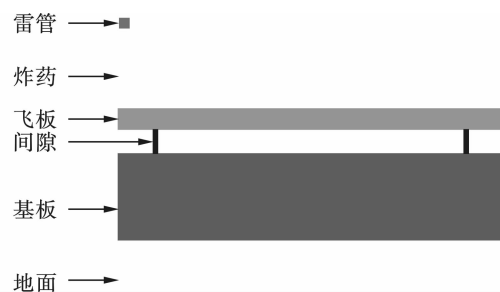


图1 平行法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the parallel method

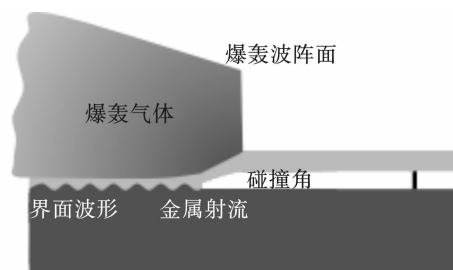


图2 爆炸焊接过程

Fig. 2 Explosive welding process

在爆炸焊接过程中, 爆轰波阵面向右侧传播的速度为爆速 v_d 。飞板在爆轰气体高压推动之下, 会发生迅速的动态弯折, 以碰撞速度 v_p 向基板运动, 一般假定速度方向垂直于弯折角 θ 的平分线。若将运动坐标系置于碰撞点, 飞板则以速度 v_f 、碰撞角度 β 流向碰撞点, 而在平行放置时有, 来流速度 $v_f = v_d$, 碰撞角度 $\beta = \theta$ 。运动参数之间满足以下几何关系

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

为了达到较好的爆炸焊接效果, 作为爆炸焊接的重要参数, 碰撞点移动速度 v_c 、碰撞角 β 、碰撞速度 v_p 需要满足一定范围, 而三者由式(2)联系起来,

故只需两个独立参数即可。

1.2 爆炸焊接参数与焊接窗口理论

异种金属材料有着不同的物理性质和力学性能,对应的爆炸焊接参数也会不同。大量实验结果表明,结合界面处均匀且细小的周期性波纹会提高结合强度,这种高质量界面的获得往往依赖于焊接参数的选取。因此,合适的爆炸焊接参数选择至关重要,在由两个独立变量张成的爆炸焊接窗口范围内选择参数,一般能够获得优质波纹。见图3。

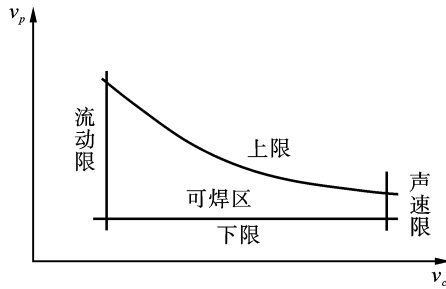


图3 爆炸焊接窗口

Fig. 3 Explosive welding window

由图3可知,爆炸焊接窗口是由声速限、流动限、上限、下限围成的区域。

1) 流动限

流动限代表着金属射流形成的左临界条件,一般认为碰撞点的压力远大于材料静强度,即式(1)的值为材料静强度 Rm 的10倍以上,有

$$\frac{\rho v_c^2}{2} \geq 10Rm \quad (3)$$

或

$$v_{c \min} = \sqrt{20 Rm/\rho} \quad (4)$$

但是在异种材料焊接的情况下,流动限需要综合基板进行考虑。由下式表达^[7]

$$v_{c \min} = \sqrt{20 Rm/\rho_{\min}} \quad (5)$$

2) 声速限

爆炸焊接形成射流应该满足碰撞点的速度相对于基、复板是亚声速的,意味着碰撞点移动速度 v_c 需小于某值,否则也不能形成射流。基、复板声速不同时,取最小的声速

$$v_{c \max} = \min(C_{01}, C_{02}) \quad (6)$$

式中: C_{01} 和 C_{02} 分别为基复板的体波声速。

3) 爆炸焊接下限

在爆炸焊接中,下限是个很重要的条件,一般高质量的焊接产品会在下限附近获得,同时下限也是碰撞速度达到射流产生的最低条件。以往 Deribas 提出的下限公式得到广泛应用

$$v_{p \min} = K \sqrt{HV\rho} \quad (7)$$

式中: K 为常数,与表面的粗糙度有关,一般取 0.6~1.2 之间; HV 为材料的维氏硬度。鉴于该下限公式只能用于单一金属,李晓杰提出了双金属爆炸焊接下限公式^[8]。首先在单一金属下限基础上,用冲击波关系式导出界面最小正碰撞压力

$$p_{\min} = \rho \left(C_0 + \frac{\lambda v_{p \min}}{2} \right) \frac{v_{p \min}}{2} \quad (8)$$

为保证爆炸焊接过程同时产生射流,双金属最小可焊压力取单金属中可焊压力较大一个,得到以下公式

$$p_{\min} = \max(p_{\min 1}, p_{\min 2}) \quad (9)$$

$$u_1 = \frac{[\sqrt{1 + 4\lambda_1 p_{\min}/(\rho C_{01}^2)} - 1] C_{01}}{2\lambda_1} \quad (10)$$

$$u_2 = \frac{[\sqrt{1 + 4\lambda_2 p_{\min}/(\rho C_{02}^2)} - 1] C_{02}}{2\lambda_2} \quad (11)$$

$$v_{p \min} = u_1 + u_2 \quad (12)$$

式中: λ 为冲击波关系中线性系数; u 为碰撞后质点速度。

4) 爆炸焊接上限

在焊接过程中,如果飞板的碰撞速度过大,携带的动能也会增大。这将导致碰撞区温度剧烈升高,会较长时间保持熔化状态,界面受到反射波的拉伸作用就会开裂,即“过熔”现象,显著降低焊接质量。为防止此情况发生,需要对碰撞速度加以限制。李晓杰根据对热传导理论、传热过程、焊接动力学等综合分析^[8],推导出双金属爆炸焊接上限公式

$$v_{p \max} = \left\{ \frac{8\sqrt{2\pi}}{N} \left[1 + \left(\frac{\rho_2 C_{p2} \lambda_2}{\rho_1 C_{p1} \lambda_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 + \frac{\rho_1 h_1}{\rho_2 h_2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\min \left(1, \frac{C_{01} h_2}{C_{02} h_1} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{C_*}{v_c} \right)^{\frac{n}{2}} \cdot \left[\frac{C_{p1} \lambda_1 (T_{m \min} - T_0)^2}{h_1 \rho_1 C_{01}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (13)$$

上式过于复杂,不适于工程应用,简化为

$$v_{p \max} = \frac{f}{v_c} \left(1 + \frac{\rho_1 h_1}{\rho_2 h_2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\min \left(1, \frac{h_2 C_{01}}{h_1 C_{02}} \right) / h \right]^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$

式中: h 为板厚; f 是与两种材料相关的物性常数,由爆炸焊接实验数据拟合而得。

使用爆炸焊接窗口理论可以指导生产,例如钛铝焊接中不同装药比下界面结合质量的预测^[9]。为了工程上方便快捷地确定参数,一些专家、学者利用 C++ 或者 Visual Basic 等软件开发了参数选择系统,可以绘制异种金属的爆炸焊接窗口,并自动计算合适的工艺参数。通过对焊接窗口理论的研究,

可以直观、清晰地发现焊接参数对于焊接过程的影响以及深入地理解爆炸焊接原理,从而更好地指导实践。

2 异种金属爆炸焊接界面的研究

2.1 爆炸焊接界面组织及力学性能

组织决定性能,良好的性能离不开对于微观组织的研究,因此,目前大多数研究集中在复合板结合界面的金相组织观察及力学性能测试。

在爆炸焊接过程中,界面会发生强烈的塑性剪切变形,尤其以碰撞点处变形最为剧烈。通过金相腐蚀或是直接使用 EBSD 技术观察到,界面处的晶粒受到剪切作用会被拉长,产生加工硬化,而远离界面处的晶粒则保持原态。此外,界面出现的细小等轴晶粒可能是由于高温高压而发生了再结晶,会影响界面性能。例如,钛-不锈钢显微硬度实验测的界面硬度为 413.10 HV,高于母材原始硬度,表明再结晶产生的细晶强化是结合界面处硬度提升的一个原因^[10]。相似的是,张婷婷等人利用爆炸焊接制备了镁-铝复合板^[11],在镁侧界面中发现 45° 方向的绝热剪切带,带内存在孪晶和细晶粒,导致了硬度曲线的小波动。随着碰撞点移动,驻点后瞬间的冷却速率可达 $10^5 - 10^7$ K/s,界面物质骤冷可能形成金属间化合物(Intermetallic compounds, IMC)。通过界面物相分析及元素分析,硬而脆的 IMC 往往在结合界面处或者波纹的涡旋区形成,且难以通过之后的热处理消除。适量的 IMC 能够促进材料之间的焊接,而区域过大或含量过多时,界面硬度上升、韧性下降,甚至有竖向微裂纹产生,反而对结合强度起抑制作用^[12]。

由此可见,微观结构的改变势必会影响宏观特征。复合板界面组织常存在裂纹、Kirkendall 空洞、绝热剪切带、金属间化合物等缺陷,需要深入研究其形成机理与控制途径。

2.2 热处理对界面组织的影响

热处理是一种通过加热、保温、冷却等方法调整微观组织的热加工工艺,广泛应用于爆后复合板,以消除爆炸应力,改善加工性能,从而获得高质量的爆炸加工产品。关于热处理对于界面的主要影响,一方面是消除加工硬化;另一方面是改变金属间化合物含量。

出于对轻质合金的考虑,Atifeh 等人研究了 250℃ 和 350℃ 的温度下^[13],镁-铝复合板的退火处理对材料的力学性能和成形性的影响。研究发现:如图 4 所示,退火温度升高,使扩散层的厚度增加,

同时也促进了 IMC 的形成和生长;再结晶退火使得镁侧绝热剪切带消失,晶粒也变得细而均匀。此外,退火 2 h 后,强度分别降低了 7% 和 23%,伸长率增加了 176% 和 130%,成形性提高了 52% 和 22.4%。结合组织进行分析,强度的降低是由于加工硬化的消除和硬而脆的 IMC 的生成。相比 250℃,350℃ 时伸长率和成形性有所减少是因为 IMC 含量的提高,从而降低了塑性能力。由此可见,IMC 的含量或者厚度与退火温度有着一定关系。在退火温度分别为 300℃、350℃、400℃ 的实验中也得到相同结果^[14],退火温度的升高,加剧了结合界面处原子的扩散,从而使得扩散层区域变大。进一步利用 XRD 分析扩散层物相组成,指出 IMC 的种类为靠近铝一侧的 Al_3Mg_2 和靠近镁一侧的 $Al_{12}Mg_{17}$,可与镁铝二元合金相图对应。界面物相组成并没有因为退火温度的改变造成影响,呈现出 Mg - $Al_{12}Mg_{17}$ - Al_3Mg_2 - Al 的分层,与 EDS 分析结果一致。此外,Arrhenius 公式被用来描述扩散系数 D 和温度 T 的关系^[15]

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (15)$$

式中: D_0 为扩散常数; Q 为扩散活化能; R 为气体常数; T 为开尔文温度。在 IMC 的生长动力学研究中^[16],扩散层厚度 x 和热处理时间 t 可由下式表示

$$x = \sqrt{Dt} \quad (16)$$

上式对于 IMC 层厚度的预测和实验结果近似一致^[17]。但是 Cheng 等人指出^[18],早期影响会对扩散偶实验得到的扩散系数产生影响,通过高温激光扫描共聚焦显微镜 (HTLSCM) 原位观察可以消除,能够获得准确的扩散系数。见图 4。

热处理对于界面组织的影响在其他金属对上也有体现。如钛-铜组合^[19],在 700℃ 下退火 15 min,结合界面的严重变形层经过再结晶被等轴晶取代,并随着退火时间增加,逐渐形成了 Ti - Ti₂Cu - TiCu - Ti₃Cu₄ - TiCu₄ - Cu 的分层生长。此外,Šlapáková 等人利用 TEM 进行原位退火观察^[20],发现铝-钢的 IMC 层生长动力学也遵循抛物线规律。

由上述可知,IMC 对于复合板力学性能产生重要影响,因此,深入研究不同退火温度下 IMC 的扩散生长行为,合理控制界面处金属间化合物的含量及厚度,可以为准确地制定爆后复合板的热处理工艺以及有效地改善加工性能提供理论依据。

2.3 结合界面的影响因素和焊接技术使用

爆炸焊接的界面形貌通常可以分为平直界面、波状界面、连续的熔化层界面,其中界面呈现微小的波状是高质量结合的表现。界面影响因素众多,广

为研究的有质量比、基覆板间距、预设角度等。此外,曾翔宇等人通过控制变量^[21],仅调整基板强度,研究了材料强度对于结合界面的影响,指出比强度低时,材料强度的影响不可忽视。Carvalho 认为界

面波形的不同是焊接材料波阻抗不匹配的结果^[22],并设计了阻抗失配参数用于估计典型正弦波和卷曲波的形成趋势。研究还发现,与卷曲波相比,典型的对称波倾向于产生少量的 IMC。

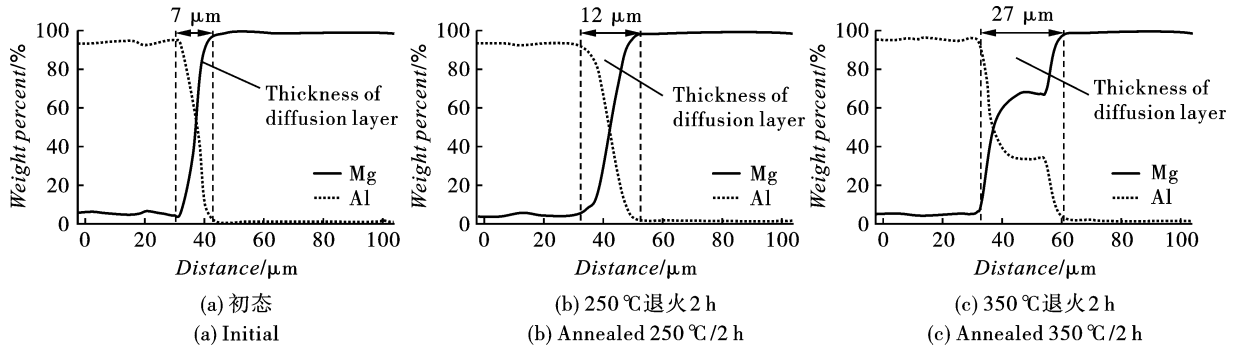


图4 不同条件下双层界面的EDS分析^[13]

Fig. 4 EDS analysis of the interface of the bilayer under different conditions^[13]

由于材料之间理化性质和力学性能各不相同,在焊接薄板或易形成IMC的材料时,可能会导致冶金相容性不足。一般有以下一些方法可以改善可焊接性^[23]:预先热处理、使用低爆速炸药、使用中间层、超声辅助等。Liu等人通过热爆炸焊接技术成功制备了钨层无裂纹的钨铜双金属接头^[24],指出无裂纹的原因可能是钨的热处理温度超过了动态韧脆转变温度。预热处理可以使焊接窗口下限降低,从而降低了碰撞速度和反射拉伸波的影响,保证焊接成功。此外,在爆炸焊接过程中加载超声波,可以使金属力学行为发生变化,改善结合效果^[23]。相比于常规爆炸焊接,超声波辅助的界面波纹幅值和波长显著降低,经过微观表征和力学测试,界面熔融金属减少,热影响区的强度和硬度等力学性能有所提高。

除了热、超声波等外界能量的输入,低密度低爆速炸药和中间层的耦合使用也可改善焊接质量^[25]。对于常规方法难以焊合的金属,使用中间层进行过渡可有效降低性能突跃,起到缓冲作用,常用的中间层如铝、钢和钨等^[26-28]。氦气和空气氛围中的爆炸焊接实验表明^[29],气体冲击波管道效应对焊接质量也会产生影响,而氦气的保护能够抑制氧化物和金属间化合物的产生,提升复合材料抗拉强度、硬度等力学性能。

3 爆炸焊接的应用范围

爆炸焊接涉及领域广泛,在石油化工、航空航天、机械制造、军工等行业都有着相当普遍的应用。石化行业和生活密切相关,涉及的工业设备大多设置在苛刻的环境中,如高温高压、具有腐蚀性

等。这就要求设备材料有着良好的强度、耐高温、耐腐蚀等性能。爆炸焊接法制备的复合板不仅保留了母材的耐腐蚀性能,还拥有优于母材的力学性能,并且可以减少财力消耗。钛-钢和不锈钢-碳钢普遍用于化工设备如石油蒸馏塔、分馏塔、氧化反应器等^[30]。不锈钢和钢的结合管材可用于流体管道,起到防腐蚀作用。核工业中也可用到爆炸焊接技术。铌和不锈钢接头可用于氦气容器的制造^[31],氧化物弥散强化铜合金和不锈钢的组合可用于面向等离子体的偏滤器^[32]。此外,爆炸焊接还可以用于装甲防护^[33],半导体芯片加工中的溅射靶材^[34]等。

不同于常见合金的设计思路,2004年叶均蔚提出的高熵合金是由五种及五种以上元素以近似等摩尔比混合而成^[35]。由于高熵效应影响,大多以FCC或者BCC结构的简单固溶体形式存在^[36]。大量研究表明:高熵合金有着令人满意的硬度、强度、耐腐蚀性能、抗辐照性能等。和传统合金不同的是,高熵合金主元众多,通过对元素种类及配比的调制,可以产生多种具有不同性能的结构,将会对爆炸焊接的结合产生影响。

经过专家学者们的大量工作,异种材料爆炸焊接的研究已经形成较为完善的流程,即通过爆炸焊接实验及之后的微观结构表征和力学性能测试,辅之以数值模拟。相同的流程可以推广到新材料上,但是目前看来,国内外研究的重心仍然是传统金属材料。古往今来,材料领域的每一次重大突破,都会带来社会生产力的伟大变革。应该探索更多具有优异性能的新材料,如记忆合金、微晶非晶、高熵合金等,乃至非金属材料。

4 爆炸焊接界面波形成机理的发展

爆炸焊接复合板的质量往往和界面的形状紧密相关,因此一系列关于界面波的形成机理得以研究。Baharani 和 Crossland、Bergman 等人最先提出了刻入机理,由于缺少高应变率下的本构模型和状态方程,该机理仅是对界面波形成的唯象阐释。Baharani 将材料视为无粘不可压缩流体,并认为是周期性的飞板侵入复板作用和再入射流与基板的相互剪切作用形成的波纹。刻入机理从严格意义上来说并不是一种理论模型,没有相关的理论推导,而且基板不产生射流的假设也不正确。但是,它形象地描述了界面波纹的形成过程,与数值模拟的结果有着较好的吻合度^[37,38],仍被广泛使用。Hunt 和 Robinson 也是从流体角度出发,认为界面波的形成是由于射流和基板之间的流速差导致的 Helmholtz 不稳定性。按照这一理论,射流是一个必要条件,在基板碰撞瞬间,已经将金属表层氧化物清除,这与在涡旋中观察到氧化物不符。此外,该机理虽然解释了一些现象,但是无法解释无速度差的对称碰撞仍然有波纹地出现。Cowan 等人提出了爆炸焊接的卡门涡街机理,认为爆炸焊接过程中的界面波与流体绕过障碍物时在障碍物后方产生涡流的现象类似。该机理并没有指出设想的障碍物的属性和形成原因,而且忽略了材料强度对波纹产生的影响^[21]。

以上是从流体的视角出发,对成波机理做出的研究,Godunov 和 Deribas 则认为和应力波有关。应力波机理认为随着碰撞点的移动,反射应力波周期性在界面扰动,从而导致界面波产生。我国郑哲敏院士认为界面波形成机理属于弹塑性模型下的界面稳定性问题^[39],提出了流体弹塑性模型。平直界面主要出现在碰撞压力小时,而当压力和碰撞角增大时,界面会存在热塑失稳和波状界面失稳。郑远谋对此有着不同的看法^[40],他主张用金属物理学的理论进行研究,认为波的形成,是作为外因的爆炸载荷和作为内因的金属材料之间的相互作用。此外还有一些如“脉冲熔池压力焊”观点的提出,并未做出全方位分析论证。目前对于界面波的形成机理仍未有清晰的认识^[41]。

5 爆炸焊接数值模拟的发展

对于爆炸焊接的模拟研究,早期的学者大多采用有限差分法或者是在有限元软件中使用拉格朗日法和欧拉法。这种方法对压力场和温度场等物理场的分析尚且可行,而对于基复板界面波的形成过程

以及再入射流喷射过程的研究则束手无策。此外,拉格朗日法在处理大变形、大应变问题时网格变形很大,会导致网格畸变,难以进行求解,即使采用侵蚀算法进行计算,也会带来质量不守恒的问题。而欧拉法大多用于流体力学,对于边界处理比较困难。

Elango 等人在研究不同爆炸比对铝钢界面产生的影响时^[42],发现用 AUTODYN 中的光滑粒子流体动力学方法 (SPH) 进行模拟是一种有效方法。SPH 使用粒子进行计算,有效避免了网格畸变,也能避免欧拉网格和材料界面问题,适合于解决高速冲击碰撞问题。Sun 等人使用双立式法爆炸焊接一次性得到两块复合板^[43],大幅提升了炸药能量利用率,通过 SPH 进行 2D 和 3D 模拟,讨论了界面微观结构和工艺参数关系,其中 2D 模拟可以很好复现界面波纹和射流形成。任意拉格朗日-欧拉法和流固耦合方法也被用于焊接的模拟,但对于射流喷射的捕捉却无能为力^[44,45]。SPH 方法适用于爆炸焊接的高速碰撞和射流模拟,但是也存在着拉伸不稳定性 and 缺乏高阶一致性的局限,会导致大变形材料中的不稳定和不准确解。Baek 等人提出了改进的半拉格朗日再生核粒子法 (SL-RKPM)^[46],表现出了比 SPH 的结果更稳定和真实的节点分布,还有效模拟了射流的形成,精确捕捉到了强冲击波的传播。此外,最近使用 LAMMPS 软件进行爆炸焊接的分子动力学 (MD) 模拟^[38],同样可以得到良好的界面以及实现对射流喷射的捕捉。Ma 等人从原子尺度出发^[47],利用 MD 模拟了爆炸焊接界面处原子的扩散行为,证明了界面的三种扩散行为:固-固扩散、固-液扩散和液-液扩散,回答了关于界面是否扩散的争议。

如今的数值模拟主要采用 SPH 方法,用于爆炸焊接的可行性分析或者实验的验证,以及对成波机理的探讨等。这通常仅是针对某一方面,并不能完整地反映整个爆炸焊接过程。MD 模拟方法进一步缩小了研究尺度、拓宽了研究范围,可以模拟结合界面扩散行为,乃至界面晶体结构,这是之前的有限元方法难以做到的,也证明了将 MD 模拟技术用于爆炸焊接是有发展前途的。若是能够开发对爆炸焊接过程系统而全面的模拟,无疑会有效地推动该技术的发展。

6 结语

通过对爆炸焊接相关理论的介绍,结合国内外研究现状,论述了焊接界面的相关研究,以及成波机理和数值模拟的发展等,对存在的问题和未来的发展方向给出以下建议:

1)当前对于焊接材料的选择仍大多局限于传统金属及合金,选择的广度不够,应多关注已经表现出优异性能的新型材料,如高熵合金、非金属材料等。新材料的使用势必会拓宽爆炸焊接技术的应用领域,可以预见该技术未来的应用前景广阔。

2)组织决定性能,异种材料爆炸焊接界面组织往往具有各种缺陷,影响因素众多,需要进一步深入研究其形成机理与相应的控制途径,为获得优异的爆炸加工产品提供理论基础。

3)鉴于对结合质量和环境保护日益增长的高要求,真空爆炸焊接和气体保护爆炸焊接等新技术、新工艺的开发显得尤为重要。

4)后续的热处理工艺对于金属间化合物的扩散生长行为有着显著影响,因此,复合板结合质量和加工性能的有效改善依赖热处理工艺的合理制定。

5)爆炸焊接界面成波机理一直是研究热点,但是至今认识不足。一个科学完善的机理对于爆炸焊接参数选择相当重要,影响着复合板的结合质量以及数值模拟研究。

6)如今的爆炸焊接数值模拟方法得到了快速的发展,但大多仅是对某一过程的模拟,因此需要研究系统、全面、准确地爆炸焊接模拟方法。

参考文献 (References)

- [1] CARL L R. Brass weld, made by detonation impulse [J]. *Metal Progress*, 1944, 46(1): 102-103.
- [2] PHILIPCHUK V. Explosive welding and forming open another door for industry [J]. *Weld Engineering*, 1959, 44(4): 61-62.
- [3] YANG M, MA H H, SHEN Z W, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Fe meshing bonding interfaces manufactured by explosive welding [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(4): 680-691.
- [4] KAHRAMAN N, Gulenc B, Findik F. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 169(2): 127-133.
- [5] MAHMOOD Y, CHEN P W, BATAEV I A, et al. Experimental and numerical investigations of interface properties of Ti6Al4V/CP-Ti/Copper composite plate prepared by explosive welding [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(5): 1592-1601.
- [6] 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.
- [6] SHAO Bing-huang, ZHANG Kai. The principle of explosive welding and its industrial application [M]. Dalian: Dalian Institute of Technology Publishing House, 1987. (in Chinese)
- [7] 汪旭光. 爆破手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [7] WANG Xu-guang. *Blasting manual* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [8] 李晓杰, 王宇新, 王小红, 等. 双金属爆炸焊接参数设计理论 [J]. *工程爆破*, 2020, 26(5): 1-13.
- [8] LI Xiao-jie, WANG Yu-xin, WANG Xiao-hong, et al. Theory on the design of bimetal explosive welding parameter [J]. *Engineering Blasting*, 2020, 26(5): 1-13. (in Chinese)
- [9] 李文轩, 戴美想, 吴晓明, 等. 异种金属爆炸焊接窗口分析与应用 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(3): 68-73, 86, 117.
- [9] LI Wen-xuan, DAI Mei-xiang, WU Xiao-ming, et al. Analysis and application of explosive welding window for dissimilar metals [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(3): 68-73, 86, 117. (in Chinese)
- [10] 陆良宇, 苏 勇, 陈 健. TA1-304 不锈钢爆炸焊接复合板组织和性能的探究 [J]. *热加工工艺*, 2021, 50(19): 27-30.
- [10] LU Liang-yu, SU Yong, CHEN Jian. Study on microstructure and properties of TA1-304 stainless steel explosive welding cladding plate [J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(19): 27-30. (in Chinese)
- [11] 张婷婷, 王文先, 袁晓丹, 等. Mg/Al 合金爆炸焊连接及其界面接合机制 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(12): 52-58.
- [11] ZHANG Ting-ting, WANG Wen-xian, YUAN Xiao-dan, et al. Interface bonding mechanism of Mg/Al alloy explosive welded [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(12): 52-58. (in Chinese)
- [12] FANG Z H, SHI C G, SUN Z R, et al. Influence of interlayer technique on microstructure and mechanical properties of Ti/Al cladding plate manufactured via explosive welding [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(10): 106519.
- [13] ATIFEH S M, ROUZBEH A, HASHEMI R, et al. Effect of annealing on formability and mechanical properties of AA1050/Mg-AZ31B bilayer sheets fabricated by explosive welding method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 118(3): 775-784.
- [14] 张 振, 丁 旭, 田晓东, 等. 退火温度对 5052/AZ31B 爆炸复合板组织与性能的影响 [J]. *材料导报*, 2022, 36(15): 151-156.
- [14] ZHANG Zhen, DING Xu, TIAN Xiao-dong, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and properties of 5052/AZ31B explosive composite plate [J]. *Materials Research Express*, 2022, 9(15): 105111.

- rials Reports, 2022, 36(15):151-156. (in Chinese)
- [15] 金玉花,甘瑞根,邵庆丰,等. 焊后退火 Al-Mg 界面金属间化合物生长行为[J]. 焊接学报, 2017, 38(8):68-72, 132.
- [15] JIN Yu-hua, GAN Rui-gen, SHAO Qing-feng, et al. Growth behavior of Al-Mg intermetallic during post weld annealing treatment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(8):68-72, 132. (in Chinese)
- [16] 唐超兰,郭校峰,许秋平,等. 铝钢复合界面金属间化合物生长行为[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(5):713-719.
- [16] TANG Chao-lan, GUO Xiao-feng, XU Qiu-ping, et al. Research on growth behavior of intermetallic compounds at Al-steel bonding interface [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2018, 36(5):713-719. (in Chinese)
- [17] MACWAN A, JIANG X Q, LI C, et al. Effect of annealing on interface microstructures and tensile properties of rolled Al/Mg/Al tri-layer clad sheets[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 587:344-351.
- [18] CHENG K M, XU H X, MA B C, et al. An in-situ study on the diffusion growth of intermetallic compounds in the Al Mg diffusion couple [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 810:151878.
- [19] PAUL H, CHULIST R, BOBROWSKI P, et al. Microstructure and properties of the interfacial region in explosively welded and post-annealed titanium-copper sheets [J]. Materials Characterization, 2020, 167:110520.
- [20] ŠLAPÁKOVÁ M, KŘIVSKÁ B, FEKETE K, et al. The influence of surface on direction of diffusion in Al-Fe clad material [J]. Materials Characterization, 2022, 190:112005.
- [21] 曾翔宇,李晓杰,曹景祥,等. 材料强度对爆炸焊接结合界面的影响[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5):139-145.
- [21] ZENG Xiang-yu, LI Xiao-jie, CAO Jing-xiang, et al. Interface characteristics of explosive welding for different strength plates [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(5):139-145. (in Chinese)
- [22] CARVALHO G, GALVO I, MENDES R, et al. Explosive welding of aluminium to stainless steel using carbon steel and niobium interlayers [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2020, 283(C):116707.
- [23] KUZ'MIN E V, LYSAK V I, KUZ'MIN S V, et al. Influence of structure formation and properties of bimetal produced by ultrasound-assisted explosive welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 71:734-742.
- [24] LIU K Y, CHEN P W, RAN C, et al. Investigation on the interfacial microstructure and mechanical properties of the W-Cu joints fabricated by hot explosive welding [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2022, 300:117400.
- [25] CARVALHO G, GALVO I, MENDES R, et al. Aluminium-to-steel cladding by explosive welding [J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2020, 10(8):1062.
- [26] WU X M, SHI C G, FANG Z H, et al. Comparative study on welding energy and Interface characteristics of titanium-aluminum explosive composites with and without interlayer [J]. Materials & Design, 2021, 197:109279.
- [27] CHEN X, LI X J, INAO D, et al. Study of explosive welding of A6061/SUS821L1 using interlayers with different thicknesses and the air shockwave between plates [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(11-12):3779-3794.
- [28] LI J X, Vivek A, Daehn G. Improved properties and thermal stability of a titanium-stainless steel solid-state weld with a niobium interlayer [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 79(20):191-204.
- [29] ZENG X Y, CHEN X, JIN P, et al. Study on interface morphology and effect of gap gas in explosive welding [J]. Welding in the World, 2022, 66(7):1395-1402.
- [30] ZHAO H. The microstructure and property of a titanium-carbon steel clad plate prepared using explosive welding [J]. Metals, 2022, 12(1):129.
- [31] WANG R X, HE Y, TAN T, et al. Niobium-316L Stainless Steel Transition Joints for Superconducting Radiofrequency Cavities by Explosive Welding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(12):3876-3882.
- [32] ZHANG B Y, MA H H, XU J F, et al. Investigations on the microstructure evolution and mechanical properties of explosive welded ODS-Cu/316 L stainless steel composite [J]. Fusion Engineering and Design, 2022, 179:113142.
- [33] 郭登刚,周强,刘睿,等. 铝-镁-铝轻质金属层状复合靶抗弹性能 [J]. 兵工学报, 2021, 42(3):598-606.
- [33] GUO Deng-gang, ZHOU Qiang, LIU Rui, et al. Ballistic resistance of Al-Mg-Al light metal layered armor plate [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(3):598-606. (in Chinese)
- [34] 臧伟,袁雪婷,郭龙创,等. 爆炸焊接法制备的 5NAI 和 TU1-Cu 靶材组织及性能 [J]. 金属世界, 2022(1):78-83.
- [34] ZANG Wei, YUAN Xue-ting, GUO Long-chuang, et al. Microstructure and properties of 5NAI and TU1-Cu targets prepared by explosive welding [J]. Metal World, 2022(1):78-83. (in Chinese)
- [35] YE H J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes [J]. Advanced

- Engineering Materials, 2004, 6(5):299-303.
- [36] AVILA R, CARRENO G, HERRERA R. Microstructure and microhardness of high entropy alloys with Zn addition; AlCoFeNiZn and AlCoFeNiMoTiZn [J]. Advanced Powder Technology, 2021, 32(12):4687-4696.
- [37] ZENG X Y, LI X J, WANG X H, et al. Formation and development of explosive welding wave interface [J]. RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING, 2020, 49(6):1977-1983.
- [38] FENG J R, LIU R, LIU K Y, et al. Atomistic simulation on the formation mechanism of bonding interface in explosive welding [J]. Journal of Applied Physics, 2022, 131(2):23101.
- [39] 郑哲敏, 谈庆明. 爆炸复合界面波的形成机理 [J]. 力学学报, 1989(2):129-139.
- [39] ZHENG Zhe-min, TAN Qing-ming. Mechanism of wave formation at the interface in explosive welding [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1989(2):129-139. (in Chinese)
- [40] 郑远谋, 骆智君, 张勤学, 等. 爆炸焊接结合区波形形成的金属物理学机理 II. 外因和内因的相互作用 [J]. 广东有色金属学报, 1998(2):131-139.
- [40] ZHENG Yuan-mou, LUO Zhi-jun, ZHANG Qin-xue, et al. Metal physics mechanism on the wave formation in the bonding zone of explosive welding II. interaction between the external cause and the internal cause [J]. Materials Research and Application, 1998(2):131-139. (in Chinese)
- [41] YAO P W, YANG H B, LIU H. Research status and development of explosive welded metal materials [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 493(1):12018.
- [42] ELANGO E, SARAVANAN S, RAGHUKANDAN K. Experimental and numerical studies on aluminum-stainless steel explosive cladding [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(6):1742-1753.
- [43] SUN Z R, SHI C G, XU F, et al. Detonation process analysis and interface morphology distribution of double vertical explosive welding by SPH 2D/3D numerical simulation and experiment [J]. Materials & Design, 2020, 191:108630-108630.
- [44] NASSIRI A, ZHANG S Y, LEE T, et al. Numerical investigation of CP-Ti & Cu110 impact welding using smoothed particle hydrodynamics and arbitrary Lagrangian-Eulerian methods [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 28(3):558-564.
- [45] CHEN Z J, XU J F, ZHOU H, et al. Experimental and numerical investigation on fabricating multiple plates by an energy effective explosive welding technique [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14:3111-3122.
- [46] BAEK J, CHEN J S, ZHOU G H, et al. A semi-Lagrangian reproducing kernel particle method with particle-based shock algorithm for explosive welding simulation [J]. Computational Mechanics, 2021(23):1-27.
- [47] MA Y, ZHANG S, WANG T, et al. Atomic diffusion behavior near the bond interface during the explosive welding process based on molecular dynamics simulations [J]. Materials Today Communications, 2022, 31:103552.

英文编辑:黄刚

(上接第87页)

- [23] AGYEI G, NKURUMAH M O. A review on the prediction and assessment of powder factor in blast fragmentation [J]. Nigerian Journal of Technology, 2021, 40(2):275-283.
- [24] KUZNETSOV V M. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock [J]. Soviet Mining Science, 1973, 9(2):144-148.
- [25] CUNNINGHAM C V B. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting [C] // Proceedings of 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blast-ing, Sweden, 1983(8):39-453.
- [26] LI X, XU D, GUO L. Blasting technique for optimizing the comprehensive cost of mining and mineral [C] // Proceedings of 12th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lule Sweden, 2018:1572-1582.
- [27] KANSACE B. Comparative analysis of rock fragmentation models: A case study [D]. Master's thesis, University of Mines and Technology, Ghana, 2016.
- [28] ROSIN R, RAMMLER E. Laws governing the fineness of powdered coal [J]. J Inst Fuel 1933(7):29-36.
- [29] CUNNINGHAM C V B. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting [C] // Proceedings of 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blast-ing, (ed: R Holmberg and A Rustan), Luleå, Sweden, 1983(8):439-453.
- [30] OUCHTERLONY F. The Swebrec function: Linking fragmentation by blasting and crushing. Institution of Mining and Metallurgy [M]. Transactions. Section A: Mining Technology, 2005, 114(1):29-44.

英文编辑:陈东方