

金属复合板材爆炸焊研究进展及应用前景综述

杨 军^{1,2,✉}, 毕宗岳³, 朱 磊⁴

1 陕西铁路工程职业技术学院铁道装备制造学院, 陕西 渭南 714000

2 渭南市特种装备材料工程技术研究中心, 陕西 渭南 714000

3 中国石油集团宝石管业有限公司, 陕西 宝鸡 721008

4 西安天力金属复合材料股份有限公司, 西安 710200

爆炸焊作为一种固态焊接工艺, 凭借其高能量密度与瞬时高速成形特性, 可实现异种金属材料的高效结合。由于焊接过程无明显热影响区及连续脆性金属间化合物生成, 界面区域力学性能得以显著优化, 尤其在大幅度双层金属、多层金属和新型功能梯度金属复合板材生产制备领域极具竞争优势。本文综述了金属复合板材爆炸焊工艺的研究进展, 系统阐述了双层金属复合板材爆炸焊的基本原理、工艺参数、成波理论和连接机制, 分析了影响焊接质量的关键因素; 重点介绍了多层金属复合板材和新型功能梯度金属复合板材的最新研发情况以及焊后性能评价方法, 并总结了复合板材在石油化工、船舶与海洋工程、航空航天、核工业领域的应用情况和发展前景, 为金属复合板材研发领域或焊接领域工作者提供一定参考。

关键词 金属复合板材 爆炸焊接 界面结构 连接强度 残余应力

中图分类号: TG456 文献标识码: A

A Review on Research Progress and Applicative Prospects of Explosive Welding of Metal Composite Plates

YANG Jun^{1,2,✉}, BI Zongyue³, ZHU Lei⁴

1 Institute of Railway Equipment Manufacturing, Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, Shaanxi, China

2 Weinan Special Equipment Materials Engineering Technology Research Center, Weinan 714000, Shaanxi, China

3 CNPC Baoji Petroleum Pipe Industry Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China

4 Xi'an Tianli Clad Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710200, China

Explosive welding, a unique form of solid-state bonding, enables the effective joining of dissimilar metals through the rapid release of high-energy impulse and extreme interface velocities. Unlike conventional fusion-based techniques, this method typically avoids the development of extensive heat-affected zones (HAZs) and suppresses the formation of continuous brittle intermetallic compounds (IMCs). As a result, the mechanical integrity of the bonded interface is often significantly enhanced. Owing to these characteristics, explosive welding has emerged as a particularly promising solution for fabricating large-area bimetallic sheets, complex multilayered composites, and advanced functionally graded materials. This review surveys recent advances in the explosive welding of metal composite plates, with a particular focus on the underlying bonding mechanisms, the role of critical process parameters, and the theoretical modeling of wave formation at the interface. It further discusses the primary factors influencing weld quality, alongside current research and development (R&D) in post-weld performance evaluation. The paper also highlights recent research into multilayer and functionally graded composites and provides an overview of practical applications across petrochemical systems, marine and offshore structures, aerospace components, and the nuclear sector. By synthesizing these findings, the study aims to inform and support ongoing research and engineering practices in the R&D of metal composite materials.

Key words metal composite sheet, explosive welding, interface structure, joining strength, residual stress

0 引言

金属复合板材作为一种新型复合材料, 因其独特的性能和广阔的应用前景, 近年来受到了材料科学领域的高度关注。金属复合板材是通过特种焊接技术(如爆炸焊接、电渣熔焊、热压、热轧或爆炸+热轧等工艺)将高性能复层材料(如不锈钢、钛、铜、镍、锆、铝等)与基层碳钢材料(如低碳钢、低合金高强度钢、管线钢、压力容器钢、耐候钢等)复合成界面具有冶金结合特性的双层金属、多层金属或新型功能梯度金属复合板材。金属复合板材的复层厚度一般为1~20 mm, 基层厚度为5~200 mm, 能最大限度地实现材料优势互补, 节约稀贵金属, 降低工程费用, 从而广泛应用于城市饮用水输送、石油化工、海水淡化、真空蒸发、电厂脱硫、酸性油气田开发

等领域。

爆炸焊是一种固态连接技术, 借助爆炸能量驱动飞板与基板斜向高速碰撞, 实现界面冶金结合。与传统焊接相比, 该技术可连接物理性质差异大的异种材料, 且界面无明显的热影响区, 能保留原材料性能, 具备生产效率高、能耗低、适合批量生产的优势^[1-3]。近年来, 随着材料科学、计算机模拟等技术的进步, 爆炸焊技术取得了一系列新的突破^[4-13]。在界面波形控制方面, 开发了新型缓冲层设计和爆炸参数优化方法; 在界面结合强度提高方面, 提出了表面活化处理和中间过渡层等新技术; 在残余应力调控方面, 探索了热处理、超声处理等后处理方法。同时, 复合板材的性能表征和服役行为研究也取得了重要进展。

本文综述了金属复合板材爆炸焊研究进展与应用前景,

基金项目: 工业和信息化部专项项目(2240STCZB2346); 渭南市重点研发计划(2023ZDYFJH-391); 陕西铁路工程职业技术学院英才项目(2023KYC-07); 陕西省“两链”融合重点专项(2021LLRH-05-10; 2021LLRH-05-11)

✉ yangjun01.cool@163.com

25090146-1

DOI: 10.11896/cldb.25090146

系统阐述了双层金属爆炸焊基本原理、工艺参数、成波理论、影响因素及连接机制, 论述了多层及新型功能梯度金属复合板材爆炸焊研究进展与焊后性能评价方法, 总结了其在石油化工、船舶与海洋工程、航空航天及核工业领域的应用现状与发展前景, 以期对相关领域的研究者提供参考。

1 双层金属复合板材爆炸焊原理及影响因素

1.1 双层金属复合板材爆炸焊原理概述

爆炸焊的基本原理是通过控制爆炸产生的高压气体, 使飞板(上板)以极高的速度撞击基板(下板), 在碰撞过程中, 两种金属表面的氧化膜和杂质被高速射流剥离, 同时金属表面在瞬间达到极高温度和压力, 促使两种金属原子在界面处相互扩散, 最终形成牢固的冶金结合^[14-15]。

爆炸焊过程可分为加速、碰撞、结合三个阶段。加速阶段主要依靠爆炸产生的冲击波使飞板加速, 达到所需的碰撞速度; 碰撞阶段主要指飞板与基板高速碰撞, 产生局部塑性变形和金属喷射; 结合阶段主要指在高温、高压条件下, 金属

原子相互扩散, 形成冶金结合^[16]。

爆炸焊的独特之处在于其极短的作用时间(通常为毫秒级)和极高的压力(可达数吉帕)。这种瞬时高能量输入使得材料表面极薄层金属迅速熔化并快速凝固, 形成特征性的波浪状界面结构。波浪状界面不仅增加了结合面积, 还能有效释放焊接过程中产生的应力, 提高结合强度^[17-20]。

1.2 双层金属复合板材爆炸焊主要参数及成波理论

金属复合板材爆炸焊接叠层配置构型通常分为两类^[21-23], 一类为平行配置, 板材间间距固定且相互平行, 如图 1a 所示。该种配置由于板材和爆炸层平行排列, 固定的间距确保了飞板速度的均匀性, 爆炸焊过程能够快速建立近乎稳态的焊接条件, 碰撞点移动速度(V_c)等于爆轰速度(V_d), 飞板碰撞速度(V_p)与 V_c 之间存在如式(1)所示的函数关系。

$$V_p = 2V_c \sin(\beta/2) \quad (1)$$

式中: β 为碰撞角。平行配置法适用于大幅面、宽厚异种金属板材的爆炸复合焊接。图 1b 示意了平行配置法爆炸焊过程。

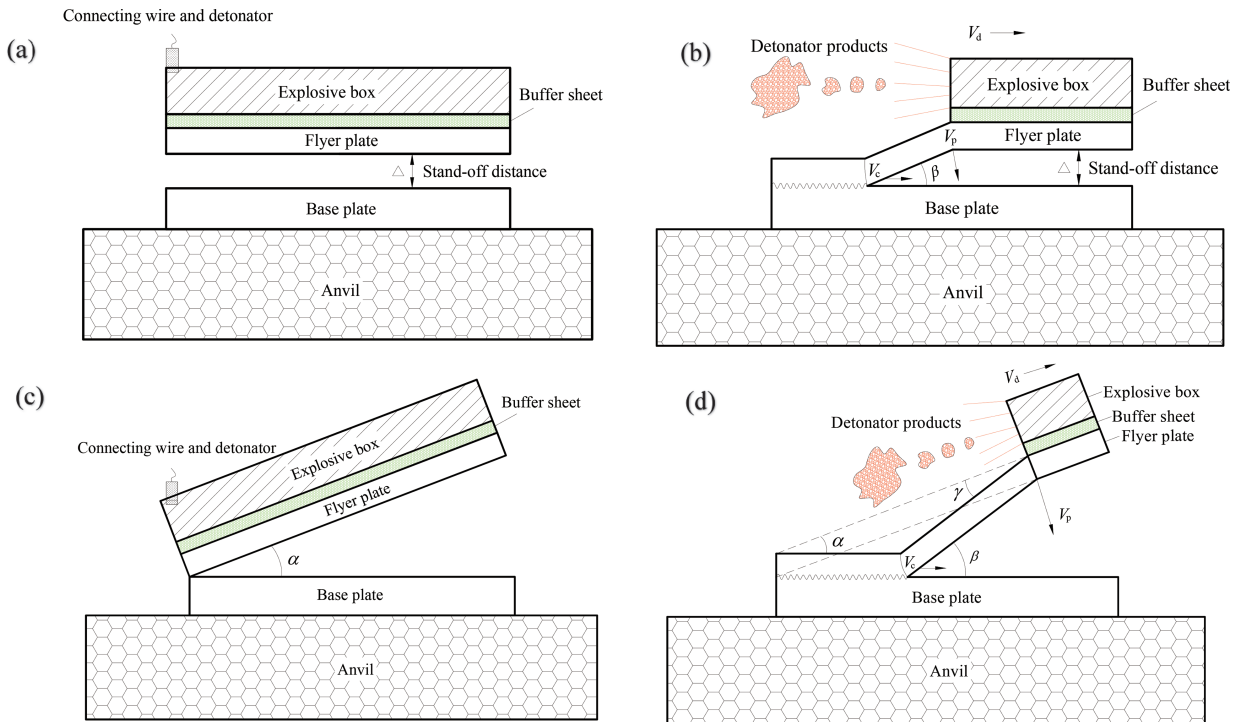


图 1 双层金属复合板材爆炸焊构型设计与过程示意: (a) 平行配置构型法; (b) 平行配置构型爆炸焊过程; (c) 倾斜配置构型法; (d) 倾斜配置构型爆炸焊过程

Fig. 1 Schematic diagrams of different configuration designs and explosive welding processes for explosive welding of double-layer metal composite plates: (a) parallel configuration method; (b) explosive welding process with parallel configuration; (c) inclined configuration method; (d) explosive welding process with inclined configuration

另一类为板材间设置初始角度(α)的倾斜配置, 如图 1c 所示。该种配置可使用高爆轰速度的炸药, 此时 V_c 、 V_d 与 β 之间的关系用式(2)表示。

$$V_c = V_d \frac{\sin \gamma}{\sin(\alpha + \beta)} = V_d \frac{\gamma}{\sin \beta} \quad (2)$$

式中: γ 为复板的弯角。若 γ 较小, 则飞板的碰撞速度可表示为

$$V_p = V_d \sin \beta \quad (3)$$

倾斜配置法更适用于小面积爆炸焊应用场景, 因为其能

在撞击点附近启动焊接。倾斜配置法爆炸焊过程如图 1d 所示。

图 1 中配置在飞板与炸药之间的绿色阴影区域为缓冲层, 由橡胶等材料制成, 主要保护飞板与炸药接触表面免受爆炸冲击波的破坏^[24-26]。起爆后, 炸药化学能转化为动能, 产生一个爆轰波阵面, 该波阵面迅速在飞板表面传播^[27]。这一过程在被焊材料的界面处产生高速度、高压和高能量冲击, 从而引发射流现象, 射流的产生能有效去除待焊表面杂质和氧化层, 促进冶金结合界面的形成^[28-29]。

图2给出了双金属复合板材爆炸焊工艺过程示意,明确了焊接流程、板材初始配置及装置详细结构。爆炸焊中,射流清除基板与飞板表面的氧化膜及杂质、保障洁净表面接触以促进原子扩散与键合外,核心作用是实现能量传递与振动诱导。射流携带的动能可使基板表面产生局部塑性变形并引发振动,为波的形成提供初始扰动。由于飞板对基板的高压、高速冲击,基板表面承受着强大的应力,在一些应力集中区域,基板表面的材料会发生塑性变形并局部凸起,形成早期凸起。这些早期凸起改变了基板表面的局部几何形状和应力分布。随着焊接过程的推进,凸起周围的材料受到射

流和应力波持续作用的影响,使得凸起以波状的方式生长和发展。由射流引起的基板表面振动以及早期凸起的生长是周期性发生的,二者相互作用并相互叠加。当射流的振动频率与凸起的生长频率在一定程度上匹配时,就会产生类共振效应,这进一步促进了波的生长和放大,从而形成明显的波状界面。射流使基板表面的材料发生流动,而早期凸起会影响这种流动的方向和速度,二者之间的相互作用使得材料在界面上重新分配,形成波状结构^[30-31]。该机制是爆炸焊经典成波理论之一,但当前学术界对界面成波机制尚未形成统一认知。

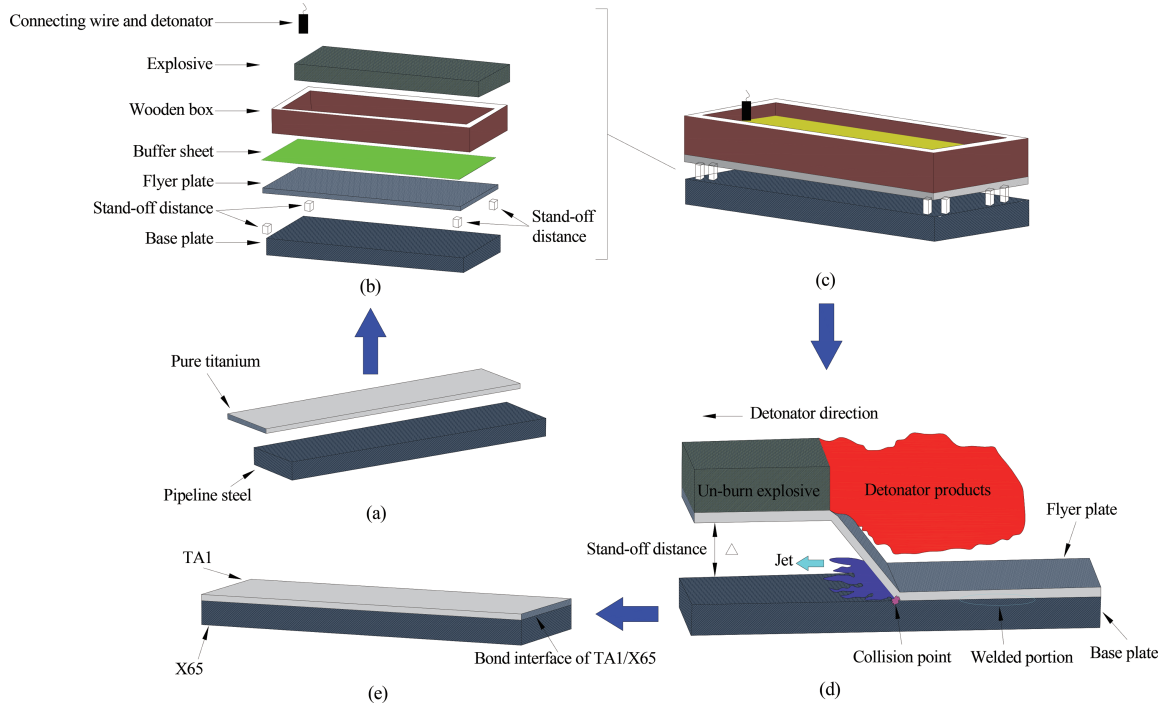


图2 双金属复合板材爆炸焊工艺过程示意:(a)待复合板材的初始状态;(b)爆炸焊装置的结构组成与详细配置顺序;(c)完成装配的爆炸焊装置;(d)金属板材在爆炸开启过程中的焊接条件;(e)最终形成的爆炸焊接金属复合板材

Fig. 2 Summarize and draw the schematic diagram of its technological process according to the specific working process of explosive welding for bimetallic composite plates: (a) initial state of the bimetallic plates to be clad; (b) structural composition and detailed configuration sequence of the explosive welding device; (c) fully assembled explosive welding device; (d) welding conditions of the metal plates during the explosion initiation process; (e) finally formed explosively welded bimetallic composite plate

由 Abrahamson 提出、经 Bahrani 和 Brunton 进一步发展的压痕理论^[32-34],被用于解释波状界面的形成。该过程示意图3。爆炸焊时在碰撞点处的主射流在与基板碰撞时,被分成向前的再入射流和向后的凸出射流(图3a)。由于高温、高压的作用,再入射流和凸出射流会得到补充,这将实现表面氧化物或其他杂质的清除,有助于建立原始清洁的理想焊接条件。剩余的软基体不断被挤压,最终在表面形成凹槽,而附近区域的金属不能立即熔化,被挤压形成隆起,如图3b所示。隆起的出现改变了再入射流的方向,使其与复板发生碰撞。同样,在复板上也会形成凹槽和隆起。射流在与复板碰撞后,再次形成新的凸出射流和再入射流。当碰撞点移动到隆起的顶部时,在碰撞点的高压以及新的再入射流的冲刷作用下,隆起被压平并拉长,形成波峰。金属射流在剪切作用下做圆周运动,在卷曲的凹腔内形成了旋涡(图3c、d)。此外,再入射流受到复板隆起的阻碍,将再次与基板碰撞,进而形成凹槽。最终,凹槽和波峰周期性出

现,促进了波状结构的形成(图3e)。Carvalho 等^[35]提出,界面波形的类型与焊接材料的密度有很大关系,密度相近的材料会产生典型波,而密度差异较大的材料则会导致卷曲波的形成。典型波更加规则且对称,两种材料都会参与其形成过程^[35]。

爆炸焊过程:连续的爆轰冲击从突起的波峰到波谷不断发生,推动表面层在对面产生新的突起,这一过程阐明了为什么旋涡只在波峰附近而不是波谷附近被观察到^[36]。然而,仅由炸药产生的压力不足以实现金属键。为了形成金属键,一种金属板材的原子必须与另一种金属板的原子密切相互作用,共享它们的电子轨道,但是金属表面经常受到氧化物层、表面薄膜、氮化物、氢气等被困气体的阻碍,原子的紧密接触受阻。为了克服这些挑战,焊接前彻底的表面净化处理是必不可少的。随后,通过施加高爆轰压力使两板瞬间接近,界面局部塑性变形,最终形成金属键结合,实现焊接^[37]。

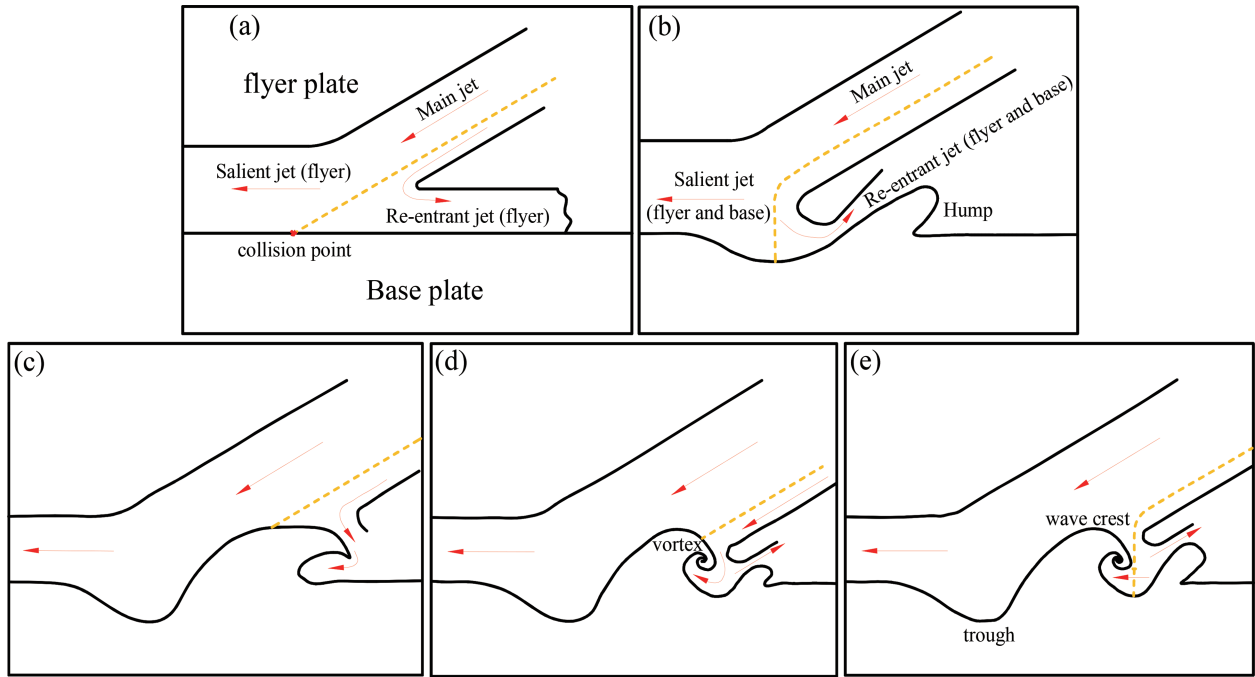


图3 带有旋涡的波状界面形成过程示意: (a) 初始时刻; (b) 射流形成; (c) 隆起部位受到射流干扰; (d) 射流被困在波峰的凹腔内; (e) 波状结构形成

Fig. 3 Schematic diagram of the formation process of wavy interface with vortices: (a) initial moment; (b) jet formation; (c) bulge being disturbed by jet; (d) jet trapped in the cavity of wave crest; (e) formation of wavy structure

表1总结了金属复合板材爆炸焊五种典型成波理论在核心成波机理,旋涡形成机制、形态分布与缺陷特征,绝热剪切带形成机制、形态分布与性能影响三方面的差异。爆炸界面波的形成本质是极端热-力耦合条件(高应变率、瞬态高温、瞬态高压)驱动微观组织演化(细晶、再结晶)与流体力学

行为(射流、旋涡)协同作用的结果。热-力参数通过调控原子扩散、塑性变形及相变,塑造细晶、再结晶等微观组织特征;微观组织的均匀性、晶粒尺寸以及相组成则反映了波形形成的力学机制,最终共同决定波形类型(典型波/卷曲波)及界面结合质量^[38-43]。

表1 金属复合板材爆炸焊五种典型成波理论总结

Table 1 Five typical wave formation mechanisms for explosive welding of metal composite plates

成波理论	核心成波机理	旋涡形成机制、形态分布与缺陷特征	绝热剪切带形成机制、形态分布与性能影响
压痕理论 ^[32-34]	飞板流侵入机理:飞板以高速侵入基板,碰撞点主射流定向改变,驱动界面周期性凸起-凹陷,形成波形(因成波过程类似压痕形成,故称“压痕机理”)	形成机制:射流被基/飞板“定向捕捉”(涡腔由飞板侵入挤压形成) 形态分布:形态规则(直径50~80 μm),成分以飞板碎片为主 缺陷特征:孔洞率小于5%	形成机制:飞板侧局部高应变率($\dot{\epsilon} > 5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$),塑性变形产热集中 形态分布:飞板侧连续分布(宽度20~30 μm),晶粒极度细化(1~2 μm),沿爆炸方向延伸 性能影响:加工硬化显著,易成为微裂纹萌生源
应力波理论 ^[44-46]	应力波干涉机理:爆炸冲击波在基/飞板界面反射、叠加,形成周期性应力场,驱动金属周期性塑性变形,最终形成波形(应力波的干涉是成波核心)	形成机制:应力波干涉导致局部金属环流(非主导现象,仅为伴随产物) 形态分布:体积小(直径小于30 μm),分布无规律(多位于应力叠加区),成分以基板为主 缺陷特征:对结合强度无显著贡献(面积小于5%),无明显缺陷	形成机制:应力集中区局部塑性变形($\dot{\epsilon} = 3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$),产热有限 形态分布:基板侧断续分布(宽度10~15 μm),沿应力方向延伸 性能影响:局部硬度提升20%~30%,无裂纹
涡脱理论 ^[47]	碰撞板流动构型:爆炸波产生非均匀压力场,驱动界面金属呈流体态绕流,形成周期性旋涡脱落(类似流体绕圆柱的涡街),涡脱过程带动界面形成波形(涡脱是成波核心)	形成机制:流体绕流时边界层分离,旋涡周期性脱落 形态分布:形态扁平(长径比3:1),双侧分布(波峰两侧均有) 缺陷特征:旋涡区细晶化(晶粒尺寸1~2 μm),硬度提升30%~40%,无缺陷(流体充分填充)	形成机制:金属呈流体态,剪切均匀无局部产热 形态分布:几乎无绝热剪切带形成,仅旋涡边缘有微量剪切变形区(宽度小于5 μm),无固定方向 性能影响:对界面性能无影响,韧性由细晶化保证(延伸率大于15%)

(续表1)

成波理论	核心成波机理	旋涡形成机制、形态分布与缺陷特征	绝热剪切带形成机制、形态分布与性能影响
Kelvin-Helmholtz 失稳理论 ^[48]	剪切不稳定性机理:飞板与基板的剪切速度差($\Delta v > 100$ m/s)使界面金属呈流体态,触发 K-H 失稳(界面扰动因剪切放大),最终形成波形(剪切失稳是成波核心)	形成机制:剪切失稳导致局部金属环流(无固定位置,随扰动随机形成) 形态分布:全域不规则分布(直径 20~100 μm),成分完全混合 缺陷特征:混合区无脆性相(因完全流体态抑制脆性相析出),延伸率提升 10%~15%	形成机制:金属呈完全流体态,剪切均匀无局部产热 形态分布:无绝热剪切带形成,仅旋涡边缘有微量剪切变形(宽度小于 3 μm),无固定方向 性能影响:对界面性能无影响,韧性由流体混合区保证
Richtmyer-Meshkov 失稳理论 ^[49]	R-M 失稳机理:冲击波作用于密度差异界面,触发 R-M 失稳(初始微小扰动因冲击波冲击放大),形成初始波形;后续射流维持波形稳定(R-M 失稳主导初始波形成)	形成机制:R-M 失稳初始扰动触发微小旋涡,后续射流补充使旋涡生长 形态分布:在初始扰动区分布(爆轰起始端),形态随时间演变(从圆形变为椭圆形,直径 30~60 μm),成分梯度平缓 缺陷特征:旋涡区无缺陷(初始扰动均匀),结合强度稳定(波动小于 5%)	形成机制:局部高应变($\dot{\epsilon} = 5 \times 10^3$ /s)作用,后续温度下降,绝热剪切带消失 形态分布:瞬时存在(持续时间不足 0.5 μs),宽度 5~8 μm ,无固定分布方向 性能影响:对界面性能无负面影响(绝热剪切带消失后界面强度恢复)

爆炸焊极端热-力环境以“高应变率、瞬态高温、瞬态高压”为核心,对界面微观组织(细晶、再结晶)具有重要调控作用。在每秒变形 5 000~10 000 次这种极快、剧烈的塑性变形下,材料内部产生大量位错、畸变、储能,从而为晶粒细化、动态再结晶形核提供了足够的驱动力。高应变率下产生高密度位错,形成位错胞并分割原始晶粒,实现变形诱导细晶^[39,42];应变储能打破晶粒平衡,触发动态再结晶(DRX),形核率与高应变率正相关,且高应变率抑制晶粒长大^[21,38]。瞬态高温($T = 0.5T_m \sim 0.9T_m$, T_m 为待焊金属熔点)是再结晶与凝固细化的能量保障。爆炸焊界面温度在 0.4 $T_m \sim 0.5T_m$ 时激活原子扩散,促进 DRX 形核;当处在 0.6 $T_m \sim 0.8T_m$ 时 DRX 完全发生^[38,42];当界面温度高于 0.8 T_m 时金属呈流体态,快速凝固形成超细晶^[38,41];瞬态高温持续时间短(0.5~2 μs),限制了晶粒长大,可维持细晶形态^[40,41]。瞬态高压($p = 5 \sim 15$ GPa)是微观组织细化的调控剂。高压会降低金属熔点,提升“有效温度”(T/T_m),促进 DRX^[38,42];高压会抑制原子扩散,限制晶粒长大,强化变形诱导细晶^[38,40];同时,高压还会使晶格畸变,增加位错密度,为细晶形核提供更多位点^[21,39]。而细晶与再结晶又是波形稳定性与均匀性的核心保障。热-力参数相匹配($\dot{\epsilon} = 5 \times 10^3 \sim 10^4$ s⁻¹、 $T = 0.6T_m \sim 0.8T_m$ 、 $p = 8 \sim 12$ GPa)时,界面发生完全 DRX,形成均匀等轴细晶,将促进周期性规则波形的形成^[41,42]。热-力参数不匹配(如密度差异大导致的局部应变率、温度不均匀)时,仅发生部分 DRX,伴随静态再结晶(SRX)和变形细晶,则形成不对称的卷曲波^[21,40]。

旋涡区热-力参数的极端化($\dot{\epsilon} > 5 \times 10^4$ s⁻¹、 $T > 0.8T_m$ 、 $p > 15$ GPa)是形成“细晶+柱状晶+金属混合相”特殊组织的根本原因。如 Nb/SS304 旋涡区有 Nb 碎片和 Fe-Nb 金属间化合物,伴随柱状晶^[42];快速凝固使旋涡区晶粒尺寸更细小(0.5~1 μm),如 CLAM/316L 旋涡区超细晶(300 nm)和柱状晶^[38]。旋涡区的细晶强化与机械锁合作用提升了波形稳定性,如 Ti/SS 界面旋涡区细晶使波形振幅维持在 240 μm ^[41];旋涡区金属混合相(如 Al₃Ti、TiNi)的脆性会导致波形局部畸变,如 1060Al/TA1 旋涡区 Al₃Ti 相使卷曲波振幅出现较大的波动^[40]。爆炸界面波形成的本质是热-力耦合参数(应变率、温度、压力)、微观组织演化(细晶、DRX/SRX)、波形特征的

链式调控,三者相互依存、相互反馈。DRX 是典型波(规则波)形成的核心微观机制,而热-力参数不匹配导致的变形细晶与 SRX 是卷曲波的关键特征。旋涡区微观组织(超细晶、柱状晶、金属间化合物)直接反映射流与热-力集中程度,是评估波形稳定性的重要指标。

1.3 双层金属复合板材料爆炸焊质量和性能的影响因素

爆炸焊质量和界面性能主要受爆轰速度(V_d)、飞板碰撞速度(V_p)、碰撞角(β)、待焊板间距(Δ)、炸药当量(W_g)和板材厚度比(δ)等工艺参数影响^[21,24-25]。

V_d 指爆炸反应沿着炸药传播的速度,业界普遍认为炸药爆速 V_d 必须小于基材或复材的音速,通常在 2 000~6 000 m/s 之间,其直接决定了 V_e ,进而影响界面波形和结合强度^[37,50-51]。 V_d 越大,结合界面波长越长、波幅越大,结合界面由微波结合过渡为大波结合,波峰前端旋涡组织和绝热剪切带逐渐增大,元素扩散距离增加,界面强度性能逐渐变差;当 V_d 过大时,结合界面会出现过熔现象,使材料承受过大的应力,导致结合处开裂,从而严重影响界面结合强度^[52-53]。

V_p 指飞板撞击基板时的速度,一般在 300~1 000 m/s 之间,其决定了碰撞时的动能,对界面结合质量有重要影响^[54]。 β 指飞板与基板的夹角,通常在 5~25° 之间,适当的 β 可确保金属射流的形成和有效的界面清洁。Xu 等^[43]开发了一种拉格朗日-欧拉耦合模拟算法并与多种表征手段相结合,对铌/钢爆炸焊界面撞击速度、微观结构特征及演变机制进行了研究,发现在 $V_p = 563$ m/s、 $\beta = 14.1^\circ$ 时,铌/钢爆炸焊界面呈波状结构,在波前和波后各有一个带有孔洞和裂纹类微缺陷的旋涡,旋涡区域的晶粒为细小柱状晶。该复合材料极限强度超 350 MPa,剪切强度超 220 MPa,力学性能优异,在核工业领域有较好的应用前景。铌/钢爆炸焊界面波形结构与模拟结果对比见图 4,基于 EBSD 数据绘制的铌/钢爆炸焊界面晶粒分布特征及演变机制示意图以及基于光滑粒子流体动力学(SPH)模拟的压力、温度和塑性应变分布情况见图 5。Zhang 等^[39]结合多元表征和 SPH 数值模拟对 CLAM/316L 爆炸焊界面微观组织演变、极端热力学行为进行了研究,在 $V_p = 540$ m/s、 $\beta = 11.5^\circ$ 时,界面呈现带有旋涡的波浪结构,实现了

紧密结合,其旋涡区晶体结构演变包括超细晶粒、柱状晶粒、等轴晶粒、变形晶粒、严重的晶格畸变。

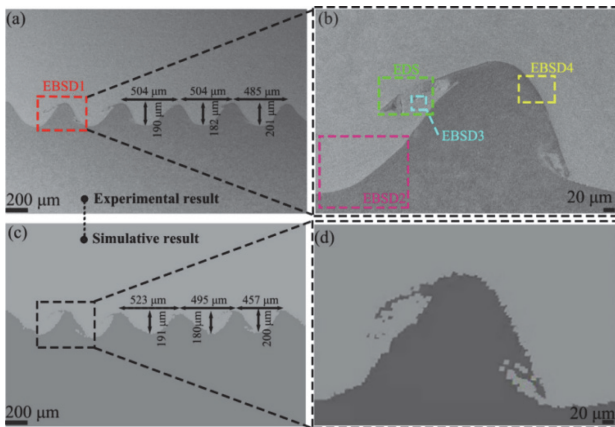


图4 钕/钢爆炸焊界面波形结构实验结果与模拟结果的对比:(a,b)钕/钢焊接界面的SEM图及框选视域的局部旋涡结构;(c,d)对照SEM图进行的模拟结果及框选视域的局部旋涡结构^[43]

Fig. 4 Comparison between experimental and simulation results of waveform structure at niobium/steel explosive welding interface: (a,b) SEM image of niobium/steel welding interface and local vortex structure of the framed viewfield; (c,d) simulated results corresponding to the SEM image and local vortex structure of the framed viewfield^[43]

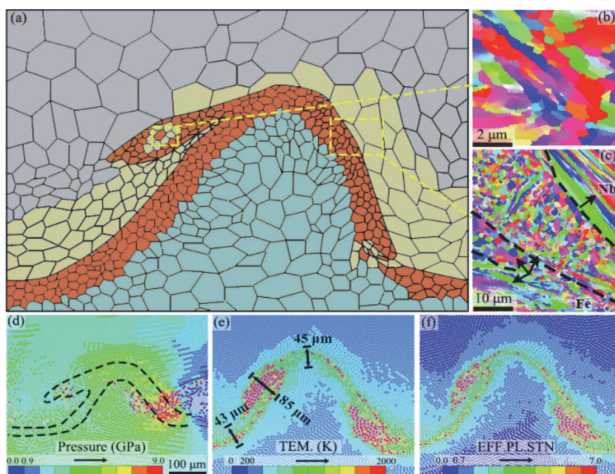


图5 基于EBSD数据绘制的钕/钢爆炸焊界面晶粒分布特征和演变机制示意以及基于光滑粒子流体动力学(SPH)模拟的压力、温度和塑性应变分布情况:(a)晶粒分布示意图;(b)图4b中框选视域-EBSD3的反极图(IPF);(c)图4b中框选视域-EBSD4的反极图(IPF);(d)压力分布;(e)温度分布;(f)塑性应变分布^[43](电子版为彩图)

Fig. 5 Schematic diagrams of grain distribution characteristics and evolution mechanism at the niobium/steel explosive welding interface drawn based on EBSD data, and pressure, temperature and plastic strain distributions based on smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation: (a) schematic diagram of grain distribution; (b) inverse pole figure (IPF) of the framed viewfield-EBSD3 in Fig. 4b; (c) inverse pole figure (IPF) of the framed viewfield-EBSD4 in Fig. 4b; (d) pressure distribution; (e) temperature distribution; (f) plastic strain distribution^[43]

Δ 指初始状态下飞板与基板之间的距离,通常为1~5倍飞板厚度。合适的 Δ 可确保飞板达到足够的速度^[55]。缪广红等^[56-58]采用爆炸焊试验结合有限元模拟计算研究了 Δ (2.5 mm、4.5 mm、6.5 mm、8.5 mm、10.5 mm)对钕/钢复合板爆炸焊质量的影响,结果表明,随着 Δ 增大,界面结合强度呈先由低到高、再由高到低的变化过程,当 $\Delta = 6.5$ mm时可获得较好的界面波形,结合质量较高;对于304/Q235B的爆

炸焊,该团队采用上限间距和下限装药量组合得到了良好的小波状界面波形,该种组合和配置在降低炸药用量的同时能获得优质的焊接界面。此外,该团队还对不同 Δ 的321钢/1230铝双金属管爆炸焊质量进行了研究,发现 Δ 对复层管塑性变形和碰撞速度有较大影响, Δ 过小将严重影响钢/铝双金属复合管的焊接质量,导致结合强度降低。

W_g 指单位面积上的炸药质量,通常在1~5 kg/m²之间,其直接影响爆炸能量^[59],爆炸能量决定了爆炸过程的撞击速度和压力,进而影响界面微观结构、变形程度和焊接接头的力学性能。文献[60]研究了不同炸药量下爆炸焊过程中的压力时程并分析了炸药量、爆轰荷载、碰撞速度和界面波形之间的关系,以及炸药量对界面波的影响。结果表明,在可焊性窗口内,炸药量大会产生较大波状结合界面,厚度递减的布药方式能消除均匀布药方式下界面波的不均匀现象。文献[61]在钢/铜双层圆管爆炸焊中研究了炸药量对结合界面、复层管所受压力及其运动速度和动能的影响规律,发现炸药量对基、复层管产生的变形量及复层管爆轰速度的影响极大,变形量和复层管爆轰速度过小时均不能实现良好的结合。 δ 指飞板与基板的厚度比,通常在0.1~1之间。 δ 影响能量传递和界面波形的形成^[62]。

以上参数之间存在复杂的相互关系,需根据具体材料组合和工艺要求进行优化。例如,增加爆炸速度可以提高结合强度,但也会增加界面熔化和金属间化合物的形成风险。因此,在实际操作中,常需要通过试验和数值模拟结合来确定最佳的参数组合^[63]。

近年来,随着计算机技术的发展,参数优化方法也在不断进步。如使用正交试验设计和响应面法可以有效减少试验次数,而人工智能算法(如遗传算法和神经网络)则能够更快速地找到最优参数组合。

2 多层金属复合板爆炸焊研究进展

多层金属复合材料由于具有优异的综合性能,对于许多行业 and 关键设备拥有巨大的应用价值^[64]。多层金属结构可以实现性能的梯度过渡,提高材料的综合性能^[65]。

2A14Al/Nb层状复合材料兼具抗辐照性、轻量化和热稳定性的特点,航空航天和核工业领域对其需求迫切。Yang等^[66]分别用1060Al和Ag作为中间过渡层,通过平行配置法爆炸焊成功制备出2A14Al/1060Al/Nb和2A14Al/Ag/Nb两种复合材料,前者具有更高的结合强度。两者界面处微缺陷具有相同的几何形状和分布特征,对力学性能的负面影响比金属间化合物更大。

由铝合金和钢组成的多层复合材料被用于大型工程结构制造,包括造船和轨道车辆行业。Malakhov等^[67]首先通过轧制工艺制备了AA1070-AMg6-AA1070层状结构复合材料飞板,然后选用钛(VT1-0)作为中间过渡层,08Cr18Ni10Ti不锈钢作为基板,采用平行配置法爆炸焊工艺成功实现了AA1070-AMg6-AA1070/VT1-0/08Cr18Ni10Ti多层金属复合材料的制备,在450~500℃进行了消应力处理,撕裂强度达(130±10)MPa,大于AA1070合金的强度。

Liang等^[42]选用AA1060作为飞板、TA2作为中间板、

SS30408 作为基板,采用平行配置法爆炸焊工艺制备了 AA1060/TA2/SS30408 三金属复合材料,复合界面呈现典型波状结构,结合质量优异,无明显缺陷,但在界面处产生了再结晶和强织构现象。其爆炸焊过程如图 6 所示。梁国峰等^[68]采用 A7075 铝合金作为飞板、纯铝 A1060 作为过渡层、钛合金 Ti-6Al-4V 作为基板进行了爆炸焊研究,发现 A7075/A1060/Ti-6Al-4V 复合板两个界面结合均较好,无明显分层或微裂纹等缺陷,A7075/A1060 界面呈平直状且剪切强度为 69.77~81.57 MPa,A1060/Ti-6Al-4V 界面呈波纹状,正、反弯曲试验界面分离均发生在 A7075/A1060 界面。

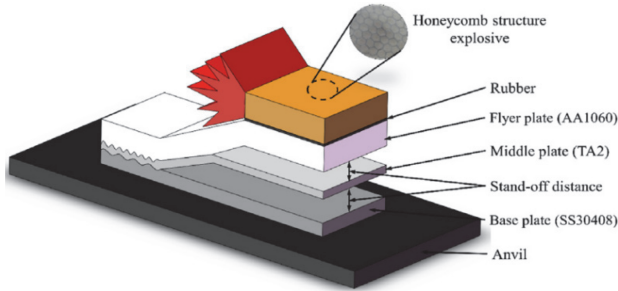


图 6 三金属复合材料 AA1060/TA2/SS30408 爆炸焊实验示意图
Fig. 6 Schematic diagram of explosive welding experiment for AA1060/TA2/SS30408 ternary metal composite material^[42]

以上研究^[42,66-68]说明,带中间过渡层的爆炸焊工艺是解决诸如 Al/Nb、Al/钢、Al/Ti 等冶金不相容性层状复合材料制备的适宜技术,中间层材料的正确选用对提高焊接质量和控制能量损失有显著影响。中间层均具有良好的延展性这一共性特点,为波状结合界面的形成提供了必要的协变条件。此外,界面处的几何微缺陷(孔隙、裂纹和不规则碎屑)对力学性能的负面影响大于金属间化合物。金属间化合物的纳米级晶粒结构有利于提高复合材料界面的延展性,而大量几何微缺陷将导致结合界面完整性受损,为应力集中、孔洞聚集、裂纹扩展等物理过程的发生创造了有利条件,从而降低了结合强度。

除采用常规配置顺序外,也有研究者^[69-70]采用反向配置顺序(即将塑变性差、强度和硬度高的材料作为飞板,塑变性好、强度和硬度低的材料作为基板)进行了爆炸焊研究,均实现了多层金属复合材料的制备。

Mahmood 等^[69]采用工业纯钛 CP-Ti 作为中间层材料,将 Ti6Al4V 飞板与 Cu 基板实现了三金属复合材料 Ti6Al4V/CP-Ti/Cu 的爆炸焊制备。飞板 Ti6Al4V 与中间层 CP-Ti 的复合界面呈平滑的直线状,无明显的熔化区;中间层 CP-Ti 与基板 Cu 的复合界面呈典型的波状形态,无明显的裂纹和孔隙,但在旋涡处存在多个金属间化合物(CuTi、Cu₂Ti、CuTi₂、Cu₄Ti)区域,其平均面积约为 6 000 μm²。拉伸、弯曲、剪切及维氏硬度试验结果表明,该复合材料具有较好的力学性能,满足最低焊接标准。

罗宁团队^[70]为了提高材料间可焊性,选取 1060Al 作为中间过渡层、TA2 作为飞板、AZ31B 镁合金作为中间板、2024Al 铝合金作为基板,运用平行配置法爆炸焊工艺制备了 TA2/AZ31B/2024Al 多层轻质金属复合板材,其爆炸焊实验板材配置及典型实物样本如图 7 所示。

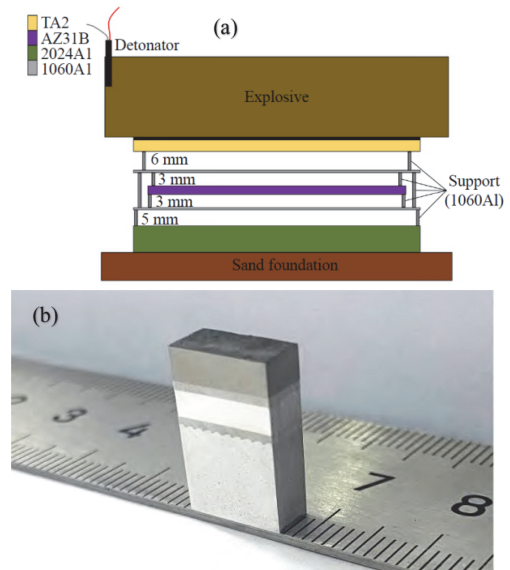


图 7 TA2/AZ31B/2024Al 复合板材爆炸焊实验配置示意图及其典型实物样本;(a)爆炸焊实验装置示意图;(b)典型实物样本^[70]
Fig. 7 Schematic diagram of experimental configuration for explosive welding of TA2/AZ31B/2024Al multilayer light metal composite plates and its typical physical samples; (a) schematic diagram of the explosive welding experimental device; (b) typical physical sample^[70]

试样四个焊接界面均呈波状结构特征,结合界面无明显缺陷,总体焊接质量良好。但在四个结合界面处均观察到了明显的变形织构与再结晶织构特征,晶粒发生细化并形成细晶区。沿宽度方向最大动态抗压强度达 605 MPa,断口界面三维形貌呈近似水面波纹结构特征,沿厚度方向最大动态抗压强度达 390 MPa,断口界面三维形貌呈纤维状韧性断裂特征。

Zhang 等^[41]通过爆炸焊制备了 5083Al/1060Al/TA1/Ni/SUS304 五层金属复合板,其波状界面微观扫描如图 8 所示,四个界面呈现出波长和振幅明显不同的波形结构,界面显微组织经历了动态恢复和再结晶,产生了不同取向的细晶组织区。各界面拉剪强度均达到技术指标要求,良好的界面结合强度主要归功于薄多层材料的加入,使得各界面呈现出理想的波浪结构,波浪结构增加了基板和飞板的接触面积。同时,界面两侧的晶粒尺寸相对较小,极大改善了材料界面的力学性能。

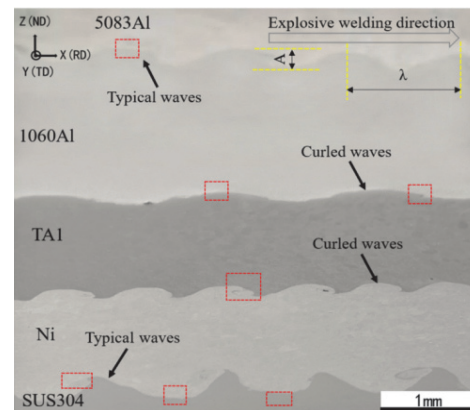


图 8 五层金属复合板材 5083Al/1060Al/TA1/Ni/SUS304 波状界面微观扫描图像^[41]
Fig. 8 Microscopic scanning image of wavy interface of five-layer metal composite plate 5083Al/1060Al/TA1/Ni/SUS304^[41]

对典型多层金属复合材料爆炸焊制备实验中金属板材的配置顺序、物理尺寸及板间间隙等重要内容进行总结, 如表 2 所示。总结发现, 对于爆炸焊工艺制备多层金属复合板材, 其金属材料组合和功能梯度设计主要根据工程应用需求而定, 其爆炸焊构型设计大多采用平行配置法, 材料的常规配置顺序从飞板、中间板到基板, 塑性变形能力逐渐降低, 强度和硬度逐渐升高^[41, 66-68]。若将材料配置顺序倒置, 塑性变差、强度和硬度高的材料作为飞板, 塑性变好、强度和硬度低材料作为基板, 为了提高材料间的可焊性, 一般需选用塑性更好的材料作为中间过渡层促进焊接, 中间过渡层对于提高焊接质

量和控制能量损失起着重要作用^[69-70]。同时, 在五层金属复合材料制备中, 飞板和基板材料的厚度较中间层材料大很多, 飞板和基板厚度越大, 中间层材料越多, 飞板、中间层、基板之间的配置间隙也越大。较大的配置间隙确保了飞板有足够大的碰撞速度, 促进射流的形成, 射流的冲刷作用在碰撞动能加持下自上而下以爆轰波的形式推动多层金属材料完成焊接。另外, 通过比较波型类型可以发现, 材料密度对波形类型有较大影响, 密度接近的材料界面多形成典型波, 密度差异较大的材料界面多形成卷曲波。微量脆性相、微孔多出现在旋涡区, 容易导致波形局部畸变, 对界面爆炸焊质量有一定的影响。

表 2 多层金属复合板材爆炸焊制备实验中金属板材的配置顺序、物理尺寸及板间间隙

Table 2 Configuration sequence, physical dimensions and inter-plate gaps of metal plates in the explosive welding preparation experiment of multi-layer metal composite plates

多层金属复合板材	配置方式	叠层配置顺序	材质	物理尺寸 mm	层间配置间隙 mm	波形类型	界面特征
2A14Al/ Ag(1060A1)/Nb ^[66]	平行	第一层(飞板)	2A14Al	150×100×5	4	典型波: (2A14Al/Ag(1060A1)) 卷曲波: (Ag(1060A1)/Nb)	旋涡区有微量弥散脆性相, 无裂纹、气孔
		第二层(中间层)	Ag(1060A1)	150×100×0.5	2		
		第三层(基板)	Nb	150×100×3	(Ag(1060A1)/Nb)		
AA1070-ALMg6- AA1070/Ti(VT1-0)/ 08Cr18Ni10Ti ^[67]	平行	第一层(飞板)	轧制板材 AA1070-ALMg6- AA1070	300×200×10	6	典型波: (AA1070-ALMg6- AA1070/VT1-0) 卷曲波: (VT1-0/08Cr18Ni10Ti)	无连续脆性相, 无裂纹、气孔
		第二层(中间层)	Titanium (VT1-0)	300×200×2	6		
		第三层(基板)	08Cr18Ni10Ti	300×200×4	(VT1-0/08Cr18Ni10Ti)		
AA1060/TA2/ SS30408 ^[42]	平行	第一层(飞板)	AA1060	220×120×10	5	均为卷曲波	无连续脆性相, 仅旋涡区有微量 Ti-Fe 混合相; 无裂纹, 旋涡区有微量微孔(<2 μm)
		第二层(中间层)	TA2	200×100×2	6		
		第三层(基板)	SS30408	200×100×8	(TA2/SS30408)		
A7075/A1060/ Ti-6Al-4V ^[68]	平行	第一层(飞板)	A7075	200×100×3	2	典型波: (A7075/A1060) 卷曲波: (A1060/Ti-6Al-4V)	无连续脆性相, 无缺陷
		第二层(中间层)	A1060	200×100×1	5		
		第三层(基板)	Ti-6Al-4V	200×100×3	(A1060/Ti-6Al-4V)		
Ti6Al4V/CP-Ti/Cu ^[69]	平行	第一层(飞板)	Ti6Al4V	200×150×3	8	典型波: (Ti6Al4V/CP-Ti) 卷曲波: (CP-Ti/Cu)	无连续脆性相, 无缺陷
		第二层(中间层)	CP-Ti	200×150×0.2	5		
		第三层(基板)	Cu	200×150×3	(CP-Ti/Cu)		
TA2/AZ31B/ 2024Al ^[70] (1060Al 作为中间层)	平行	第一层(飞板)	TA2	800×400×4	6	卷曲波: (TA2/1060Al/ AZ31B) 典型波: (AZ31B/1060Al/ 2024Al)	无连续脆性相, 无裂纹, 有微量微孔
		第二层(过渡层)	1060Al	800×400×1	3		
		第三层(中间层)	AZ31B	700×350×3	3		
		第四层(过渡层)	1060Al	800×400×1	5		
		第五层(基板)	2024Al	800×400×10	(1060Al/2024Al)		
5083Al/1060Al/TA1/ Ni/SUS304 ^[41]	平行	第一层(飞板)	5083Al	200×200×35	28	卷曲波: (5083Al/1060Al; Ni/SUS304) 典型波: (TA1/Ni) TA1/Ni)	无连续脆性相, 无裂纹、微孔
		第二层(过渡层)	1060Al	200×200×4	10		
		第三层(中间层)	TA1	200×200×2	12		
		第四层(过渡层)	Ni	200×200×2	9		
		第五层(基板)	SUS304	230×230×58	(Ni/SUS304)		

3 新型功能梯度金属复合板材爆炸焊研究进展

新型功能梯度金属复合板材具有性能、功能的连续变化和梯度分布特征, 在现代工业生产和装备制造中应用极其广

泛。为提升新型功能梯度金属复合板材爆炸焊工艺适应性, 研究者通过在爆炸焊中加入中间层, 达到改善界面结合质量、拓展可焊接材料范围的目的。Saravanan 等^[71]研究了中间层材料(1100 铝、纯铜和 304 不锈钢)对 5052 铝/316 不锈

钢可焊性窗口的影响,发现中间层能使飞板与中间层材料的动态弯曲角和碰撞速度分别降低 50%、15%,从而使可焊性窗口扩大 40%。该团队进一步给出了铝/钢可焊性窗口下限的数学表达式(式(4)),该公式具有潜在的工业应用价值。

$$\beta = 0.3\sqrt{H_V/(\rho V_c^2)} \quad (4)$$

式中: H_V 为飞板的维氏硬度, N/m^2 ; ρ 为密度, kg/m^3 。

此外,还可通过对基板复合表面进行微型缺口预制,以此来提高爆炸焊界面质量。Sun 等^[72]通过对 W 板进行燕尾槽预制,然后通过真空热熔制备 W/CuCrZr 复合板,最后对真空热熔 W/CuCrZr 复合板进行爆炸焊接研究,结果表明,热熔爆炸焊接 W/CuCrZr 复合板界面结合良好,具有 3~8 μm 的交叉熔融区,但在 W 侧产生了裂纹。热熔爆炸焊接界面附近的高温、高压进一步促进了界面的结合。其 W 板燕尾槽设计与爆炸装置实物如图 9 所示,热熔爆炸焊接复合板 W/CuCrZr 的金相组织如图 10 所示。

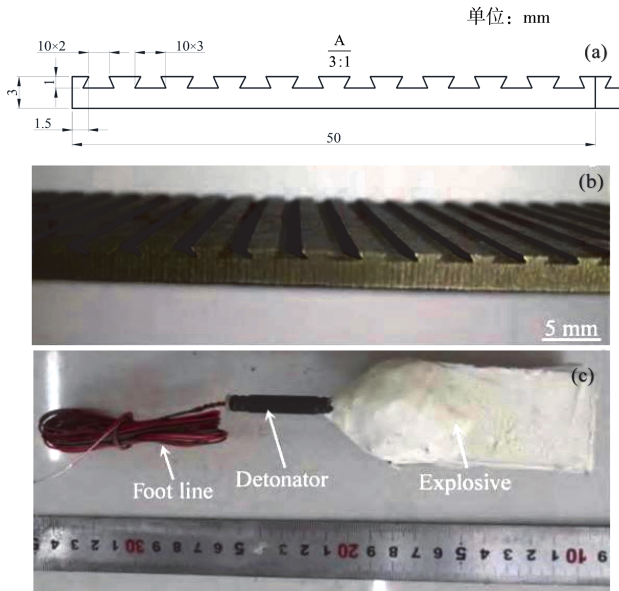


图 9 钨板燕尾槽设计与爆炸装置实物:(a)钨板燕尾槽的尺寸设计;(b)机加工燕尾槽后的钨板;(c)爆炸焊接装置实物^[72]

Fig. 9 Design of tungsten plate dovetail groove and physical diagrams of explosive device: (a) dimensional design of tungsten plate dovetail groove; (b) tungsten plate with machined dovetail groove; (c) physical explosive welding device^[72]

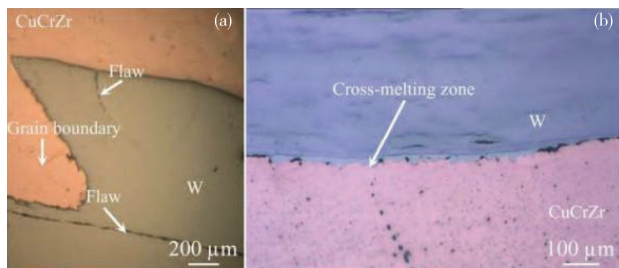


图 10 热熔爆炸焊接复合板 W/CuCrZr 的金相组织:(a)钨板燕尾角局部放大;(b)爆炸复合界面形貌特征^[72]

Fig. 10 Metallographic structure of W/CuCrZr composite plate by hot-melt explosive welding: (a) partial magnification image of tungsten plate dovetail angle; (b) morphological characteristics of explosive cladding interface^[72]

Sun 等还研究了用于超导托卡马克核聚变装置的具有中空换热通道的 316L/CuCrZr 复合板材的制备技术^[73]。该技

术先通过在 316L 不锈钢基板预制微孔,再采用爆炸焊制备 316L/CuCrZr 复合板,最后对微孔进行扩孔,得到了具有中空换热通道的 316L/CuCrZr 复合板材。经检测,其焊接质量良好,以均匀波形结合,界面无空隙和裂纹等缺陷,换热通道具有较好的密封性且耐高温、高压,满足托卡马克核聚变装置使用要求。其 316L 不锈钢基板微孔预制方案和扩孔后的 316L/CuCrZr 复合板材实物如图 11 所示。

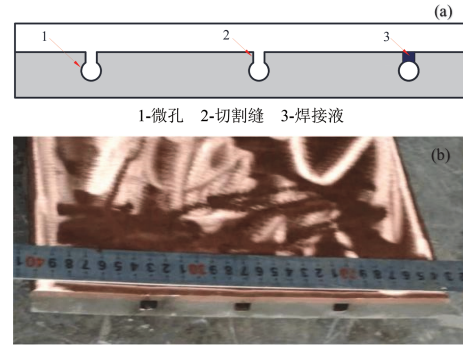


图 11 不锈钢基板微孔预制方案和 316L/CuCrZr 爆炸焊复合板材扩孔后实物:(a)基板微孔预制方案;(b)爆炸焊复合板材扩孔后实物^[73]

Fig. 11 Micropore prefabrication scheme for stainless steel substrate and physical sample of 316L/CuCrZr explosively welded composite plate after hole expansion: (a) micropore prefabrication scheme for substrate; (b) physical sample of explosively welded composite plate after hole expansion^[73]

研究者还通过将其他先进技术与爆炸焊技术联合使用开展新型复合材料的制备,为新型高性能材料的开发提供参考。Huang 等^[74]研究了 3D 打印 SUS316L 与纯铝 A1060 的爆炸焊接,发现界面处存在大量高角度晶界和晶粒细化,阻碍了位错重结晶,提高了材料强度;在靠近界面 SUS316L 一侧经历了马氏体相变,存在显著的塑性应变,孔隙率降低。Wei 等^[38]通过爆炸焊制备了 Mo-Cu/Cu 复合板材,发现界面处形成了一种不规则塑性变形层,存在恢复-再结晶现象,并且界面无裂缝和孔洞缺陷,最大剪切强度为 252.1 MPa,平均纳米硬度值达 4.50 GPa。

4 爆炸焊金属复合板材性能评价方法

焊后性能评价是确保复合板材质量可靠性的关键步骤。近年来,一系列新型评价方法用于爆炸焊复合板材的研究,主要包括非破坏性检测技术、界面结合强度测试、残余应力测量、腐蚀性能评价、高温服役性能测试、动态载荷响应法等^[5-11, 38, 50-53, 72-74]。

非破坏性检测技术包括 X 射线计算机断层扫描(CT)、超声 C 扫描等高分辨率无损检测方法,能精确识别界面缺陷和内部结构^[62, 74-75]。例如,通过超声 C 扫描技术,能够快速检测大面积复合板材界面的结合质量,识别微小界面的分离和夹杂,已在航空航天领域的复合板材质量控制中得到广泛应用。

界面结合强度测试除传统的剪切试验外,还开发了新型的界面拉伸试验和弯曲试验方法,能够更全面地评价界面结合强度。近年来,采用原位测试技术测试界面结合强度。通过在扫描电镜中进行微尺度力学测试,能够直接观察界面的变形和断裂过程,获得界面强度的微观机制信息^[76-78]。该方

法为界面强化设计提供了重要指导。

电化学阻抗谱 (EIS)^[79-80] 和扫描振动电极技术 (SVET)^[81] 等先进方法能够评估复合板材在各种腐蚀环境下的抗腐蚀性能。电化学阻抗谱技术能够提供复合板材界面腐蚀的动态信息。研究发现, 爆炸焊接界面的特殊结构可能导致局部电化学行为的异常, 这对于理解和改善复合板材的耐腐蚀性能意义重大。

随着研究工作的持续推进, 复合板材性能的新型评价方法被不断完善。除传统力学性能测试外, 研究者还开发了一系列针对特定应用的性能评价方法, 如热循环测试、冲击载荷测试、腐蚀疲劳测试等。此外, 针对特定应用场景, 开发了一些专门的性能评价方法。对于核电用复合板材, 开发了模拟辐照环境下的力学性能测试方法; 对于海洋工程用复合板材, 设计了模拟海水环境的疲劳-腐蚀耦合试验方法。这些方法为新型复合板材的性能优化和应用拓展提供了重要支持。

5 爆炸焊金属复合板材的应用前景

5.1 石油化工领域

爆炸焊复合板材在石油化工领域主要用于反应釜、换热器、储罐、原油集输管道、海洋油气输送管道等关键设备^[50, 73, 82-86]的生产。这类设备通常需同时具备耐腐蚀和高强度, 而单一材料难以满足要求。爆炸焊复合板材可将不锈钢、钛合金等耐腐蚀材料与碳钢等高强度材料完美结合, 实现“内抗腐蚀, 外保强度”的效果。如在乙烯裂解炉中使用不锈钢/碳钢复合板, 可有效延长设备使用寿命, 提高生产效率。

爆炸焊复合板材相比传统整体式不锈钢或钛合金材料, 可大幅降低成本。中国石油集团宝石管业有限公司毕宗岳团队联合西安天力金属复合材料股份有限公司、西安交通大学, 早在 2013—2016 年依托国家 863 课题“双金属层状结构复合管材技术研究”(2013AA031303) 和陕西省科技统筹创新工程计划课题“双金属层状结构复合管研制”(2014KTDZ01-03-02) 开展了一系列复合板材、管材的研制^[87-91]。该团队先采用爆炸+热轧技术制备出双金属复合板材, 再通过 JCOE 成形+特种复合焊接技术制备各种规格尺寸的用于酸性油气集输的双金属复合管材产品。图 12 为该团队研制的两种双金属复合板材界面微观形貌特征。可观察到, 界面呈微波结构(图 12a、c), 无连续熔化层、裂纹等常见缺陷; 热轧后, 由于强烈塑性变形, 界面处波状形貌已完全趋于扁平, 界面近乎平直, 无分层、孔洞、裂纹等缺陷(图 12b、d)。

随着我国海洋油气田资源的大规模开采, 石油化工行业向高端化、绿色化发展, 爆炸焊复合板材的应用范围将进一步扩大。结合行业报告及爆炸焊复合板材行业发展的常规预测逻辑, 预计未来 5 至 10 年, 我国石油化工领域对爆炸焊复合板材的需求量将达到 50 万 t 左右, 年均增长率超过 15%^[82-85]。这一趋势将为爆炸焊复合板材技术的进一步发展提供强劲动力。

5.2 船舶与海洋工程

在船舶制造方面, 爆炸焊复合板材主要应用于船体结构、甲板、舱壁等部位^[50, 64, 82-85, 92-93], 例如, 采用铝/钢复合板可

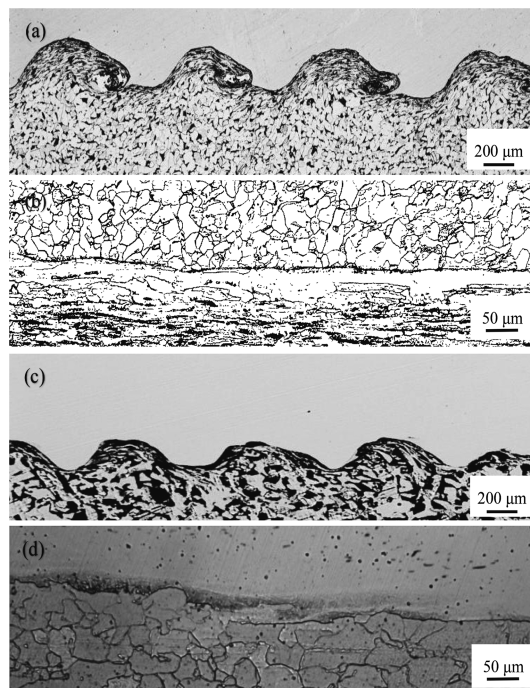


图 12 两种爆炸焊双金属复合板材热轧前后复合界面形貌特征: (a) 采用爆炸焊制备的 TA1/X65 复合板材的界面微观形貌特征; (b) 采用爆炸焊+热轧工艺制备的 TA1/X65 复合板材的界面微观形貌特征; (c) 采用爆炸焊制备的 2205/X65 复合板材的界面微观形貌特征; (d) 采用爆炸焊+热轧工艺制备的 2205/X65 复合板材的界面微观形貌特征

Fig. 12 Morphological characteristics of the composite interface of two types of explosively welded bimetallic composite plates before and after hot rolling: (a) microscopic morphological characteristics of the interface of TA1/X65 bimetallic composite plates prepared by the explosive welding; (b) microscopic morphological characteristics of the interface of TA1/X65 bimetallic composite plates prepared by the explosive welding+hot rolling process; (c) microscopic morphological characteristics of the interface of 2205/X65 bimetallic composite plates prepared by the explosive welding; (d) microscopic morphological characteristics of the interface of 2205/X65 bimetallic composite plates prepared by the explosive welding+hot rolling process

有效降低船舶质量, 提高航速和燃油效率。据统计, 使用爆炸焊复合板材可使船舶质量减轻 15%~20%, 燃油效率提高 8%~10%。

在海洋工程领域, 爆炸焊复合板材在海上平台、深海管道、水下装备等场景中应用广泛。海上钻井平台采用钛/钢复合板, 可同时满足结构强度与耐腐蚀要求, 解决了传统单一材料难以兼顾的技术难题。在深海管道系统中, 不锈钢/碳钢复合管道能够显著提升管道的使用寿命与运行安全性。根据中船协会分析报告、政策文件以及爆炸焊复合板材行业发展的常规预测逻辑, 预计未来 5 至 10 年, 我国船舶与海洋工程领域对爆炸焊复合板材的需求量将达到 30 万 t 左右, 年均增长率在 10%~12% 之间^[82-84, 94-95]。这一趋势不仅将推动爆炸焊技术的创新, 还将促进相关产业链的发展, 为我国船舶与海洋工程装备制造业的转型升级提供有力支撑。

5.3 航空航天领域

爆炸焊复合板材在航空航天领域具有独特的应用价值和广阔的发展前景。近年来, 随着全球航空航天产业的快速发展, 对高性能、轻量化材料的需求日益增长。在航空领域, 爆炸焊复合板材主要应用于飞机机身、机翼、发动机等关键部件^[50, 82-85, 93, 96]以及抗弹装甲^[97-99]。例如, 采用铝/钛复合

板可显著降低飞机质量,同时保持足够的强度和刚度。此外,复合板材还具有良好的耐热性和抗疲劳性,能够满足飞机在高温、高压环境下的使用要求。据统计,使用爆炸焊接复合板材可使飞机质量减轻 5%~8%,燃油效率提高 3%~5%。在航天领域,爆炸焊复合板材在火箭、卫星、空间站等方面也有着广泛应用。如在火箭燃料箱制造中,使用铝/不锈钢复合板可同时满足轻量化和耐蚀性的要求,有效提高火箭运载能力。在卫星结构中,采用铝/钛复合板可实现轻量化设计,同时保证足够的强度和热稳定性。

随着航空航天技术朝更高、更快、更远的方向发展,爆炸焊复合板材的应用将进一步拓展。预计未来 5 至 10 年,我国航空航天领域对爆炸焊复合板材的需求量将达到 10 万 t 左右,年均增长率在 15%~20% 之间^[82-84]。在此背景下,爆炸焊复合板材将成为支撑航空航天关键构件升级的重要基础材料,进一步带动材料制备、连接技术与装备应用的协同突破,助力我国航天强国建设。

5.4 核工业领域

在核电站建设中,爆炸焊复合板材主要应用于反应堆压力容器、蒸汽发生器、换热器等核心设备^[21,50-51,73,82-85,100-102]。如采用不锈钢/碳钢复合板可有效提高设备的安全性和使用寿命。此外,复合板材还具有良好的热传导性和抗辐射性,能够满足核电站的苛刻环境要求。据统计,使用爆炸焊复合板材可使核电设备的使用寿命延长 20%~30%,同时降低制造成本 10%~15%。

在核燃料循环领域,爆炸焊复合板材在铀浓缩设备、乏燃料处理设施等方面也有广泛的应用。如在铀浓缩离心机的制造中,使用钛合金/钢复合板可实现轻量化设计,同时保证足够的强度和抗腐蚀性。

随着核电技术朝更安全、高效的方向发展,爆炸焊复合板材的应用将进一步深化。预计未来 5 至 10 年,我国核工业领域对爆炸焊复合板材的需求量将达到 5 万 t 左右,年均增长率在 8%~10% 之间^[82-84]。

6 挑战与展望

6.1 面临的挑战

(1) 界面脆性相的形成与扩散难以管控

界面脆性是制约爆炸焊复合板材服役可靠性的关键,其核心源于爆炸焊界面脆性金属间化合物(IMC)相的形成与元素扩散的不可控性。冶金不相容的异种金属组合(如 Nb/钢、Ti/钢、Ti/铜、Al/钢等)是 IMC 相形成的基本条件,高温、高压和高应变率为脆性相生成提供了热力学条件。同时,爆炸焊的瞬时性虽能抑制长距离扩散,但界面局部熔融区(如 Ti/SS 界面熔区厚度 7 μm)仍会发生元素的剧烈扩散,形成脆性相梯度分布,会加剧界面微缺陷的产生,但可通过高塑性中间层材料的巧妙运用加以解决。

(2) 残余应力的多源叠加与分布不均

爆炸焊的冲击波加载与非均匀塑性变形会在复合板中产生显著的残余应力,其控制难点在于残余应力分布不均与调控手段的副作用。爆炸冲击波使飞板以极高的速度碰撞基板,界面波峰处因剧烈塑性变形产生压应力,波谷处因金

属流动不充分产生拉应力,形成“压-拉交替”的残余应力场,易导致波谷处出现微孔洞;同时三金属复合板中,各材料间较大的热膨胀系数差异引起的热残余应力易与冲击残余应力叠加,易引发界面剥离。工程领域常采用热处理工艺消减残余应力,但该手段始终存在“应力消除效果”与“材料性能劣化”的核心矛盾。低温热处理温度不足,残余应力释放效率极低,难以达到调控要求;高温热处理虽应力消除效果较好,但极易诱发界面金属间化合物增生、基材脆化等次生缺陷;而常规机械校形不仅适用场景受限,还存在应力调控精度差、易造成界面二次损伤等局限。

(3) 污染防控与操作风险的双重制约

具有较高技术门槛的爆炸焊技术以炸药为能源,其环境污染与操作安全问题较为突出。噪声与震动污染的难收集、毒气与粉尘污染的高扩散以及冲击波与飞石风险均对其工程应用产生制约。

6.2 展望

(1) 人工智能与机器学习在爆炸焊工艺优化和性能预测中的应用

爆炸焊的瞬时性(微秒级)、多参数耦合(炸药量/间隙/爆速)、界面复杂性(旋涡/脆性相)导致传统经验化工艺优化效率低,人工智能与机器学习技术可通过数据驱动突破这一瓶颈,主要聚焦“多参数耦合工艺的智能优化”“界面性能与缺陷的精准预测”和“数字孪生驱动的全流程管控”三大方向,重点研究爆炸焊工艺参数对界面质量的影响规律、界面脆性相与残余应力引起失效的预测分析以及超大尺寸复合板“爆轰不稳定-边缘变形-残余应力分布不均”等问题的全流程动态监控与预判。

(2) 面向极端环境(超高温、抗辐照)的新型复合材料爆炸焊

随着核电、深海油气、航空航天等领域对“耐极端环境+低成本”复合材料的需求激增(如核反应堆需抗辐照的 Nb/钢复合板、深海平台需抗海洋环境腐蚀的 Ti/钢复合板),爆炸焊将聚焦新型材料组合与界面改性技术,未来重点突破超高温抗辐照复合板的爆炸焊制备、深海/强腐蚀环境专用复合板的性能突破和轻质高强复合板的爆炸焊工艺创新三大方向,重点研究多层梯度复合设计、界面高温稳定性调控、新型耐蚀复合体系开发、层间间隙精准控制、镁合金-钛合金复合、多孔金属夹芯复合。

(3) 跨尺度模拟技术与绿色、安全爆炸作业系统的发展

爆炸焊的“原子扩散(纳米级)—界面细观结构(微米级)—宏观板形(米级)”多尺度特性与“环保高压)、安全风险(冲击波/飞石)”制约其产业化,未来将通过跨尺度模拟精准化、作业系统绿色安全化实现突破。主要聚焦跨尺度模拟技术的整合与精准预测(多尺度模型耦合、人工智能加速模拟计算)、绿色爆炸作业系统的开发与应用(低爆速环保炸药的研发、密闭爆炸仓与粉尘收集系统、废料循环利用)和智能安全监测与风险防控(实时爆速与冲击波监测、自动化布药与起爆)。

在可预见的未来,随着工业生产新需求和相关技术的不断进步,爆炸焊的重要性将持续提升,尤其在制备具有精确

特性、特殊结构的定制型材料、新型功能梯度金属复合板材和多层金属复合板材方面取得了显著成效,其多功能性变得愈发宝贵。该领域的研究在未来将聚焦改进炸药成分、调整被焊材料的几何形状和排列方式等,以期扩展到更广泛材料类别的焊接。同时,研究工作还可聚焦开发创新性的界面波形和缺陷控制方法以及中间层材料,以进一步提高结合质量并改善焊接性能。

参考文献

- Narita M M, Asai K, Sato H, et al. *Materials*, 2025, 18(5), 1013.
- Sherpa B B, Izumi Y, Inao D, et al. *Materials Today Communications*, 2025, 42(1), 111536.
- Yuan J X, Shao F, Bai L Y, et al. *Journal of Central South University*, 2024, 31(1), 43.
- Sun Y B, Gou J N, Wang C, et al. *Defence Technology*, 2024, 32, 521.
- Li J H, Liang X P, Tao H, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 35(1), 587.
- Song X H, Yang Y X, Cheng Y F, et al. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2024, 160, 160.
- Su Z Y, Masahiro M, Masahiro N, et al. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 186, 104869.
- Ivanov S G, Berdychenko A A. *Technical Physics*, 2024, 68(10), 351.
- Shan S J, Zhang J L, Zong Y B, et al. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2024, 10(1), 195.
- Andrey M, Nemat N, Igor D, et al. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, 188(8), 1.
- Wu X M, Shi C G, Wang H T, et al. *Materials Research Express*, 2023, 10(10), 106518.
- Kumar P, Ghosh S K, Saravanan S, et al. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2023, 59(3), 253.
- Kotyk M. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 28, 3319.
- Mojzeszko M, Madej L. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2024, 24(1), 37.
- Zhu L, Zhou Q, Song C B, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 28, 668.
- Lin M J, Liao J J, Xue B, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 319(10), 118071.
- Bir B S, Yu M H, Daisuke I, et al. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 26(1), 1.
- Yang M, Cao C, Wang J X. *Materials & Design*, 2023, 235, 112372.
- Liang H L, Luo N, Chen Y L, et al. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2023, 28(7), 598.
- Zhang Q B, Yuan Y, Zhang C J, et al. *Materials & Design*, 2023, 234, 112346.
- Bir B S, Reetu R. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 2024, 6, 100078.
- Sherpa B B, Kumar P D, Upadhyay A, et al. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021, 74(2), 1.
- Sherpa B B, Kumar P D, Upadhyay A, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113, 3303.
- Han S C. *Interfaces and fracture microstructures in explosive welding*, National Defense Industry Press, China, 2011, pp. 232 (in Chinese). 韩顺昌. 爆炸焊接界面与断口组织, 国防工业出版社, 2011, pp. 232.
- Viguera D, Renero C D, Inal O. *Materials Technology*, 2007, 22(4), 200.
- Saravanan S, Raghukandan K, *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, 28(5), 589.
- Lysak V, Kuzmin S. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 222, 356.
- Li X J, Mo F C, Wang X H, et al. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(1), 36.
- Tabbataee M, Mahmoudi J. *SIMS Oslo Norway*, 2013, pp. 1287.
- Zheng Y M. *Explosive welding and explosive composites*, National Defense Industry Press, China, 2017, pp. 47 (in Chinese). 郑远谋. 爆炸焊接和爆炸复合材料, 国防工业出版社, 2017, pp. 47.
- Zeng X Y, Li X J, Wang X H, et al. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49, 1977.
- Abrahamson G R. *Journal of Advanced Research*, 1961, 28(4), 519.
- Bahrani A S, Black T J, Crossland B. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1967, 296(1445), 123.
- Yang M, Xu J F, Ma H H, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 213, 108685.
- Carvalho G, Galvao I, Mendes R, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 283, 116707.
- Merriman C. *Welding Journal*, 2006, 85(7), 27.
- Wang Y H. *Research and practice in explosive welding of metal plates*, National Defense Industry Press, China, 2007, pp. 7 (in Chinese). 王耀华. 金属板材爆炸焊接研究与实践, 国防工业出版社, 2007, pp. 7.
- Wei Y, Xie Z R, Wu X J, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27, 2806.
- Zhang B Y, Ma H H, Ding L, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25, 3395.
- Wei Y, Wu X J, Xie Z R, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24, 7788.
- Zhang C H, Song C B, Zhu W G, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 19, 314.
- Liang H L, Luo N, Chen Y L, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18, 564.
- Xu J F, Ma H H, Yang M, et al. *Materials & Design*, 2022, 218, 110716.
- Godunov S K, Deribas A A, Zabrodin A V, et al. *Journal of Computational Physics*, 1970, 5(3), 517.
- Godunov S K, Zabrodin A V, Prokopov G P. *USSR Computational Mathematics & Mathematical Physics*, 1962, 1(4), 1187.
- Crow J E. *Computational physics*, Institute of Physics, London, 1970, pp. 37.
- Cowan G R, Holtzman A H. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(4), 928.
- Hunt J N. *Philosophical Magazine*, 1968, 17(148), 669.
- Xie L H, Duan W D, Jiang P. *Blasting*, 2023, 40(2), 153 (in Chinese). 谢礼宏, 段卫东, 蒋培. 爆破, 2023, 40(2), 153.
- Zheng Y M. *Principles and applications of explosive welding and explosive composites*, Central South University Press, China, 2007, pp. 84 (in Chinese). 郑远谋. 爆炸焊接和爆炸复合材料的原理及应用, 中南大学出版社, 2007, pp. 84.
- Bi Z X, Li X J, Yang K, et al. *Defence Technology*, 2023, 25(7), 192.
- Shang Y P, Wang H H, Qiao Y Y, et al. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2025(1), 1 (in Chinese). 尚永鹏, 王呼和, 乔岳云, 等. 兵器材料科学与工程, 2025(1), 1.
- Hao Y Q, Liang Z Y, Deng D Z, et al. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2023, 44(5), 497 (in Chinese). 郝永强, 梁增友, 邓德志, 等. 中北大学学报(自然科学版), 2023,

- 44(5), 497.
- 54 Xia Z Q, Wang H T, Shi C G, et al. *Crystals*, 2023, 13(7), 1079.
- 55 Yang M, Wang J X, Chao C, et al. *Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters*, 2023, 17(10), 2300179.
- 56 Miao G H, Ma L M, Wu J Q, et al. *Blasting*, 2020, 37(2), 106 (in Chinese).
缪广红, 马雷鸣, 吴建强, 等. *爆破*, 2020, 37(2), 106.
- 57 Wei Z M, Miao G H, Dong J L, et al. *Journal of Jinling Institute of Technology*, 2024, 40(3), 77 (in Chinese).
魏正梅, 缪广红, 董继蕾, 等. *金陵科技学院学报*, 2024, 40(3), 77.
- 58 Miao G H, Ma Q Y, Zhou D P, et al. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2023, 44(4), 990 (in Chinese).
缪广红, 马秋月, 周大鹏, 等. *力学季刊*, 2023, 44(4), 990.
- 59 Kumar P, Ghosh S K, Saravanan S, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(5-6), 2387.
- 60 Yan J W, Lei F C, Yu Q Y, et al. *Engineering Blasting*, 2018, 24(6), 10 (in Chinese).
闫建文, 雷方超, 俞祺洋, 等. *工程爆破*, 2018, 24(6), 10.
- 61 Sui G F, Li J S, Ma B, et al. *Materials Science and Technology*, 2010, 18(6), 741 (in Chinese).
隋国发, 李金山, 马贝, 等. *材料科学与工艺*, 2010, 18(6), 741.
- 62 Elitas M, Goktas M, Acarer M, et al. *Materials Testing*, 2023, 65(5), 789.
- 63 Wu T, Yang C L. *Materials Science and Technology*, 2023, 39(7), 834.
- 64 Xu S X, Sheng G, Luo W, et al. *Ship Engineering*, 2024, 46(7), 122 (in Chinese).
徐双喜, 盛过, 骆伟, 等. *船舶工程*, 2024, 46(7), 122.
- 65 Zhang L J, Pei Q, Bi Z Y. *Welded Pipe and Tube*, 2024, 47(2), 37 (in Chinese).
张林杰, 裴强, 毕宗岳. *焊管*, 2024, 47(2), 37.
- 66 Yang M, Wang J X. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30, 4654.
- 67 Malakhov A, Niyozbekov N, Denisov I, et al. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, 188(8), 1.
- 68 Liang G F, Huang J W, Hu J N, et al. *Engineering Blasting*, 2024, 30(6), 138 (in Chinese).
梁国峰, 黄佳雯, 胡家念, 等. *工程爆破*, 2024, 30(6), 138.
- 69 Mahmood Y, Chen P W, Bataev I A, et al. *Defence Technology*, 2021, 17, 1592.
- 70 Liang H L, Luo N, Chen Y L, et al. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(4), 141 (in Chinese).
梁汉良, 罗宁, 陈彦龙, 等. *爆炸与冲击*, 2024, 44(4), 141.
- 71 Saravanan S, Raghukandan K, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32(1), 91.
- 72 Sun Y L, Liang H L, Zhu J S, et al. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2024, 53(11), 3077.
- 73 Sun Y L, Ma H H, Shen Z W. *Engineering Blasting*, 2023, 29(1), 55 (in Chinese).
孙玉玲, 马宏昊, 沈兆武. *工程爆破*, 2023, 29(1), 55.
- 74 Huang J W, Liang G F, Luo N, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27, 2508.
- 75 Wang R, Zhang L, Wu J T, et al. *Nondestructive Testing*, 2021, 43(1), 9 (in Chinese).
王茹, 张磊, 吴江涛, 等. *无损检测*, 2021, 43(1), 9.
- 76 Liu K Y, Chen P W, Ran C, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 300, 117400.
- 77 Zhou Q, Liu R, Zhou Q, et al. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 830, 142260.
- 78 Wu X Y, Kondo S, Yu H, et al. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 826, 141995.
- 79 Wojewoda B J, Bugajska M, Guspel J, et al. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(9), 7080.
- 80 Najafi S, Khanzadeh M R, Bakhtiari H, et al. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2020, 56(6), 675.
- 81 Mohammad R J, Abdollah S, Gholamreza K, et al. *Metals*, 2020, 10(5), 634.
- 82 Originality Document Research Center. 2026-2030 Forecast report on competition risks and investment development trends of China's metal explosion welding industry, <https://m.book118.com/html/2025/1130/6145122011012021.shtm>.
原创力文档研究中心. 2026-2030 中国金属爆炸焊接竞争风险及投资发展趋势预测报告, <https://m.book118.com/html/2025/1130/6145122011012021.shtm>.
- 83 China Nonferrous Metals Industry Association. *Development report on China's explosion-bonded clad plate industry (2024)*, China Nonferrous Metals Industry Association, China, 2024.
中国有色金属工业协会. *中国爆炸焊接复合板行业发展报告 (2024)*, 北京:中国有色金属工业协会, 2024.
- 84 Docin Industry Research Department. 2026—2030 Analysis report on operational risks and marketing models of China's metal explosion welding industry, https://www.docin.com/touch_new/preview_new.do?id=4919623823.
豆丁网行业研究部. 2026—2030 中国金属爆炸焊接行业经营风险及营销模式分析研究报告, https://www.docin.com/touch_new/preview_new.do?id=4919623823.
- 85 Ministry of Industry and Information Technology. *Petrochemical industry planning and layout plan (2025—2030)*, Ministry of Industry and Information Technology, China, 2024.
工业和信息化部. *石化产业规划布局方案 (2025—2030)*, 工业和信息化部, 2024.
- 86 Liu X D, Jiao K X, Zhang J L, et al. *Iron & steel*, 2025, 60(11), 51 (in Chinese).
刘旭东, 焦克新, 张建良, 等. *钢铁*, 2025, 60(11), 51.
- 87 Liu H Z, Bi Z Y, Yang J, et al. *Welded Pipe and Tube*, 2018, 41(3), 17 (in Chinese).
刘海璋, 毕宗岳, 杨军, 等. *焊管*, 2018, 41(3), 17.
- 88 Bi Z Y. *Welded Pipe and Tube*, 2018, 41(6), 7 (in Chinese).
毕宗岳. *焊管*, 2018, 41(6), 7.
- 89 Bi Z Y, Yang J, Liu H Z, et al. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(8), 1017 (in Chinese).
毕宗岳, 杨军, 刘海璋, 等. *金属学报*, 2016, 52(8), 1017.
- 90 Liu Y, Yang J. *Welding & Joining*, 2019(10), 38 (in Chinese).
刘云, 杨军. *焊接*, 2019(10), 38.
- 91 Zhang L J, Pei Q, Zhang J X, et al. *Materials and Design*, 2014, 64, 462.
- 92 Kowalski M, Bhm M, Rozumek D, et al. *Ocean Engineering*, 2023, 288, 115990.
- 93 Sun Q J, Tao Y J, Liu Y B, et al. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024(22), 40 (in Chinese).
孙清洁, 陶玉洁, 刘一搏, 等. *机械工程学报*, 2024(22), 40.
- 94 China Association of the National Shipbuilding Industry. 2025 Market analysis report on explosion-welded materials for marine engineering, China Association of the National Shipbuilding Industry, China, 2025.
中国船舶工业协会. 2025 年海洋工程用爆炸焊接材料市场分析报告, 中国船舶工业协会, 2025.
- 95 Shipbuilding Industry Competent Authorities of Coastal Provinces. *The 14th five-year plan for the shipbuilding industry*, Various Coastal Provinces: Shipbuilding Industry Competent Authorities of Coastal Provinces, 2021.
沿海省份船舶工业主管部门. “十四五”船舶工业规划, 各沿海省份:各沿海省份船舶工业主管部门, 2021.
- 96 Yao P W, Yang H B, Liu H, et al. *IOP Conference Series: Materials*

- Science and Engineering*, 2019, 493(1), 12108.
- 97 Zhang Q B, Yuan Y, Zhang C J, et al. *Materials & Design*, 2023, 234, 112346.
- 98 Zhang Q B, Yuan Y. *International Journal of Impact Engineering*, 2025, 196, 105151.
- 99 Cai Y G, Wu X M, Shi C G, et al. *Composites Science and Technology*, 2024, 257, 110799.
- 100 Du F, Wang X Y, Deng L, et al. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(5), 600 (in Chinese).
杜飞, 王新云, 邓磊, 等. *中国机械工程*, 2021, 32(5), 600.



杨军, 通信作者, 陕西铁路工程职业技术学院副教授, 高级工程师。主要研究先进焊接技术、高强管线钢技术、双金属复合管材技术与 TiNi 形状记忆合金材料技术等。



毕宗岳, 中国石油集团宝石管业公司特聘专家, 教授级高级工程师, 硕士研究生导师, 全国焊接标准化技术委员会副主任委员, 获国务院政府特殊津贴荣誉。从事油气管材新材料、新技术、新装备、新产品的开发工作。获省部级科技进步特等奖 2 项, 一等奖 2 项。发表论文 90 多篇, 出版专著 2 部, 获授权发明专利 30 多项, 负责制订国家标准 2 项。

- 101 Song C B, Zhu L, Wu J T, et al. *Rare Metal Materials and Engineering*, <https://link.cnki.net/urlid/61.1154.tg.20250826.1750.002> (in Chinese).
宋从斌, 朱磊, 吴江涛, 等. *稀有金属材料与工程*, <https://link.cnki.net/urlid/61.1154.tg.20250826.1750.002>.
- 102 Ma H H, Qu Z L, Zhang B Y, et al. *Engineering Blasting*, 2024, 30(6), 129 (in Chinese).
马宏昊, 曲泽林, 张冰原, 等. *工程爆破*, 2024, 30(6), 129.
(责任编辑 杨霞)



朱磊, 硕士, 西安天力金属复合材料股份有限公司正高级工程师, 主要从事爆炸金属复合材料制备工艺、性能评价研究。