

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.04.001

复合板爆炸焊工艺研究现状及展望

李星昆, 何建萍*

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘 要:爆炸焊制备的复合板作为当前工业生产的重要材料,对工业生产至关重要。控制工艺参数是提高复合板焊接质量的重要方法。爆炸焊工艺参数主要包括炸药厚度、基复板间距及缓冲层的种类与厚度。当前主要有复合板爆炸焊成形质量研究、异种金属复合板工艺研究和数值模拟研究。近几年研究成果表明爆炸焊在解决异种金属复合板连接中起着至关重要的作用。未来的热门研究方向有非金属复合板爆炸焊接、波状界面成形和数值模拟研究。

关 键 词:爆炸焊;复合板;炸药厚度;基复板间距;缓冲层

中图分类号: TG442; TH164

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2021)04-0001-04

Research Status and Prospect of Explosive Welding Technology for Composite Plates

LI Xingkun, HE Jianping*

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Composite boards manufactured by explosive welding are vital materials for current industrial production. Controlling welding parameters is an important method to improve the welding quality of composite plates. The parameters of explosive welding mainly include the thickness of explosives, thickness gap between the base plate, and the thickness and the category of the buffer layer. The current research mainly includes forming quality of explosive welding of composite plates, the process of dissimilar metal composite plates and numerical simulation. Recent research results show that the explosive welding plays a vital role in solving dissimilar metal composite plate welding; future popular research directions include non-metal composite plate explosive welding, wave-shaped interface forming and numerical simulation research.

Keywords: explosive welding; composite plate; explosive thickness; base plate thickness gap; buffer layer

爆炸焊是通过炸药爆炸产生能量,短时间内复板与基板发生碰撞变形,进而达到原子间结合,形成永久固相结合的一种焊接技术^[1]。随着工业技术的不断进步,对材料的综合性能要求也越来越高,这就不得不提到金属复合板材料。这种材料通常由不同金属或合金焊接而成,具有单一金属难以具备的综合性能。例如,同时具有低密度、耐腐蚀、耐冲击、较高的抗拉强度等综合性能。目前已有一大批爆炸焊制备的复合板应用到各行各业中: Al/Cu 复合板主要用于生产各种电

气产品,如电连接器^[2-4]; Ti/Al 复合板以高比强度主要用于航空器件^[5-6]; Al/Mg 异种材料主要应用于汽车轻量化和航空航天等^[7-8]; Cu/Fe 复合材料由于其优异的导热、延展性能和高比强度,常用于核工业^[9]; Cu/Ti/Fe 和 Gr/Fe 复合板以其优异的耐腐蚀性能常用于化学反应器的腔室制作^[10]; Ti/Fe 复合板具有较好的经济效益和耐腐蚀性,常用于火电厂湿烟囱改造工程^[11]; 超过 260 多种板材已通过爆炸焊工艺获得了优良的焊接接头^[12]。由此可见爆炸焊制作的复合板对

收稿日期: 2020-11-27; 修回日期: 2021-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775327); 上海市科委基础研究重点资助项目(14JC1402700)。

第一作者简介: 李星昆(1996), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 主要研究方向为植柱型碰撞冲击焊基于快速热塑性变形的微观组织演变。E-mail: 1213193040@qq.com。通信作者: 何建萍(1964), 女, 上海人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为超薄细微束等离子弧焊。E-mail: janejphe@163.com

于工业生产至关重要。

当前大面积复合板爆炸焊研究主要集中于以下几个方面:特殊材料的爆炸焊工艺及缺陷控制研究;工艺参数对焊缝成形、微观组织及力学性能的影响。由于爆炸焊接过程具有瞬时性和复杂性,人们在通过实验及相关设备来观察、研究爆炸焊接过程时,效果十分有限^[13]。相对而言,基于计算机的复合板爆炸焊数值模拟,可缩短工艺试验周期,降低成本,同时还可以较好地分析焊接过程。因此基于数值模拟分析的爆炸焊工艺研究成为当今国内外学者的研究热点^[14]。

笔者结合近几年的文献,从爆炸焊工艺实验和数值模拟分析的角度,着重回顾了大面积复合板的成形质量、微观组织和力学性能的研究进展,总结、归纳了当前研究的一些短板,并对未来的研究方向做了展望。

1 复合板爆炸焊成形质量研究

复合板爆炸焊接在不同的工艺条件下会产生不同的焊接接头界面,爆炸焊成形界面主要有 4 种:脱落型界面、平坦型界面、波浪型界面和撕裂型界面^[15]。当爆炸焊能量不足以使基复板之间建立有效连接时,就会形成脱落性界面,该平面典型的特征是焊缝不连续,基板与复板部分结合。平坦型界面的特点是界面上可以看到平直、清晰的结合线。结合线 2 侧的金属成分急剧变化,基体金属直接接触和结合,没有明显的塑性变形或熔化等微观组织形态。波浪型界面的特点是接头的结合区会转变为有规律的波浪形;实验研究表明波浪型界面同时具备原子间结合和机械咬合的作用而拥有优异的力学性能^[16]。当焊接工艺参数超过爆炸焊工艺窗口后,往往形成撕裂型界面。显微组织分析可发现结合界面存在大量空洞、裂纹等焊接缺陷。经验数据表明工艺参数是影响焊接界面成形的重要因素。

针对爆炸焊界面形貌,不同学者通过设计工艺试验,研究爆炸焊接成形规律。如,Arab 等^[17]采用爆炸焊工艺,主要展开了基复板间距对爆炸焊接铝合金和 CoMnCrFeNi 高熵合金成形质量的影响。研究中,复板与基板的间距为 1 mm 时,焊接界面处出现了约 1.8 μm 的过渡层,获得了平坦型界面结合。但当间距拉大到 2 mm 和 3 mm 时,界面出现了局部熔化,连接界面呈现由平坦型往波浪型界面转变的特征。刘瑞等^[18]采用爆炸焊工艺,针对基复板间距对钛-钢薄板焊接成形的关系展开了研究。研究结果表明:随着基复板间距增大,焊接界面由小波浪型向大波浪型界面转变,最后变为撕裂型焊缝界面。Loureiro 等^[19]采用

用了爆炸焊工艺,研究了炸药比率和炸药敏化剂对铝-铜复合板焊接的影响。实验结果表明:随着炸药比率(即爆炸载荷)的增加,由 Cu-Al 中间相组成的焊缝熔融区面积会增加,焊缝波浪型界面有所扩大,变为大波浪型界面;采用空心玻璃微球作为敏化剂的爆轰速度较为稳定,易获得均匀一致的波浪型界面。Liang 等^[20]采用水下爆炸焊方法,研究了炸药厚度与焊缝成形的关系。研究选择了非晶材料和铝板进行焊接,用水作为缓冲层来传递爆炸能量和保护复板。试验结果表明:当炸药厚度为 30 mm 时,形成了平坦型焊接接头,界面处出现了 7 μm 厚的扩散层;随着炸药厚度的增加,并未获得波浪型界面,而是形成撕裂状界面。Ren 等^[21]针对钢和钨合金的爆炸焊展开研究,计算了可焊性窗口,通过工艺试验发现:随着爆炸载荷的增加,焊接界面从平坦型向波浪型转变;当爆炸载荷超过计算窗口上边界后,在焊接界面处有一个熔化区,并有可能在界面处扩展的微裂纹。董刚等^[22]采用爆炸焊工艺,研究了铺药方式与焊接界面波的关系。研究表明:炸药厚度相同的情况下,获得的界面呈现波形不一致,末端波形尺寸严重大于前端波形;炸药厚度不同时,即梯形布药可以有效消除爆炸焊碰撞压力不均匀的情况,使界面波形尺寸基本保持一致。

2 复合板微观组织和力学性能研究

1959 年美国人 Philipchuk 首次通过爆炸焊技术将铝板和钢板焊接在一起,这一事件标志着爆炸焊成功进入了工程应用^[23]。之后,法国、英国、德国和前苏联等传统工业强国针对该技术进行了广泛研究。当前主要针对镁铝合金、高温镍基合金和钛合金等新型材料展开焊接工艺研究,以期获得优质的焊缝接头。

很多学者对不同材料焊接的微观组织和力学性能作了研究。张婷婷等^[24]分析了由爆炸焊制备镁-铝复合板微观组织特征,结果表明:在镁板一侧出现了呈 45°方向的绝热剪切带,该区域由细小的等轴晶组成;焊缝中心形成了金属间化合物,显微硬度最高;焊缝 2 侧均出现了明显的加工硬化。拉剪试验结果表明:断裂沿波状结合面方向,强度约为 93.3 MPa。陈凯等^[25]通过爆炸焊工艺对镍基合金和低碳钢进行了研究。结果表明:波状界面旋涡区主要由表层等轴晶和内部树枝晶组成,并在其中夹杂一些气孔和微裂纹。显微硬度显示:其结合面附近由于发生强烈的塑性变形,镍基合金一侧的硬度明显提高,约为母材的 3 倍。Zu 等^[26]采用爆炸焊工艺对钛-钢复合板焊接进行了研究,其研究结果表明:当形成波状界面时,其界面会形

成一些不连续、形状不规则的金属间化合物(FeTi 和 Fe₂Ti);剪切试验表明,其强度为 334 MPa。

此外,部分学者从工艺参数层面探讨复合板焊接的微观组织及力学性能的影响规律。如 Zeng 等^[27]采用爆炸焊工艺,研究了气态介质对钛-钢爆炸焊接复合板界面组织和力学性能的影响。研究结果表明:在氦气保护下的焊缝界面出现了少量固溶体,没有发现裂纹;在气态介质为空气的焊接中,一部分固溶体被氧化,形成脆性杂质,且在冷却过程中因内应力而形成裂纹;另外,氦气保护下的试样(393.8 HV)高于空气保护下的试样(320.2 HV),抗剪强度从约 420 MPa 增加到约 490 MPa,抗拉强度从 500 MPa 增加到 550 MPa。可见,氦气可以明显提高钛-钢复合板焊接接头质量。Arab 等^{[17]5}采用爆炸焊工艺,针对基板间距对铝板和高熵合金板(CrMnFeCoNi)焊接的成形质量的影响展开了研究。研究结果表明:当基板间距为 1 mm,被焊件可以获得优质的焊缝接头;金相照片显示铝板、过渡层和高熵合金在原子尺度上连接在一起,没有任何裂纹和缺陷;但当基板间距的增加至 2 mm 和 3 mm 时,裂纹开始出现在高熵合金一侧,宽度达到 10 μm;显微硬度测试结果显示过渡层硬度为 120 HV,铝板侧出现了一定的加工硬化,高熵合金侧硬度无明显变化。Loureiro^{[19]266}针对铜-铝爆炸焊展开了研究,显微组织分析表明:爆炸载荷越大,焊缝界面的空洞和裂纹现象越严重,且焊接界面处出现了金属皮剥离现象,以不规则小颗粒的形式镶嵌在焊缝中;另外,铝的塑形变形程度大于铜一侧;显微硬度测试显示铝一侧的硬度大于铜一侧。梁汉良等^{[20]116}采用爆炸焊方法,探究铺药厚度与铝-非晶合金的焊接接头微观组织和力学性能的关系。研究发现:当铺药厚度为 20 mm 时,焊缝呈现平直型界面,基板与复板间形成了 7 μm 的过渡层;随着铺药厚度的增加,过渡层增加至 10 μm,同时裂纹开始在过渡层萌生,并向非晶合金一侧扩散;电子衍射分析焊缝处,显示由晶格结构和不明显的环组成的混合相,在非晶合金侧,图像仅具有光环,表明其在焊接后仍然保持了非晶结构;显微硬度测试表明铺药厚度与其硬度变化无明显规律,焊缝 2 侧均出现了一定的加工硬化现象。

3 复合板爆炸焊数值模拟研究

研究爆炸焊的结果表明:数值模拟技术在研究其焊接过程、分析界面波成形机理方面起着至关重要的作用。通过对数值模拟展开研究,可以指导工业生产中的焊接工艺试验,进而可缩短工艺实验周期,降低生

产成本,方便广大生产者快速制定焊接工艺,推动爆炸焊的发展。

Yuan 等^[28]采用 SPH 法对 Al-AZ31B 的爆炸焊过程进行了数值模拟,模拟结果清晰显示出界面波形和爆炸焊过程中的金属射流情况。刘江等^[29]采用 SPH 法从二维的角度重现了实验中的射流和界面波生产现象;分析了塑形变形、结合点应力、以及温度等参数随时间的变化规律。李晓杰等^[30]采用 SPH 方法对钢板进行了焊接模拟,得到了清晰的爆炸焊接界面波形貌,且试验误差与碰撞速度成反比。李继红等^[31]针对钛/钢复合板爆炸焊展开了模拟研究,结果表明大面积复合板焊接时采用中心引爆的方式更为合理。闫建文等^[32]采用 SPH 法数值模拟,针对炸药铺覆厚度对焊接质量的影响展开了模拟研究。结果显示:采用厚度递减的铺药方式有助于使界面波形状尺寸基本保持一致,同时节省了炸药用量。廖广红等^[33]借助 LS-DYNA 软件结合 SPH-FEM 耦合的方法,对基板间距对钛-钢复合板爆炸焊接质量研究。其研究结果表明:在工艺窗口内,随着基板间距的增加,焊接界面由平坦型向大波状界面转变,模拟结果和试验结果基本一致,模拟结果显示当间距处于 6.5~8.5 mm 时,焊接质量优异。

4 复合板爆炸焊总结及展望

为了获得焊接接头成形良好、力学性能优异的大面积复合板成形件,已有一大批科研人员从工艺试验和数值模拟的角度对复合板爆炸焊展开了研究。笔者总结分析了国内外研究动态,同时就未来亟需解决的关键问题给出如下建议:

1) 针对一些特殊异种金属材料复合板的焊接,爆炸焊接工艺应用前景光明,且展开的研究较为成熟和广泛,下一步可以围绕金属与非金属复合板的焊接工艺展开研究。

2) 不同工艺参数下的复合板焊接工艺研究表明大部分材料均可获得 4 种界面形貌,而非晶材料无法获得力学性能优异的波状界面。有关波状界面的产生与材料属性和工艺参数的关系需展开进一步研究,以获取其一般规律。

3) 基板间距和爆炸载荷对界面形貌有着至关重要的影响;炸药敏化剂和铺药方式可从稳定爆炸速度的角度,获得优质的焊接界面成形。

4) 复合板爆炸焊接过程中会产生快速热塑形变形,接头 2 侧出现明显的加工硬化现象,同时也会产生一定热量,进而使界面附近出现少量元素扩散和金属

间化合物生成。

5) 不同工艺参数下的复合板爆炸焊微观组织及力学性能的研究表明保护气可以通过避免接头处氧化物的生成而提高焊接质量;随着爆炸载荷增加,气孔及裂纹等焊接缺陷会在接头处产生;相同爆炸载荷的情况下,间距过大时焊接质量会变差,且裂纹通常在接头处出现。

6) 数值模拟研究现状分析表明基于 SPH 法的爆炸焊模拟可很好地模拟复合板爆炸焊成形过程,且通过模拟结果可对焊接试验起到重要的指导作用。

参考文献:

- [1] 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,2007:1.
- [2] PRONICHEV D V, GUREVICH L M, TRYKOV Y P, et al. Investigation on contact melting of Cu/Al laminated composite[J]. Revista De Metalurgia, 2016, 52(4):79.
- [3] LIU H X, JIN H, SHAO M, et al. Investigation on interface morphology and mechanical properties of three-layer laser impact welding of Cu/Al/Cu[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50:1273.
- [4] ACARER M, GULEN B, FINDIK F. The influence of some factors on steel/steel bonding quality on there characteristics of explosive welding joints[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(21):6457.
- [5] FRONCZEK D M, CHULIST R, LITYNSKA-DOBRYNSKA L, et al. Microstructural and phase composition differences across the interfaces in Al/Ti/Al explosively welded clads[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48:4154-4165.
- [6] LAZURENKO D V, BATAEV I A, MALI V I, et al. Explosively welded multilayer Ti-Al composites: Structure and transformation during heat treatment[J]. Materials & design, 2016, 102:122.
- [7] QIAO X G, LI X, ZHANG X Y, et al. Intermetallics formed at interface of ultrafine grained Al/Mg bi-layered disks processed by high pressure torsion at room temperature[J]. Materials Letters, 2016, 181:187.
- [8] NIE H H, LIANG W, CHEN H S, et al. A coupled EBSD/TEM study on the interfacial structure of Al/Mg/Al laminates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 781:696.
- [9] GLADKOVSKY S V, KUTENEVA S V, SERGEEV S N. Microstructure and mechanical properties of sandwich copper/steel composites produced by explosive welding [J]. Materials Characterization, 2019, 154:294.
- [10] 郑世平. 压力容器用铝及铝复合板的特性与应用[J]. 江苏化工, 2004, 32(5):53.
- [11] 王航, 李晓峰, 张煜, 等. 爆炸焊接层状复合材料国内外发展现状及应用领域简介[J]. 中国钛业, 2017(1):17.
- [12] KACAR R, ACARER M. An investigation on the explosive cladding of 316L stainless steel-din-P355GH steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152(1):91.
- [13] 缪广红, 马雷鸣, 李雪交, 等. 装药方式对铜/钢爆炸焊接界面波的影响及波形成机理[J]. 高压物理学报, 2020, 34(2):126.
- [14] NASSIRI A, KINSEY B. Numerical studies on high-velocity impact welding: smoothed particle hydrodynamics (SPH) and arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 24:376-381.
- [15] 汤柳磊. 植柱型旋转碰撞冲击连接工艺及界面特征[D]. 上海:上海工程技术大学, 2018:31.
- [16] HE J P, SIROIS D, LI S Q, et al. Ballistic impact welding of copper to low carbon steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 232:165-174.
- [17] ARAB A, GUO Y S, ZHOU Q, et al. Joining AlCoCrFeNi high entropy alloys and Al-6061 by explosive welding method [J]. Vacuum, 2020, 174:109221.
- [18] 刘瑞, 段卫东, 唐玉成. 基复板间隙对钛-钢薄板爆炸焊接质量影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(4):87-92.
- [19] LOUREIRO A, MENDES R, RIBEIRO J B, et al. Effect of explosive mixture on quality of explosive welds of copper to aluminium[J]. Materials & Design, 2016, 95:256-267.
- [20] LIANG H L, LOU N, LI X J, et al. Joining of $Zr_{60}Ti_{17}Cu_{12}Ni_{11}$ bulk metallic glass and aluminum 1060 by underwater explosive welding method[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45:115-122.
- [21] REN B X, TAO G, WEN P, et al. Study on weldability window and interface morphology of steel tube and tungsten alloy rod welded by explosive welding[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 84:105005.
- [22] 董刚, 周春华, 史长根, 等. 爆炸焊接不等厚度布药工艺[J]. 焊接, 2004(6):38.
- [23] 邵丙璜, 张凯. 爆炸焊接原理及其工程应用[M]. 大连:大连工学院出版社, 1987:1.
- [24] 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.
- [25] 陈凯, 马勇, 何尧, 等. C276/304L 爆炸焊接复合板界面熔化区微观组织及形成过程[J]. 精密成形工程, 2020, 12(2):67-71.
- [26] ZU G Y, SUN X, ZHANG J H. Interfacial bonding mechanism and mechanical performance of Ti/Steel bimetallic clad sheet produced by explosive welding and annealing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(4):906-911.
- [27] ZENG X Y, WANG Y X, LI X Q, et al. Effects of gaseous media on interfacial microstructure and mechanical properties of titanium/steel explosive welded composite plate [J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 148:111292.
- [28] YUAN X D, WANG W X, CAO X Q, et al. Numerical study on the interfacial behavior of Mg/Al plate in explosive/impact welding[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2017, 24(4):833-843.
- [29] 刘江, 郑远远, 沈宗宝, 等. 基于 SPH 方法的爆炸焊接过程模拟[J]. 焊接技术, 2013, 42(12):17-20.
- [30] 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.
- [31] 李继红, 蔡俊清, 刘娟娟, 等. 爆炸参数对钛/钢复合板爆炸焊接质量影响的数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(3):5-8.
- [32] 闫建文, 雷方超, 俞祺洋, 等. 炸药量对爆炸焊接界面波影响的数值模拟[J]. 工程爆破, 2018, 24(6):10.
- [33] 缪广红, 马雷鸣, 吴建强, 等. 基复板间距对爆炸焊接质量影响的数值模拟[J]. 爆破, 2020, 37(2):106-114.