

爆炸焊接技术及工程应用

王宇新^{1,2}, 李晓杰^{1,2}, 王小红^{1,2}, 闫鸿浩^{1,2}

(1. 大连理工大学工程力学系, 大连 116024;
2. 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

[摘要] 爆炸焊接作为一种特殊焊接技术广泛应用于生产各种金属复合板材, 爆炸焊接复合板材不仅结合强度高, 还可以实现多种不同金属材料的大面积复合, 从而有效地降低了贵金属材料成本。除了介绍爆炸焊接基本原理、爆炸焊接窗口和试验技术外, 还对当前爆炸焊接新技术和新产品开发作了讨论, 同时也介绍了爆炸焊接复合金属材料在不同行业领域的应用以及未来的发展前景。

关键词: 爆炸焊接; 复合板; 焊接窗口; 爆炸试验; 复合管

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2019.12.042



王宇新

副教授, 计算力学博士, 韩国仁荷大学博士后, 中国爆破行业协会爆炸加工专委会副秘书长; 主要从事爆炸冲击动力学 CAE 软件研发和金属爆炸焊接理论与工程应用研究; 主持和参与了多项国家自然科学基金项目和企业合作项目, 先后研制开发了 8 套爆炸冲击动力学应用软件, 并全部申请获得国家软件著作权证书; 科研成果曾获钱令希力学青年教师一等奖, 获 2 项中国爆破行业协会科技进步一等奖(省部级)。

20 世纪 50 年代, 美国开始研究金属爆炸焊接技术, 并由杜邦公司成功实现了大面积金属复合板的爆炸焊接。1958 年, 日本延冈火药厂、旭化成工业公司、三菱钢铁研究所和神户钢铁公司等企业相继开展了爆炸焊接技术与金属复合板加工业务。此后, 前苏联、英国、瑞典、德国等也陆续应用爆炸焊接技术开发金属复合材料, 促使爆炸焊接技术逐步走向成熟^[1-3]。

20 世纪 60 年代, 我国也开始对爆炸焊接技术进行理论与试验研究, 大连造船厂陈火金在 1968 年成功研制了第一块金属爆炸复合板。从 20 世纪 70 年代开始, 国内外很多科研机构 and 学者相继加入到爆炸焊接技术研究领域中, 开发出多种双金属平板爆炸焊接、多层金属爆炸焊接、圆管爆炸焊接、有色金属和稀有金属爆炸焊接等, 在理论研究和试验技术上取得了大量科研成果^[4-6], 迅速推动了爆炸焊接理论与技术应用开发。特别是 21 世纪以来, 全球装备制造行业快速发展, 爆炸焊接技术得到

广泛应用, 金属复合板产量也迅速增长。到目前为止, 我国金属爆炸焊接复合材料产量占据世界总量 50%。

随着爆炸焊接理论和技术研发日臻成熟, 金属复合板材应用行业不断拓宽, 各类金属复合板产量也在持续增长, 在轨道交通、船舶工业、化工工业、核工业、航空航天和武器装备等领域发挥了不可替代的作用。本文将对爆炸焊接基本原理、试验方法、新技术和新产品进行介绍, 并对爆炸焊接技术的应用前景加以分析。

爆炸焊接理论

1 爆炸焊接基本原理

爆炸焊接属于一种物理焊接技术, 是利用炸药爆轰压力驱动复板与基板高速碰撞, 碰撞界面的金属材料发生塑性变形和熔化, 从而使得两种金属紧密地结合在一起^[7-8]。金属爆炸焊接基本原理如图 1 所示。

两种金属板材爆炸焊接通常是将基板与复板在地面上平行布置, 然后炸药均匀铺装在复板上表面, 复板与基板需要保持一定的初始间隙。

炸药起爆产生很高的爆轰压力,驱动复板高速冲击基板,在碰撞点处的金属材料发生剧烈塑性变形,其变形近似于流体状态,并形成相互嵌入的界面波和高速喷射的金属微射流^[9-10]。爆轰波沿着复板表面向前滑移推进,在滑移爆轰压力作用下,复板与基板不断地碰撞闭合,最后两块金属材料焊接在一起而完成整个爆炸复合过程。

2 爆炸焊接窗口理论

爆炸焊接窗口是指两种金属爆炸复合的可焊参数范围,包括流动限 $v_{c \min}$ 、上限 $v_{p \max}$ 、下限 $v_{p \min}$ 和声速限 $v_{c \max}$ 4个参数,可以用4条曲线或直线绘制出1个封闭图形区域,如图2所示^[11]。

爆炸焊接窗口一般通过半圆柱

法、台阶法和小倾角法等试验方法确定,也可以应用试验与理论相结合推导出相应的计算公式^[12],爆炸焊接窗口的计算公式在实际工程应用中比较准确,对合理地制定爆炸焊接技术参数具有指导意义,其公式形式如下。

(1)焊接下限:使得基板与复板焊接在一起的最小碰撞点速度 $v_{p \min}$,如图2中的 ad 线所示,只有当复板冲击基板的速度超过下限值时,才能在碰撞界面处形成微射流,下限计算公式为^[13]:

$$v_{p \min} = K_c \sqrt{H_v / \rho} \quad (1)$$

式中, ρ 为材料密度; H_v 为维氏硬度; K_c 为经验系数,一般取值范围在0.6~1.2之间,与金属复合界面的粗

糙度和金属射流厚度有关。

(2)流动限:复板与基板的碰撞点移动速度达到最小值 $v_{c \min}$,才能使碰撞界面的金属熔化和产生塑性流动,否则不能形成射流和界面波,如图2中的 ab 线所示。流动限决定了界面波和射流形成的基本条件,计算流动限选择复板与基板材料屈服强度较大、密度较小的参数作为判定条件,流动限计算公式为^[14]:

$$v_{c \min} = \sqrt{2.0K_v \frac{\text{Max}(\sigma_{b1}, \sigma_{b2})}{\text{Min}(\rho_1, \rho_2)}} \quad (2)$$

式中, K_v 为流动限系数。

(3)声速限:复板与基板的碰撞点移动速度(即炸药爆速)必须小于金属材料声速,否则碰撞界面不能形成射流,如图2中的 cd 线所示。两种金属材料声速不同,取二者最小值作为声速限,计算公式如下:

$$v_{c \max} = \min(C_{01}, C_{02}) \quad (3)$$

(4)焊接上限:使复板与基板复合界面不发生开裂的最大碰撞点速度称为焊接上限,如图2中的 bc 线所示。焊接上限是以碰撞界面材料发生塑性流动变形所沉积的最大能量作为计算依据,当复板冲击基板速度过高时,碰撞界面沉积能量比较大,当冲击压力卸载时,该处材料还保持着热软化状态,从而导致复合界面过熔失效或开裂。基于冲击动力学和传热理论对碰撞界面的能量沉积过程进行分析,最后得到焊接上限计算公式:

$$v_{p \max} = \frac{f}{V_c} \sqrt{1 + \frac{\rho_1 h_1}{\rho_2 h_2}} \sqrt{\text{Min}\left(1, \frac{h_2 C_{01}}{h_1 C_{02}}\right)} / h_1 \quad (4)$$

式中,下标1、2分别代表基板和复板; h_1 和 h_2 为基板和复板的厚度; f 是与材料性能有关的系数,需要通过爆炸焊接试验数据拟合才能得到。

由式(1)~(4)可知,为了计算爆炸焊接窗口需要通过试验测试金属材料的密度、硬度和屈服强度等各项指标^[15]。

在表1中,给出爆炸焊接的常

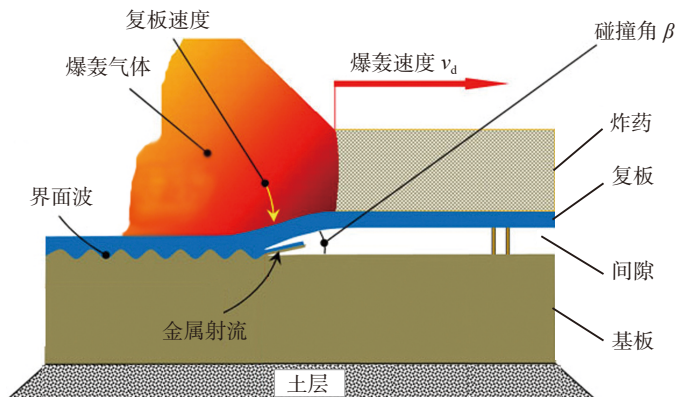


图1 爆炸焊接基本原理

Fig.1 Basic principle of explosive welding

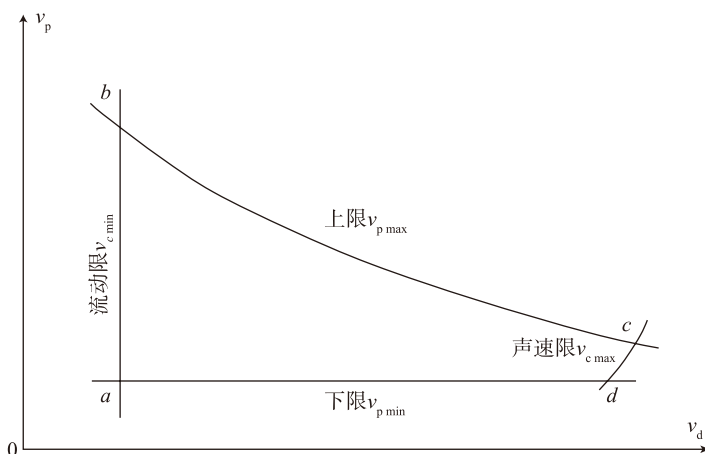


图2 爆炸焊接窗口

Fig.2 Windows of explosive welding

见金属材料的密度和爆炸焊接窗口下限。

试验技术

1 炸药调配与测试

爆炸焊接一般使用中低爆速炸药,包括铵油、2号岩石硝酸铵、粉状铵油等,炸药性能参数包括密度、爆速、爆热和猛度等。炸药密度采用容器质量体积比对法测量,猛度采用铅柱压缩法(赫斯试验)、铜柱压缩法(卡斯特试验)和平板炸坑试验及弹道摆(猛度摆)等试验确定。炸药爆速通常采用单段或多段爆速仪对标准直径的炸药柱进行测量,这种方法仅能得到两个探针之间的炸药爆速,在金属板材幅面较大的爆炸焊接中,装药厚度和装药密度并不完全均匀,这就导致不同区域炸药的爆速有所变化。为了获得炸药连续变化的爆速,大连理工大学研制开发了连续电阻丝法爆速测试技术,可以实现炸药爆轰行程长度超过10m的爆速测量^[6],测点数量超过25万个,而且数据采集精度高、抗干扰性强,实测数据采用高阶多项式拟合计算后,可以准确地绘制炸药爆速连续变化数据曲线,如图3所示。

2 金属材料预处理

爆炸焊接第一道工序是对复板和基板进行预处理,包括对基板和复板材料性能检验、板材下料、拼接焊接、表面打磨和整平等,并使用超声波探伤仪检验材料是否存在缺陷。虽然金属板材生产厂家提供材质单,但是按爆炸加工标准必须进行复检,像板材硬度和抗拉强度或屈服强度在爆炸焊接前是必须检验的指标。

基板和复板检验合格则进行下一道工序。按复合板成品尺寸和爆炸焊接工艺要求对金属板材定尺下料,对于板面尺寸不够的复板可以进行拼焊处理,基板最好不做拼焊,一般采用整板。然后,对基板和复板的焊合面打磨除锈,清除氧化层和锈蚀

层,若板面发生翘曲变形,还要对基板和复板进行整平。

3 爆炸焊接作业及后处理

基于爆炸焊接窗口计算结果,确定炸药爆速、装药厚度、基复板间距等技术参数。接下来就是爆炸焊接

生产作业,基本流程如下。

(1)地面处理:爆炸焊接基础地面需要使用铲车等工具进行平整,并铺垫一定高度的细砂土,作为铺设基板的地面基础。

(2)板材安装:采用吊装设备或

表1 常见金属爆炸焊接下限
Table 1 Lower limit of explosive welding of common metals

材质	状态	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	硬度 H_v / MPa	$v_{p \text{ min}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
纯铝	供态	2710	270	189
纯铝	硬态	2710	366	220
LY12 铝合金	硬态	2790	1098	377
纯钛	供态	4510	1600	357
纯钛	硬态	4510	2323	431
1Cr18Ni9Ti	供态	7900	1960	299
20号钢	退火	7850	1010	215
20号钢	硬态	7850	1539	266
16Mn 钢	正火	7850	1137	228
16Mn 钢	硬态	7850	1754	284
镍及合金	退火	8880	1100	211
镍及合金	硬态	8880	1509	247
紫铜	供态	8930	588	154
紫铜	硬态	8930	833	183
纯金	退火	19300	250	68
纯金	硬态	19300	600	106
纯银	退火	10500	320	105
纯银	硬态	10500	880	174

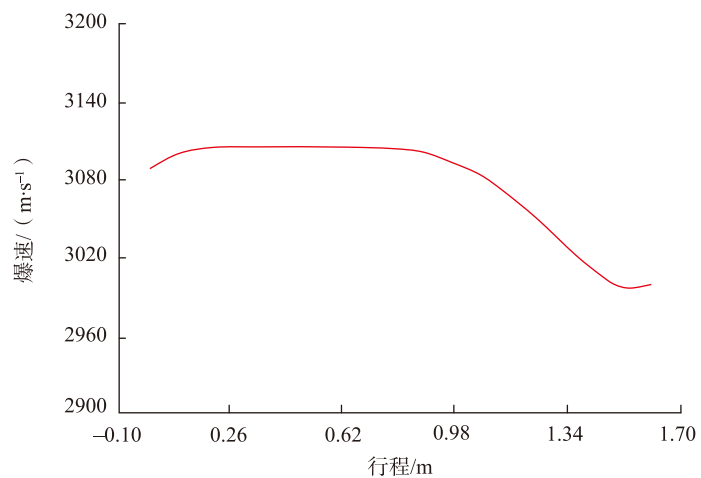


图3 铵油炸药连续爆速测量曲线

Fig.3 Curve of continuous detonation velocity of ammonium oil explosives

人力将基板安放在地面基础上,架高均匀地摆放在基板上,复板安放在架高上尽量与基板保持平行,在复板上表面涂锂基润滑脂或其他缓冲防护层。

(3)布置炸药:铵油炸药遇潮湿容易结块,采用筛网过筛使结块炸药粉碎,然后将炸药均匀地铺装在复板上表面,将炸药刮平至预先设计的装药厚度,尽可能保持装药密度和厚度一致。

(4)起爆:起爆点可以设计在复板的中心或短边中间位置。由于铵油炸药起爆感度较低,为了保证炸药起爆后爆速能在短时间内达到稳定爆轰,在起爆点处可以添加少量高爆速炸药作为引爆药。在所有无关人员撤离现场后,由有资质的爆破员安插雷管,并按《爆破安全规程》要求严格执行操作规范,然后再起爆。

(5)结束:待爆破员确认爆炸焊接作业现场安全后,再使用吊装和运输设备将复合板运回厂区车间,经过热处理和表面处理后包装入库。

爆炸焊接技术应用

爆炸焊接理论研究与技术开发经过 50 多年持续发展,为工业新产品研发与制造提供了优质复合板材料,大连理工大学爆炸焊接复合板技术开发与产品应用主要集中在以下行业。

1 化工设备

(1)爆炸焊接不锈钢-钢复合板与超厚不等面积铜-钢复合板:不锈钢复板厚度 2~16mm,最大板幅可达 3m×14m,如图 4 所示。

不锈钢复合板主要用于大型化工反应器、石油炼制蒸馏塔、换热器、化工反应塔、化工防腐设备、船舶制造、制药机械、食品加工、造纸工业等。超厚不等面积铜-钢爆炸焊接复合阴极板主要用于化工行业氯碱电解槽设备,如图 5 所示。

(2)爆炸焊接有色金属复合板:

包括钛-钢复合板、铝-钢复合板、铜-钢复合板、铝-铜复合板,广泛用于航空航天、城市轨道交通导电轨、加氢反应釜、过渡导电块、脱硫设备和海水淡化等,如图 6 所示。

(3)爆炸焊接金属复合管材与棒材:不锈钢-钢复合管材主要用于

化工防腐耐酸管道,也可用于自来水管,还有应用于化工电解设备电极的钛-铜复合棒材,如图 7 所示。

2 核电设备

铜-不锈钢(厚度 20mm 铜板+厚度 90mm 不锈钢板)爆炸焊接复合板用于“ITER 计划”核电设备受



图4 爆炸焊接不锈钢复合板

Fig.4 Stainless steel clad plate by explosive welding

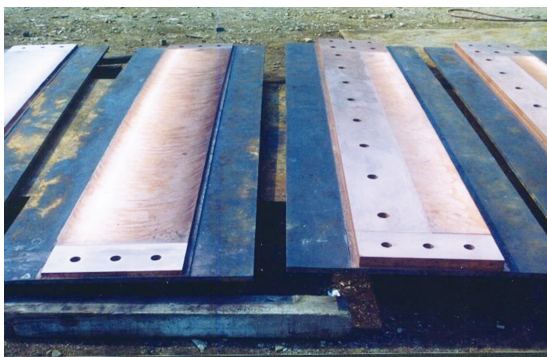


图5 不等面积铜-钢爆炸焊接阴极板

Fig.5 Negative clad plate of unequal area copper-steel by explosive welding

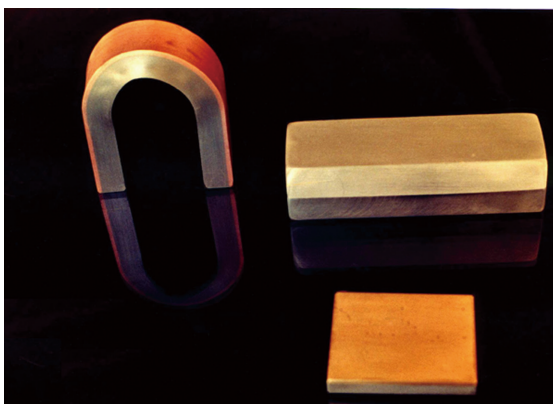
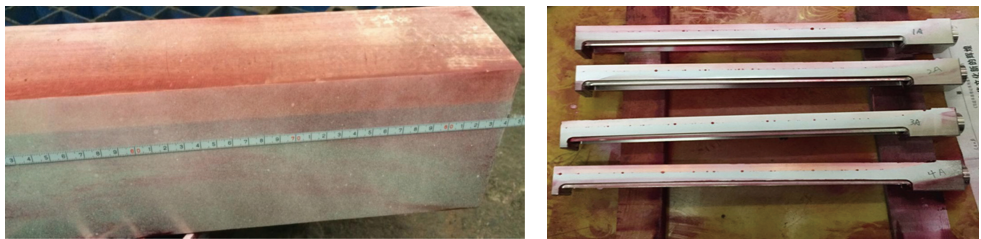


图6 爆炸焊接有色金属复合板

Fig.6 Non-ferrous clad plate by explosive welding



图7 爆炸焊接复合管材与棒材
Fig.7 Clad tube and bar by explosive welding



(a) 核电用铜-钢复合板坯料 (b) 铜-钢复合板加工核电设备部件

图8 爆炸焊接核电用铜-钢复合板
Fig.8 Clad plate of copper-stainless steel for nuclear power equipment by explosive welding

控核聚变试验装置线圈接头^[17]。线圈接头处于迫流超临界液氦环境,工作压强为0.6~3MPa,环境温度在4.5~6K之间。在这样的工况下,铜-不锈钢复合板的结合界面受到低温和高压的双重考验,该复合板材厚度比较大,不但要求加工精度高,而且铜-不锈钢的界面结合强度必须超过基体材料,只有应用爆炸焊接才能达到各项技术指标。大厚度铜-不锈钢爆炸焊接坯料以及将复合板材加工后的核电设备部件,如图8所示。

3 民用轻工产品

(1) 不锈钢-高强度-不锈钢爆炸三层复合板。三层爆炸焊接复合板中间层为硬度较高的金属材料,两侧包覆层为韧性较好的不锈钢,可用于制造各种优质刀具,三层爆炸复合材料加工的剪刀界面金相组织如图9所示。

(2) 爆炸焊接+轧制复合材料。将爆炸焊接复合板冷轧或热轧后,可以制造多种轻工产品。如由承德帝圣公司研制的不锈钢-铜-钛、不

锈钢-铜-不锈钢爆炸复合板经过轧制后,生产加工厨具、建筑型材、家具、整体厨房和复合门窗等。

结论

当前装备制造行业快速发展,对于爆炸复合板材的质量要求也越来越高,除了提高普通复合板产量外,爆炸焊接技术创新和个性化产品创新应该作为重点方向,主要体现在以下3个方面。

(1) 真空爆炸焊接技术研究。金属爆炸焊接目前都是露天生产作业,爆炸冲击波不仅对周边环境和建筑造成很大影响,而且一些特殊金属爆炸焊接很难达到更高的技术指标。研制开发真空爆炸容器能很好地解决这些问题,同时也可以实现爆炸焊接生产作业车间化,目前小型真空爆炸焊接试验已经取得成功。

(2) 爆炸焊接复合板新产品开发。多层金属爆炸焊接、爆炸焊接-轧制组合技术、有色金属、特种金属以及大面积复合板都是爆炸焊接新

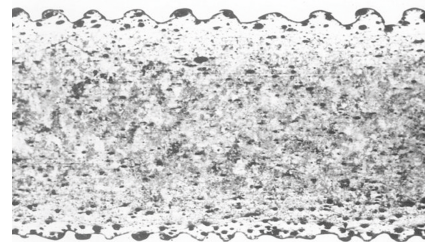


图9 爆炸焊接三层复合材料金相图
Fig.9 Metallographic structure of three-layer clad plate

技术和新产品开发的重要内容。

(3) 爆炸焊接技术新领域拓展。工业化生产进程的快速发展为爆炸焊接技术推广提供了良好的机遇,从过去应用比较集中的化工设备和化工容器转向航空航天、军事工程、水电水利、核电工程等,从工业装备转向建筑装饰、厨具、供热、供水管线等民用轻工业产品。

综上所述,爆炸焊接技术与金属复合板产品还有待进一步开发,尤其是真空爆炸焊接与特种金属复合材料的技术研发在装备制造中还有巨大的潜力和广阔的发展空间。

参考文献

- [1] HENRYK P, LUKASZ M, PRAZMOWSKI M, et al. Microstructure and mechanical properties of multi-layered Al/Ti composites produced by explosive welding[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018(15): 1391–1398.
- [2] JATINDER K, VIKAS M, JASPREET S, et al. Cladding of stainless steel (SS304) on aluminium alloy(AA1100) by explosive welding[J]. *Materials Today Proceedings*, 2018, 5(9): 19136–19139.
- [3] MENDES R, RIBEIRO J B, LOUREIRO A. Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration[J]. *Materials & Design*, 2013, 51: 182–192.
- [4] 布拉齐恩斯基 T Z. 爆炸焊接成型与压制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- BULAJIC B K T Z. Explosive welding forming and suppress[M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [5] GRIGNON F, BENSON D, VECCHIO K S. Explosive welding of aluminum to aluminum analysis, computations and experiments[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(10): 1333–1351.
- [6] NIZAMETTIN K, BEHCET G. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 169(2): 127–133.
- [7] 邵丙璜, 张凯. 爆炸焊接原理及工程应用[M]. 大连: 大连工学院出版社, 1987.
- SHAO Binghuang, ZHANG Kai. Principle of explosive weld and its application in engineering[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1987.
- [8] ATHAR M M H, TOLAMINEJAD B. Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated by explosive welding[J]. *Materials & Design*, 2015, 86: 516–525.
- [9] BATAEV I A, ANAKA S, ZHOU Q, et al. Towards better understanding of explosive welding by combination of numerical simulation and experimental study[J]. *Materials & Design*, 2019, 169(5): 1–16.
- [10] 李晓杰, 莫非. 爆炸焊接界面波的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(6): 653–657.
- LI Xiaojie, MO Fei. Numerical simulation of interface wave in steel explosive welding[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(6): 653–657.
- [11] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 487–507.
- WANG Xuguang. Blasting design and construction[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015: 487–507.
- [12] 赵铮, 王金相. 双金属复合板爆炸焊接窗口研究[J]. *科学技术与工程*, 2009, 9(5): 1126–1130.
- ZHAO Zheng, WANG Jinxiang. Research on explosive welding window of bimetal composite plate[J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(5): 1126–1130.
- [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 Xiaojie, YANG Wenbin, XI Jinyi, et al. The lower limit of explosive welding parameter window for bimetal[J]. *Explosive Materials*, 1999, 28(3): 22–26.
- [14] 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 Xiaojie. Application of explosive welding window to thick metal plate[J]. *Explosive Materials*, 1996, 25(2): 27–30.
- [15] 王宇新, 李晓杰. 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 Yuxin, LI Xiaojie. Research and development of CAE software for explosive welding[J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24(1): 1–7.
- [16] 王宇新, 李晓杰. 炸药爆速的连续测量技术研究[J]. *爆破器材*, 2017, 46(6): 59–64.
- WANG Yuxin, LI Xiaojie. Study on testing technology for continuous detonation velocity[J]. *Explosive Materials*, 2017, 46(6): 59–64.
- [17] 王宇新, 李晓杰. 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, 39(12): 77–81.
- WANG Yuxin, LI Xiaojie. Explosive welding technology of large thickness copper-stainless steel plate for nuclear fusion[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(12): 77–81.

通讯作者: 王宇新, E-mail: xyxphd@dlut.edu.cn.

Explosive Welding Technology and Engineering Application

WANG Yuxin^{1,2}, LI Xiaojie^{1,2}, WANG Xiaohong^{1,2}, YAN Honghao^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian 116024, China)

[ABSTRACT] As a special processing technology, explosive welding is widely used in fabrication of various metal clad plate. The clad plate not only has high bonding strength, but also can realize large-area composite of different metals. The cost of noble metal can be effectively reduced. In addition to introducing the basic theory, welding window and experimental technology of explosive welding, new technology and new products of explosive welding were discussed in this paper. Furthermore, the application of explosive welding clad plates in different industry fields and their future development prospects are also described.

Keywords: Explosive welding; Clad plate; Welding window; Explosion experiment; Clad tube

(责编 古系)