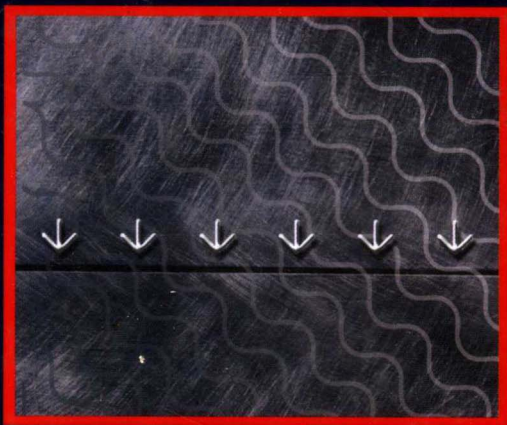


Research and Practice  
of Explosive Welding of Metal Plates

金属板材爆炸焊接  
研究与实践

王耀华 著



國防工業出版社  
National Defense Industry Press

# 金属板材爆炸焊接 研究与实践

**Research and Practice of Explosive  
Welding of Metal Plates**

王耀华 著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

金属板材爆炸焊接研究与实践 / 王耀华著. —北京: 国防工业出版社, 2007. 3

ISBN 978 - 7 - 118 - 05039 - 4

I. 金… II. 王… III. 金属板 - 爆炸焊接 IV. TG456. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 024330 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11 字数 272 千字

2007 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 40.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金  
评审委员会**

## 国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

- 主任委员 刘成海
- 副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬
- 秘 书 长 程洪彬
- 副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭
- 委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参  
(按姓名笔画排序)
- 杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵
- 佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元
- 陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明
- 常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民
- 舒长胜
- 本书主审委员 刘世参

## 作者简介

王耀华 1949年生人,工学博士,现为解放军理工大学教授,博士生导师,少将军衔。

长期从事材料合成与加工领域的教学科研与工程实践,在耐磨材料、金属板材爆炸焊接复合材料、抗钻地弹工程防护材料和军事精确爆破技术与材料等方面的理论创新、技术发明和推广应用,为国民经济和军队建设做出了突出贡献。多年来,承担科研课题20余项,获国家、军队(省、部)级科技成果奖励多项,发明专利近10项,培养博士生33名、硕士生25名,其中11人晋升为教授,9人晋升为博士生导师,带出了一支科研教学能力很强的人才梯队;已出版《Fundamentals for science and technology of engineering material》和《合金铸铁切削原理与技术》等专著近150万字,发表学术论文130余篇,其中SCI收录2篇,EI收录29篇,主编公开出版的教材2部,计235万余字。

1991年被授予“有突出贡献的中国博士学位获得者”,评为全军优秀共产党员,1993年起享受政府特殊津贴,1994年被授予国家级有突出贡献的中青年专家,1997年当选为中共十五大代表,2002年被评为江苏省首届优秀博士生导师,2005年获“军队专业技术重大贡献奖”。

## 序

爆炸焊接是利用炸药爆炸所产生的能量使金属间形成固相结合的一种焊接方法。它既是一种重要的金属零件(构件)连接方法,又是一种基本的金属材料复合技术。爆炸焊接而成的复合金属材料具有单一金属不可比拟的综合性能和很高的性能价格比,尤其是可以节约贵重稀缺金属。因此,爆炸焊接在材料合成与加工工程领域具有不可替代的地位。

爆炸焊接适用于广泛的金属组合,既可以得到不同形状的复合板,还可用于筒形与筒形相套、柱形与柱形相接等焊合。迄今,采用爆炸焊接技术复合的金属材料的不下数百种,广泛应用于石油、化工、采掘、冶金、造船、航空、航天、原子能、电力、交通运输及机械制造等各个领域之中。

最早记入文献的与爆炸焊接密切相关的实验是1944年由美国人 Carl 进行的;1957年,美国的 Phillipchuk 成功地实现了铝和钢复合板的爆炸焊接。20世纪60年代中期以后,美、英、日、苏联等国先后开始了爆炸焊接产品的商业性生产。20世纪60年代末以来,我国中科院力学所、西北有色金属研究院、大连造船厂和七二五所等单位相继开展了爆炸焊接的试验和生产。80年代初,《爆炸加工》一书(郑哲敏 杨振声 等著)的问世,进一步推动了我国爆炸焊接的理论研究和工程实践。

解放军理工大学的王耀华教授长期从事爆炸加工的人才培养、科学研究和工程实践,他撰写的这本专著《金属板材爆炸焊接研究与实践》反映了他在爆炸焊接方面的理论创新和技术



发明。本书详尽地阐述了其所构建的爆炸焊接“力学模型体系”、“爆轰荷载低限平稳控制”应用理论以及装药量计算与验证新方法、爆轰荷载作用下金属板材中“损伤场”和“微裂纹场”的控制技术、“不等厚度装药”新工艺和“爆炸焊接挡波墙技术”等内容。这些内容对提高焊合质量、降低炸药用量和减轻对环境的危害等提供了新的理论依据和技术途径,具有很高的学术水平。我相信本书对爆炸焊接理论和技术的发展将会起到重要的促进作用。

周康

二〇〇七年二月二十六日

## 前 言

本书叙述作者十余年在金属板材爆炸焊接理论与技术上的研究工作,其中心思想是“爆轰荷载低限平稳控制理论”,即以尽可能少的炸药用量获得尽可能好的复合板质量和尽可能高的环保效益。

作者在美国做访问学者期间,认真研究了爆炸焊接理论与技术的发展动向,深入思考进一步的研究工作。归国后即适应国家经济建设和军事需求,针对爆炸焊接金属复合板焊合质量不稳定、炸药用量偏高和危害环境等问题,开展了比较系统的研究工作。研究成果曾先后获得多项军队级、省(部)级科技进步奖,并于2004年获国家技术发明二等奖一项。本书的基本内容即为这些研究成果的总结和提炼,并主要侧重于爆炸焊接新技术的原理性分析。

全书共有十章,各章的主要内容如下:

第一章简要综述爆炸焊接的发展历史与现状,分析了爆炸焊接理论与技术中存在的主要问题,概括了本书的主要研究内容。

第二章从分析复合板结合界面的性状入手,依据试验观测事实,指出合格的爆炸焊接复合板的结合界面可以区分为微波状、小波状和大波状三种;在分析界面微观缺陷种类、数量及其与波形特征相互关系的基础上,指出“实现微小波状的界面结合”应作为提高爆炸焊接复合板质量的努力方向,并得出了以界面波形特征评价焊合质量的准则和方法;进而考察了整个复合板界面波的分布和变化规律及其与碰撞荷载的关系,得到了提高复合板质量均匀性的技术途径。

第三章依据复板运动姿态闪光 X 射线照相观察结果,得到爆轰荷载压力的有效作用范围、动态碰撞角与炸药爆速的关系等重要结论;分析爆炸焊接过程中的能量转换关系,给出基、复板质量比的合理值;试验观测了复板的组织与成分,发现复板是在其不同层面上经受不同性质、不同程度变形的粘弹塑性体;建立了“将复板视为一端固定、一端自由的悬臂梁”的力学模型,由此得出的装药量下限可比其他方法所得的装药量下限小 15% ~ 30%。

第四章提出了合理的基、复板间距确定的原则与方法,基于复板运动方程给出“板间距”的理论表达,并依据闪光 X 射线照相实验结果建立了复板运动速度与板间距的经验公式。

第五章首先论证了爆炸焊接界面的成因既不应该用熔化焊也不宜用扩散焊的机理来解释,而是一种特殊的压力焊;进而证明:炸药爆轰反应区荷载以及作用在复板上的爆轰产物压力都是呈波状分布的,此即为形成复合板波状结合界面的荷载原因。

第六章通过对可焊性窗口的分析,指出该“窗口”存在的主要问题;依据旨在尽量降低装药量的爆炸焊接试验,发现可焊性窗口的下限是可以突破的,采用比此“窗口”下限更低的装药量,焊接质量更好;通过等厚度平面布药所得复合板界面的显微分析,发现其界面结合波沿爆轰传播方向由小到大的变化规律;进而指出造成这种现象的主要原因是爆轰荷载与振动荷载的叠加,据此发明了不等厚度布药工艺;创建了最佳装药量窗口,并列举了该“窗口”在高质量复合板生产中的应用实例。

第七章阐述工具钢等硬脆金属爆炸焊接的损伤与破裂机制。首先指出:在爆炸焊接条件下,此类金属组织中存在着硬质相和软质相的巨大变形差异,故硬质相可视为损伤场,而硬质相对软质相的割裂作用可视为损伤场演变;依据爆炸焊接过程的力学分析,归纳了爆炸焊接四个主要阶段中的损伤场演变特点;分析了工具钢等硬脆金属宏观破裂的影响因素,给出了消除宏观开裂的技术途径。

第八章阐述钛金属复合板爆炸焊接技术及其质量检测的特殊性。通过检测试验,发现了 Ti/Q235 复合板超声波探伤的特异现象;结合金相分析及电镜扫描等微观检测结果,得到了超声波探伤的“特征值”及其与复合板质量的关系,为钛金属复合板质量检测提供了简捷可靠的技术途径;基于对 Ti/Q235 复合板爆炸焊接可焊性窗口特异性的认识,试验得到改善复合板质量的优化工艺参数。

第九章是关于地基特性与优化的研究。探讨了地基强度和波阻抗对复合板质量的影响,指出,强度的影响主要体现在地基的压缩性,而波阻抗则直接影响复合板与地基之间界面透射波和反射波的大小;讨论了爆炸焊接地基应力-应变测试的特殊性,建立了可靠的测试系统;根据测量数据和材料本构关系的计算原理,得出了粘土和砂土的动态本构关系曲线;通过大量的以提高复合板焊合率为目标函数的地基参数优化试验,建立了土质地基上复合板焊合率模型,由此得出壤土与砂土地基的优化参数。

第十章是关于爆炸焊接冲击波特性及削波技术的研究。首先证明,在爆炸焊接对环境影响的次效应中,冲击波对环境的危害性最大;分析了爆炸冲击波的特性,提出了在爆炸焊接爆源周围构筑挡波墙的思路;针对不同位置 and 不同高度的挡波墙,计算爆炸场的各个物理量随时间的变化关系,讨论了远场压力对挡波墙的依赖性;采用 Lagrangian 2D SOLID 单元和 JWL 状态方程,数值模拟了挡波墙的挡波效果,并进行了试验验证;分析了挡波墙的作用机理,提出了最大耗能原理,据此给出挡波墙主要参数的优化结果;最后强调须重视挡波墙背风面马赫反射区的特异性。

作者衷心感谢王伟策教授的长期密切合作;感谢陆明、史长根、顾月兵、鲁植雄、王飞、康丽霞、陈小波、高勇军、蔡立良、周春华、刘鹏、刘学勇、刘强、尤俊等同志在研究生期间的努力工作;感谢原工程兵工程学院领导和该院科研处有关同志的支持和帮助。在成果推广应用过程中,总参军训和兵种部等领导机关给予了指

导,宝钢集团和南化集团等企业单位给予了协作。在书稿写作过程中,陆明、史长根、鲁植雄、王飞等同志做了大量资料性工作,博士生刘影、肖艳妮等同志做了不少辅助工作;汪旭光、杨秀敏二位院士给予了宝贵的指导和帮助。在此一并表示衷心的感谢!

最后,作者特别感谢周廉院士的悉心指导及为本书作序而付出的辛劳!

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 爆炸焊接的发展历史 .....	1
1.2 爆炸焊接工艺装置及工艺参数 .....	2
1.2.1 爆炸焊接工艺装置 .....	2
1.2.2 爆炸焊接静态参数 .....	2
1.2.3 爆炸焊接动态参数 .....	5
1.3 爆炸焊接的特点 .....	6
1.4 爆炸焊接研究现状及存在的问题 .....	8
1.4.1 爆炸焊接研究现状 .....	8
1.4.2 存在的问题 .....	11
1.5 本书主要研究内容 .....	14
<b>第二章 爆炸焊接复合板结合界面</b> .....	16
2.1 爆炸焊接复合板结合界面的微观特征 .....	16
2.1.1 缝隙和空洞物的测试分析 .....	17
2.1.2 界面的塑性变形 .....	20
2.1.3 界面熔化 .....	26
2.1.4 界面扩散 .....	28
2.2 爆炸焊接的三种结合界面 .....	31
2.2.1 对现有理论的述评 .....	31
2.2.2 结合界面电子扫描及成分测试 .....	33
2.2.3 结合界面三种波状形式的测试与比较 .....	35
2.3 爆炸焊接复合板界面波的分布 .....	39
2.3.1 界面波在复合板中的分布规律 .....	40

2.3.2	复合板结合界面波与装药量之间的关系	43
2.4	本章小结	48
<b>第三章</b>	<b>复板的运动规律和碰撞作用机理</b>	51
3.1	复板的运动和加速过程	51
3.1.1	复板运动姿态试验与分析	51
3.1.2	复板的力学模型	55
3.2	基复板相互作用机理	57
3.2.1	高应变率、高温、高压下材料的动态强度	57
3.2.2	爆炸焊接基复板相互作用规律	63
3.3	本章小结	69
<b>第四章</b>	<b>基复板合理间距研究</b>	71
4.1	关于基复板间距的研究现状	71
4.2	基复板间距对边界效应的影响	73
4.3	基复板间距与复板运动速度关系的理论研究	74
4.3.1	由复板一维运动公式得到的间距表达式	74
4.3.2	由复板二维运动公式得到的间距表达式	79
4.4	基复板间距与复板运动速度关系的试验研究	83
4.4.1	闪光 X 射线照相法	83
4.4.2	复板速度的测量原理	85
4.4.3	试验方案及结果分析	86
4.4.4	焊接质量分析	90
4.5	本章小结	90
<b>第五章</b>	<b>爆炸焊接界面结合及成波机理</b>	92
5.1	爆炸焊接界面结合机理	92
5.1.1	概述	92
5.1.2	形成爆炸焊接界面的前提条件	93
5.1.3	爆炸焊接的压力焊机理	94
5.2	爆炸焊接界面波形成机理	97
5.2.1	成波机理研究的历史与现状	98
5.2.2	炸药爆轰反应区荷载的波状分布规律	100

5.2.3	碰撞焊接瞬间复板上表面爆轰作用压力	105
5.3	本章小结	106
<b>第六章</b>	<b>最佳装药量窗口研究</b>	<b>107</b>
6.1	装药量经验公式分析	108
6.1.1	可焊性窗口的讨论	108
6.1.2	装药量与碰撞速度关系的计算式	110
6.1.3	可焊性窗口的炸药用量下限计算	112
6.2	降低炸药用量的试验研究	113
6.2.1	装药量下限经验公式的对比试验	113
6.2.2	装药量下限经验公式的修正	115
6.2.3	修正式的试验检验	117
6.3	不等厚度布药	118
6.3.1	等厚度布药爆炸焊接复合板界面波分布情况	118
6.3.2	待焊区板振动及其对界面波的影响	119
6.3.3	不等厚度布药的结构参数	122
6.3.4	两种布药方式所得复合板界面形貌的比较	125
6.4	最佳装药量窗口	129
6.4.1	建立最佳装药量窗口的基本原则与方法	129
6.4.2	最佳装药量窗口各点、线的物理意义	132
6.4.3	最佳装药量窗口与可焊性窗口的比较	133
6.4.4	应用实例	134
6.5	本章小结	136
<b>第七章</b>	<b>硬脆金属爆炸焊接研究</b>	<b>138</b>
7.1	硬脆金属的特点	138
7.2	T10/Q235 复合板爆炸焊接试验	139
7.2.1	问题的提出	139
7.2.2	工具钢金相组织的软硬质相	140
7.2.3	工具钢金相组织微观变形分析	143
7.2.4	工具钢复合板爆炸焊接的初步试验	144



7.2.5	工具钢复板微观组织的电镜扫描试验与分析	147
7.3	工具钢爆炸焊接机理分析	148
7.3.1	爆炸焊接过程的力学特点分析	148
7.3.2	损伤场的演变及断裂机理分析	150
7.3.3	工具钢宏观开裂的主要影响因素	157
7.4	解决工具钢爆炸焊接易开裂的技术途径	165
7.4.1	工艺改进措施	165
7.4.2	工艺改进后的试验情况	167
7.4.3	硬脆金属复合板爆炸焊接生产实例	169
7.5	本章小结	171
<b>第八章</b>	<b>Ti/Q235 复合板爆炸焊接研究</b>	<b>174</b>
8.1	钛—碳钢的焊接	174
8.2	钛—碳钢复合板爆炸焊接试验	177
8.3	Ti/Q235 复合板的质量检测及分析	182
8.3.1	Ti/Q235 复合板超声波探伤的特殊问题	182
8.3.2	Ti/Q235 复合板超声波探伤基本原理	184
8.3.3	Ti/Q235 复合板超声波探伤检测试验	186
8.3.4	Ti/Q235 复合板结合界面微观测试分析	192
8.4	炸药爆速的影响因素与低爆速炸药配制	196
8.4.1	影响炸药爆速的因素	196
8.4.2	低爆速炸药的配制	198
8.5	本章小结	201
<b>第九章</b>	<b>爆炸焊接的地基特性与优化</b>	<b>203</b>
9.1	地基的类型与结构	203
9.1.1	地基的类型	203
9.1.2	地基中的土壤结构	203
9.1.3	地基中土壤的主要参数	205
9.1.4	爆炸焊接中的地基缺陷	207
9.1.5	爆炸焊接地基研究的主要问题	208