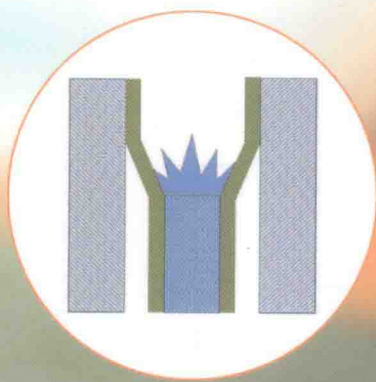


史长根 著 

# 爆炸焊接 下限原理与双立法

The Lower Bound Theorem and  
Double Vertical Method of Explosive Welding



冶金工业出版社  
[www.cnmip.com.cn](http://www.cnmip.com.cn)

# 爆炸焊接下限原理与双立法

史长根 著



北京  
冶金工业出版社  
2015

## 内 容 提 要

本书从金属复合材料界面微观组织测试入手,系统分析爆炸焊接装药参数、界面微观组织和复合材料力学性能等微观、细观和宏观三者关系,提出了“三种界面结合理论”、“爆炸焊接压力焊机理”和“界面波波状荷载压嵌的新机理”。书中构建的爆炸焊接装药参数下限原理、爆炸焊接最小作用量装药参数窗口以及装药厚度、基复板间距、炸药爆速等三个基本初始工艺参数的窗口法则和下限法则,使爆炸焊接用量仅为传统工艺的60%,而且使复合材料结合界面性能达到最优。本书还提出了双立爆炸焊接生产金属复合板的新方法,该法可使能量利用率再提高2/3。本书适合于从事爆炸焊接研究、教学及金属复合材料生产现场的工程技术人员阅读和使用。

中国工程院汪旭光院士为本书作序。

### 图书在版编目(CIP)数据

爆炸焊接下限原理与双立法/史长根著. —北京:  
冶金工业出版社, 2015. 11  
ISBN 978-7-5024-7087-6

I. ①爆… II. ①史… III. ①爆炸焊—研究  
IV. ①TG456. 6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第269674号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 程志宏 徐银河 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7087-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安新华明印业有限公司印刷

2015年11月第1版,2015年11月第1次印刷

169mm×239mm;14.25印张;278千字;215页

68.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

## 序

爆炸焊接就是利用炸药爆轰产生的能量使两层或多层的同种或异种金属板材或管材发生高速倾斜碰撞而形成固相大面积结合的一种高能焊接技术。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。

爆炸焊接作为异种金属的焊接方法和金属复合材料的一种制造工艺，在制造大面积不同厚度不同形状和不同用途的双金属及多层金属复合材料中具有重要和不可替代的作用。目前爆炸焊接已实现了三百多种金属或合金材料之间的焊接，爆炸复合材料已广泛应用到航空航天、石油化工、制盐制碱、制药造纸及食品五金等各个行业和生活领域。尤其“爆炸+轧制”等复合技术制造的超薄、超长复合材料由于其尺寸规格上的优越性，可应用于所有涉及金属材料的领域，因此具有更广阔的应用前景。

从20世纪60年代始，我国中科院力学所、大连理工大学、洛阳725所、西安有色金属研究院、解放军理工大学、南京理工大学、西安交通大学、郑州大学等高校院所等先后开展了爆炸焊接的理论和技术研究，为爆炸焊接的生产实践和技术发展的日趋完善奠定了坚实的理论基础。

我国爆炸焊接厂家也由20世纪80年代大连造船厂、宝鸡宝钛、宜宾复合板厂等几家发展到现在的西安天力、南京润邦、南京宝钛、南京三邦、太钢、洛阳双瑞、山东鲍德、威海化机、郑州宇光，铁岭军宇、宝鸡新丰、宝鸡任益、承德帝圣、辽宁葫芦岛等100多家金属复合材料厂家，由此可见爆炸焊接技术的发展与金属复合材料行业的盛况。

本书作者运用科学技术发展的普遍规律以及事物发生、发展和演化过程中所体现的“集成式”、“优化式”和“本原式”三种创新思维和方法，结合他近20年爆炸焊接理论研究和生产实践，撰写的这本专著《爆炸焊接下限原理与双立法》，集中反映了作者在爆炸焊接和金属复合材料领域所取得的三个方面的重大创新和突出贡献。

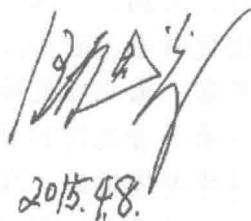
作者从金属复合材料界面微观组织测试入手，系统分析了爆炸焊接装药参数、界面微观组织和复合材料力学性能等微观以及细观和宏观三者之间的关系，提出了“三种界面结合理论”、“爆炸焊接压力焊机理”和“界面波波状荷载压嵌的新机理”等新观点，改变了我国复合板厂家普遍存在热衷于“大波复合界面”的认识所导致装药量过大，界面强度反而大大下降的困扰，指出“微小波状”结合界面才是爆炸焊接努力的方向。

作者将“最小作用量原理”这一自然界和物理学统一普遍法则运用于指导爆炸焊接的理论研究和生产实践，发现并提出了爆炸焊接应遵循“装药参数下限原理”（即爆炸焊接装药初始参数的窗口法则和下限法则）的新观点，以指引人们逐步使爆炸焊接装药工艺和参数达到最优，最终使爆炸焊接综合效益达到最佳。

随着科学技术可持续发展和低碳节能环保的要求，爆炸焊接冲击波对环境的消极影响越来越凸显出来，制约了金属复合材料行业的大规模化发展。作者发明的“双立式”爆炸焊接新方法，节省了近2/3炸药，而且削减了爆炸冲击波对周围环境的影响，双立爆炸法的研究推广，将极大推动爆炸焊接技术的可行性和规模化生产，尤其是双立“爆炸+轧制”综合技术，将充分地发挥爆炸和轧制两种技术各自优势，是金属复合材料未来的主要发展方向。

本书所体现的上述三个方面的技术创新和理论突破，对提高金属复合材料的焊合质量、大幅度降低炸药用量、削减对环境的危害和引领爆炸焊接技术的发展方向等提供了新的理论方法和技术途径，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导向和促进作用。

中国工程院院士



2015.4.8.

# 前 言

本书是作者在爆炸理论研究的基础上，结合近 20 年爆炸焊接生产实践所撰写完成的，是在爆炸焊接和金属复合材料领域进行的技术创新。书中深刻反映和揭示了科学技术发展的普遍规律以及事物发生、发展和演化过程中的“集成式”、“优化式”和“本原式”三种创新思维和方法。

作者在“爆炸焊接界面三种结合面”和“爆炸焊接压力焊机理研究”等论文发表后，就企业咨询，对“金属复合板在后续加工尤其是冲压封头中易出现开裂现象，是否与大波界面微观缺陷有关”等问题进行了论证和解决。在之后的理论研究和生产实践发现和证实了我国复合板厂家普遍存在的一种倾向，即热衷于“大波”复合界面爆炸焊接，致使装药量过大，而界面强度却反而大大下降。通过不断努力，作者所提出的“三种界面”、“压力焊接机理”及“装药下限法则”等创新思想和技术参数已逐渐为业界普遍接受并应用于爆炸焊接生产实践中，不仅提高了我国复合板的微观质量和服役寿命，而且在降低约 1/3 装药量的同时，减轻了对周围环境的消极影响。

随着科学技术可持续发展和对低碳节能环保要求的提高，爆炸焊接冲击波对环境的消极影响越来越凸显，制约了金属复合材料行业的规模化发展，为此作者 2006 年发明了“双立式”爆炸焊接新方法。双立爆炸焊接法节省了近 2/3 炸药用量，而且减小了爆炸冲击波对周围环境的影响，极大地推动了爆炸焊接技术大规模化的实施，尤其是“双立爆炸+轧制”的综合技术，将成为金属复合材料未来的主要发展方向。

针对爆炸焊接理论和实践存在的问题，根据科技创新的发展趋势

和事物发生、发展、消亡的基本规律，本书着重阐述了与爆炸焊接相关的三个方面的理论和技术创新，即准确理解和把握爆炸焊接技术的界面成因和力学本质；不断优化焊接工艺参数从而使爆炸焊接技术的综合效益达到最佳以及创新爆炸焊接工艺方法，试图以此引领爆炸焊接和金属复合材料领域的发展方向。

本书共分为三篇，即第一篇 爆炸焊接界面、第二篇 爆炸焊接下限原理、第三篇 双立爆炸法。内容包括：第1章 概述，第2章 爆炸焊接三种结合界面，第3章 爆炸焊接固相结合及成波机理，第4章 爆炸焊接最小作用量分析与构建，第5章 装药量下限原理确定与试验，第6章 间距上限法则分析与试验，第7章 双立式爆炸焊接爆轰作用机理，第8章 双立式爆炸焊接的数值模拟，第9章 双立式爆炸焊接防护试验及结合界面。

本书作者申报的《双立爆炸焊接新方法复合板运动规律及防护机理研究》项目获2015年国家自然科学基金资助（51541112）。作者对国家自然科学基金委员会表示衷心感谢！

衷心感谢导师王耀华先生的指导并引领作者进入爆炸焊接和金属复合材料研究领域；感谢汪育、侯鸿宝、赵林升、葛雨珩等同志与作者进行研究期间的卓越工作；还要感谢南京润邦等企业单位与作者进行的长期合作及提供的试验条件，特别感谢中国工程院汪旭光院士的悉心指导及为本书作序而付出的辛劳！

作 者  
2015年6月

# 目 录

## 第一篇 爆炸焊接界面

第1章 概述	3
1.1 爆炸焊接工艺装置及参数	3
1.1.1 爆炸焊接工艺装置	3
1.1.2 爆炸焊接工艺参数	4
1.1.3 爆炸焊接的特点	7
1.2 爆炸焊接技术发展	9
1.2.1 爆炸焊接历史	9
1.2.2 我国爆炸焊接技术现状	9
1.2.3 爆炸焊接发展新趋势	10
1.3 爆炸焊接科学问题	14
1.3.1 爆炸焊接爆轰驱动	14
1.3.2 爆炸焊接界面结合	15
1.3.3 爆炸焊接装药参数	17
1.3.4 爆炸焊接次效应	20
1.4 爆炸焊接研究存在的问题	21
1.4.1 界面微观质量	21
1.4.2 界面固相结合机理	22
1.4.3 装药工艺参数优化	23
1.4.4 爆炸焊接中的环境保护	24
第2章 爆炸焊接三种结合界面	25
2.1 爆炸焊接界面微观特征	25
2.1.1 缝隙和空洞物	26
2.1.2 界面塑性变形	28
2.1.3 界面熔化	32



2.1.4	界面扩散 .....	33
2.2	爆炸焊接的三种结合界面 .....	36
2.2.1	爆炸焊接结合合理理论述评 .....	36
2.2.2	结合界面电子扫描及成分测试 .....	37
2.2.3	结合界面三种波状形式 .....	38
2.3	爆炸焊接界面波分布规律 .....	42
2.3.1	界面波在整个复合板中的分布规律 .....	43
2.3.2	复合板结合界面波与装药量之间的关系 .....	46
2.4	本章小结 .....	48
<b>第3章</b>	<b>爆炸焊接固相结合及成波机理 .....</b>	<b>51</b>
3.1	基复板结合的力学和几何条件 .....	51
3.1.1	复板材料及厚度对碰撞结合的影响 .....	51
3.1.2	基础对基复板碰撞结合的影响 .....	53
3.1.3	复板飞行姿态和运动过程 .....	54
3.1.4	爆炸焊接基复板相互作用规律 .....	56
3.2	爆炸焊接界面结合机理 .....	60
3.2.1	机理 .....	61
3.2.2	形成爆炸焊接界面的两个前提条件 .....	61
3.2.3	爆炸焊接中的压力焊接机理 .....	62
3.3	爆炸焊接界面波形成机理 .....	64
3.3.1	问题的提出 .....	64
3.3.2	炸药爆轰反应区荷载的波状分布规律 .....	65
3.3.3	碰撞瞬间复板上表面爆轰作用压力 .....	68
3.4	界面波“射流捕获机理” .....	69
3.4.1	波头断面的测量与分析 .....	69
3.4.2	射流捕获机理 .....	70
3.5	本章小结 .....	73
 <b>第二篇 爆炸焊接下限原理</b>  		
<b>第4章</b>	<b>爆炸焊接最小作用量分析与构建 .....</b>	<b>77</b>
4.1	最小作用量原理 .....	77

4.1.1	最小作用量原理发展过程	77
4.1.2	最小作用量原理的普遍性	78
4.1.3	爆炸焊接下限原理的研究基础和依据	81
4.2	爆炸焊接下限原理	83
4.2.1	爆炸焊接“最小作用量”构建	84
4.2.2	爆炸焊接静态参数窗口	85
4.2.3	爆炸焊接静态参数下限原理	85
4.3	爆炸焊接装药量下限确定及其窗口的构建	86
4.3.1	装药量下限	86
4.3.2	装药量上限计算	87
4.3.3	临界药厚质量比曲线	90
4.3.4	临界碰撞角曲线	90
4.3.5	临界可焊复板厚度	91
4.3.6	装药量窗口构建与应用	91
4.4	爆炸焊接上限间距分析与计算	92
4.4.1	上限间距图解法计算	93
4.4.2	上限间距与复板厚度的关系曲线	94
4.5	本章小结	95
<b>第5章</b>	<b>装药量下限原理确定与试验</b>	<b>96</b>
5.1	三种装药厚度对比试验	96
5.1.1	实验材料及其性能	96
5.1.2	试验方案设计	97
5.1.3	试验步骤与结果分析	98
5.2	三种装药量复合板界面测试分析	100
5.2.1	药厚 15mm 的 410S/Q345R 复合板界面分析	100
5.2.2	药厚 25mm 的 410S/Q345R 复合板界面分析	104
5.2.3	药厚 35mm 下的 410S/Q345R 复合板界面分析	107
5.2.4	三种药量复合板界面对比分析	109
5.3	三种装药量复合板综合力学性能	111
5.3.1	显微硬度测试	111
5.3.2	剪切强度测试	112
5.3.3	冲击性能测试	114
5.3.4	拉伸性能测试	115
5.4	本章小结	116

第 6 章 间距上限法则分析与试验 .....	118
6.1 基复板间距模型构建 .....	118
6.1.1 复板运动与间距的关系 .....	118
6.1.2 匀变加速运动模型建立 .....	119
6.2 间距与复板运动速度实验测试 .....	121
6.2.1 试验方案 .....	121
6.2.2 试验测试结果 .....	122
6.2.3 实验数据拟合分析 .....	124
6.3 上限间距应用试验研究 .....	125
6.3.1 试验材料与方案 .....	126
6.3.2 界面测试分析 .....	127
6.3.3 剪切测试 .....	131
6.4 下限原理装药参数 .....	133
6.5 本章小结 .....	134

### 第三篇 双立爆炸法

第 7 章 双立式爆炸焊接爆轰作用机理 .....	139
7.1 问题的提出 .....	139
7.1.1 现行爆炸焊接方法及存在问题 .....	139
7.1.2 双立式爆炸焊接新方法的提出 .....	141
7.1.3 科学意义与应用价值 .....	142
7.2 双立式爆炸焊接新方法及其作用过程 .....	143
7.2.1 双立式爆炸焊接结构形式 .....	143
7.2.2 双立式爆轰作用过程 .....	144
7.3 双立式复板驱动一维爆轰模型 .....	144
7.3.1 双立式复板运动一维解析解 .....	145
7.3.2 双立式一维爆轰驱动模型特征分析 .....	146
7.4 双立式爆轰复板运动 P-M 模型 .....	148
7.4.1 双立式 P-M 膨胀模型的建立 .....	149
7.4.2 双立式复板飞行姿态 .....	149
7.4.3 双立式复板运动规律分析 .....	152
7.5 双立式爆炸焊接 R- $\delta$ 可焊性窗口 .....	153

7.5.1	双立式焊接窗口的构建	153
7.5.2	双立式焊接窗口边界条件	154
7.5.3	双立式爆炸焊接 $R-\delta$ 窗口的构建及应用	160
7.6	双立式爆炸焊接工艺参数	161
7.6.1	质量比与装药厚度	162
7.6.2	基复板间距确定	162
7.6.3	炸药爆速优化控制	163
7.7	本章小结	163
<b>第8章</b>	<b>双立式爆炸焊接的数值模拟</b>	<b>165</b>
8.1	双立式爆炸焊接模型的建立	165
8.1.1	模型尺寸	165
8.1.2	单元划分	166
8.1.3	材料模型	167
8.2	双立式爆炸焊接爆轰驱动过程分析	168
8.2.1	双立式爆炸焊接作用过程	168
8.2.2	双立式爆炸焊接复板运动速度	169
8.3	复合板动力响应分析	171
8.3.1	复合板运动速度分析	171
8.3.2	复合板动应力分布规律	173
8.3.3	复合板动应变分布规律	175
8.4	防护装置模拟防护分析	177
8.4.1	防护装置位移变化规律	177
8.4.2	防护装置压力响应分析	180
8.4.3	防护装置塑性应变分析	181
8.5	本章小结	183
<b>第9章</b>	<b>双立式爆炸焊接防护试验及结合界面</b>	<b>185</b>
9.1	双立式爆炸焊接复合板运动速度	185
9.2	三种双立防护结构及试验	188
9.2.1	柔性防护墙设计及试验	188
9.2.2	自锁式防护装置设计及试验	190
9.2.3	紧固箍防护装置设计及试验	191
9.3	刚性板和柔性防护墙综合防护装置	193
9.3.1	综合防护结构模型建立	193

---

9.3.2 钛钢双立爆炸焊接综合防护试验 .....	195
9.4 大板面双立爆炸焊接试验 .....	197
9.5 双立复合板结合界面及力学性能 .....	197
9.5.1 双立式复合板界面形貌 .....	198
9.5.2 双立式复合板界面微观组织 .....	202
9.5.3 双立式复合板综合力学性能 .....	207
9.6 本章小结 .....	211
参考文献 .....	213

# 第一篇

## 爆炸焊接界面

任何技术创新必须是从研究基本问题入手并对问题本质有深刻理解和认识。本篇旨在从爆炸焊接结合界面的微观组织测试和分析入手，主要阐述作者“三种界面”、“界面波整体分布规律”、“爆炸焊接固相结合机理”以及“界面波波状荷载压嵌”等创新论点，用以指导读者深刻理解和正确认识爆炸焊接界面的微观结合质量、结合机理、装药参数等涉及爆炸焊接的最基本和最重要的问题。对于爆炸焊接众所周知的技术工艺参数则只作简要叙述或略去不论。



# 第 1 章 概 述

## [ 本章提要 ]

主要阐述和总结爆炸焊接基本装置和工艺参数，回顾和分析历史及现状和技术发展，提炼并提出爆炸焊接关键技术和存在问题等等，使读者对爆炸焊接技术建立整体认识和把握并明晰本理论的重要意义和实践价值。

爆炸焊接 (explosive welding) 就是利用炸药 (explosive) 爆轰产生能量，使两层或多层的同种或异种金属板材或管材发生高速倾斜碰撞而形成固相大面积结合的一种高能焊接技术。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。有文献还报道了，部分金属与非金属材料 (如陶瓷、橡胶) 也可以通过爆炸焊接实现结合。

## 1.1 爆炸焊接工艺装置及参数

### 1.1.1 爆炸焊接工艺装置

目前国内外爆炸焊接一般采用如图 1-1(a) 所示平行式爆炸焊接装置，即基板 (base or drive plate) 和复板 (cladding or flying plate) 均平行放置在爆炸基础之上，炸药经过雷管引爆后，爆轰波以速度  $v_d$  自左向右传播，复板在爆轰产物压力作用下以速度  $v_p$  向下飞行，由于速度  $v_d$  和  $v_p$  都很高，从而与基板发生高速碰撞而实现焊接。

由于平行爆炸法属开放裸露装药，而炸药爆轰产生的爆轰波是向四周传播的，因此，此方法炸药能量利用率要小于 1/2，而炸药爆轰所产生的大于 1/2 的能量均由上方耗散，同时对周围环境还造成了巨大的危害。

为了充分利用炸药的能量，同时削减冲击波对周围环境的不利影响，本书作者提出“双立式”爆炸焊接新方法，如图 1-1(b) 所示。炸药 4 由雷管引爆后爆轰产生的冲击波使左右两侧竖立的两块复板 (3 和 3') 均发生弯曲和塑性变形并分别与两侧同样平行竖立的两块基板 (2 和 2') 产生碰撞并焊接，焊接后的两块复合板不是向下运动与地基发生碰撞，而是向两侧运动。

显然，双立爆炸法将平行爆炸法上方耗散的爆炸能量用于爆炸焊接，所以此



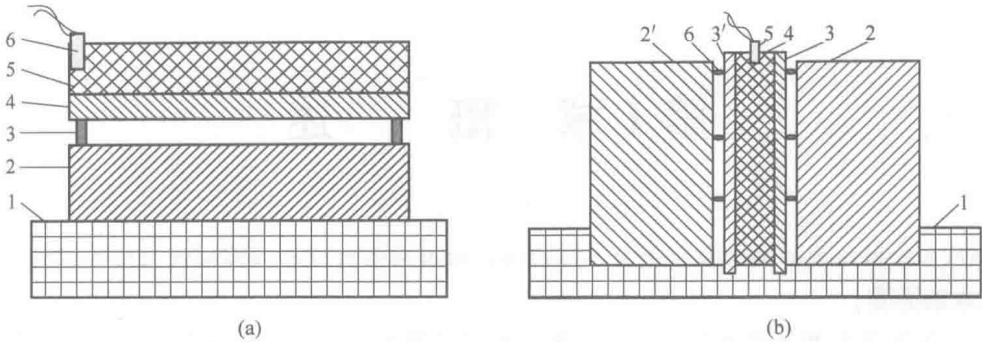


图 1-1 爆炸焊接装置示意图

(a) 现行平行爆炸法; (b) 作者发明的双立爆炸法

1—安装装置(地基); 2(2')—基板; 3(3')—复板; 4—炸药; 5—雷管; 6—间隙

方法不仅可至少节省 1/2 的能量, 同时削减了冲击波对周围环境的不利影响。因此, 此方法的推广应用将是爆炸焊接行业的一次革命, 而且也必将推动金属复合材料领域朝可持续和规模化生产方向发展。

### 1.1.2 爆炸焊接工艺参数

爆炸焊接工艺参数又分为动态参数和静态参数。影响爆炸焊接质量的动态参数主要包括: 碰撞速度  $v_p$  (impact velocity), 碰撞点移动速度  $v_c$  (一般等于炸药爆速), 动态弯折角  $\beta$  (dynamic bent angle) 或碰撞角  $\theta$  (collision angle)。这三个动态参数就构成了爆炸焊接窗口的可焊参数, 而这些参数又由炸药爆速 (detonation velocity)、装药厚度 (thickness of explosive)、基复板间距 (stand off distance) 等三个主要静态工艺参数所确定。

#### 1.1.2.1 静态工艺参数

如图 1-1 所示, 爆炸焊接安装参数主要由上述三个主要静态工艺参数 (又称安装工艺参数或初始工艺参数) 构成, 这三个静态参数是决定爆炸焊接成败的关键, 是爆炸焊接研究的核心问题, 本书的第一篇和第二篇就是要提出三个参数选取的“下限原理”从而不断优化以使爆炸焊接质量和综合效益达到最佳。

(1) 炸药爆速  $v_d$ 。爆炸焊接以炸药爆炸作为能源, 而炸药爆炸能量、爆轰压力以及爆炸猛度均与炸药爆速关系十分密切。炸药爆速决定了基、复板的碰撞速度  $v_p$  和动态碰撞角  $\theta$ 。而且, 炸药爆速直接决定了基、复板的碰撞点移动速度  $v_c$ , 如果  $v_c$  过大而基、复板间距  $s$  过小, 易造成基、复板射流捕获而堆积在结合界面上, 形成界面缺陷甚至使焊接失效。因而, 当炸药品种选定之后, 炸药爆速的控制就显得十分重要。目前, 普遍采用乳化炸药, 但此炸药对于爆炸焊接而言尤其是大板面和硬脆材料其爆速明显偏高, 所以一般需要在爆炸现场进行配置低