

# 爆炸 焊接动力学 及其计算方法

BAOZHA HANJIE DONGLIXUE  
JIQI JISUAN FANGFA

谢飞鸿◎著



科学出版社

# 爆炸焊接动力学及其计算方法

谢飞鸿 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是对爆炸焊接动力学及其计算方法的研究与总结。主要内容包括：金属板爆炸焊接时爆轰产物爆炸作用指数的计算分析；用Twin P-M计算模型计算分析复板的弯折、时程压力的方法；瑞利-里兹、狄拉克函数计算分析爆炸焊接复合板界面应力场的计算方法；普朗特-雷恰特、库塔-布拉休斯二维定常流涡丝分布的数值计算模型；炸药爆轰特征和复合板界面熔化层成因对复合板质量影响因素的分析；爆炸焊接碰撞点锐楔区流场动力学状态参数的数值分析。本书还给出了爆炸焊接应力场计算分析实例，可有效地帮助读者理解和掌握相关知识和计算方法。

本书适合从事金属爆炸加工及研究的人员阅读，也可作为相关专业的研究生教材和高年级本科生选修教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

爆炸焊接动力学及其计算方法 / 谢飞鸿著. — 北京 : 科学出版社, 2014.8  
ISBN 978-7-03-041475-5

I. ①爆… II. ①谢… III. ①爆炸焊-动力学-计算方法 IV. ①TG456.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 170572 号

---

责任编辑：杨 岭 杨悦蕾 / 责任校对：杨悦蕾

责任印制：余少力 / 封面设计：墨创文化

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年9月第 一 版 开本：B5(720×1000)

2014年9月第一次印刷 印张：10 3/4

字数：220千字

定价：59.00元

# 前 言

随着科学技术和社会经济的飞速发展，人们对金属材料使用性能的要求越来越高，金属材料的消耗量也越来越大，因此，研究者开始把目光转向金属复合材料的研究、开发和利用。其中，使用爆炸复合生产的大面积复合板和异种金属过渡接头开始大量应用于生产实践，并日益显示出其巨大的经济和技术价值。

爆炸焊接是制造金属复合板的重要方法之一，与常规焊接方法完全不同。它是利用炸药的爆轰能量使被焊材料的焊接面高速斜碰撞基体金属板，碰撞时，复板和基板之间产生的射流可以自动清除金属表面的杂质和氧化膜，碰撞产生的压力足以使被焊金属界面产生剧烈的局部塑性变形，将两层或多层金属材料有效地焊接在一起。在焊接界面上一般都会产生局部高温，压力、温度的共同作用能使界面结合处的强度等于或大于母体金属材料的强度，爆炸焊接集压力焊、熔化焊和扩散焊的方法于一体，使被焊金属实现了完全的冶金结合，是一种独特的焊接技术。爆炸焊接是一种非常复杂的物理化学过程，它涉及固体力学、流体力学、冲击力学、机械工程、材料科学、高压物理学等多个学科。

爆炸焊接复合板在炸药爆轰压力冲击作用下，界面会形成波纹状的啮合，板的动力响应特征、变形以及爆炸焊接的安装参数是决定焊接质量的关键性因素。分析炸药在复合板上的传爆过程和复合板的运动形态，有利于进一步研究复合板冲击基板而引起的基板的动力响应模式和动态变形形式，也有利于研究复合板的黏塑性流动变形和界面涡丝分布。

本书研究了炸药在金属板上的滑移爆轰过程及其作用形式，炸药爆炸作用下板的动力响应特征、界面应力状态的数值分析，对常见2号岩石硝铵炸药爆轰速度(以下简称爆速)随其装药密度及敷设厚度的变化给出了定性、定量的描述；同时对炸药敷设厚度、有效多方指数、碰撞角和安装间距之间的可焊范围进行了数值分析；还提供了爆炸焊接所涉及的爆速、爆轰产物的有效多方指数、复板与基板的碰撞角和安装间距等参数的计算方法。

本书内容还包括炸药爆炸作用时爆轰产物的爆炸作用指数、爆炸作用下复板的时程压力、复板冲击基板的应力场、复合板界面的应力响应特征和波状界面成形的数值计算模型，以及影响爆炸焊接板的因素分析。这些内容对金属板爆炸焊接界面受力特征的评价至关重要。本书采用双普朗特-梅耶(Twin P-M)模

型计算分析复板的弯折、时程压力状态；采用瑞利-里兹(Rayleigh-Ritz)变分方程、狄拉克(Dirac)函数  $\delta(x)$  计算分析爆炸焊接复合板界面应力场；采用普朗特-雷恰特(Prandtl-Reichardt)复合板界面二维自由射流，以及库塔-布拉休斯(Couette-Blasius)二维定常流的涡丝分布的数值计算模型来计算分析焊接界面的特征。

本书分为8章，第1章为绪论；第2章主要介绍金属爆炸焊接的特点、研究现状及发展，还包括对爆炸焊接结合界面的数值模拟研究；第3章主要介绍炸药爆炸作用于复板的冲击荷载时程压力的数值计算，在滑移爆轰荷载作用下复板承受的冲击压力的数值计算中，应用了 Twin P-M 计算模型和列契脱(Richtor)二维简化计算模型；第4章主要介绍冲击荷载作用于基板的应力场数值分析，并结合工程实例和实验结果对试件和模型进行了数值计算和模拟分析；第5章主要介绍移动冲击荷载下复合板的动力响应特征计算模型，并充分结合实例对黏弹性地基爆炸焊接和滑移爆轰作用下的复合板的动力响应，移动冲击荷载作用下对边简支、对边自由的矩形大板计算模型进行了理论分析；第6章主要介绍爆炸焊接界面塑性流致涡数值计算模型中的复合板界面二维自由射流和定常流涡丝分布的数值计算；第7章主要介绍对大面积板爆炸复合的关键工艺参数研究，阐述了炸药爆轰特征和复合板界面熔化层成因对复合板质量影响因数的分析过程，以及爆炸焊接碰撞点锐楔区流场动力学状态参数的数值分析；第8章是对全书的一个小结。

本书体系完整、结构清晰，详细讲解了爆炸焊接全过程数值的计算方法，对焊接领域新方法的研究有一定的参考价值。

本书在写作过程中得到了中国工程院院士汪旭光教授、北京科技大学于亚伦教授、成都大学寇智勇教授的指导与帮助；本书的出版还得到科学出版社和成都大学的大力支持；书中的计算和部分插图由孙伟、刘京学、郭磊、王换强、曹光辉、许绍平、陈蓓等同学帮助整理，在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中错误与不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2014年3月于成都

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
第 2 章 金属爆炸焊接复合界面成形问题研究综述 .....	4
2.1 金属爆炸焊接的发展和研究现状 .....	4
2.1.1 爆炸焊接的成形过程及特征 .....	4
2.1.2 爆炸焊接工艺特点及结合区物理特性 .....	5
2.2 爆炸焊接技术的应用 .....	7
2.3 爆炸焊接结合界面的数值模拟研究进展及特点 .....	9
第 3 章 炸药爆炸作用于复板的冲击荷载时程压力数值分析 .....	17
3.1 爆轰参数绝热指数的力学计算值推论问题的提出 .....	17
3.1.1 爆轰产物的绝热指数 $k$ 和比热比 $\gamma_1$ .....	17
3.1.2 有效多方指数 $\gamma$ 值的推导 .....	24
3.1.3 计算结果分析 .....	29
3.2 滑移爆轰荷载作用下复板承受的冲击压力的数值分析 .....	29
3.2.1 爆炸焊接参数之间的关系 .....	29
3.2.2 一维格尼复板运动公式 .....	30
3.2.3 列契脱二维简化模型的计算公式 .....	32
3.2.4 Twin P-M 计算模型 .....	36
3.2.5 计算结果分析 .....	44
第 4 章 冲击荷载作用于基板的应力场数值分析 .....	45
4.1 金属爆炸焊接数值计算及工程应用 .....	45
4.1.1 试件与模型 .....	45
4.1.2 数值计算 .....	46
4.2 确定爆炸焊接的碰撞角 .....	51
4.2.1 爆炸焊接临界碰撞角 $\alpha_c$ 的确定 .....	51
4.2.2 爆炸焊接可焊参数碰撞角的上限值 $\alpha_{\max}$ 的确定 .....	53
4.2.3 工程实例 .....	60
4.3 金属爆炸焊接界面应力场数值分析 .....	61
4.3.1 瑞利-里兹变分方程的直接求解方法 .....	61
4.3.2 工程应用 .....	63

4.4	基于 $\delta(x)$ 函数的爆炸焊接界面应力场数值分析	65
4.4.1	数值计算模型	65
4.4.2	实验结果分析	67
<b>第5章</b>	<b>移动冲击荷载下复合板的动力响应特征模型</b>	<b>71</b>
5.1	黏弹性地基爆炸焊接的动力响应数值计算分析	71
5.1.1	计算模型	72
5.1.2	梁弯曲振动的动态响应	76
5.1.3	实例分析	77
5.1.4	计算结果分析	79
5.2	滑移爆轰作用下复合板的动力响应特征数值分析	80
5.2.1	基本方程及计算模型	80
5.2.2	实例分析	82
5.2.3	计算结果分析	87
5.3	移动冲击荷载作用下对边简支、对边自由矩形大板的振动计算模型	...
		87
5.3.1	振型方程	88
5.3.2	振型分量	88
5.3.3	实例计算	89
5.3.4	计算结果分析	94
<b>第6章</b>	<b>爆炸焊接板界面塑性流致涡数值计算模型</b>	<b>95</b>
6.1	普朗特-雷恰特复合板界面二维自由射流涡丝分布数值计算	95
6.1.1	计算模型	97
6.1.2	普朗特-雷恰特流动速度解析	100
6.1.3	计算结果分析	106
6.2	库塔-布拉休斯复合板界面二维定常流涡丝分布数值计算	106
6.2.1	两平行平板间突然启动的库塔流计算模型	107
6.2.2	绕顺流放置平板的边界层布拉休斯流模型	110
6.2.3	计算结果分析	115
<b>第7章</b>	<b>大面积板爆炸复合的关键工艺参数研究</b>	<b>117</b>
7.1	大面积板的炸药爆轰特征对复合板质量的影响因素分析	117
7.1.1	常见的2号岩石硝铵炸药的爆轰特征参数	117
7.1.2	低密度低爆速性能炸药参数分析	121
7.1.3	端部效应分析	122
7.1.4	不等厚度布药的结构特征	124
7.1.5	流体沿壁面摩擦系数的分布规律	125

7.1.6	大面积复合板爆炸焊接的改进方法 .....	127
7.2	复合板界面熔化层成因对复合质量的影响因素分析 .....	130
7.2.1	冲击引起材料温升的实验与数值计算 .....	130
7.2.2	复合板界面熔化的化学成因分析 .....	131
7.2.3	嵌边函数法界面温度场计算模型 .....	133
7.2.4	降低熔化层厚度的工艺方法 .....	139
7.2.5	计算结果分析 .....	140
7.3	爆炸焊接碰撞点锐楔区流场动力学状态参数数值分析 .....	141
7.3.1	流动控制方程和数学描述 .....	141
7.3.2	数值计算方法和定解条件 .....	143
7.3.3	计算结果分析 .....	147
7.4	爆炸焊接质量的影响因素分析 .....	147
7.4.1	引爆端稀疏作用的影响 .....	147
7.4.2	基、复板安装间距限定情况下的复板碰撞压力对焊接质量的影响 分析 .....	151
<b>第8章</b>	<b>结语 .....</b>	<b>156</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>161</b>
<b>索引</b>	<b>.....</b>	<b>163</b>



# 第 1 章 绪 论

爆炸复合常称为爆炸焊接，它与激光加工技术同属于高能率加工方法。爆炸焊接方法是美国的卡尔(L. R. Carl)<sup>[1]</sup>在 1944 年首先提出来的。他在一次炸药爆炸试验中偶然发现，两片黄铜圆薄片由于受到爆炸的冲击而被结合在一起，于是他提出了利用炸药把不同金属复合起来的研究课题。另一些早期发现的爆炸焊接现象还包括：一堆炮弹同时爆炸，相邻弹壳之间会形成焊接层，过量的炸药将成形件焊死在模腔内，导致很高的模具修理费用；早期的粉末压实研究中，压力元件之间可能产生偶然的焊死。正是由于这类事件的发生，人们开始研究探讨如何防止此类焊死现象，进而于 20 世纪 50 年代后期开始了对爆炸焊接的研究。1957 年，费列普捷克(V. Philipchulk)<sup>[2]</sup>第一次把爆炸复合技术引入到实际工业工程上。此后，英国、苏联、联邦德国、捷克、日本、美国等国也相继展开了对这门新工艺的研究工作。20 世纪 60 年代，我国也开始了对爆炸焊接方面的实验和理论研究。1968 年，大连造船厂陈火金等人试制成功了国内第一块爆炸复合板。20 世纪 80 年代以来，爆炸焊接理论和实验技术得到了长足的发展<sup>[3]</sup>，爆炸焊接研究范围日益扩大，特别在应用上有了许多创新，使得这门技术在化工、石油、制药、造船、军事，甚至核工业、航空、航天等领域都有了广泛的应用。

国内外在双金属的爆炸焊接领域中进行了大量的理论和实践工作，爆炸焊接技术发展到今天，对于爆炸荷载下复板的运动姿态，射流的形成，碰撞点近区速度场、压力场和应变场的计算，爆炸焊接的可焊参数的确定等问题已经得出了很好的结论。但焊接界面处的结构及成波机理仍未能得到圆满的解释。爆炸焊接后的金属分界面上出现的周期性的波状界面直接影响焊接质量，需要进一步研究。同时由于不同材料组合的爆炸焊接界面具有其独特性，因此对爆炸焊接界面的研究仍需大量的实验工作。

人类发展的历史证明，材料是社会进步的物质基础，是人类进步程度的主要标志，所以人类社会的进步以材料作为里程碑。纵观人类发现材料和利用材料的历史，每一种重要材料的发现和广泛应用，都会给社会生产力和人类生活水平带来巨大的变化。近年来，随着工业现代化的不断加快，有许多动力机械、化工、冶金、石油加工等设备的零部件难免要在高温、超载、强侵蚀、电磁辐射或放射性等恶劣环境中长期工作。这就要求用于制造这些零部件的材料必须

是能适应上述环境的特殊材料,如高合金钢、有色金属、专用合金材料等。如果整个设备和仪器都采用十分昂贵的特殊材料制造,不仅会使生产工艺复杂化、显著提高设备和仪器的造价,而且更重要的是,难以满足设备的整体使用要求。

国防工业如运载火箭、航天器、超音速飞机、潜艇等高精尖军工领域的发展,代表了一个国家的科技发展水平,而这一发展水平在很大程度上取决于高性能新材料的研究和开发能力。国防工业中使用的大多数材料几乎都要求在低温和高温下有很高的比强度;在振动和高速运行时,具有足够的强度和寿命,以确保长期工作的可靠性。但就目前已有的材料的性能来看,单独使用任何一种材料,都不可能同时满足几方面的特殊要求。因此要制造出这种特殊材料,就要将几种分别满足不同要求、性能各异的材料复合起来。焊接是将不同金属材料制备成复合材料的最常见方法。但异种金属材料的焊接往往比同种材料的焊接困难得多,这是因为金属材料的种类不同,其熔点、密度、导热性各异,线膨胀系数、晶格类型等物理化学性能也有所差别,有的甚至差别很大,从而导致对其焊接性有很大影响。引起异种金属材料焊接困难的主要原因是基体金属之间物理化学性能的不同。焊接时,结合面处会产生一层性能和组织与母材不同的过渡层,因此,采用常规方法焊接时,经常会出现以下技术问题:①两种基体金属材料之间不能形成合金;②焊接过程中,金相组织发生变化或产生新的组织而使接头性能变差;③熔合区和热影响区的机械性能及塑性降低;④由于基体金属热膨胀系数不同而引起热应力,而且这种热应力不能消除;⑤塑性变差和应力增加往往容易引起裂纹。

金属爆炸焊接的过程可以这样描述:将炸药、雷管、复板和基板在基础(地面)上安装起来,当置于复板之上的炸药被雷管引爆后,炸药的爆炸化学反应经过一段时间的加速,便以爆速在复板上向前传播;随着爆轰波的推进和爆炸产物的急骤膨胀,大部分炸药的化学能转换成高速运动的爆轰波和爆炸产物的动能;随后,动能的一部分传递给复板,从而推动复板向基板高速运动,在两板之间的气体全部迅速地排出的同时,复板和基板随即在接触点上依次发生撞击。在这个过程中,在两板的接触面上,借助波的形成,一薄层金属先由于倾斜撞击和切向应力的作用而发生强烈的塑性变形,借助金属塑性变形的热效应将复板高速运动动能的90%~95%转换成热能,如此大量的热能在近似绝热的情况下将促使塑性变形后的金属温度升高,当此温度达到金属的熔点以后,就会使紧靠界面的一薄层塑性变形金属发生熔化,剩余的热能还会使部分塑性变形金属发生回复和再结晶,并使双金属整体的温度升高。

由金属物理学的基本原理可知,在爆炸焊接过程中,由于不同金属间存在浓度梯度,界面上高压、高温下的金属的塑性变形及熔化等条件的存在及其综合作用,必然导致基体金属原子间的相互扩散。这种扩散现象使用光学金相显

显微镜、电子显微镜、电子探针等都可以测量出来。

这样，当界面上的那一薄层塑性变形和熔化了了的金属迅速冷却后，便在界面上形成了包括金属塑性变形特征、熔化特征和原子间扩散特征的结合区。在金相显微镜下观察，可看到细微的波状结构。这说明两种不同成分的金属材料已达到冶金结合的效果，也说明不同金属的爆炸焊接获得成功。

上述分析表明，爆炸荷载最终在结合区转换和分配成三种主要形式的能量：一薄层金属的塑性变形能、熔化能和扩散能。研究指出，这三种能量是造成金属间爆炸焊接的基本能量。

爆炸焊接一般采用接触爆炸，即将炸药直接敷在复板金属表面。炸药爆炸后，将复板金属往下送落，复板依次与基板发生碰撞，碰撞速度可达 600 m/s，这种高速碰撞产生巨大的冲击压力，大大地超过金属的屈服强度极限。因此，在两块金属板的接触面上发生剧烈的摩擦，产生高速碰撞射流和热量，为两块金属表面原子之间的冶金结合提供了必要的条件。

## 第 2 章 金属爆炸焊接复合界面成形 问题研究综述

### 2.1 金属爆炸焊接的发展和研究现状

20 世纪 50 年代中期, 由于航空航天工业的发展, 产生和形成了以爆炸成形为主的加工工艺。随后, 60 年代崛起的爆炸焊接, 为这一高新技术领域注入了新的活力。它们的出现, 使利用炸药进行金属高能加工的大量新工艺和新技术不断地向许多工业部门扩展, 有的可能是目前唯一可行的金属加工方法, 从而开拓了全新的工业领域。进入 20 世纪 90 年代, 国内外的广大科技工作者对爆炸焊接的机理、后续加工工艺等开展研究, 发表了大量有价值的论文, 较好地回答了爆炸焊接中出现的一些质量问题, 如解决了厚板之间的焊接问题, 提出了厚板焊接理论, 作出焊后的热处理分析<sup>[4]</sup>等, 这些都为爆炸焊接的发展提供了更加丰富的理论依据。近年来, 爆炸焊接的研究范围在不断扩大, 如用爆炸焊接来复合成块体非晶态合金, 将薄带非晶条带焊接在普通金属上用于防腐等<sup>[5]</sup>。还有人用爆炸焊接的方法尝试了使金属和陶瓷连接的试验, 结果表明, 焊接界面达到了预期的效果, 即在焊接界面, 金属部分熔化, 并在强大的剪切作用下, 产生了对陶瓷微粒的包覆结构, 这种结构增强了界面的连接强度<sup>[6]</sup>。这一发展趋势表明, 爆炸焊接将会使金属和非金属之间的连接具有更广阔的前景。

回顾过去可知, 爆炸复合技术能够将大多数金属(或非金属)材料相互复合在一起, 形成一种兼有两种或多种金属(有色金属)性能的复合板(或管、棒等), 它有利于节约资源, 有利于综合利用、充分发挥、显著增强现有金属材料的物理和化学性能, 若能将爆炸复合技术领域的理论及实践问题全部解决, 那么爆炸复合技术将会有更加美好的发展前景。

#### 2.1.1 爆炸焊接的成形过程及特征

根据一般的金属焊接基本原理和对爆炸焊接过程的分析, 可以认为爆炸焊接首先应当属于压力焊的范畴, 但如果伴随着金属熔化和基体金属原子间的扩散, 那么就不限于此了。因此在一般情况下, 爆炸焊接具有压力焊的特征——

结合区存在金属的塑性变形, 又具有熔化焊的特征——结合区存在金属的熔化, 还具有扩散焊的特征——结合区必然进行不同金属原子间的扩散。这些特征在爆炸焊接的双金属和多金属结合区成分、组织和性能的检验中被证实。因此, “爆炸焊是以炸药为能源的压力焊、熔化焊和扩散焊‘三位一体’的金属焊接新工艺及新技术”, 这样一种观点和结论是客观和有事实根据的。

也许正因为如此, 能够爆炸焊接的金属组合的数量比单一的压力焊、熔化焊和扩散焊要多得多。在一般的焊接工艺下不能或难于焊接的金属组合, 在采用爆炸焊后都可以简单而迅速地焊接起来。因此可以说, 不仅所有的金属材料都能进行爆炸焊接, 而且只要金属本身具有一定的塑性和冲击韧性, 工艺参数又选择适当, 那么, 爆炸焊接的双金属和多金属就能具备一定的面积和相当的结合强度, 从而可以进行实际应用。

根据爆炸焊接的过程、实质以及它的金属物理学机理, 金属爆炸焊接可定义为: 是在一个特定的用于焊接的炸药—爆炸—金属系统中, 炸药的化学能经过多次和多种形式的传递、吸收、转换及分配以后, 在待结合的金属界面上形成一薄层具有塑性变形、熔化、扩散以及波形特征的焊接过渡区, 从而造成强固结合的一种金属焊接的新工艺和新技术。

爆炸复合一般指大面积金属板之间的爆炸焊接。研究爆炸复合的过程及其原理对于研究众多不同形式的爆炸焊接工艺的过程和原理具有重要的意义。其他形式的金属材料的爆炸焊接有管与管、管与板材、管与棒、零件与零件的爆炸焊接, 局部爆炸焊接等。

在一定的条件下, 金属板材在炸药爆炸的冲击荷载下, 将在金属板间产生射流, 这一特征也是金属爆炸焊接的必要条件。一般来说, 当两块不同的金属平板直接接触时, 由于金属表面存在氧化物和吸附气体, 因此会影响金属板间的焊接。射流则起到了清除金属表面杂质、保证爆炸焊接形成的作用。以平板爆炸焊接为例, 当复板表面的炸药以爆速  $D$  传播时, 复板在爆轰产物的高温高压作用下, 以一定的速度向基板碰撞、压合, 当这一速度达到某一数值时, 两金属接触瞬间, 在高压作用下形成金属流, 进而复板与基板焊接在一起。焊接后将焊接面剖开, 在金相显微镜下观察, 可以看到细微的波状结构。

### 2.1.2 爆炸焊接工艺特点及结合区物理特性

分析和研究表明, 金属爆炸复合是介于金属物理学、爆炸物理学和复合工艺学之间的一门边缘学科。爆炸复合也有它自身的特殊性, 这又给有关学科提出了新的研究课题。因此可以认为, 相关学科的基本理论在爆炸复合技术中的广泛应用, 新的研究课题的不断解决, 必将推动爆炸复合技术理论研究和实践

应用的发展。

任何金属的复合都需要某种形式的能量。这些能量在金属复合的时候，都会发生一定形式的转化。爆炸复合的能量是炸药的化学能，在爆炸复合的过程中，这种化学能在炸药—爆炸—金属系统内将发生多种和多次能量的转化、吸收、传递和分配，最后形成金属之间的复合结合区。这种能量转换的过程是十分复杂的，尽管如此，这种过程始终依次和有条不紊地进行着。特别应当指出的是，爆炸复合能量转换的过程与爆炸复合过程一样十分短暂，在时间上以微秒计。

爆炸复合的操作过程非常简单，它不需要昂贵的设备和复杂的工艺，也不一定要求十分熟练的技术。实际上，只要有炸药、金属材料 and 一块开阔的场地，以及为数不多的辅助设备和工具，在稍微有技术训练和实践经验的人员的操作下，就能够进行爆炸复合试验和生产，而且这种试验和生产的规模和范围可以随工作人员的增加、机械化程度的提高及其市场的扩大而迅速扩大。

爆炸复合双金属和多金属的结合区是基体金属之间成分、组织和性能的过渡区，在一般情况下，它具有金属的塑性变形、熔化、扩散以及波形的明显特征。在爆炸复合过程中，由于高的加热和冷却速度以及结合区金属的塑性变形（加工硬化），结合区金属的硬度要比基体金属高。在合金相图上形成固溶体、金属间化合物或它们的混合物的金属组合，在该结合区的熔体（熔化块或熔化层）内，仍会形成相应的固溶体、金属间化合物或混合物。结合区的铸态金属内也有疏松、气孔、裂纹、夹杂、偏析等微观缺陷。在变形热的作用下，紧靠界面的一部分变形最强烈的金属还会发生回复和再结晶。成分分析结果表明，在该区中存在着液态和固态下基体金属原子之间的相互扩散，这表明，在结合区中发生了众多的成分、组织和性能的变化。这些变化都是由爆炸复合过程中的热效应引起的。

爆炸复合的结合区通常很窄，一般在 0.01~1 mm 范围内，这个尺寸虽小，但它却是强固连接基体金属的纽带。这个纽带的形成及其组织和性能直接与工艺参数有关，也直接影响基体金属之间的结合强度和使用性能。

对于爆炸复合技术来说，无论是在金属组合的数量、类型和材型方面，还是复合的形式、面积和速度方面，或是在操作的难易性和经济性方面，以及产品的性能和应用范围方面，都优于其他许多复合方法。原则上说，爆炸复合可以简单、迅速、有效地实现大面积、高质量和多种形状的不同金属、特别是不同金属的复合，为其提供一个不可替代的方法和工艺。

爆炸复合后的各种复合材料，其结合强度通常不低于基体材料中的较弱者，而且复合后的材料在使用过程中，当一边出现裂纹和裂纹发展的时候，该裂纹将在界面上被阻止。这样就能够延缓材料断裂的过程，提高其使用寿命。

大量金相结果表明,爆炸复合双金属和多金属结合区的基本形态及物理特性有如下几种:①波形结合区;②连续熔化型结合区;③混合型结合区;④直接接触平面的或直接接触的波动起伏的结合区。以上4种形状的结合区在任何爆炸复合板的结合界面上都大部分地或全部地存在。

对于结合区中的波形,在一般的情况下呈现连续性和规则性。波形的出现是爆轰波波动传播的能量与金属材料相互作用的结果。进一步的研究表明,此波形成的过程就是金属爆炸复合的过程。结合区内波的形成,对于爆炸复合过程中能量的转换和分配、爆炸复合界面的形成、界面结合强度的提高等都有重要意义。结合区中金属的塑性变形导致了波形内金属的组织不同于基体金属的组织,即在爆炸复合过程中,金属的组织发生了波状的塑性流动,即塑性变形。这种塑性变形是伴随着波的形成而同时形成的,所以波形成的过程就是结合区金属发生不可逆的塑性变形的过程,结合区波形成的过程就是金属爆炸复合的过程。

## 2.2 爆炸焊接技术的应用

一般爆炸复合板的制造过程可分为材料准备、爆炸焊接及后处理三个主要过程。材料准备又分为炸药准备和焊接件准备两部分,炸药准备主要是调整炸药性能,使之在所需的范围内,焊接件的准备则主要需对基、复板待焊面进行打磨除锈、校平修整等,这一准备过程可在车间里进行。爆炸焊接过程必须在专门的爆炸场地进行,它主要包括基、复板现场组装、布药、爆炸等。

通过对炸药的调制及对基、复板间隙的控制,可以调整板件的碰撞角、碰撞点移动速度、复板撞击速度等爆炸焊接参数。进一步通过理论分析、数值计算和适当的实验验证,可以获得较满意的焊接质量,这样的爆炸焊接参数可直接用于指导大板幅的爆炸复合板生产和具体的爆炸焊接工程。

爆炸焊接的最大优点是能将性能差异大、用通常的方法很难熔焊在一起的金属焊接在一起。如铝-钢、铜-钢、钛-钢、铅-钢等金属组合,其熔点、强度、热膨胀系数等性能差异极其悬殊,用其他连接技术很难把它们连接在一起,或者即使连接在一起,其结合质量也难以保证,而采用爆炸焊接技术很容易将它们成功焊接在一起。

由于爆炸焊接是在高温、高压下微秒级的时间内完成的,其结合面发生扩散、夹杂、晶形改变等现象较少,因此爆炸焊接结合面的强度往往比被焊金属中较低金属强度还高,焊接界面保持了一定的韧性。爆炸焊接非常适合大面积的焊接,可以用于平板焊,也可用于管材的内、外包覆焊,来制备复合管材和棒材。爆炸复合后的板材、管材、棒材有优异的后续加工性能,能继续进行



热处理、轧制、车、铣、刨等。爆炸焊接工艺简单，应用方便，不需要复杂的成套设备，而且能源丰富，不仅可以进行大批量生产，也可以单件复合。

下面介绍几种常见的爆炸焊接复合产品：

(1)耐腐蚀用复合钢板。复层材料用不锈钢、铜合金、镍合金、铝、钛等耐腐蚀材料，而基材为结构钢，可爆炸焊接成耐腐蚀的结构用复合钢板，这种复合钢板已广泛地用在化工装置、化学储罐、热交换器管板、地热发电设备、海水淡化装置、煤的液化装置、炼镁柑塌等许多方面。通常这些复合板都是成品板，国标上对这些复合板的性能都进行了严格的规定，如国标 GB/T 8165—2008 不锈钢复合钢板，GB/T 8547—2006 钛、钢复合板等。一般复合钢板设备都是用复合板经卷制、焊接而成的，复合钢板的焊接必须采用特殊的焊接工艺，通常压力容器制造厂商对这些焊接工艺是熟识的。复合钢板的焊接往往都采用三层焊接，通常先焊基层焊缝，然后再堆焊过渡层，最后焊复层焊缝。这种焊接顺序有利于提高焊接接头的抗腐蚀能力。

(2)耐磨用复合钢板。耐磨铜合金包覆钢板用以制造轧钢机、车辆的制动卡瓦、起重机的滑动轴承。用耐磨、耐热的镍基合金管爆炸包覆钢棒，然后可经锻造制成内燃机的进排气挺杆。由于爆炸焊接制品的结合强度高、复合率高、导热性好，所以具有经久耐用的特点。

(3)异种金属过渡接头。由于爆炸焊接非常适合焊接异种金属，因此常用来制造异种金属过渡接头，作为使用常规焊接连接两种金属的过渡件。这种双金属过渡接头根据其使用目的的不同可分为导电过渡接头和机械结构过渡接头。导电过渡接头用于电网中的异种金属过渡连接，常用的金属为铝、铜、钢等，如铝、钢导电接头大量地用于炼铝工业中，而铝、铜接头则大量用于电力、电解等工程中。对机械结构过渡接头而言，其使用条件往往要比导电接头严格得多，因此其爆炸焊接过程要比导电接头复杂得多，加工条件也要严格得多。如高速舰船上的铝、钢接头，主要用于轻体的铝制上层结构和钢制船体的连接；液化天然气运输船体上，为了固定铝制球罐所使用的铝、钢接头，都使用钛层来提高接头的综合性能；又如用于液化气中的不锈钢、铝过渡管接头，为确保其低温力学性能，采用了不锈钢、镍、钛、纯铝、铝合金进行多层爆炸焊接，由 5 种金属的组合得到了低温韧性极好的管接头。这种用于机械结构过渡的接头还有许多应用领域，如用于制冷设备的铝铜管接头，用于海水冷却设备的钛铜管接头，用于核反应堆上的不锈钢或镍基合金、Nb-0.1 Zr 与 316 不锈钢及 304 不锈钢与烧结铝的组合，用于航天的钛与不锈钢、铝与镁、铝与钛的组合等。



## 2.3 爆炸焊接结合界面的数值模拟研究进展及特点

爆炸焊接技术发展到今天,国内外在双金属爆炸焊接领域进行了大量的理论和实践工作,对于爆炸荷载下复板的飞行姿态,射流的形成,碰撞点近区速度场、压力场和应变率场的计算,爆炸焊接的可焊参数的确定等问题,已经得出了很好的结论。但焊接界面处的结构及成波机理尚未得到圆满的解释。爆炸焊接后的金属分界面上出现周期性的波状界面,这一焊接现象直接与焊接质量有关,还需要进一步研究。最早的阿勃莱汉姆逊(Abrahamson)以及稍后的勃格曼(Bergman)、伯赫拉尼(Baharani)首先提出刻入机理。1968年,汉托(Hunt)提出了以再入射流和基板之间的速度差为特征的亥姆霍兹失稳模型。之后,戈杜诺夫(Godunov)等人提出了应力波机理。同时期的科瓦利克(Kowalick)、海(Hay)、柯沃恩(Gowan)等人提出了卡门(Karman)涡街机理。

1982年,中国科学院力学研究所在郑哲敏院士的带领下,进行了一系列的工作,提出了流体弹塑性失稳模型,较好地解释了焊接时界面出现波纹的原因。1998年,郑元谋提出了一种与流体力学相对立的金属物理学机理,他认为:波形是在爆炸荷载下相互撞击的金属界面所发生的一种不可逆的和周期性波动分布的塑性变形,它的形成必有内因和外因,内因是待焊金属的材料特性,外因是在金属中波动传播的爆炸荷载。爆炸荷载下,在金属材料界面发生冲击碰撞是波形形成不可缺少的过程和手段,可是它无法解释下面这种现象:一颗高速飞行的铅丸与一块靶板倾斜碰撞时也能产生波,尽管人们提出了各种各样的成波机理,但爆炸焊接是一个十分复杂的过程,在炸药爆炸的驱动下,基、复板发生高速碰撞,碰撞区在高温高压的作用下产生高应变率的塑性流动,并产生射流,高速运动的射流又与基、复板产生相对运动,引起侵彻和剪切作用,形成多种不同类型(形态)的波。这些机理只对某些类型的界面波适用,或者只能解释某些现象。所以成波机理至今仍不完全清楚,提出一个完善、成熟、确切而适用的机理模型仍是爆炸焊接复合材料研究者的奋斗目标。

爆炸焊接是利用炸药的爆轰使待焊接表面以高速倾斜碰撞,在界面产生局部剧烈的塑性变形而焊接在一起。这一方法通常被描述为冷加工技术,认为在整个过程中没有热量来促使焊接形成,但事实上,由于这种方法的动力学特点,在焊接界面一般都会产生局部高温。压力、温度和塑性变形的共同作用能够使界面结合处的强度等于或大于母体金属的强度。虽然爆炸焊接能将两层或多层同种金属焊接在一起,但这种方法的主要工业应用潜力在于它能将异种金属焊接在一起,而其中有许多异种金属是无法用其他焊接方法焊接的。爆炸焊接经过几十年的研究、应用和发展,已成为金属爆炸加工领域中使用炸药最多、产