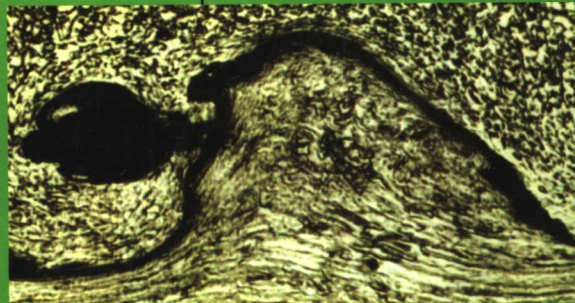


THE PRINCIPLE AND APPLICATION
OF EXPLOSIVE WELDING AND METALLIC COMPOSITE

爆炸焊接和爆炸复合材料 的原理及应用

郑远谋 著



中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

爆炸焊接和爆炸复合材料的原理及应用/郑远谋著. —长沙:中南大学出版社,2007. 1

ISBN 978-7-81105-509-2

I. 爆... II. 郑... III. ①爆炸焊接②爆炸复合-复合材料
IV. TC456. 6 TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 021194 号

爆炸焊接和爆炸复合材料的原理及应用

郑远谋 著

责任编辑 刘石年

责任印制 汤庶平

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

印 装 中南大学印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 62.75 字数 1596 千字 插页 1

版 次 2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-81105-509-2

定 价 180.00 元

内 容 简 介

金属爆炸焊接是介于金属物理学、爆炸物理学和焊接工艺学之间的一门边缘学科，爆炸焊接又是用炸药作能源进行金属间焊接和生产金属复合材料的一种很有实用价值的高新技术。它的最大特点是在一瞬间能将相同的、特别是不同的和任意的金属组合，简单、迅速和强固地焊接在一起。它的最大用途是制造大面积的各种组合、各种形状、各种尺寸和各种用途的双金属及多金属复合材料。这种技术还是一种先进的表面工程技术，这类材料也是一类应用广泛的表面工程材料。

本书从金属物理学的观点出发，在实践、研究和大量国内外资料的基础上，全面系统地论述了爆炸焊接的工艺及原理，从而建立起一整套爆炸焊接的金属物理学理论，并提供了大量的金属爆炸复合材料的生产工艺、组织性能及其工程应用方面的资料。

本书图文并茂和通俗易懂，集理论与实践、研究和应用，以及实用于一体，可供下列学科、行业和领域中，从事异种金属焊接和复合材料研究、开发、生产、设计、管理、教学或应用方面工作的科研及工程技术人员、企业家、工人和大专院校师生参考：爆炸加工、爆炸焊接（焊接）、金属复合材料（金属材料）、表面工程技术（表面工程材料）、炸药和爆炸物理（爆炸力学）、化工（石油化工）、工程爆破、材料保护、工程机械、机器制造、能源技术、环境保护、水利水电、冶金设备、舟舰船舶、交通运输、建筑装饰、电工电子、电脑家电、电线电缆、电解电镀、仪器仪表，办公用品、消防器材、食品轻工、烹饪用具、厨房设备、家具用材、医药化肥、医疗器械、切削刀具、油井钻探、油气管道、桥梁隧道、港口码头、城市建设、设备维修、农业机械、真空元件、超导材料、低温构件、海洋工程、国防军工、航空航天和原子能，以及金属资源的回收与综合利用……

Brief Introduction

Metallic explosive welding is a boundary science between metalphysics, explosion physics and welding technology science, and is yet a very useful advancing high tech for metals welding and metallic composite production by using explosives as energy resource. The most characteristic of explosive welding lies in that identical, especially variable and arbitrary metals combination can be strengthened and tight bonded together simply and instantaneously. The greatest application of explosive welding is fabricating different dual/poly metal composites with variable metal combination, variable shape, variable dimension and different usage. This technique is also an advanced surface engineering technique, whose product is also a kind of widely used surface engineering material.

The present book describes the technology and theorem of the explosive welding completely and systematically based on metalphysics view and a volume of practical experiences, research results and information data at home and abroad, aiming at establishing a packaged metalphysics theory for explosive welding, and providing the production technology, structure/property and other useful data of a large number of explosive metal-composites.

The present book is rich in both graph and literal, is popular and understandable, and is integrated the theory, practice, research, application and so on into one book. It could be used or referred by scientific research worker, engineering technician, enterprise manager, technic worker, and both teachers and students of university/college, those are engaging in theoretical research or engineering application, etc, in the following fields, such as explosion working, explosive welding (welding), metallic composite/material, surface engineering technique/material, explosives and explosion physics/mechanics, chemical/petroleum-chemical industry, material protection, engineering machine, machinery manufacture, energy resource technique, environmental protection, water conservancy/electricity, metallurgy equipment, boat manufacturing, communication/transportation, architecture and decorate, electrical/electronic engineering, electric wire/cable, electrolysis/electroplate, instrument/meter, office articles, fire control equipment, food process, light industry, household electrical apparatus, medical implement, cutting appliances, oil well pipe, bridge and tunnel, port and dock, urban construction, agricultural machine, vacuum component, superconducting material, low temperature structure component, oceanographic engineering, national defence industry, aerospace, atomic energy, recovery and comprehensive utilization of metal resources, and so on.

资 助 者

本书之得以付梓，实赖下列资助者对编辑和出版工作的慷慨资助，作者和中南大学出版社对他们表示衷心的感谢。

大连爆炸加工研究所

广东阳江十八子集团刀剪制品有限公司

太钢复合材料厂

四川宜宾金属复合板厂

湖南长沙众诚机电科技有限公司

山东青岛海军潜艇学院防救系

江西永固金属电力制品有限公司

爆炸焊接是焊接技术的一大发展和生产复合材料的一种高新技术，爆炸复合材料是材料科学及其工程应用的一个新的发展方向。

董白云

(中南大学校长、教授 中国工程院院士)

二〇〇六年十一月十八日

大力开展爆炸焊接工作，大量
生产各种金属复合材料，满足各项
机械工程的需要，促进我国机械工
业的发展。

——贺郑远谋同志的专著《爆炸焊接和爆炸复合材料的原
理及应用》出版。

中国机械工程学会
副理事长兼秘书长、教授



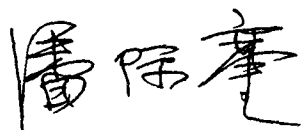
2006年10月18日

序 一

郑远谋同志用毕生精力完成的专著《爆炸焊接和爆炸复合材料的原理及应用》是全面和系统地讨论爆炸焊接理论及其应用的一本好书。这本书不仅阐述了不同于流体力学的爆炸焊接的金属物理学原理，而且指出了爆炸焊接的最大用途是制造各种金属复合材料。这些复合材料广泛地应用在生产和科学技术的各个方面，从而显示出爆炸焊接技术的神奇性和不可估量的应用价值。

爆炸焊接是焊接技术的一个大发展，爆炸复合材料是材料科学的一个新的发展方向。爆炸焊接大有作为和任重道远，爆炸复合材料意义深远，前程似锦，值得一切有志于这方面工作的人们奋发努力。

中国科学院院士
清华大学教授



2006年4月26日

(曾任国际焊接学会副主席、中国焊接学会理事长、
清华大学副校长、南昌大学校长)

序 二

郑远谋先生的著作《爆炸焊接和爆炸复合材料的原理及应用》是讨论爆炸焊接工艺、原理和应用的一部专著。是作者毕生研究和实践爆炸焊接技术的结晶，同时又为读者汇集了国内外爆炸焊接方面的研究成果。该书论述严谨、结构新颖、内容丰富，为爆炸焊接技术设计和生产应用提供了大量翔实的宝贵数据。理论紧密联系实际、对生产实践指导作用强是该书的最大特色。

爆炸焊接可以实现多种材料、多种性能的复合，能将不同物理、力学或化学性能的常用材料或珍贵材料与普通钢材强固地焊接在一起，表面材料和本体材料的厚度及其厚度比可以任意选择，面积可达数十平方米，用它们制造的设备可达数百吨。爆炸焊接还可以与各种压力加工和机械加工工艺相结合，生产出更长或更短、更大或更小、更薄或更厚，以及异形的表面工程材料及其零部件。爆炸焊接也是一种先进的表面工程技术，用爆炸焊接技术生产的金属复合材料是一类用途广泛的表面工程材料。

与某些表面工程技术相比，爆炸焊接具有工艺设备投资少、操作简单、质量好和成本低等优点。用爆炸焊接制备的表面工程材料结合强度高、面积大、品种多、适应性强，并且由于爆炸硬化和爆炸强化，使表面材料的某些性能，如强度、耐腐蚀性和耐磨性等还会有附加的提高。书中的大量事例说明，用爆炸焊接技术生产的各种各样的金属复合材料已构成了工程结构新的表面材料体系，丰富了表面工程的内涵，其应用前景十分广阔。

该书的出版发行，必将促进我国爆炸焊接及表面工程技术的研究与应用，为我国国民经济建设和国防建设作出重要贡献。

中国工程院院士
装甲兵工程学院教授



2006年5月8日

序 三

爆炸焊接是爆炸加工高科技领域的重要新工艺和新技术之一。爆炸焊接经过几十年来的研究、应用和发展,已成为爆炸加工领域中使用炸药最多、产量最大、应用最广、迄今前景最好和最活跃的一个分支。

爆炸复合材料是材料科学及其工程应用的一个新的发展方向。爆炸复合材料的品种和数量庞大,形状和类型很多,性质和用途很广。它们为充分发挥和综合利用、增强和提高金属材料的化学、物理及力学性能展现了一幅无限广阔的前景。

《爆炸焊接和爆炸复合材料的原理及应用》一书,全面和系统地总结了作者几十年来,在爆炸焊接研究和金属复合材料生产中的理论及实践。

书中相图在爆炸焊接中的应用和界面上大量金属物理学课题的研究成果,很是深刻和很有见地。它们为将爆炸焊接的理论建立在金属物理学的基础上提供了依据。

郑远谋同志早就计划写这部书了。作为作者的老师,对该书的出版和他所取得的成果十分高兴和欣慰。俗话说有志者事竟成。祝愿那些不畏艰险和勇敢攀登的人们,登上科学技术的高峰。

中国科学院院士
中南大学教授

金展鹏

2006年11月8日

序 四

爆炸焊属于特种焊的范畴，郑远谋同志在他执著研究和丰富实践经验的基础上写成的这部 160 余万字的专著中对爆炸焊涉及的各个领域，从爆炸焊接的基础理论，金属物理基础到各种工艺，产品结构和接头性能，进行了详尽的论述。对于从事爆炸焊的工作者既是一本教科书又是一本手册，对于涉及这个领域的工程技术人员也是一本很好的参考书。

爆炸焊不仅是一种先进实用的焊接技术，而且是一种用途广泛的金属复合材料的生产工艺。这种工艺技术具有重要的经济和技术价值。本书的出版必将促进这种工艺技术的发展。

中国机械工程学会焊接学会理事长
甘肃工业大学副校长、教授



2006 年 4 月 29 日

前 言

PREFACE

1970年初,我有幸参加了爆炸焊接新技术的研究和爆炸复合新材料的生产工作。30多年来,我一面工作,一面学习和一面写作。因此,为了这本书,我干了30多年,学习了30多年和写了30多年,现在终于完成了这个艰苦而意义重大的任务。甚为欣慰和感慨。

本书的出版,使我能够表述我在这门新兴的边缘学科和高科技领域所作出的如下主要贡献:提出了爆炸焊接中炸药和爆炸,即能源和能量在传统的爆炸物理学中许多不曾有过的观点及结论;揭示了爆炸焊接能量的传递、吸收、转换和分配的全过程;探讨了爆炸焊接的冶金过程和冶金结合,即结合区金属塑性变形、熔化和扩散的起因、经过及结果;研究了结合区波形的形成原理;总结了爆炸焊接工艺和技术中几乎所有的理论及实践课题。并且提供了数百种爆炸复合材料的生产工艺、组织性能和工程应用方面的大量资料。这一切就从金属物理学的角度出发,为这门学科提出了一整套全新的理论和实践。此外,30多年来,我为这门新工艺和新技术及其产品在我国的推广与应用也做了大量的工作。这部书出版后,我希望能对我国金属材料、焊接和表面工程,以及“内容简介”中众多学科的发展起一点作用,能对我国与世界各国的学术交流并促进这门学科的发展起一点作用。

本书导言简要地介绍爆炸加工和爆炸焊接领域大量的新工艺和新技术,介绍爆炸焊接的发展历史、特点和光明前景。第一篇提纲挈领地论述爆炸焊接的过程、爆炸焊接与聚能效应的原则和本质的区别,以及它的发展方向。由此简述爆炸焊接的金属物理学本质,并为后文论述这个本质提出问题和打下基

础。第二篇介绍爆炸焊接的能源和能量,即炸药与爆炸方面的基本知识,讨论爆炸焊接能量的传递、吸收、转换和分配的全过程。第三篇在大量资料的基础上,以大量篇幅介绍爆炸焊接的工艺和技术,及用这些工艺和技术生产的数百种爆炸复合材料,以及它们的后续加工(如压力加工、热处理、焊接、机械加工和废料处理等)和工程应用。第四篇讨论所有爆炸复合材料中共同的和特有的宏观及微观的金属物理学课题,全面和系统地探讨爆炸焊接金属物理学的机理,以及结合区波形成的原理,从而建立起一整套完全不同于流体力学的金属物理学理论(包括波形成理论),构成爆炸复合材料学。第五篇介绍在爆炸焊接和爆炸复合材料研究及工程应用中必要的工具资料。

这本书出版之后,希望读者一书在手能融会贯通和运用自如。并且在前人的基础上承前启后和推陈出新,为我国爆炸焊接和爆炸加工事业的发展作出自己最大的贡献。

最后说明几点:

1. 本书篇幅很大,内容很多。在目录中按内容分类,除导言外,共分五篇。篇、章、节编排参照 GB1.1 国家标准。除篇号用了汉字外,内中编排均用数字表示,如 1.1.1、即第一篇第 1 章第 1 节。

2. 本书图、表和公式很多。为了清晰地表明它们在书中的位置和序号,其编号以 4 位数表示,前三位表示图、表和公式所在的篇、章、节,第 4 位为它们的序号。

3. 本书金属组合的表示方法:在通常情况下用“-”连接两种或多种金属材料的组元,如钛-钢、不锈钢-钢和钛-钢-不锈钢等。在少数情况下,例如金属材料组元中有下标和连字符“-”存在时,则用“+”连接以示与它们相区别,如 Zr_{-2} +不锈钢, BFe30-1-1+921 钢和 BT1-1+钢 3 等,并且,覆层在前,基层在后。

4. 本书所用物理量的符号和单位采用法定符号及计量单位。爆炸焊接学科特有的符号和单位,能够统一的尽量统一。统一了的见本书附表 3.2,未统一的将在文内相应位置标明。

5. 为论证爆炸焊接的金属物理学原理,全书参阅了数以千计的国内外文献。为此特向所有文献的作者们致谢。对一些多作者文献未能写出全部作者的名字,在此特向他们致歉。

6. 感谢西北有色金属研究院的陈昆华同志为本书摄制了数百幅金相照片,也感谢该单位的许多同志为作者提供了大量的帮助,还要感谢国内主要从事爆炸焊接研究和生产的单位及个人为本书提供了大量的产品和应用方面的图片。特别要感谢多位资深的两院院士和专家教授为本书题名、题词和作序,共同推动爆炸焊接技术在我国的应用和发展。这一切不仅使本书更加完善、完美和锦上添花,而且使本书成为向国内外宣传和展示 40 多年来我国在此科技领域所取得的成就的窗口。

7. 本书是第二稿。第一稿于 1998 年 7 月在广州火车站附近随行李被盗。作者百折不挠,现在“书”终于出版了,甚为欣慰。以此凝结作者一辈子心血和期望的专著,献给从事和即将从事本学科工作的人们,并互勉。

8. 借此机会,以本书向这么多年来给予我关心、同情、支持、帮助、爱护和保护的所有领导、同事及朋友们表示深深的谢意。

最后,书中的学术观点和语言文字难免有片面及错漏之处,敬请国内外专家学者批评指正。

目 录

CONTENTS

题词和序

导 言	(1)
0.1 爆炸加工	(1)
0.2 爆炸焊接	(2)
0.2.1 爆炸焊接的发展	(2)
0.2.2 爆炸焊接的特点	(7)
0.2.3 爆炸焊接的展望	(9)
第一篇 爆炸焊接金属物理学原理	(15)
1.1 金属的爆炸焊接	(16)
1.1.1 爆炸焊接的过程	(16)
1.1.2 爆炸焊接的实质	(17)
1.1.3 爆炸焊接的定义	(18)
1.2 爆炸焊接与聚能效应	(19)
1.2.1 金属焊接的一般原理	(19)
1.2.2 聚能效应的现象和本质	(19)
1.2.3 爆炸焊接与聚能效应的区别	(21)
1.2.4 模糊与混乱	(21)
1.3 爆炸焊接的研究课题和发展方向	(24)
1.3.1 理论研究方面	(24)
1.3.2 实践应用方面	(26)

第二篇 爆炸焊接能源和能量基础 炸药与爆炸	(29)
2.1 爆炸焊接的能源	(30)
2.1.1 炸药与爆炸	(30)
2.1.2 爆炸焊接中的炸药	(45)
2.1.3 爆炸焊接中炸药的爆炸	(54)
2.1.4 爆轰波	(56)
2.1.5 爆炸产物	(59)
2.1.6 爆热	(61)
2.1.7 爆炸焊接中炸药的爆速及其测定与影响因素	(62)
2.1.8 几种混合炸药爆速的探针法测定及结果分析	(74)
2.2 爆炸焊接的能量	(84)
2.2.1 爆炸焊接的静态参数	(84)
2.2.2 爆炸焊接的动态参数	(84)
2.2.3 爆炸焊接过程中覆板的抛掷	(90)
2.2.4 爆炸焊接工艺参数的选择和计算	(92)
2.2.5 爆炸焊接模型律	(93)
2.2.6 爆炸焊接半圆柱法工艺参数试验	(96)
2.2.7 爆炸焊接台阶法工艺参数试验	(101)
2.2.8 爆炸焊接小角度法工艺参数试验	(103)
2.2.9 爆炸焊接电阻丝法工艺参数试验	(104)
2.2.10 计算机在爆炸焊接工艺参数设计中的应用	(106)
2.2.11 爆炸焊接“窗口”	(110)
2.2.12 结合区压力的计算和测量	(115)
2.2.13 结合区温度的计算和测量	(120)
2.3 爆炸焊接过程的能量分析和能量平衡	(132)
2.3.1 爆炸焊接过程的能量分析	(132)
2.3.2 爆炸焊接过程的能量平衡	(134)
2.4 爆炸焊接的边界效应及其力学-能量原理	(135)
2.4.1 爆炸焊接的边界效应现象	(135)
2.4.2 金属板上炸药爆轰过程的力学-能量分析	(136)
2.4.3 金属管内炸药爆轰过程的力学-能量分析	(137)
2.4.4 爆炸焊接边界效应的力学-能量原理	(138)
2.4.5 爆炸焊接边界效应的预防	(143)
第三篇 爆炸焊接工艺和技术基础 爆炸复合材料	(145)
3.1 爆炸焊接的工艺	(146)
3.1.1 爆炸焊接的工艺流程	(146)
3.1.2 爆炸焊接的工艺参数	(147)
3.1.3 爆炸焊接中的间隙	(149)

3.1.4	爆炸焊接中金属待结合面的净化处理	(153)
3.1.5	爆炸焊接中金属材料的表面保护	(156)
3.1.6	爆炸焊接过程中的排气	(157)
3.1.7	爆炸焊接的基础	(162)
3.1.8	爆炸焊接的必要条件	(164)
3.1.9	爆炸焊接的场地和配套工序及设施	(166)
3.1.10	爆炸焊接的工艺安装	(168)
3.1.11	爆炸焊接工艺的重复性和稳定性	(169)
3.1.12	爆炸焊接的安全与防护	(171)
3.2	爆炸焊接的技术和爆炸复合材料	(172)
3.2.1	钛-钢复合板的爆炸焊接	(172)
3.2.2	不锈钢-钢复合板的爆炸焊接	(194)
3.2.3	铜-钢复合板的爆炸焊接	(212)
3.2.4	铝-钢复合板的爆炸焊接	(221)
3.2.5	铜-铝复合板的爆炸焊接	(233)
3.2.6	贵金属复合板的爆炸焊接	(238)
3.2.7	锆合金-不锈钢管接头的爆炸焊接	(246)
3.2.8	钼-不锈钢管接头的(热)爆炸焊接	(252)
3.2.9	铅复合板的(冷)爆炸焊接	(259)
3.2.10	镍-不锈钢复合板的爆炸焊接	(262)
3.2.11	镍-钛复合板的爆炸焊接	(264)
3.2.12	铜-钛复合板的爆炸焊接	(266)
3.2.13	钛-不锈钢复合板的爆炸焊接	(270)
3.2.14	铝-不锈钢复合板的爆炸焊接	(274)
3.2.15	钛-铝复合板的爆炸焊接	(280)
3.2.16	镍-钢复合板的爆炸焊接	(283)
3.2.17	锆-钢复合板的爆炸焊接	(286)
3.2.18	铌-钢复合板的爆炸焊接	(287)
3.2.19	钽-钢复合板的爆炸焊接	(290)
3.2.20	锆-铜复合板的爆炸焊接	(291)
3.2.21	钼-铜复合材料的爆炸焊接	(292)
3.2.22	热双金属材料的爆炸焊接	(293)
3.2.23	减磨双金属材料的爆炸焊接	(297)
3.2.24	电真空用复合材料的爆炸焊接	(301)
3.2.25	超导复合材料的爆炸焊接	(302)
3.2.26	原子能复合材料的爆炸焊接	(308)
3.2.27	核燃料复合材料的爆炸焊接	(311)
3.2.28	装甲复合板材料的爆炸焊接	(312)
3.2.29	弹性复合材料的爆炸焊接	(313)
3.2.30	复合钎料材料的爆炸焊接	(315)

3.2.31	金属与陶瓷、玻璃和塑料的爆炸焊接	(316)
3.2.32	热交换器破损传热管的爆炸焊接堵塞	(319)
3.2.33	复合刀具材料的爆炸焊接	(321)
3.2.34	双金属蜗轮叶片材料的爆炸焊接	(324)
3.2.35	蜂窝结构材料的爆炸焊接	(326)
3.2.36	平面双金属管板的爆炸焊接	(326)
3.2.37	异形双金属管板的爆炸焊接	(327)
3.2.38	多层复合板的爆炸焊接	(329)
3.2.39	箔材的爆炸焊接	(333)
3.2.40	纤维增强复合材料的爆炸焊接	(335)
3.2.41	金属粉末与金属板的爆炸焊接	(342)
3.2.42	短复合管的爆炸焊接	(346)
3.2.43	长复合管的爆炸焊接	(353)
3.2.44	管道与管道的爆炸焊接	(355)
3.2.45	管与管板的爆炸焊(胀)接	(357)
3.2.46	复合棒材的爆炸焊接	(363)
3.2.47	复合异形件的爆炸焊接	(366)
3.2.48	金属板的搭接、对接和斜接接头的爆炸焊接	(368)
3.2.49	金属管的搭接、对接和斜接接头的爆炸焊接	(368)
3.2.50	点状、线状和局部爆炸焊接	(370)
3.2.51	对称碰撞爆炸焊接	(373)
3.2.52	利用冲击器爆炸焊接	(376)
3.2.53	加盖炸药罩爆炸焊接	(377)
3.2.54	水下爆炸焊接	(378)
3.2.55	宇宙中的爆炸焊接	(380)
3.2.56	在爆炸洞中爆炸焊接	(381)
3.2.57	架空电力线接头的爆炸压接	(382)
3.2.58	钢筋混凝土电杆接头的爆炸压接	(385)
3.2.59	修理中的爆炸焊接	(387)
3.2.60	其他复合材料的爆炸焊接	(388)
3.2.61	相同材料的爆炸焊接	(395)
3.3	爆炸复合材料的压力加工	(400)
3.3.1	爆炸复合材料压力加工的特点	(400)
3.3.2	爆炸复合板的轧制	(401)
3.3.3	爆炸+轧制复合板结合区的微观组织	(406)
3.3.4	爆炸+轧制复合板的力学性能	(408)
3.3.5	爆炸+轧制复合板的厚度参数	(417)
3.3.6	爆炸复合板轧制机理的探讨	(424)
3.3.7	爆炸复合板轧制过程中的一些问题	(425)
3.3.8	爆炸复合材料其他形式的压力加工	(427)

3.3.9	爆炸复合材料压力加工技术的展望	(428)
3.4	爆炸复合材料的热处理	(429)
3.4.1	爆炸复合材料热处理的特点	(429)
3.4.2	爆炸复合板的退火	(429)
3.4.3	退火后复合板结合区的微观组织	(430)
3.4.4	退火后复合板的力学性能	(441)
3.4.5	爆炸复合材料其他形式的热处理	(456)
3.5	爆炸复合材料的焊接	(457)
3.5.1	爆炸复合材料焊接的特点	(457)
3.5.2	钛-钢爆炸复合板的焊接	(459)
3.5.3	不锈钢-钢爆炸复合板的焊接	(463)
3.5.4	铜-钢爆炸复合板的焊接	(470)
3.5.5	铝-钢爆炸复合板的焊接	(473)
3.5.6	镍-钢爆炸复合板的焊接	(478)
3.5.7	锆-钢爆炸复合板的焊接	(479)
3.5.8	钽-钢爆炸复合板的焊接	(480)
3.5.9	不锈钢-钢爆炸+轧制复合薄板的焊接	(481)
3.6	爆炸复合材料的机械加工	(484)
3.6.1	爆炸复合材料机械加工的特点	(484)
3.6.2	爆炸复合材料的切割加工	(484)
3.6.3	爆炸复合材料的切削加工	(486)
3.6.4	爆炸复合材料的校平和校直加工	(486)
3.6.5	爆炸复合材料的成形加工	(487)
3.7	爆炸复合材料的废料处理	(491)
第四篇 爆炸焊接金属学和金属物理学基础 爆炸复合材料学		(493)
4.1	爆炸焊接的结合区	(494)
4.1.1	结合区的基本形态	(494)
4.1.2	结合区的物理特性	(495)
4.1.3	结合区的化学特性	(496)
4.1.4	结合区的意义	(497)
4.2	爆炸焊接结合区中金属的塑性变形	(499)
4.2.1	结合区塑性变形的一般情况	(499)
4.2.2	结合区塑性变形的特点	(499)
4.2.3	结合区塑性变形的起因	(501)
4.2.4	结合区塑性变形程度的测定	(501)
4.2.5	结合区塑性变形的影响因素	(503)
4.2.6	结合区塑性变形的意义	(503)
4.3	爆炸焊接结合区中金属的熔化	(505)
4.3.1	结合区熔化的一般情况	(505)