

Phase Transformation and
Fractography of Interface
of Explosive Welding

爆炸焊接界面相变 与断口组织

中国船舶重工集团公司
第七二五研究所

韩顺昌 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

P 爆炸焊接界面相变与断口组织

Phase Transformation and Fractography
of Interface of Explosive Welding

中国船舶重工集团公司
第七二五研究所

韩顺昌 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

爆炸焊接界面相变与断口组织/韩顺昌著. —北京:国防工业出版社,2011.7

ISBN 978-7-118-07542-7

I. ①爆... II. ①韩... III. ①爆炸焊—界面结构—研究 ②爆炸焊—断口金相—研究 IV. ①TG456.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第107774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100048)

嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 15½ 字数 370 千字

2011年7月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 128.00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



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出出版。

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
第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰
副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬
秘 书 长 程洪彬
副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明
委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴
刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁
李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生
吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠
陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起
崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

谨以本书的出版向

中国船舶重工集团公司第七二五研究所建所50周年献礼

Phase Transformation and Fractography of Interface of Explosive Welding



材料是国民经济、工农业生产和国防工业发展的重要物质基础。材料技术被世界先进国家列为 21 世纪国家重点发展的关键技术之一,它关系到国家经济的发展水平、科学技术进步程度以及国家安全。

中国船舶重工集团公司第七二五研究所(以下简称七二五所),作为一个专业从事海军武器装备材料研制和工程应用研究的军工研究所,长期以来研究及合作研究的舰船材料为海军武器装备的研制提供了强有力的物质和技术支撑,为海军装备现代化和信息化发展做出了应有贡献。经过多年的发展,七二五所贯彻科技为本、军民结合的方针,着力实行技术创新、科技成果转化和高科技产业化发展模式,拓展了专业技术领域,扩大了应用和服务范围。从研究金属、非金属和防腐防污材料发展到研究复合材料、信息材料、功能材料、生物材料、纳米材料等;从单纯研制材料扩大到研制和规模生产材料制品、舰船武器装备和民用工业产品;应用、服务范围从舰船扩大到船舶、航空、兵器、核工业、冶金、化工、电力、交通运输和环保医疗等部门以及国外市场。自 1961 年建所至今,已历 50 个春秋,七二五所已初步建成了国内领先、国际一流的集科研和多个高技术产业公司为一体的高科技产业集团。

当此之际,七二五所组织所内科技人员和专家教授,把建所 50 年来在舰船及其他材料技术和工艺的科研成果和经验,尤其是改革开放以来研究的新材料、新技术、新工艺及其工程应用的成果和经验加以总结,编纂成系列书籍,陆续出版发行,献给与这些工作有关的创业者、未来工作的参与者以及关心此事业的朋友们,以促进舰船工业和其他工业的发展。七二五所建所 50 周年材料科技工程系列书籍中,已出版和即将出版的有:

《船用铝合金焊接及其船体建造工艺》,国防工业出版社,2004 年

《海水冷却系统的腐蚀及其控制》,化学工业出版社,2006

《防腐蚀涂装工程手册》,化学工业出版社,2007 年

《金属腐蚀显微组织图谱》,国防工业出版社,2008 年

《舰船船体结构钢》,国防工业出版社,2011 年

《爆炸焊界面相变与断口组织》,国防工业出版社,2011 年

《粘弹性阻尼材料》,国防工业出版社,2011 年

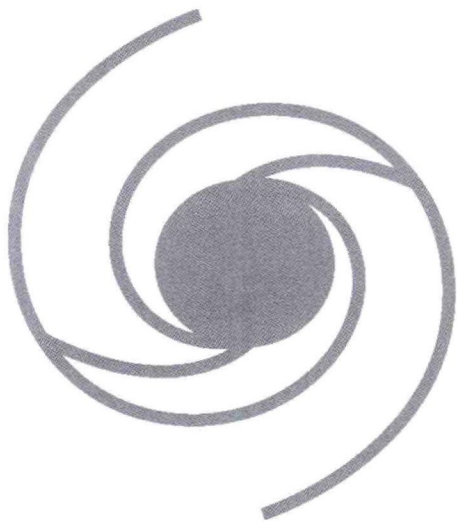
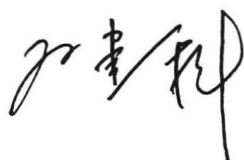
《舰船钛合金》,国防工业出版社,2011 年

这些专业书籍总结了我所科研人员在相关材料与工艺技术及其工程应用方面的重要成果、数据、信息和经验,也汇集了国内外一些先进的材料技术,并提出了我国有关材料未来发展的对策和方向,具有新颖性、先进性和实用性。可供舰船和有关其他材料的科研和管理人员参考使用,也可供舰船设计、建造和使用的工程技术人员及院校师生参考。

在编撰和出版这套系列书籍的过程中,得到有关部门和单位的支持和帮助。我们要感谢国防科技图书出版基金会的大力支持和帮助!感谢冶金、化工和船舶工业的有关研究所和企事业单位的长期合作和支持!并对本系列书籍所引用文献资料的作者及本系列书籍的编写、编审人员和做过贡献的所有人员表示衷心的感谢!

限于编著人员水平,不足之处在所难免,敬请指正。

中国船舶重工集团公司
第七二五研究所 所长





用爆炸焊接的方法制造金属复合材料和进行异种金属的连接,从现象的发现到研发成为生产金属复合材料和焊接件的完整工艺,并在工业和国防上得到广泛的应用,迄今已有近百年的历史。在这期间,人们从爆炸焊的理论研究、炸药的性质、炸药的爆炸过程及其对材料的物理化学作用、材料在冲击载荷下的动态特性、金属材料在冲击载荷下所产生的物理冶金作用,到爆炸复合材料的生产工艺和工程应用等,进行了大量的理论研究和工艺研究。这项技术的突出特点是:许多不能焊接的异种金属用爆炸焊却能焊接起来,而且焊接接头强度高,热影响区很小,加之工艺简单,易操作、省时省力等优点,很受世人青睐。在石油化工、电子、造船、航空、航天及国防工程领域得到广泛应用。其中最典型的是美国“阿波罗”飞船 Ti 与 Al 的焊接。

我国爆炸复合材料的科学研究和工艺研究已达到相当高的水平,在工业应用上也进入世界前列。近些年来我国出版了不少有影响的专著。郡丙璜和张凯等编著的《爆炸焊接原理及其工程应用》(1987)、郑远谋编写的《爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用》(2002)、杨扬编著的《金属爆炸复合技术及物理冶金》(2006)、王耀华编著的《复合板材爆炸焊接研究与实践》(2007)等,都是我国在这一领域的研究水平和工艺水平的体现。

作者从事金属爆炸复合板界面组织的研究和测试工作达 30 余年,并全力倾注于界面与漩涡中组织转变规律和(微区)成分的分布规律、界面漩涡内的冶金缺陷及其对界面性能的影响等方面的研究。早在 1983 年开始采用 Z 向小拉伸试样的方法,用扫描电镜(SEM)观察界面断口的特征及界面波的分布规律,测定了不同工艺条件下的界面波长及其对界面强度的影响。而且,用这种方法揭示出白铜 B30/船体钢复合界面漩涡内具有流线型特征的“高压旋转气团”(气孔),并在一些气孔表面上观察到“斑马纹”特征。这些物理现象的发现,对深入开展金属爆炸复合机理的研究,认识高压下材料的“流体”特性,具有重要意义。此后,利用断口金属学的技术,研究了多种复合材料的断口特征,以及工艺参数和复合板几何尺寸等对界面断裂强度和缺陷形态的影响。在金相试验中,作者发现,以硝酸为基的浸蚀剂能同时显现复板和基板的显微组织(即一步浸蚀法),在 SEM 下揭示出漩涡内的纳米晶、微晶和微树枝晶、微裂纹和气孔等许多铸造组织的特征,这在迄今为止已经发表的国内外文献中尚不多见。有的工作还参加了全国金属图片展览会,荣获优秀奖,如 BFe30-1-1/钢复合界面漩涡中成分俯视图等。根据界面前后漩涡成分的微区成分的分布规律,研究了射流的结构组成和形态,并结合高压气团的运动规律,提出界面波纹的形成机理。同时,对所

观察到的一些特殊物理现象也进行了初步探讨。当然也有些现象,由于受认识程度和研究深度的局限,目前还无法解释。热切希望国内能有更多的研究者在这一领域进行更深入的研究,使我国的爆炸焊接理论研究和工艺水平走在世界的前列。

本书共9章。第1章介绍爆炸焊接的发展历史,爆炸复合板的工艺及主要参数,爆炸焊接的特点和复合界面波长与界面性能之间关系等。第2章介绍爆炸复合界面组织的研究方法。第3章介绍爆炸载荷作用下材料的动态行为。第4章论述了冲击波对材料的物理冶金作用,包括爆炸冲击引起材料的相变、残余组织及其对性能的影响。第5章介绍爆炸焊接复合界面漩涡内铸造组织,论述了复合界面上前后漩涡内的结晶组织特征,气孔、夹杂、裂纹和金属间化合物等缺陷,前后漩涡中的成分分布特点等,非晶、纳米晶及微晶快冷组织的特征和高温析出相等,并结合试验观察,讨论了粉末压实的机理和组织。第6章介绍爆炸焊接复合界面的变形组织,结合 Cu/Cu、Ti/Ti、Al/Al、Ti/钢、Al/Ti、(304) 不锈钢/钢以及 Al/钢等爆炸复合界面所谓“直接”结合的变形组织的分析实例,描述了界面及其附近的各种变形组织的特征及其分布的一般规律,讨论了在复合界面发生的动态再结晶和爆炸复合材料的再结晶热处理后的自组织。第7章介绍绝热剪切带,重点讨论剪切带的种类、内部结构、细小晶粒和非晶、空间分布和自组织现象,在高速变形过程中发生的动态再结晶机理、影响因素及其危害。第8章为爆炸焊接复合界面的断口金相学,作者在界面断口上观察到具有流线型特征的高压、高温、高速旋转的“高压气团”及其对漩涡内液体金属结晶的影响和“斑马纹”等特征;观察到气孔不但分布在熔池结晶基体上,还分布在金属间化合物内等。第9章描述爆炸复合活化区特性及波状界面的形成机理。

本书是作者长期试验工作和理论研究成果的结晶,并汲取国内外近些年的研究成果,较全面系统地论述了爆炸复合界面的组织转变特征和规律,以及界面断口特征,对于从事爆炸焊和爆炸复合材料生产的技术人员、科研院所的科技人员和相关专业的师生,一定有所裨益。

在本书的编撰过程中,得到我所王其红、张霞和高灵清等研究员的大力支持和帮助,得到洛阳双端金属复合材料有限公司张超、徐宇皓和辛宝、侯发臣、张保奇、岳宗洪等高级工程师的技术指导与样品支持。我所中央实验室的张海峰、张金民、张永辉、杨之勇、叶宏德、李雪峰、王春芬和郭海霞等同志给予许多试验支持;高灵清、曹声驹研究员和张金民、岳宗洪高级工程师还阅读了初稿的相关部分,提出许多很好的修改意见;情报室的郭泽亮高级工程师等也给予很多情报支持。在此,作者向他们表示衷心的感谢。对哈尔滨工业大学分析测试中心的孟庆昌教授,河南科技大学材料学院文九巴教授和李炎教授对本书的热情指导和帮助表示衷心谢意。此外,作者还特别缅怀已故张振奎研究员、吴绍绕高级工程师曾对作者实验工作的支持和帮助! 本书得到国防出版基金的资助,中国船舶重工集团第七二五研究所也给予经费支持,在此深表感谢!

限于作者的能力和水平,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正!



作者
2011年4月



目录 Contents

第1章 绪论	001	Chapter 1 Introduction	001
1.1 爆炸焊接发展的历史回顾	001	1.1 Reviews and development of explosive welding	001
1.2 爆炸复合的基本原理和特征	002	1.2 Basic principle and and characteristic of explosive cladding	002
1.2.1 金属爆炸复合的原理	002	1.2.1 Basic principle of explosive cladding of metallic plates	002
1.2.2 金属爆炸复合界面的基本特征	004	1.2.2 Basic characteristic of explosive cladding interface	004
1.3 爆炸复合的基本装配形式	005	1.3 Basic assemblies of explosive cladding plates	005
1.3.1 平行法	005	1.3.1 Parallel assemble of explosive cladding plates	005
1.3.2 倾斜法	005	1.3.2 Inclined assemble of explosive cladding plates	005
1.4 关键参数	006	1.4 Key parameters	006
1.4.1 临界碰撞角度	006	1.4.1 Critical angle for jet formation	006
1.4.2 临界冲击压力	006	1.4.2 Critical impact pressure	006
1.4.3 临界流体传输速度	007	1.4.3 Critical flow transition velocity	007
1.4.4 最大冲击速度	007	1.4.4 Maximum impact velocity	007
1.5 爆炸焊接窗口	008	1.5 Weldability window of explosive welding	008
1.6 爆炸焊接的特点	009	1.6 Features of explosive welding	009
1.6.1 冲击波	009	1.6.1 Shock wave	009
1.6.2 材料的动态特性	010	1.6.2 Dynamic characteristic of materials	010
1.6.3 高变形速率	010	1.6.3 High strain rate	010
1.6.4 高塑性变形能力	010	1.6.4 High plastic deformation capability	010
1.6.5 高压气体	011	1.6.5 High pressure air mass (HPAM)	011
1.6.6 界面等离子体	012	1.6.6 Interfacial plasma	012
1.6.7 冲击相变和调幅分解	012	1.6.7 Shock phase transformation and Spinodal decomposition	012
1.6.8 绝热剪切带	012	1.6.8 Adiabatic shear bands	012
1.7 金属爆炸复合界面的性能与参数之间的关系	013	1.7 Relationship between properties and parameters of explosive cladding interface	013
1.7.1 缺口Z向拉伸强度试验	013	1.7.1 Z-direction pre-crack tension test	013
1.7.2 金属爆炸复合界面的硬度分布	014	1.7.2 Hardness distribution of explosive welding interface	014
参考文献	016	References	016

第 2 章 爆炸焊接界面相变组织分析方法	017	Chapter 2 Analytical methods for interfacial transformation structures	017
2.1 界面及其附近可能出现的相变与缺陷	017	2.1 Phase transformation and defects appear around interface of explosive cladding	017
2.2 分析仪器分辨率要求	017	2.2 Resolution requirements of instrumental analysis	017
2.3 在爆炸复合界面组织表征中常用的分析方法	018	2.3 The frequently-used methods to characterize the structures of explosive welding interface	018
2.3.1 形貌分析技术	018	2.3.1 Morphological analysis	018
2.3.2 微区成分分析	020	2.3.2 Micro-composion analysis	020
2.3.3 微区结构分析	022	2.3.3 Micro-scale structural analysis	022
2.3.4 动态瞬时结构分析	026	2.3.4 Dynamic instantaneous structural analysis	026
2.4 取样与样品制备	026	2.4 Selection and preparation of sample	026
2.4.1 取样	026	2.4.1 Sampling and preparation of specimens	026
2.4.2 样品磨制、抛光和浸蚀	028	2.4.2 Grinding, polish and etching of metallographic specimens	028
参考文献	031	References	031
第 3 章 爆炸载荷作用下材料的动力学行为	032	Chapter 3 Dynamic behavior of materials under explosive impact loading	032
3.1 材料动态行为的基本概念	032	3.1 Basic concept of dynamic behavior of materials	032
3.1.1 基本概念	032	3.1.1 Basic concept on dynamic behaviors of materials	032
3.1.2 研究材料动态行为的重要意义	036	3.1.2 Significance to investigate the dynamic behavior of materials	036
3.2 应力波在金属中的传播速度	037	3.2 Propagating speed of stress wave in metals	037
3.2.1 爆炸复合过程中冲击波	037	3.2.1 Shock waves produced during explosive cladding	037
3.2.2 弹性波	037	3.2.2 Elastic wave	037
3.2.3 塑性波	038	3.2.3 Plastic wave	038
3.2.4 冲击波	039	3.2.4 Shock wave	039
参考文献	048	References	048
第 4 章 冲击波对材料的冶金作用	050	Chapter 4 Metallurgical effect of shock wave on materials	050
4.1 冲击引起的相变	050	4.1 Shock induced transformation	050
4.1.1 位移/无扩散相变	050	4.1.1 Displacement-/diffusionless-transformation	050
4.1.2 铁合金中的相变	053	4.1.2 Transformation of ferroalloy	053
4.1.3 304 不锈钢中的 $\gamma - \text{Fe}$ 向 α' 马氏体的转变	053	4.1.3 $\gamma - \text{Fe} \rightarrow \alpha'$ martensite in 304 stainless steel	053
4.1.4 钛合金中的相变	057	4.1.4 Phase transformation in titanium alloy	057
4.1.5 调幅分解	057	4.1.5 Spinodal decomposition	057
4.1.6 其他材料中的转变	061	4.1.6 Phase transformation in other materials	061

4.2	冲击波引起的显微组织及其对性能的影响	061	4.2	Shock induced microstructure and its effect on properties of materials	061
4.3	残余组织的形成机理	062	4.3	Mechanism of formation of residual microstructure	062
4.3.1	应力状态分析	062	4.3.1	Stress state analysis	062
4.3.2	位错的产生	064	4.3.2	Generation of dislocations	064
4.3.3	堆垛层错能和晶体结构对冲击亚结构的影响	066	4.3.3	Effect of SFE (Stacking fault energy) and crystal structures on shock substructure	066
4.4	位错产生机理模型	068	4.4	Model of mechanism of generation of dislocation	068
4.5	位错网络的形成	070	4.5	Formation of dislocation networks	070
4.6	点缺陷的形成	072	4.6	Generation of point defects	072
4.7	孪晶的形成机理及其影响因素	075	4.7	Mechanism of twin and its infuence factors	075
4.7.1	孪晶的形成机理	075	4.7.1	Mechinsm of twin formation	075
4.7.2	孪晶的影响因素	076	4.7.2	Infuence factors of twin	076
4.8	残余组织对力学性能的影响	082	4.8	Effect of residual structures on mechical propories	082
4.9	冲击波加载技术及其在材料研究中的应用	084	4.9	Shock loading and its application in material invetigation	084
参考文献		085	References		085

第5章	爆炸复合界面漩涡铸造组织	087	Chapter 5	Cast microstructure in the vortex of explosive cladding interface	087
5.1	金属爆炸复合界面漩涡的铸造组织	087	5.1	Cast microstructure in the vortex of explosive cladding interface	087
5.2	金属爆炸复合界面铸造组织缺陷	089	5.2	Cast defects in vortex of explosive cladding interface	089
5.2.1	气孔与裂纹	089	5.2.1	Blowhole and micro-cracks	089
5.2.2	金属碎块等夹杂物	091	5.2.2	Particles of broken metals and inclusions	091
5.2.3	漩涡中的空隙和疏松	091	5.2.3	Blowhole and micropolosity in vortex	091
5.2.4	其他缺陷	093	5.2.4	Other defects	093
5.2.5	漩涡内金属的流动性	093	5.2.5	Metal flowability in vortex	093
5.2.6	漩涡内相变	093	5.2.6	Transformation in vortex	093
5.3	界面漩涡区中的成分组成与分布	096	5.3	Chemical composition and element distribution in the vortex	096
5.4	金属爆炸复合界面的扩散现象	097	5.4	Diffusion phenomenon on the explosive clading interface	097
5.5	非晶态、纳米晶和微晶	098	5.5	Amorphous, nano-crystals and micro-crystals	098
5.5.1	非晶态	098	5.5.1	Amorphous	098
5.5.2	纳米晶	100	5.5.2	Nano-crystals	100
5.5.3	Al/钢界面上的纳米晶与非晶	101	5.5.3	Nano-crystals and Amorphous	101
5.5.4	纳米晶与微晶	101	5.5.4	Nano-crystals and micro-crystals	101
5.6	金属间化合物	101	5.6	Intermetal compounds	101
5.6.1	Al - Fe 金属间化合物	103	5.6.1	Al - Fe intermetal compounds	103
5.6.2	Al - Cu 金属间化合物	103	5.6.2	Al - Cu intermetal compounds	103

5.7	高温沉淀相	105	5.7	High temperature precipitates	105
5.8	漩涡周围的再结晶	106	5.8	Recrystallization around vortex	106
5.9	粉末压实的金相组织	106	5.9	Metallographic structures of powder press forming	106
5.9.1	冲击波压实的基本原理	107	5.9.1	Basic principle of powder press forming by shock wave	107
5.9.2	冲击波压实过程中的基本现象	107	5.9.2	Basic phenomenon forming by shock wave during powder press	107
5.9.3	冲击波压实样品的金相组织观察	109	5.9.3	Observation of metallographic structure of powder press forming by shock wave	109
参考文献		111	References		111
第6章 爆炸复合界面的变形组织			Chapter 6 Deformation structure on interface of explosive cladding		
6.1	金属材料的爆炸复合界面变形组织	114	6.1	Deformation structure on interface of metal explosive cladding	114
6.1.1	复合界面变形组织的一般规律	114	6.1.1	General role of deformation structure	114
6.1.2	中心非晶带	114	6.1.2	Amorphous band in the centre of interface	114
6.1.3	超细晶粒带	115	6.1.3	Ultrafine crystal band	115
6.1.4	流变变形带与热影响带	117	6.1.4	Plastic deformation band and heating band	117
6.1.5	冷变形带	123	6.1.5	Cold deformation band	123
6.1.6	界面组织分布的影响因素	123	6.1.6	Influence factors of distribution of deformation structure	123
6.1.7	位错在各部位的分布	125	6.1.7	Distribution of dislocation on interface	125
6.1.8	不同变形速率的组织	128	6.1.8	Microstructure of varied deformation rate	128
6.1.9	其他爆炸复合板的界面组织	131	6.1.9	Interfacial structure in other cladding	131
6.1.10	基体原始组织	136	6.1.10	Original microstructure of flyer plate and parent plate	136
6.2	爆炸复合界面上的再结晶	136	6.2	Recrystallization around interface of cladding	136
6.2.1	爆炸复合板的内应力	136	6.2.1	Residual internal stress of explosive cladding	136
6.2.2	再结晶的分类	139	6.2.2	Sorts of recrystallization	139
6.2.3	静态再结晶	139	6.2.3	Static recrystallization in the interface of explosive cladding	139
6.2.4	动态再结晶	144	6.2.4	Dynamic recrystallization in the interface of explosive cladding	144
6.3	热轧对界面组织的影响	146	6.3	Influences of rolling and heat treatment on interfacial microstructures	146
参考文献		147	References		147
第7章 绝热剪切带			Chapter 7 Adiabatic shear bands		
7.1	绝热剪切带特征	151	7.1	The characteristic of ASB	151
7.2	绝热剪切带的种类	151	7.2	Sorts of ASB	151

7.3 绝热剪切带的演化过程与形成机理	153	7.3 Evolution of ASB and mechanism of formation	153
7.4 剪切带的组织转变与硬度	155	7.4 Transformation and hardness in ASB	155
7.4.1 剪切带中的 α' 马氏体转变	155	7.4.1 α' martensite transformation in(ABS)	155
7.4.2 剪切带的硬度	156	7.4.2 Hardness of ASB	156
7.4.3 剪切带内的再结晶	157	7.4.3 Recrystallization in ASB	157
7.4.4 再结晶的晶粒转动机制	160	7.4.4 Crystal turning mechanism of Recrystallization	160
7.4.5 带内超高速率变形	162	7.4.5 Ultrahigh rate deformation in the ASB	162
7.4.6 带内位错结构	163	7.4.6 Dislocation structure in ASB	163
7.4.7 损伤和沿剪切带的断裂	164	7.4.7 Damage and fracture along ASB	164
7.4.8 爆炸复合界面上的断裂	167	7.4.8 Fracture on interface of explosive cladding	167
7.4.9 剪切带的空间分布与自组织	168	7.4.9 Space distribution and self-organization of ASB	168
7.4.10 带内的非晶相	170	7.4.10 Amorphous in ASB	170
7.4.11 剪切带内温度的估算方法	171	7.4.11 Evaluation of temperature in ASB	171
7.5 爆炸复合板界面上的绝热剪切带	172	7.5 ASB on interface of explosive bonding	172
7.6 绝热剪切带的影响因素	173	7.6 Influence factors of ASB	173
7.6.1 组织的影响	173	7.6.1 Microstructural factors	173
7.6.2 强化相颗粒尺寸的影响	174	7.6.2 Influence of particle size of reinforced phase	174
7.6.3 硬度的影响	175	7.6.3 Influence of hardness of materials	175
7.6.4 冲击速度的影响	176	7.6.4 Influence of impacting velocity	176
7.7 绝热剪切带的判据	176	7.7 Criterion for ASB	176
参考文献	179	References	179
第8章 爆炸复合界面断口金相学	181	Chapter 8 Fractography of explosive cladding interface	181
8.1 断口金相学简介	181	8.1 Introduction of fractography	181
8.2 爆炸焊界面组织的特殊性	182	8.2 Particularity of microstructures of explosive cladding interface	182
8.2.1 均质材料的断口金相学	182	8.2.1 Fractography of homogeneous materials	182
8.2.2 非均质材料的断口金相学	183	8.2.2 Fractography of explosive cladding interfaces (heterogeneous materials)	183
8.3 界面断口特征	183	8.3 Characteristic of interfacial fracture of explosive cladding interface	183
8.3.1 界面断口的断裂特征	184	8.3.1 Fracture characteristic of explosive cladding interface	184
8.3.2 界面过量的液体金属分布	185	8.3.2 Distribution of excessive liquid metal along the interface	185
8.3.3 工艺参数对界面断口特征的影响	188	8.3.3 Effect of technological parameters on characteristic of fractography of interface	188
8.4 界面夹杂物与金属化合物	188	8.4 Inclusions and intermetal compounds in the interface	188

8.5	界面漩涡中的气孔	190	8.5	Blowhole in vortex of interface	190
8.5.1	BFe30-1-1/低合金钢复合界面上的气孔与周围组织	190	8.5.1	Blowhole in BFe30-1-1/low alloying steel cladding interface and structure around vortex	190
8.5.2	321 不锈钢/铝复合板拉脱试验断口中的气孔	191	8.5.2	Blowhole on fracture surface of Ram tensile sample of Al / 321 stainless steel explosive cladding	191
8.5.3	气孔含量的定量分析	196	8.5.3	Quantitative analysis of Blowhole	196
8.6	气孔周围的结晶特征	196	8.6	Characteristic of crystalline around blowhole	196
8.7	气孔的形态与材料的关系	198	8.7	Relationship between the morphology of blowhole and materials	198
8.8	气孔表面上的斑马纹现象	201	8.8	"Zebra" pattern on the surface of blowhole	201
8.9	复合板宽度对气孔形态的影响	203	8.9	Effect of width of cladding plate on morphology of blowhole	203
8.10	韧性耗竭断口	205	8.10	Fracture of depleted toughness	205
8.11	不焊合	206	8.11	No-bonding between flyer plate and parent plate	206
8.12	纳米晶与相变特征	207	8.12	Nano crystal and transformation feature	207
8.13	复合板的疲劳断裂	207	8.13	Fatigue crack of explosive cladding plate	207
8.13.1	复合板疲劳概率的计算	207	8.13.1	Evaluation of fatigue probability of explosive cladding plate	207
8.13.2	复合板疲劳断口的基本特征	208	8.13.2	Basic Characteristic of fatigue fracture of explosive cladding plate	208
8.14	减少气孔的工艺措施	210	8.14	Technological measures for reducing of blowhole	210
	参考文献	211		References	211
第9章 爆炸焊活化区与波状界面的形成			Chapter 9 Characteristic of active zone and formation of wave-like interface		
9.1	高能活化区的定义	212	9.1	Definition of active zone	212
9.2	高能活化区的构成要素	212	9.2	Key elements for formation of active zone	212
9.2.1	炸药的爆轰	213	9.2.1	Detonation of explosive	213
9.2.2	冲击与冲击波	213	9.2.2	Shock pressure and shock wave	213
9.2.3	射流的形成与作用	215	9.2.3	Formation of jet and its functions	215
9.2.4	来流金属的形成与作用	217	9.2.4	Formation of coming-in metal flow and its functions	217
9.2.5	活化区内高压气体的作用	218	9.2.5	Role of HPAM in active zone	218
9.2.6	等离子体的形成	219	9.2.6	Formation of plasma flow	219
9.3	界面波纹的形成机理	219	9.3	Formation mechanism of wave-like interface	219
9.4	漩涡内高压气体(团)对结晶的影响	221	9.4	The effect of HPAM on crystallization in vortex	221
9.5	气孔内压力与温度的估算	224	9.5	Estimation of temperature and pressure in blowhole	224
9.5.1	气孔内压力的估算	224	9.5.1	Estimation of pressure in blowhole	224
9.5.2	气孔内的温度估算	225	9.5.2	Estimation of temperature in blowhole	225
9.6	高压气体对结晶过程的影响	226	9.6	The effect of HPAM on crystallization	226
9.6.1	普通金属焊缝凝固组织与控制因素	226	9.6.1	Solidified structure and controlling factors of ordinary welding	226
9.6.2	非旋转高压气孔对结晶的影响	228	9.6.2	Effect of no-rotating HPAM on crystallization	228
9.6.3	旋转高压气团对结晶的影响	230	9.6.3	Effect of rotating HPAM on crystallization	230
	参考文献	231		References	231

C 第1章 绪论

Chapter 1 Introduction

1.1 爆炸焊接发展的历史回顾

从人们观察到炸弹碎片能牢牢地粘接在被冲击金属靶板上的现象算起,到20世纪六七十年代发展成为一种先进的金属制品加工工艺,迄今大约经历了100年的探索时间,其中仅有最后50年,是爆炸焊接技术迅速发展的时期,使爆炸焊接成为制作金属制品的先进工具,并被世界各国的工业部门广泛采用。据报道,在第一次世界大战期间,有一位军械科学家首先观察到爆炸的碎片能粘接到被冲击的靶板上,但他没认识到这是一种焊接现象。到了第二次世界大战,美国工程师L. R. Carl于1944年发表了有关爆炸焊接的报告。在他完成了程序化的标准化爆炸评价试验之后,发现用于放置炸药的两个相接触的黄铜圆片在引爆之后被焊接在一起,并观察到界面有波状特征;与此同时,1944年—1947年苏联的科学家研究小组也观察到钢—铜爆炸复合界面上的波纹特征。今天,从大面积金属复合板制作,到电子学和通信工业等,都有这种技术的应用。最著名的爆炸焊接实例是“阿波罗”探月飞船上的钛—钢爆炸焊接接头。

在随后的数十年里,在世界许多国家特别是美国和苏联,有数以千计的有关爆炸焊接、金属爆炸复合(装甲)、爆炸成型和相关工艺等的研究与开发项目,并开展了大量的理论方面的研究工作,开发出许多新的爆炸加工技术,使该项技术日趋完善。1960年,美国杜邦公司首先发表了第一项专利,此后爆炸复合板的应用连续不断增长,据报道,1996年全世界共生产10000t爆炸复合板。迄今为止,爆炸加工技术在高能率加工领域占有越来越重要的地位。根据美国动态材料公司(DMC)2008年的统计,全球2007年装甲材料市场的估算约为14亿美元,其中爆炸复合板的产值约为5.5亿美元,用热轧和普通层间焊接等其他复合技术生产的复合板的产值约为8.5亿美元(图1-1)。爆炸复合板的产值约占总产值的1/3还高。这些复合板主要用于石油天然气、石油化工和化学工业、替代能源、水利冶金、发电系统、铝生产、造船工业和工业制冷等设备。

随着爆炸焊接理论方面的深入研究,科学家们发现,在爆炸过程中所产生的高能量(高温、高压和高变形率),以及所产生的冲击波会导致材料发生物理和化学性能方面的奇异变化,对新材料研究和新材料合成等具有重要意义,这一点将在后面的章节里予以专门讨论。

在现代工业科学实践中,爆炸加工技术应用在许多领域,概括地讲有如下几个方面:

(1) 金属加工技术:金属部件的爆炸成型,金属复合(装甲)板的制作,异种金属焊接,金属的切削或打孔,金属材料的硬化处理,消除焊接应力和雕刻等。