

金属爆炸复合技术 与 物理冶金

杨 扬 编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

金属爆炸复合技术与物理冶金

杨 扬 编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

金属爆炸复合技术与物理冶金/杨扬编著. —北京:
化学工业出版社, 2005. 9
ISBN 7-5025-7689-4

I. 金… II. 杨… III. ①金属-爆炸成型 ②物理
冶金学 IV. ①TG392 ②TG11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 113265 号

金属爆炸复合技术与物理冶金

杨 扬 编著

责任编辑: 丁尚林 陶艳玲

责任校对: 李 林

封面设计: 潘 虹

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷有限责任公司印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 8 1/2 字数 225 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7689-4

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

爆炸复合技术可以使绝大多数金属材料复合形成金属复合板/管材,拓展了原有金属材料的性能和应用范围;而且和其他材料连接技术相比,具有独到的工艺特点,爆炸复合技术在各工业领域得到了广泛应用。与发达国家相比,我国在该领域的生产能力和科研水平尚有差距,例如:双金属爆炸复合的力学问题已得到了较完整的发展,但复合参数的确定、实验尝试仍不可或缺;对与爆炸复合相关联的诸多物理冶金问题,普遍缺乏研究甚至存在错误的认识,这些严重制约了爆炸复合技术的工程应用与发展。我国现有的相关专业书籍已比较陈旧,很有必要补充最新的研究成果,在新的起点上对金属爆炸复合技术与物理冶金进行系统阐述。本书是在总结近几年来作者在该领域的研究工作、并参阅国内外相关书刊资料的基础上撰写而成的。

本书分为两部分:第一部分(即第1篇)系统地介绍了金属爆炸复合技术的基础理论、金属爆炸复合工艺参数设计原则、金属爆炸复合材料的制备工艺及其工程应用。第二部分(第2篇,第3篇)结合作者的研究工作着重阐释了爆炸复合所涉及的物理冶金问题。第2篇是金属爆炸复合材料的界面问题,如界面层的微观组织结构特征、界面冶金结合机理、界面扩散反应、界面微观断裂机制;第3篇是动态载荷(尤其是爆炸复合载荷)下的绝热剪切问题,如绝热剪切的本构行为、绝热剪切带内形变热/力参量演变的数值模拟及其微观结构的演化、绝热剪切带的分布规律。限于篇幅,动态载荷对金属组织结构和力学性能的影响等内容本书未予介绍。本书各篇(章)既相对独立,又相互联系,全书形成了一个既较为完整,又可适当取舍的体系。

本书既有较强的理论基础,又具有较强的工程实用性,可作为

材料科学与工程、力学、爆炸物理等专业研究生或高年级本科生的教材或参考书，也可供高等院校有关专业的教师、科研或工程单位的科学研究及工程技术人员参考，是一本有工程应用价值的参考书。

本书涉及较宽泛的学科领域，由于作者在理论和实践上的局限性，同时目前作者仍在继续相关的研究工作，因而本书难免存在不妥之处，恳请读者指正。

借此机会，感谢国家自然科学基金、教育部博士点基金等的资助。

作 者

2005 年 6 月

目 录

第 1 篇 金属爆炸复合技术

第 1 章 绪论	3
1.1 金属连接技术与爆炸复合	3
1.2 爆炸复合技术概述	8
1.2.1 爆炸复合的基本原理	8
1.2.2 爆炸复合技术的优缺点及其应用	9
1.3 国内外爆炸复合的发展及研究动态	13
1.3.1 爆炸复合技术的发展趋势	13
1.3.2 爆炸复合理论研究概况及发展动态	14
第 2 章 爆炸复合理论概述	16
2.1 爆炸复合(焊接)理论分析	16
2.2 金属板在爆轰作用下的飞行运动规律	17
2.2.1 半经验公式	17
2.2.2 一维抛体运动的公式	18
2.2.3 二维简化公式	20
2.3 高速飞行下复板碰撞和射流形成机理	23
2.3.1 不可压缩流体模型	23
2.3.2 可压缩流体模型	24
2.4 波的形成机理	26
2.4.1 复板流侵彻机理(刻入机理)	26
2.4.2 涡脱落机理	28
2.4.3 流体不稳定机理	30
2.4.4 应力波机理	31
第 3 章 金属爆炸复合工艺参数选取与爆炸复合窗口	33
3.1 理论概述	33

3.2 主要爆炸复合参数	33
3.2.1 初始复合参数	33
3.2.2 爆炸复合动态参数	39
3.2.3 爆炸复合结合区参数	41
3.3 爆炸复合参数之间的关系	41
3.3.1 复合参数之间的几何关系	41
3.3.2 初始复合参数和动态复合参数之间的关系	42
3.3.3 动态复合参数和结合区参数之间的关系	42
3.4 爆炸复合中边界(稀疏)效应的影响	43
3.4.1 边界效应的产生	43
3.4.2 边界效应的发展	44
3.4.3 影响边界不结合区大小的因素	45
3.4.4 边界效应的消除	45
3.5 爆炸复合参数的合理选择与爆炸复合窗口	46
3.5.1 爆炸复合参数的极限值	46
3.5.2 爆炸复合窗口	48
第4章 金属复合板、管的制备工艺	50
4.1 金属复合板的制备工艺	50
4.1.1 爆炸复合工艺流程	50
4.1.2 爆炸复合参数的选择	51
4.1.3 炸药密度和厚度的控制	51
4.1.4 复合材料待复合表面的处理	51
4.1.5 复板表面的保护	51
4.1.6 边界效应问题分析及防护措施	52
4.1.7 爆炸复合中残余应力影响	53
4.1.8 爆炸复合质量检测	55
4.2 金属复合管的爆炸复合工艺	59
4.2.1 金属复合管的主要制备工艺方法	59
4.2.2 金属管的爆炸复合	65
4.2.3 金属管在爆轰驱动下的运动规律	68
4.2.4 稀疏效应对复合管制备的影响	70

4.2.5 金属管的爆炸复合工艺	78
4.2.6 示例	82
参考文献	84

第2篇 金属爆炸复合材料的界面

第5章 爆炸复合界面结合层的微观组织结构	89
5.1 界面结合层内的微观组织结构	89
5.1.1 界面结合层内的微观组织结构特征	89
5.1.2 界面熔层内的纳米晶与非晶及形成机制	92
5.1.3 界面层附近两侧金属的微观组织结构	101
5.2 爆炸复合界面冶金结合机制	104
5.3 界面温度场模型	104
5.4 本章小结	108
参考文献	109
第6章 爆炸复合界面的扩散反应	111
6.1 界面扩散反应层内的微观组织结构	111
6.2 界面扩散反应层内的成分分布特征	116
6.3 界面扩散反应层内的相及其生长规律	119
6.4 本章小结	126
参考文献	127
第7章 爆炸复合界面微观断裂机制	128
7.1 界面微观断裂过程的动态观察	128
7.2 裂纹的稳态扩展	134
7.3 界面微观断裂机制	135
7.4 爆炸复合工艺参数、界面波形和复合质量	136
7.5 本章小结	138
参考文献	138

第3篇 爆炸复合动态载荷下的绝热剪切

第8章 概述	143
---------------------	-----

参考文献	148
第 9 章 绝热剪切的本构行为——热黏塑性本构失稳	150
9.1 Zener-Hollomon 热塑本构失稳	150
9.2 绝热剪切——热黏塑性本构失稳	151
9.2.1 基于表观均匀变形模型的热黏塑性本构失稳	153
9.2.2 基于非均匀(局部化)变形模型的热黏塑性本构失稳	155
9.2.3 计及损伤的率型本构关系	156
9.3 影响热黏塑性本构失稳形成绝热剪切带的因素	157
9.3.1 影响绝热剪切带形成的材料参量	157
9.3.2 加载条件(受力状态)对绝热剪切带形成的影响	164
参考文献	164
第 10 章 绝热剪切带内形变热/力学参量演变的数值模拟	167
10.1 热黏塑性本构模型的建立	169
10.1.1 实验方法及测定的真应力-真应变曲线	169
10.1.2 Johnson-Cook 本构模型及其待定参数的确定	170
10.1.3 热黏塑性本构模型	179
10.2 绝热剪切带内形变热/力学参量演变历史的数值模拟	181
10.2.1 热-力耦合刚(黏)塑性有限元基本理论	181
10.2.2 绝热剪切带内形变热/力学参量演变历史的数值模拟	184
10.3 本章结论	197
参考文献	198
第 11 章 绝热剪切带内的微观结构演化与大剪切应变	200
11.1 绝热剪切带内的微观结构特征	201
11.2 绝热剪切带内的微观组织特征	204
11.2.1 微观组织特征	204
11.2.2 晶界特征	205
11.3 绝热剪切带内微观结构演化机制	207
11.3.1 绝热剪切带内绝热温升的估算	207
11.3.2 绝热剪切带内微观结构演化机制	210

11.3.3 绝热剪切带内亚晶粒大小的计算	225
11.3.4 绝热剪切带内晶粒组织的热稳定性	227
11.4 绝热剪切带内大剪切应变-超塑变形	229
11.5 本章结论	232
参考文献	233
第 12 章 绝热剪切带的分布规律	236
12.1 绝热剪切带间距的理论模型	237
12.1.1 Grady 模型	237
12.1.2 Grady-Kipp 模型	238
12.1.3 Wright-Ockendon 模型	239
12.1.4 Molinari 模型	241
12.1.5 Meyers 模型	243
12.1.6 绝热剪切带间距理论模型的比较	245
12.2 绝热剪切带轨迹的研究	247
12.3 平板爆炸复合界面内绝热剪切带的分布规律	248
12.3.1 绝热剪切带的集体行为特征	249
12.3.2 绝热剪切带间距的理论计算值和实验观测结果的 比较	251
12.3.3 爆炸复合界面内绝热剪切带的间距模型	252
12.3.4 材料参量和爆炸复合参数对绝热剪切带间距的 影响	254
12.3.5 结论	256
12.4 结束语:问题与展望	256
参考文献	258

第 1 篇 金属爆炸复合技术

当代科学技术突飞猛进，一系列新兴的高技术产业相继崛起，对材料提出了更高、更为苛刻的要求，单一金属或合金在许多情况下很难满足工业领域对材料综合性能的要求；同时工业生产对稀贵金属的需求量也日益增长。因此，国内外材料科学工作者正致力于研究和开发新型的金属材料——金属爆炸复合材料。金属爆炸复合材料是现代科技发展的产物，它既是多学科成果的综合，又与其他学科互相渗透、互相推动，业已成为新技术革命的前沿和支柱。

爆炸复合（又称爆炸焊接）是两种被复合的金属在炸药的爆轰作用下实现高速斜碰撞，从而在极短的时间内（微秒量级）在碰撞点附近产生 $10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ 量级的应变速率， 10^4 GPa 量级的高压，并使附近材料温度急剧升高，其升温速率达 $10^8 \sim 10^9 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ （存在局部熔化），随之在两金属间形成射流，清除（剥离）两金属表层的氧化膜和污染物，使金属露出有活性的清洁表面，碰撞产生的压力足以使两金属在界面附近产生剧烈的局部塑性变形。在高温、高压和塑性变形的共同作用下，两金属界面形成由局部熔化和扩散实现的冶金结合。

爆炸复合是近 20 年发展起来的一门新技术，它可使绝大多数金属（合金）相互复合在一起形成一种兼有两种或多种金属（合金）性能的复合材料，从而大大扩展了现有金属（合金）的性能及应用范围，充分挖掘了材料潜力，并可节约稀贵金属。

本篇以爆炸复合参数的设计为主线，主要介绍爆炸复合中的爆轰理论、爆炸复合基本原理、爆炸复合工艺参数的选取和设计原则。

第1章 绪 论

1.1 金属连接技术与爆炸复合

随着工业现代化步伐的不断加快,航空/航天、舰船、电子/电力、兵器、核工业等军工领域及机械、冶金、石油、化工等工业部门所使用的大多数材料难免要在高温、强载荷、强侵蚀、电磁辐射、放射性等恶劣环境中长期工作。单独使用任何一种金属材料如高合金钢、有色金属及合金等,都不可能同时满足几方面的特殊要求。此外,如果整个设备仪器都采用稀贵金属或合金制造,不仅会使生产工艺复杂化,而且显著提高设备和仪器的造价。因此,金属连接/复合技术应运而生。

将几种分别满足不同要求、性能各异的金属材料复合/连接起来,焊接是最常见的方法之一。异种金属材料的焊接往往比同种材料的焊接要困难得多,这是由于金属材料的种类不同,其熔点、密度、导热率、线膨胀系数、晶格类型及参数等物理化学性能差别很大,对其焊接性有很大的影响。除了金属材料本身性能对其焊接性的影响外,两种焊接材料之间的性能差异,如化学性能和物理性能、力学性能的差异以及金属的表面状态等,都会在更大程度上影响它们之间的焊接性。

目前金属连(焊)接技术的主要特点及其与爆炸复合技术的比较如下。

(1) 熔化焊

在手工电弧焊、埋弧焊、熔化极和不熔化极气体保护焊中,均是利用电弧的热效应产生的热能来熔化焊条(或焊丝)及工件金属,使之形成金属熔池,凝固后形成焊缝,达到工件间的冶金连接。熔焊冶金过程按反应的阶段可分为液相冶金、凝固冶金和固相

冶金。

电弧焊熔池与一般炼钢的液相冶金不同，具有反应区温度高（弧柱温度达 $6000\sim 8000\text{K}$ ）、熔化金属气相熔渣的接触面积（比表面积）大、反应时间短等特点，因此加速了冶金反应，增加了合金元素的烧损和蒸发。在凝固冶金阶段，由于熔池体积相对较小，周围又被冷金属所包围，所以熔池的冷却速度很快，平均为 $4\sim 100^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而钢锭的冷却速度为 $(3\sim 150)\times 10^{-4}^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ，两者相差 10000 倍。熔合线上局部熔化的母材晶粒成为熔池的结晶核心，形成焊缝金属与母材金属长合在一起的“联生结晶”。随着熔池结晶，焊缝中会产生枝晶偏析和区域偏析，还有可能会产生夹杂、气孔和裂纹。另外，熔池是在运动状态下结晶的，易导致焊缝中出现层状结晶组织。在固相冶金阶段，在焊接热源的作用下，焊缝两侧金属发生组织、性能的变化，即存在热影响区，由于各处所经历的焊接热循环不同，因此组织和性能也不同，所以在热影响区内，组织和性能是不均匀的。

爆炸复合界面仅有少量金属熔化，只存在程度很小的热影响区。

（2）摩擦焊

利用工件相对旋转运动，相互摩擦所产生的热使端部达到热塑性状态，然后迅速顶锻实现金属焊接的压焊方法。

在旋转式摩擦焊加热过程中，由于相对旋转速度很高，同时又处于较大的轴向压力作用下，使凸凹不平互相压入的表面迅速产生塑性变形和机械挖掘、咬合现象，通过塑性变形，破坏了接合面的氧化膜和金属晶粒，形成了一个高速摩擦塑性变形层，也就是将机械功变成热能的发热层，即摩擦焊的热源。摩擦发热，金属的变形和扩散现象都集中在该变形层中，在摩擦扭矩和轴向压力作用下，该层从接合面挤出，形成飞边，剩余的变形区金属构成了焊缝金属。

在停车制动和顶锻焊接过程中，变形区和高温区金属得到锻造，金属质点互相嵌入并进一步扩散，建立了牢固的金属键，形成

了良好的焊接接头。在整个摩擦焊过程中，高速摩擦塑性变形层上的金属强度降低，塑性增大，使该层作为热源在接头形成中起到提供能量和活化连接表面的作用。

在爆炸复合的特定条件下，即碰撞点（驻点）附近具有的极大的速度梯度、极高的应变率（ $10^5 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ ）以及以微秒计的极短的作用时间均集中在狭窄的高压区内，导致瞬态的热能积累和温升，在界面上出现一层薄的熔化层，该熔化层激活了界面上的分子并使之发生结合。在爆炸复合中还有一种表面激活机制，即在基、复板高速倾斜碰撞过程中形成的再入射流，它有很强的“自清理作用”。爆炸复合中产生的再入射流是实现复合的必要条件。

可见，两者在连接过程中都存在着压力、温度和塑性变形。

(3) 扩散焊

在一定的温度和压力下使待焊表面相互接触，通过塑性变形或待焊面产生的微量液相而扩大待焊面的物理接触面积，然后经较长时间的原子互扩散而实现冶金结合的一种焊接方法。

实现扩散焊的先决条件是待焊表面紧密接触，因为只有当金属原子间的距离在 $(1 \sim 5) \times 10^{-8} \text{ cm}$ 以内时，引力才开始起作用。但实际上，即使经过精加工的表面，在微观上仍然是起伏不平的，如经精细磨削加工的金属表面，其轮廓算术平均偏差为 $(0.8 \sim 1.6) \times 10^{-4} \text{ cm}$ ，在零压力下接触时，其实际接触面积只占全部表面积的一百万分之一，在施加正常扩散压力时，实际紧密接触的面积也仅占全部表面积的 1% 左右。另外，金属表面的污染物、氧化膜和吸附气体层也会妨碍接触点上金属原子间形成金属键。因此，要实现扩散焊就必须解决待焊表面紧密接触这个问题。

在温度和压力的作用下，粗糙表面的微观凸起部位首先接触和变形，挤碎氧化膜等，然后被挤平并达到紧密接触的程度而形成交界面，再通过界面的原子扩散和再结晶使晶界迁移并消除微孔，使原子扩散向纵深发展，出现所谓“体扩散”，最终，金属原始界面完全消失，形成完整的焊缝，达到冶金连接。

按照扩散焊的机理和模型，爆炸复合完全具备扩散焊的条件。

事实上，在以钢为基板、不锈钢为复板的复合界面的钢一侧普遍发现脱碳现象，而另一侧的不锈钢则相应产生增碳现象，结果造成结构钢中珠光体数量减少，铁素体数量增多，这是典型的碳原子扩散现象。

(4) 压力焊

包括冷轧、挤压、拉拔等冷加工都是使金属在压力作用下变形延伸，金属接触界面氧化膜和污层的破坏，新鲜金属接触并在压力作用下结合。该类工艺方法基本上均是采用固相复合法：即通过塑性变形使两金属在结合界面上形成结合点，再经扩散热处理，最终形成界面的冶金结合。热轧、挤压、拉拔等则是在压力和温度共同作用下实现冶金结合。

目前金属复合棒、管、线材的制备方法主要有如下几种。

(1) 浇铸包复法：如将熔化的铜浇铸在红热的钢棒上，冷凝后热轧，冷拉成线，但该法制备的线材钢芯不圆，铜层不均。

(2) 热浸涂法和电镀法：其结合不牢，涂（镀）层疏松且脆，涂（镀）层厚度不均匀。

(3) 轧制压接法：如将经过清洗并加热的两条铜带包覆铝芯线，利用轧辊施加的压力将铜带与铝芯线压接在一起，然后将铜带接缝的两个凸耳切除形成线坯，再拉拔-热处理。该方法具有产品质量好、生产效率高及环保问题少等优点，但工艺复杂，工序多，需系列设备。

(4) 包复焊接法（包套拉拔）：如将经过清洗的铜带逐步形成圆管状，包复在清洗过的铝芯线周围。采用氩弧焊将铜管的纵缝焊接形成线坯。然后拉拔-热处理。是目前国内主要的生产方法。需系列设备。

拉拔道次加工率不大（过大的道次加工率将导致尺寸、形状不合格，甚至拉断），对坯料的清洁度要求很高，由于两种金属（复材和芯材）的力学性能的差异，很容易导致在小加工率拉拔过程中（由于变形不均匀）产生界面局部开裂、复层和芯材的断裂等，导致复合线（丝）材成品率低，复层厚度不均匀，性能不稳定。

(5) (静液) 挤压法: 如将紫铜管坯和纯铝棒坯装配成的复合坯料经静液挤压获得线坯, 利用高静水压力和特有的大加工变形量作用实现铜、铝之间的冶金结合。(静液) 挤压的挤压比大, 但坯锭装配时铜管、铝锭锥部因加工精度问题无法压装到位, 同时铜/铝的力学性能差距较大, 变形速度相对加快, 必须在变形初始铜/铝就应保证充分靠合, 否则挤压初始铜/铝结合不良, 在后续快速延伸阶段很容易分层流动导致挤压失败。此外, 铜管、铝锭的压装间隙也是挤压中结合好坏的关键, 缝隙过小, 压装不易; 缝隙过大, 挤压中铜管首先受压空缩, 达到与铝芯接触时铜管内壁往往已出现一定程度皱折, 大变形过程中这些皱折是铜、铝分层或铜层起裂的根源。为此工艺设计必须保证铜管、铝锭具备合适的套装间隙和接触面之间高度的清洁性。可见, 具有工序多、工艺控制复杂、铜层厚度难以控制等不足。

(6) 填芯连铸复合连续铸造法: 如在连续铸造外层金属坯壳的同时充填芯部金属, 形成外层金属材料铜的管状坯壳, 在坯壳温度降低到一定程度时充填芯部金属液, 通过两种金属间的相互扩散反应将两种金属材料结合为一体, 实现复合, 该工艺克服了离心铸造、浸渍以及其他包复工艺中芯材或包复层预处理过程复杂、界面质量不稳定等缺陷。但在工艺控制方面还需做进一步的研究。

上述工艺方法基本上均是采用固相复合法, 即通过塑性变形使两金属在结合界面上形成结合点, 再经扩散热处理, 最终形成界面的冶金结合。该工艺路线存在的主要问题是: 由于长时间处于高温下, 异种金属间易形成脆硬的金属间化合物, 结合强度会大幅降低。此外, 要求第一道次的加工率大, 由于此时两金属不是一个整体以及两金属力学性能的差异, 并直接与高温空气接触, 便会造成分层流动导致复合失败以及外层金属管形变后厚度不均匀和表面发生氧化。

爆炸复合 (又称爆炸焊接) 是两种被复合的金属在炸药的爆轰作用下实现高速斜碰撞, 从而在极短的时间内 (微秒量级) 在碰撞点附近产生高压、高温 (存在局部熔化), 随之在两金属间形成射