



火炸药技术系列专著



炸药爆炸能量 转换原理及应用

Principle and Applications of Explosive Energy Transformation

周霖 张向荣 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

火炸药技术系列专著

炸药爆炸能量转换 原理及应用

Principle and Applications of
Explosive Energy Transformation



周 霖 张向荣 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

炸药爆炸能量转换原理及应用/周霖,张向荣编著. —北京:国防工业出版社,2015.1

ISBN 978-7-118-09875-4

I. ①炸... II. ①周... ②张... III. ①炸药—爆炸—能量转换—研究 IV. ①TQ560.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 308939 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

※

开本 710×1000 1/16 印张 19¼ 字数 349 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

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选出版。

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 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

序

火炸药包括枪炮发射药、推进剂和炸药,是陆、海、空、二炮武器装备实现“远程打击、高效毁伤”的动力能源、威力能源,是武器装备的重要组成部分,是大幅度提高武器装备作战效能最直接、最根本的源泉所在。武器装备的需求,有力促进了火炸药技术的发展;而火炸药的创新发展,又推动了武器装备的更新换代,甚至促使战争模式发生革命性变化。瑞典国防研究院一位专家曾说过:在现有基础上,使武器弹药的威力提高3倍以上时,武器装备的品种和战争模式将发生革命性变化,届时,战场上的毁伤与防护将出现不对称,占有技术和装备优势的一方,将完全占据战争的主动权。

我国火炸药行业经过几十年奋斗,从仿制走向自行研制,至今已形成一定规模的火炸药科研生产体系,为国防科技和武器装备发展做出了重要贡献。近十年来,在总装备部和国防科工局亲切关怀和领导下,火炸药行业技术进步取得令人瞩目的成绩,获得了大量创新性科研成果。

在国防工业出版社的大力支持下,我们开展《火炸药技术系列专著》的编著,目的是反映近十年来火炸药行业构建自主创新平台,加强与前沿技术交叉融合,努力提高自主创新能力等取得的丰硕成果。系列专著将充分展示这些成果的科学技术水平,体现火炸药及相关学科扎实的理论、新颖的学术思想和显著的技术创新。火炸药技术系列专著的出版,将为加强科学发展观的实践,为国防科技和武器装备发展,为科技人才培养做出贡献。

《火炸药技术系列专著》包括以下内容:

1. 先进火炸药设计与制备的理论和实践;
2. 火炸药装药设计与工艺理论及应用技术;
3. 火炸药用新型含能材料与功能材料技术;
4. 火炸药绿色制造与数字化工艺技术;
5. 新概念火炸药技术;
6. 火炸药燃烧爆炸基础理论与基础技术;

7. 火炸药性能测试与评估技术;
8. 废弃火炸药的处理与再利用技术。

上述内容,将充分反映著作者近年来在相关领域的最新科研成果,突出先进性和创新性;同时针对性地参考和引用国内外相关研究领域的最新科研动态,特别注重与相关化学、物理学、弹道学、材料力学、测试学、空气动力学、生物学、光学等学科的交叉融合,系统地、全面地描述当今火炸药科学与技术发展的最新研究成果,预测未来新军事变革和信息化战争对火炸药技术的需求、火炸药技术的发展趋势和应用前景。这些专著是火炸药专业人员和相关专业科技人员、管理人员的重要参考书和必备的火炸药学术著作。

总装备部火炸药技术专业组
2010年3月

前 言

炸药是一种常见的高效优质的化学能源,在炸药爆炸瞬间,内部所含有的化学能可在微秒量级时间内释放出来,形成很高的能量,能量释放功率可达 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ W}$ 的量级。它在瞬时形成的高压高温气体骤然膨胀,可在环境介质中造成强烈压缩而形成高压高温状态,或使周围物体发生剧烈变形、破坏,或将邻近的物体(尤其是板、片)抛射至很高的速度。由于炸药爆轰过程是以爆轰波的形式传播和扩展的,因而可以利用爆轰波传播形状的控制技术,造成许多特殊的爆炸效应,如楔形装药的聚能效应、定向抛射驱动以及定向冲击增压效应、多波撞击与会聚效应等。这就为炸药爆炸能量的科学转换与合理利用提供了广阔的开拓空间。

众所周知,炸药爆炸能量在军事武器技术上的应用是极为广阔和毋庸置疑的。各种雷、弹技术,小如手榴弹和地雷之类的爆破器材,大到各种海陆空军用导弹战斗部,乃至核弹武器等功效的发挥都源于炸药的爆轰过程及爆炸能量转化的科学设计与控制。

爆炸能量转换另一种最为重要的应用是在工程爆破领域,如开山劈石、河道疏浚、地质探矿与矿业开采、定向爆破筑坝,以及各种废旧建筑物的控制爆破拆除等。

炸药爆炸能量转换更为精密和科学的利用则是近半个世纪以来逐渐开拓发展起来的。如各种金属材料的爆炸加工、成型与切割,不同金属构件之间的爆炸焊接与板件的大面积爆炸复合,粉末固体的爆炸压实与烧结,利用冲击相变原理制造金刚石及其他超硬材料,利用爆炸造成的高温高压状态实现特殊性能新材料的化学合成,利用爆炸驱动效应实现宇宙速度量级的超高速,并进而实现对物质的超高压压缩,以及利用爆炸控制技术形成百万安培的脉冲大电流,并进而实现百万高斯强磁场及强磁流压缩等。甚至在艺术品领域,如大(小)型艺术品的雕刻与压纹等,爆炸能量转换技术也能发挥奇特的效用。

鉴于前面两大领域已有许多种专门论述和介绍的书籍出版,本书将侧重在前面所述的第三领域。虽然在本书所编写的内容中有一部分已有若干专著出版,但作为一本较为系统地阐述和介绍炸药爆炸能量转换原理及其在科学研究

和民用技术开发应用方面的书,它的编写和出版对社会有关学界及相关的技术应用开拓是有益的。

本书前两章将介绍炸药的通性、炸药爆能及做功能力的评估原理与方法;第3章则阐述炸药爆轰波的传播特性及爆轰参数的计算方法,以作为后续几章有关爆能转换技术应用内容的理论铺垫。在第4章将侧重阐述利用爆炸效应加速飞片和粒子达到高速或超高速的技术及原理,以及进而造成高压状态的原理及其应用;第5章和第6章着重介绍爆炸能量实施对金属和固体的加工、成型、焊接与大面积复合,以及压实烧结等方面的技术及其原理等;第7章则介绍利用爆炸与冲击作用实现物质相变的基本理论以及利用爆炸合成新材料,特别是爆炸合成超硬材料的相关技术;第8章将较系统而简要地阐述利用爆炸能量转换技术造成的超强磁场和兆安培脉冲大电流的爆炸磁压缩发生器的原理与技术,并展望这一技术的应用前景。

本书第2、4、7章由周霖编写,张向荣编写了第1、8章,周霖、张向荣共同编写了第3、5、6章,周霖完成了全书的统稿工作。由于水平所限,错误在所难免,敬请读者批评指正。

2014年10月

作者于北京理工大学

目 录

第 1 章 炸药及其通性	1
1.1 炸药及其化学变化的形式	1
1.2 炸药爆炸的基本特征	3
1.3 简论爆炸科学技术发展与应用	5
第 2 章 炸药能量的热化学评估	8
2.1 引言	8
2.2 燃烧与爆炸化学热力学基础	8
2.2.1 浓度、化学计量关系	9
2.2.2 状态函数及热力学关系	11
2.2.3 状态方程	20
2.2.4 燃烧与爆炸产物化学平衡	24
2.2.5 燃烧与爆炸产物组成、热力学性质的计算	28
2.3 炸药爆炸的热效应	42
2.3.1 炸药爆热评估	42
2.3.2 爆热的实验测量	45
2.3.3 炸药的爆温	70
第 3 章 炸药爆轰动力学简论	74
3.1 稳定爆轰波的 C-J 假说	75
3.1.1 爆轰波稳定传播的条件——C-J 条件	77
3.1.2 凝聚炸药爆轰参数的近似计算	81
3.2 爆轰波的 Z-N-D 模型及波区内的参数分布	85
3.2.1 爆轰波的 Z-N-D 模型	85
3.2.2 爆轰波反应区流动的定常解	86
3.2.3 凝聚炸药爆轰反应的结构	93

3.3	爆轰波参数的工程计算及实验测量	95
3.3.1	爆速及爆轰压强工程计算方法	95
3.3.2	凝聚炸药爆速的实验测定	105
3.3.3	爆轰波 C-J 压力的实验测量	109
3.4	炸药爆炸产物对介质的直接作用	122
3.4.1	爆轰产物的平面一维膨胀运动	122
3.4.2	有限长度药柱爆轰产物的一维流动	126
3.4.3	爆轰产物对刚壁面的作用冲量	130
3.5	爆炸对可压缩固体的作用	136
3.5.1	爆炸初始冲击波压力的计算	136
3.5.2	高速碰撞压力的计算	147
3.5.3	分界面运动规律及爆炸比冲量的近似解	151
第 4 章	利用爆炸获得超高速	157
4.1	炸药对刚性活塞的一维抛射	158
4.2	可获得宇宙速度的炸药炮技术及其驱动理论	161
4.3	气炮加载条件下炸药强爆轰驱动技术	171
第 5 章	金属的爆炸加工与成型	176
5.1	水中爆炸成型理论及应用	177
5.1.1	水中爆炸现象及冲击参数的评估	177
5.1.2	爆炸成型机理和郑氏爆炸成型理论	182
5.1.3	郑氏爆炸成型模型律	184
5.1.4	爆炸成型的若干事例	188
5.2	爆炸对金属的切割	190
5.2.1	爆炸切割装药参数及切割厚度的确定	192
5.2.2	爆炸切割技术概述	197
5.3	爆炸压纹、雕刻及其他	199
第 6 章	爆炸焊接(复合)、压实与烧结	200
6.1	平板的爆炸复合焊接	200
6.1.1	平面复合焊接的构形及设置	201
6.1.2	爆炸焊接机理概述	203
6.1.3	爆炸焊接参数及确定方法	203

6.1.4	爆炸焊接的其他应用	213
6.2	粉末的爆炸压实与烧结	220
6.2.1	爆炸压实与烧结方法	221
6.2.2	爆炸压实与烧结机理	224
第7章	固体的冲击相变与新材料的爆炸合成	232
7.1	固体的冲击相变	232
7.2	利用冲击波测量研究冲击相变现象	233
7.3	冲击相变实验现象	237
7.3.1	强冲击下铁的 $\alpha - \varepsilon$ 相变	237
7.3.2	硫化镉(CdS)的冲击相变	240
7.3.3	铋(Bi)的冲击相变	241
7.4	超硬材料的冲击合成	242
7.4.1	石墨-金刚石的冲击相变	242
7.4.2	超硬氮化硼的冲击合成	244
7.5	爆炸合成型状记忆合金	244
7.6	陶瓷材料的冲击相变和超导材料的合成	247
7.6.1	一般陶瓷的冲击相变	247
7.6.2	高临界温度(T_c)超导材料的冲击合成	249
7.7	冲击波作用下的新材料的化学合成	250
第8章	爆炸形成脉冲大电流及强磁场	252
8.1	百万安培脉冲大电流发生装置	253
8.1.1	磁通量压缩发生器原理及理论	255
8.1.2	系统杂散电感的估算理论	258
8.1.3	大电流发生器的设计	264
8.2	脉冲超强磁场发生器	275
参考文献		281

Contents

Chapter 1	Explosives and their general characteristics	1
1.1	Explosives and the forms of chemical change	1
1.2	Basic characteristics of explosion	3
1.3	Introduction to the technical development and application of explosive science	5
Chapter 2	Thermochemical estimation of explosive energy	8
2.1	Introduction	8
2.2	Thermochemical basis for combustion and explosion	8
2.2.1	Relations for concentration and stoichiometry	9
2.2.2	State functions and thermodynamics	11
2.2.3	Equation of state	20
2.2.4	Chemical equilibrium for combustion and explosion	24
2.2.5	Thermodynamic calculation for combustion and explosion products	28
2.3	Thermal effects of explosion	42
2.3.1	Estimation for the heat of detonation	42
2.3.2	Measurement of the heat of detonation	45
2.3.3	Temperature of detonation	70
Chapter 3	Introduction to dynamics of detonation	74
3.1	Chapman – Jouguet theory	75
3.1.1	Condition for a steady detonation—C – J assumption	77
3.1.2	Approximate calculation for the detonation parameters of condensed explosives	81
3.2	Z – N – D model for the propagation of the detonation wave and	

the parameter distribution inside the detonation wave	85
3.2.1 Z – N – D model for the detonation wave	85
3.2.2 Steady solution for the flow in the reaction zone of detonation	86
3.2.3 Structure for the reaction zone of detonation of condensed explosives	93
3.3 Engineering calculation and measurements for the detonation parameters	95
3.3.1 Methods of engineering calculation for detonation velocity and detonation pressure	95
3.3.2 Experimental measurement of detonation velocity for the condensed explosives	105
3.3.3 Experimental measurement of detonation pressure (C – J pressure)	109
3.4 Direct action on medium by detonation products	122
3.4.1 One – dimensional planar expansion flow of detonation products	122
3.4.2 One – dimensional flow of the detonation products for limited length of charge column	126
3.4.3 Impulse to a rigid wall by the detonation products	130
3.5 Explosion effects on compressible solids	136
3.5.1 Calculation of the initial shock pressure from explosion	136
3.5.2 Calculation of the pressure by high velocity impacts	147
3.5.3 Interface motion law and approximate solution for specific impulse of explosion	151
Chapter 4 Obtaining hypervelocity by explosion	157
4.1 One – dimensional motion of a rigid piston under detonation loading	158
4.2 Technology and theory of explosive charge driven gun with attainable cosmic velocity	161
4.3 Strong detonation driven technology of explosives under gas gun loading	171

Chapter 5	Explosive processing and forming of metals	176
5.1	Theory and application of explosive forming under water	177
5.1.1	Phenomena of underwater explosion and estimation of the shock wave parameters	177
5.1.2	Principle of explosive forming and Professor Zhen's explosive forming theory	182
5.1.3	Scaling law of Professor Zhen's explosive forming	184
5.1.4	Some examples of explosive forming	188
5.2	Explosion cutting of metals	190
5.2.1	Determination of charge parameters and cutting thickness of explosion cutting	192
5.2.2	Overview of explosion cutting technology	197
5.3	Explosion embossing, sculpture and others	199
Chapter 6	Explosive welding (recombination) , compaction and sintering	200
6.1	Explosive welding of plates	200
6.1.1	Configuration and setting of planar explosive welding	201
6.1.2	Overview of the principle of explosive welding	203
6.1.3	Methods for determination of the parameters of explosive welding	203
6.1.4	Other applications of explosive welding	213
6.2	Explosive compaction and sintering of powder	220
6.2.1	Methods for explosive compaction and sintering	221
6.2.2	Principle of explosive compaction and sintering	224
Chapter 7	Shock – induced phase change of solids and explosive synthesis of new materials	232
7.1	Shock – induced phase change of solids	232
7.2	Research on shock – induced phase change phenomena using shock wave measurements	233
7.3	Experimental phenomena of shock – induced phase change	237
7.3.1	Shock – induced of $(\alpha - \varepsilon)$ phase change of iron	237

7.3.2	Shock – induced phase change of cadmium sulfide (CdS)	240
7.3.3	Shock – induced phase change of bismuth (Bi)	241
7.4	Shock synthesis of ultrahard materials	242
7.4.1	Shock – induced phase change of graphite – diamond	242
7.4.2	Shock synthesis of ultrahard boron nitride	244
7.5	Explosive synthesis of shape memory alloy	244
7.6	Shock – induced phase change of ceramic materials and the synthesis of superconducting materials	247
7.6.1	Shock – induce phase change of general ceramics	247
7.6.2	Shock synthesis of superconducting materials under high critical temperature (T_c)	249
7.7	Chemical synthesis of new materials by shock waves	250
Chapter 8	Pulse high current and strong magnetic field caused by explosion	252
8.1	Generation device of pulse high current with megampere	253
8.1.1	Principle and theory of Magnetocumulative Generators	255
8.1.2	Estimation theory of stray inductance	258
8.1.3	Design of strong current generator	264
8.2	Pulse ultrastrong magnetic field generator	275
References		281