

BAOZHA LIXUE
ZAI HANGKONG TANSHE

JIUSHENG XITONG ZHONG DE YINGYONG

爆炸力学 在航空弹射救生系统 中的应用

赵隆茂 李志强 编著



兵器工业出版社

爆炸力学在航空弹射 救生系统中的应用

赵隆茂 李志强 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

该书简要介绍了爆炸力学的基础理论知识,主要包括炸药的基本特征、爆轰波流体动力学理论、凝聚炸药爆轰产物状态方程和爆轰参数以及爆炸冲击波初始参数计算。重点介绍了作者近几年来应用爆炸力学、应力波基础和人机工程学等多门学科在航空弹射救生系统中所做的工作,主要包括微爆索爆炸切割航空有机玻璃的实验研究、理论分析和数值模拟及人/椅系统穿盖过程中人体冲击损伤的评估分析。

该书适合于从事爆炸切割、航空救生工作的研究人员参考,也可供热爱结构非线性动力响应数值分析的高年级本科生和研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

爆炸力学在航空弹射救生系统中的应用/赵隆茂,李志强编著. —北京:兵器工业出版社, 2009.5

ISBN 978-7-80248-348-4

I. 爆… II. ①赵…②李… III. 爆炸力学-应用-航空器-弹射救生装置 IV. V445

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 067921 号

出版发行:兵器工业出版社

发行电话:010-68962596, 68962591

邮 编:100089

社 址:北京市海淀区车道沟10号

经 销:各地新华书店

印 刷:北京蓝海印刷有限公司

版 次:2009年6月第1版第1次印刷

责任编辑:赵成森

封面设计:李尘工作室

责任校对:郭 芳

责任印制:赵春云

开 本:880×1230 1/32

印 张:6.75

字 数:260千字

定 价:25.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

炸药作为一种含能物质，具有许多独特的特性，特别是在起爆时可发生高速化学反应，释放出大量的热能，并伴随着产生高温、高压气体等。目前，无论在军工还是在国民经济的各个领域，炸药均得到了广泛的应用。在军事上，炸药被用来装填各种炮弹、火箭弹、导弹战斗部和核武器的起爆系统，以及其他特种军事目的。在民用工程领域，炸药越来越广泛地用于冶金、采矿、石油开采和各种工程爆破技术。另外，炸药还用于爆炸成型、爆炸焊接、爆炸切割等高新技术领域。

随着航空事业的快速发展，炸药也开始用于战斗机弹射救生系统爆炸切割座舱盖等方面，这种弹射方式称为微爆索预破碎座舱盖透明件。由于在弹射过程中，引爆微爆索炸药爆轰产生的爆炸冲击波削弱了座舱盖强度，弹射座椅穿透座舱盖更加容易，和抛放座舱盖弹射相比，具有无延时、对飞行人员生理损伤小等特点。这种弹射方式涉及炸药的爆轰波，爆轰波对介质的作用以及人椅系统与座舱盖之间的动态冲击问题。因此，掌握爆炸冲击动力学理论是研究微爆索弹射救生系统的必要基础。

本书共分6章。第1~4章主要介绍了炸药的基本特征、爆轰波流体动力学理论、凝聚炸药爆轰产物状态方程和爆轰参数以及爆炸冲击波初始参数计算。第5~6章是作者近

几年综合运用前4章介绍的理论和人机工程学对微爆索弹射救生系统爆炸力学问题的研究工作,主要包括:微爆索爆炸切割航空有机玻璃平板实验、数值模拟和理论分析;微爆索爆炸切割座舱盖真实件的数值模拟,人/椅系统穿盖弹射过程的计算机仿真。全书由赵隆茂统稿,第1章、第3章及第5章5.1节、5.2节、5.3节由赵隆茂负责编写,第2章、第4章、第5章5.4节、第6章由李志强负责编写。

本书在编写过程中,第一航空集团成飞技术中心的刘晓明高工、戴干常高工在实验方面给予了很大的支持,在此谨一并致谢!

感谢国家基金(90716005)的资助。

由于作者初涉该研究领域,书中难免有错误和不足之处,敬请读者批评指正。

作者

2009年于太原理工大学

目 录

第 1 章 炸药与爆炸基础	1
1.1 爆炸现象及其特征	1
1.1.1 物理爆炸	1
1.1.2 化学爆炸	2
1.1.3 核爆炸	2
1.2 炸药爆炸及其特征	4
1.2.1 反应过程的放热性	4
1.2.2 反应的快速性	5
1.2.3 生成大量的气体	6
1.3 炸药化学变化的形式	8
1.4 炸药的分类	10
1.4.1 按用途分类	10
1.4.2 按组成分类	12
1.5 炸药的爆炸性能	14
1.5.1 炸药爆炸反应方程式	15
1.5.2 炸药的爆热	16
1.5.3 炸药的爆温	17
1.5.4 炸药的爆容	17
1.5.5 炸药的威力和猛度	17
1.6 炸药的感度	21

1.6.1	炸药的热感度	21
1.6.2	炸药的机械感度	24
1.6.3	炸药的冲击波感度	28
1.6.4	影响炸药感度的因素	29
第2章	爆轰波的流体动力学理论	34
2.1	概述	34
2.2	波的基本概念	35
2.2.1	波	35
2.2.2	压缩波与稀疏波	36
2.3	爆轰波的基本关系式	38
2.3.1	基于 C-J 理论	38
2.3.2	基于 Z-N-D 模型	43
2.4	爆轰波的性质	46
第3章	凝聚炸药爆轰产物状态方程和爆轰参数	59
3.1	凝聚炸药爆轰反应机理	59
3.2	爆轰产物状态方程	62
3.2.1	理想气体状态方程	63
3.2.2	真实气体状态方程	63
3.2.3	固体模型状态方程	64
3.2.4	液态模型状态方程	65
3.2.5	仅考虑分子排斥作用的凝聚体状态方程	67
3.2.6	JWL 状态方程	68
3.2.7	BKW 状态方程	68
3.2.8	VLW 状态方程	70
3.3	爆轰参数近似理论计算	71
3.4	装药对爆轰传播的影响	74

3.4.1 装药直径对爆轰传播的影响	74
3.4.2 装药密度与爆轰参数的关系	79
第4章 爆炸冲击波初始参数	81
4.1 反射波的判定	81
4.2 爆轰波垂直入射时介质中冲击波的初始参数 ...	84
4.2.1 爆轰产物中反射冲击波的情况	84
4.2.2 爆轰产物中反射膨胀波的情况	87
4.3 某些介质中爆炸冲击波和初始参数计算	90
第5章 微爆索爆炸切割航空有机玻璃	92
5.1 绪论	92
5.1.1 清除弹射通道的基本途径	94
5.1.2 爆炸切割国内外研究概况	98
5.2 微爆索线型爆炸切割 PMMA 平板实验	101
5.2.1 微爆索	101
5.2.2 有机玻璃	103
5.2.3 实验部分	104
5.2.4 小结和讨论	113
5.3 微爆索线型切割航空有机玻璃平板的理论分析 ...	114
5.3.1 层裂切割基本原理	114
5.3.2 接触爆炸载荷	116
5.3.3 微爆索作用在 PMMA 板上的接触爆炸载荷 ...	119
5.3.4 PMMA 板层裂切割深度计算	122
5.3.5 小结	130
5.4 微爆索线型切割航空有机玻璃板和座舱盖的 数值分析	130
5.4.1 有限变形动力学基本方程与 数值计算方法	131

5.4.2	有限变形动力学有限元求解中的 一些问题	138
5.4.3	材料非线性理论及其数值计算方法	141
5.4.4	PMMA 板材的数值分析	146
5.4.5	舱盖透明件的数值分析	164
第 6 章	人/椅救生系统穿盖弹射过程的计算机仿真	171
6.1	弹射救生技术的现状与发展	171
6.1.1	弹射座椅的发展历程 ^[74]	172
6.1.2	我国弹射救生技术的研究现状	176
6.1.3	弹射救生系统计算机仿真技术的研究现状 ...	176
6.2	假人模型	179
6.2.1	实验用假人	179
6.2.2	假人有限元模型	181
6.3	穿盖弹射过程的数值模拟	186
6.3.1	有限元模型的建立	186
6.3.2	初边值条件	191
6.4	模拟结果及讨论	191
6.4.1	破坏模式	191
6.4.2	人体头部惯性力	196
6.4.3	人体动力响应指数 DRI	197
6.5	小结和讨论	200
参考文献		202

第1章 炸药与爆炸基础

1.1 爆炸现象及其特征

在自然界中存在着各种爆炸现象。广义地讲，爆炸是物质系统的一种极为迅速的物理或化学能量释放或转化过程，是系统蕴藏或瞬间形成的大量能量在有限的体积和极短的时间内，骤然释放或转化的现象。在这种释放或转化过程中，系统的能量将转化为机械功以及光和热的辐射等。

爆炸可以由各种不同的原因引起，但不管是何种原因引起的爆炸，归根结底必须有一定的能源。爆炸可以分为三类，即物理爆炸、化学爆炸和核爆炸。

1.1.1 物理爆炸

物理爆炸是由系统释放物理能引起的爆炸。例如，高压蒸汽锅炉，当过热蒸汽压力超过锅炉能承受的程度时，锅炉破裂，高压蒸汽骤然释放出来，形成爆炸；陨石落地，高速弹丸对目标的撞击等物体高速碰撞时，物体高速运动产生的动能，在碰撞点的局域内迅速转化为热能，使受碰撞部位的压力和温度急剧升高，并在碰撞部位材料发生急剧变形，伴随巨大响声，形成爆炸现象；自然界中的雷电也属于物理爆炸，它是由带有不同电荷的云块间发生强烈

的放电现象,使能量在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ s 内释放出来,放电区达到极大的能量密度和高温,导致放电区空气温度急剧升高并迅速碰撞,对周围空气产生强烈扰动,从而形成闪电雷鸣般的爆炸现象;高压流通过细金属丝时,温度可达到 2×10^4 °C,使金属丝瞬间化为气体而引起爆炸现象;此外,地震和火山爆发等现象也属于物理爆炸。总之,物理爆炸是机械能或电能的释放和转化过程,参与爆炸的物质只发生物理状态或压力的变化,其性质和化学成分不发生改变。

1.1.2 化学爆炸

化学爆炸是由于物质的化学变化引起的爆炸,如炸药爆炸、可燃气体(甲烷、乙炔等)或悬浮在空气中的粉尘(煤粉、面粉等)以一定的比例与空气混合时,在一定的条件下所产生的爆炸均属于化学爆炸。化学爆炸是通过化学反应,将物质潜在的化学能,在极短的时间内释放出来,使其化学反应产物处于高温、高压状态的结果。一般气相爆炸和粉尘爆炸的压力可达 2×10^6 Pa,高能炸药爆炸时爆轰压力可达 10^{10} Pa 以上,二者爆炸时产物的温度均可达 $(3 \sim 5) \times 10^3$ K,因而使爆炸产物急剧向周围膨胀,产生强冲击波,造成对周围介质的破坏。化学爆炸时,参与爆炸的物质在瞬间发生分解或化合,生成新的爆炸产物。

1.1.3 核爆炸

核爆炸是核裂变(如原子弹是用²³⁵铀、²³⁹钚裂变)、核聚变(如氢弹是用氘、氚或锂核聚变)反应所释放出的巨大核能引起的。核爆炸反应释放的能量比炸药爆炸时释放出的化学能大得多,核爆炸中心温度可达数 10^7 K,压力可达 10^{15} Pa 以上,同时产生极强的冲击波、光辐射和粒子的

贯穿辐射等，比炸药爆炸具有更大的破坏力。化学爆炸和核爆炸反应都是在微秒量级的时间内完成的。

综上所述，爆炸过程表现为两个阶段，在第一阶段中，物质的（或系统的）潜在能以一定的方式转化为强烈的压缩能；第二阶段，压缩能急剧膨胀，对外做功，从而引起周围介质的变形、移动和破坏。不管是由何种能源引起的爆炸，它们都同时具备两个特征，即能源具有极大的能量密度和极大的能量释放速度。这两个特征结合起来，也可以说爆炸是功率密度极大的能量释放（转化）过程。几种爆炸的能量功率密度数量级见表 1-1。

表 1-1 几种爆炸的能量功率密度数量级

序号	爆炸现象	功率密度 $E/(\text{kW}/\text{m}^3)$
1	凝聚炸药的爆炸	10^7
2	气相炸药的爆炸	10^3
3	金属射流侵彻装甲初始速度 $8 \times 10^3 \text{ m/s}$	10^8
4	装甲弹穿甲初始速度 $1.5 \times 10^3 \text{ m/s}$	10^6
5	强脉冲放电	10^6
6	铀裂变	10^{13}
7	凝聚炸药燃烧	0

从表 1-1 可以看出，核爆炸功率密度比物理爆炸和化学爆炸高千百万倍，一般物理爆炸和化学爆炸的功率密度基本相同，但是由于化学爆炸的引爆装置和爆炸源具有体积小、质量轻、制造和控制容易等优点，因而无论在国民经济建设还是在国防建设中都得到了广泛的应用^[1]。

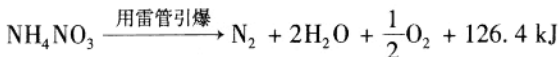
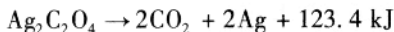
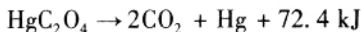
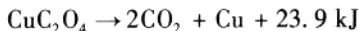
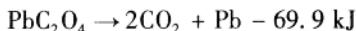
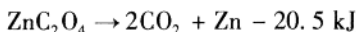
1.2 炸药爆炸及其特征

从热力学意义上说,炸药是一种相对不稳定的物质,在外界作用下,能够自行发生高速化学反应,放出大量的热,并生成大量气体产物。以上三点,称为炸药爆炸的三个特征,也是任何化学反应导致爆炸的必备条件,三者相互关联,缺一不可。

1.2.1 反应过程的放热性

反应放热是产生爆炸的必备条件之一,只有伴随热的释放,才会有爆炸反应的激发和爆炸反应的自动进行。此外,爆炸现象是一种能量的转化过程,即炸药通过爆炸反应释放的化学能变成爆炸反应产物的热能,产物的热能再转化为对环境介质所做的机械功。

不放热或放热相对较少的化学反应不能产生爆炸现象,例如:



上述分解反应 ZnC_2O_4 和 PbC_2O_4 , 因是吸热反应不发生爆炸; HgC_2O_4 、 $\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 、 NH_4NO_3 因是放热反应, 而且释放的热量较多, 则能发生爆炸; 而 CuC_2O_4 虽是放热反应,

但因放热相对较少，则基本不显示爆炸性。

但是，是不是凡是放热反应都发生爆炸呢？是否放热越多的化学反应爆炸就越强烈呢？实际上并非如此。例如，硝化甘油爆炸时放出的热量为 6222kJ/kg ，梯恩梯爆炸时放出的热量为 4232kJ/kg ，而煤和苯燃烧时放出的热量却分别为 8925kJ/kg 和 9763kJ/kg 。可见，一个放热反应过程是否发生爆炸，不能只看放热多少，还取决于能量密度的大小。所谓能量密度，是指单位体积的总机械能。如前所述，爆炸过程还必须具备极大的能量密度。煤燃烧时放热量虽然比硝化甘油爆炸时大得多，但前者的能量密度为 $171.79 \times 10^3\text{J/m}^3$ ，而后者则高达 $988.84 \times 10^7\text{J/m}^3$ 。能量密度取决于化学反应进行的速度，这样就决定了爆炸必备的第二个特征。

1.2.2 反应的快速性

爆炸反应的高速度是区别于一般放热化学反应的重要标志。只有极高的化学反应速度，即极高的能量密度，才能造成反应产物极高的能量密度。以煤的燃烧和黑索今为例。 1kg 煤完全燃烧放出的热量为 32660kJ ，而黑索今爆炸时的爆热为 5860kJ ，但前者反应完成所需时间为 10min ，而后者则只需数微秒。这就是说，黑索今爆炸反应速度是煤燃烧速度的千万倍。

由于炸药爆炸反应的速度极高，因而可以近似认为在爆炸完成的瞬间，爆炸产物并未来得及膨胀，爆炸反应所释放的热量几乎全部聚集在原来炸药所占据的体积内，从而使爆炸反应产物处于极高温度和压力状态，造成了极高的能量密度。而一般化学反应，反应速度缓慢，生成的气体产物和放出的热量均能充分发生扩散，不可能造成反应

产物的高温高压状态，产物的能量密度也很低，其压力几乎是常压，因而不可能发生爆炸现象。某些炸药爆炸时和燃料混合物燃烧时的放热量和能量密度见表 1-2。

表 1-2 炸药与一般燃料的放热量和能量密度

炸药或燃料名称	放热量 $Q/(kJ/kg)$	能量密度 $q/(kJ/m^3)$
煤	32660	3.60
汽油	41870	3.68
黑火药	2930	2805.00
梯恩梯	41870	6700.00
黑索今	5860	10467.00

从表 1-2 可知，炸药爆炸所达到的能量密度要比一般燃料燃烧所达到的能量密度高数百倍乃至数千倍，正是由于这个原因，炸药爆炸才具有巨大的做功功率和强烈的破坏作用。

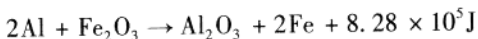
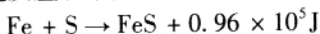
1.2.3 生成大量的气体

反应过程中有气体产物生成是炸药爆炸的又一重要特征。由于爆炸反应的放热性和高速度，可使爆炸瞬间的气体产物处于 $10^{10} Pa$ 以上的高压状态，高压状态的气体产物猛烈地膨胀，对周围介质做功。在整个过程中，气体产物既是造成高压的原因，又是对周围介质做功的工质。显然，如果没有气体产物生成，就不可能形成炸药爆炸产物的高压状态，自然也就不可能发生爆炸现象。表 1-3 列出了几种炸药爆炸反应生成的气体量。

表 1-3 几种炸药爆炸反应生成的气体量 (在标准状态下的体积)

炸药	1kg 炸药生成的气体产物体积 V/ (L/kg)	1L 炸药生成的气体产物体积 V/ (L/L)
硝化甘油	690	1100
苦味酸	715	1145
梯恩梯	740	1180
特屈儿	760	1290
太安	790	1390
黑索今	908	1630
奥克托今	908	1720

由表 1-3 可以看出, 体积为 1L 的炸药, 爆炸时可以产生 1000 ~ 1700L 的气体, 为炸药爆炸前所占相应体积的 1000 ~ 1700 倍。对于没有气体产物生成的化学反应, 如金属的硫化反应和铝热剂反应:



以上两个反应尽管反应非常迅速, 而且放出很多热量, 但因没有生成气体产物, 所以不具有爆炸性。

从上面讨论可以看出, 化学反应过程的放热性、高速度和生成大量气体产物是发生爆炸的三个必要因素。过程的放热性提供了爆炸反应的能源, 保障了爆炸反应自发进行和爆炸的自行传播; 过程的高速度, 则造成爆炸产物极高的能量密度, 使之具备巨大的功率密度, 为产生爆炸破坏效应提供了必要的条件; 过程生成大量的气体, 则是将爆炸反应放出的热量, 通过高温高压气体产物的剧烈膨胀实现能量转换, 完成对周围介质做机械功的工质。任何物质的化学变化过程, 只要上述三个要素同时存在, 就会发生爆炸, 三者相互关联, 缺一不可, 这就是通常所说的炸

药爆炸的三大特征。由此，炸药的爆炸现象可以准确地定义为一种高速进行的能自动传播的化学反应过程，在此过程中放出大量的热并生成大量的气体产物。

1.3 炸药化学变化的形式

炸药的爆炸只是炸药化学反应的一种形式。随着环境条件的不同，炸药的化学变化过程在形式上和性质上具有重大差别。按反应的速度和传播的性质，可将炸药的化学变化分为缓慢进行的化学分解和高速进行的爆炸变化，炸药的爆炸变化又可分为两种典型的形式，即爆燃和爆轰。

在常温常压条件下，即使不受外界任何作用，炸药常常以缓慢速度进行热分解反应。这种分解反应的特征是，反应在整个物质内部进行，反应速度取决于环境温度，反应规律服从阿伦尼乌斯（Arrhenius）方程，当温度升高时反应速度加快。

与缓慢的热分解反应相比，炸药的爆燃和爆轰则是剧烈的化学变化，其反应速度要比热分解快得多，反应不是在炸药各处同时发生，而是首先在某一局部发生，而且二者都是以化学反应波的形式在炸药中以一定的速度一层一层地自动进行传播。化学反应波的反应区（波阵面）比较窄，炸药的化学反应在此很窄的反应区内进行并完成（见图1-1）。

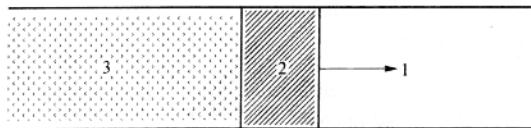


图1-1 化学反应波阵面沿炸药的传播

1—炸药；2—反应波阵面；3—反应产物