

面向 21 世纪军工院校规划教材

爆炸作用原理

主编 张国伟

副主编 韩勇 苟瑞君

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

爆炸作用原理/张国伟主编;韩勇,苟瑞君副主编.

北京:国防工业出版社,2006.7

ISBN 7-118-04568-3

I. 爆... II. ①张...②韩...③苟... III. 炸药—
爆炸—原理 IV. TQ560.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 063111 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 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

※

开本 787×1092 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 388 千字

2006 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 33.00 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

前 言

炸药作为一种能源,具有许多独特的特点。目前,无论在军事上还是在国民经济的许多领域中,炸药均得到广泛的应用。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,以及其它特种军事目的。在民用上,炸药越来越多地用于冶金、采矿、石油开采和各种工程爆炸技术。此外,炸药还用于爆炸成型、爆炸焊接、爆炸切割和爆炸合成金刚石等新技术领域。

炸药通过爆炸的形式迅速释放化学能,并对周围介质做功。研究炸药爆炸现象的发生、爆轰的传播规律以及爆炸效应等有关内容,是有关军事院校专业学生必备的基础知识,也是从事各种民用爆炸技术工作者所必备的基本知识。

本书是根据特种能源工程与烟火技术,安全工程及火炮、自动武器与弹药工程专业教学需求而编写的一本专业基础课教材,也可作为与爆炸学科应用技术相关的其它工矿、煤炭、石油、化工类专业研究生与科技人员的参考书。

本书是在作者原有讲义的基础上,经九届学生的教学实践改编而成。其内容包括炸药的爆炸、炸药的起爆机理、冲击放基本理论、爆轰波理论及爆轰对目标的作用等。

本书内容共由九章组成。由张国伟博士任主编,负责编写了第四、六、七章;第三、五章由韩勇负责编写;第二章由苟瑞君负责编写;第八章由赵捍东、赵太勇负责编写;绪论由张树霞负责编写;第一章由孙学清负责编写;第九章由许立新负责编写。由于编者思想和业务水平所限,不足和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
0.1 爆炸现象	1
0.2 冲击的现象和特征	2
0.3 热力学基础知识	3
第一章 炸药的爆炸	11
1.1 炸药爆炸的特征	11
1.2 炸药的组成与分解	13
1.3 炸药化学变化的基本形式与炸药分类	18
1.4 炸药的主要特征数	21
1.5 炸药爆炸对介质的作用	26
第二章 炸药的起爆机理	29
2.1 热起爆	29
2.2 炸药的机械作用起爆机理	36
2.3 炸药的冲击波起爆机理	41
2.4 炸药对静电放电的感度	45
第三章 冲击波基本理论	48
3.1 一维非定常等熵流动	49
3.2 正冲击波基本关系式	58
3.3 冲击波雨果尼奥曲线及冲击波的性质	64
3.4 运动冲击波的正反射	67
3.5 运动冲击波的斜反射	71
3.6 冲击波的声学理论	74
第四章 爆轰波的经典理论	78
4.1 定常爆轰波的 C—J 理论	79
4.2 多方气体的爆轰波理论	87
4.3 活塞问题解的确定性	91
4.4 爆轰波的 Z—N—D 模型及反应流的定常解	94
第五章 气体爆轰波理论	101
5.1 气体爆轰现象	101
5.2 爆炸浓度极限及其确定方法	102
5.3 气体爆轰 C—J 参数的计算	107
5.4 爆轰波阵面内的化学反应进程和压强变化率	114

绪 论

0.1 爆炸现象

爆炸是自然界中经常发生的一种现象。广义地说,爆炸是指一种极为迅速的物理或化学的能量释放过程。在此过程中,系统内在的势能转变为机械功及光和热的辐射等。爆炸做功的根本原因在于系统原有高压气体或爆炸瞬间形成的高温高压气体或蒸汽的骤然膨胀。

爆炸的一个最重要的特征是在爆炸点周围介质中发生急剧的压力突变,而这种压力突变是爆炸破坏作用的直接原因。

爆炸可以由各种不同的物理现象或化学现象所引起。就引起爆炸过程的性质来看,爆炸现象大致可分为如下几类。

0.1.1 物理爆炸现象

物理爆炸是系统的物理变化引起的爆炸。例如,蒸汽锅炉或高压气瓶的爆炸,这是由于过热水迅速转变为过热水蒸气造成高压冲破容器阻力引起的,或是由于充气压力过高以致超过气瓶强度发生破裂而引起的。地震(由地壳弹性压缩能而引起的地壳运动)也是一种强烈的物理爆炸现象,最大的地震能量比一百万吨 TNT 炸药的爆炸还要强;强火花放电(闪电)或高压电流通过细金属丝所引起的爆炸现象,也是一种物理爆炸现象。这时的能源是电能。强放电时,能量在 $10^{-6}\text{s} \sim 10^{-7}\text{s}$ 内释放出来,使放电区达到巨大的能量密度和数万度的高温,因而导致放电区的空气压力急剧升高,并在周围形成很强的冲击波。物体的高速撞击(陨石落地、高速弹丸对目标的撞击等)、水的大量骤然汽化、火山爆发等均属于物理爆炸现象。

0.1.2 化学爆炸现象

化学爆炸是由于物质的化学变化引起的爆炸。例如,细煤粉悬浮于空气中的爆燃,甲烷、乙炔以一定比例与空气混合所产生的爆炸,以及炸药的爆炸等,均属于化学爆炸现象。

炸药爆炸的速度高达每秒数千米到万米之间,所形成的温度约 $3000^{\circ}\text{C} \sim 5000^{\circ}\text{C}$,压力高达数十万个大气压,超过了地球中心所受到的压力,因而能迅速膨胀并对周围介质做功。

0.1.3 核爆炸

核爆炸是由于原子核的裂变(如 ^{235}U 的裂变)或聚变(如氘、氚、锂核的聚变)引起的爆炸。

核爆炸反应所释放出的能量比炸药爆炸放出的化学能量要大得多。核爆炸时可形成

数百万到数千万度的高温,在爆炸中心造成数百万大气压的高压(数千吉帕),比太阳中心的压力还高,同时还有很强的光和热的辐射以及各种粒子的贯穿辐射。 $1\text{g}^{235}\text{U}$ 全部进行核裂变放出的能量相当于 $2 \times 10^7\text{kg}$ TNT 炸药爆炸的能量, 1g 氘元素全部进行核聚变放出的能量相当于 $1.4 \times 10^8\text{kg}$ TNT 炸药的能量,因此比炸药爆炸具有更大的破坏力。

另外,化学爆炸和核爆炸都是在微秒量级的时间内完成的。

由于爆炸过程存在着上述特点,所以在爆炸现象的力学研究上也存在着不同于一般连续介质力学的特点,这主要是爆炸现象中载荷随时间变化的非定常运动、载荷对介质的局部效应以及载荷与介质的耦合作用。这里所说的“耦合作用”,是指载荷的大小与介质的性质相关,或者说,载荷与介质不能孤立处理,只有在所讨论的力学问题得到解决时才能知道载荷的大小。例如,TNT 炸药爆炸时可以产生峰值为 200GPa 的爆炸压力,当其作用于钢板时,其峰值载荷可达 280GPa ,而作用于水面时,其峰值载荷却只有 13GPa 。这就是说,介质的性质改变了载荷的大小。

本课主要讨论化学爆炸中的炸药爆炸,如不另加说明,以后谈及的爆炸均指炸药爆炸。

关于炸药,其定义有各种各样的说法,但一般可表述为:炸药是在外界因素作用下可以引起高速化学反应并能生成大量气体产物和放出大量热量的物质。根据其敏感程度的差别,常把炸药分为初发炸药(起爆药)和次发炸药(猛炸药)。

炸药的爆炸变化有燃烧(为与一般的燃烧相区别,也常称之为爆燃)和爆轰两种典型的形式。而这两种形式之间在一定条件下是可以相互转化的。

炸药爆炸对周围介质有做功和破坏的能力,因而炸药是能源之一。与其它能源相比,炸药具有体积小、质量轻、制造和控制容易等独特的优点,所以很早就被人类发现和利用。

炸药爆炸在军事上的用途是很广泛的。炸药可以用来装填各种炮弹、火箭弹、鱼雷、航空炸弹、地雷及导弹战斗部和核武器的起爆系统等,用以摧毁敌军装备和设施、杀伤敌军有生力量等。在民用建设方面,炸药也越来越多地被机械、冶金、采矿、煤炭、石油和铁道等部门所使用,除在工程上广泛地采用各种爆破技术外,像爆炸成型、爆炸切割、爆炸焊接以及爆炸合成金刚石等也都得到了很大的发展。

由于爆炸现象涉及的问题很广,所以各种爆炸现象已成为专门的科学研究对象。由于本课主要讨论炸药爆炸,因此其它爆炸现象可查阅有关论著。

0.2 冲击的现象和特征

所谓冲击,是抛射体(弹体)以一定的速度向被撞击物(靶板)进行撞击,在撞击瞬间能量进行急骤转化的现象。一般说来,爆炸后期的效应大都转化为冲击现象,即使是炸药爆炸也转化为高压气体产物对周围介质的冲击。另外,高速撞击本身也是一种爆炸的形式——物理爆炸。因而,冲击与爆炸密切相关,有着许多相同的特征。

穿甲弹在火药气体推动下,其速度可以达到 $1500\text{m/s} \sim 2000\text{m/s}$,当以这样的速度冲击靶板时,能量密度为 $(1 \sim 2) \times 10^{10}\text{J/m}^3$,在冲击初始几微秒内冲击压力达 10^{10}Pa 以上,以其穿透靶板。

破甲弹金属射流在锥形聚能装药爆炸作用下,其射流头部速度可达 8000m/s ,射流头

部具有的能量密度为 $2.4 \times 10^{11} \text{ J/m}^3$, 在冲击初始几微秒内冲击压力达 10^{11} Pa , 以致在钢板上冲击出比射流本身直径大许多倍的孔径。

爆炸焊接也是一种冲击现象。爆炸焊接中两块金属板按照一定形式放置, 对其中一块金属板铺上炸药, 在炸药爆炸能量的作用下这块金属板向另一块金属板进行冲击, 金属板冲击速度约 $800 \text{ m/s} \sim 2000 \text{ m/s}$, 其能量密度为 $(2.4 \sim 15) \times 10^9 \text{ J/m}^3$, 冲击点处压力达 10^9 Pa , 在这样高的压力作用下, 碰撞点处形成金属喷射, 以致使两金属界面得到清理而达到金相连接。

任何可以被发射的东西都能够成为一个抛射体, 军事上的弹体只是可抛射体的一小部分。日常见到的锤子敲打物体, 高压水柱冲撞物体, 太空中微陨石对宇宙飞船和人造卫星的碰撞, 都是冲击现象。

冲击现象共同特点是载荷强度高, 作用时间短, 尤其作用时间短是区别于一般力学现象的重要特征。在冲击现象中, 作用时间一般为毫秒、微秒甚至毫微秒数量级, 在这么短时间内完成施加高强度载荷, 以及在被作用物体内部造成极高的压力(或应力), 引起被作用物体内部介质的运动和材料的破坏, 这是一系列随时间剧烈变化的动态过程。

上述叙述中, 采用了冲击和撞击两个词。一般说来, 撞击专指固体抛射体对固体靶体的作用; 冲击泛指抛射体对被撞击物的作用, 这里所说的抛射体可能是固体、液体或高压气体, 被撞击物也可能是固体靶体、液体或气体介质。本书所涉及的冲击多为固体物之间的撞击, 不过在普遍意义上写成“冲击”二字。

0.3 热力学基础知识

由于本课主要讨论炸药的爆炸, 而大量的实验观察表明, 爆轰是爆轰波沿爆炸物一层一层地进行传播的过程。这种爆轰波是沿爆炸物传播的强冲击波。炸药爆炸对周围介质的作用, 是和爆轰产物的高速流动及在介质中形成的压力突变的传播是密切相关的。作为宏观描述热现象的热力学是研究能量转化的, 它是研究爆炸现象的基础之一。

0.3.1 气体的状态参量和状态方程

一、气体的状态参量

在热学和热力学中为了描述物体的状态, 常采用一些表示物体有关特性的物理量作为描述状态的参数, 称为状态参量。气体的状态参量有三个, 即压强 p 、密度 ρ (或比容 $v = 1/\rho$) 和温度 T 或 t 。我们知道, 一定质量的气体在一定容积的容器中, 只要它与外界没有能量交换, 内部也没有任何形式的能量转换(例如没有发生化学变化或原子核反应等), 那么不论气体内部各部分的原始温度和压强如何, 经相当时间后, 终将达到气体内部各部分具有相同温度和相同压强的状态, 而且长期维持这一状态不变。这种状态称为气体的平衡状态。

当气体与外界交换能量时, 它的状态就要发生变化。气体从一状态不断地变化到另一状态, 其间所经历的过渡方式称为状态变化的过程。如果过程所经历的所有中间状态, 都无限接近平衡状态, 这个过程就称为准静态过程, 也称平衡过程。

二、理想气体(完全气体)的状态方程

所谓理想气体(完全气体),是指气体分子不占任何体积、彼此之间不存在任何作用力(引力或斥力)的气体。

实验事实证明,表征气体平衡状态的三个参量 p 、 v (或 $1/\rho$)、 T 之间存在着一定的关系式,称为气体的状态方程。

对于理想气体,其状态方程为:

$$pv = RT \text{ 或 } p = \rho RT \quad (0-3-1)$$

式中 R 为理想气体常数,对于不同的气体, R 值不同。

该方程也可以采用摩尔质量作为质量单位,则其形式为:

$$pV = nRT$$

式中 V 为气体所占体积; n 为气体的摩尔数, $n = \frac{M}{M_{\text{mol}}}$; M 为气体的质量; M_{mol} 为气体的摩尔质量。

理想气体是热力学中理想化了的一种气体,虽然在实际中并不存在这种气体,但它却是一个既简单又非常有用的概念。当压强不高或密度较低时,所有的真实气体都可以当做理想气体来处理。

对于真实气体来说,目前存在着许多经验和半经验的状态方程,例如范德瓦耳斯(Van der Waals)方程、Beattie-Bridgman 方程和多项式方程等,但这些方程比较复杂,使用起来很不方便。而理想气体的状态方程,即使在压强接近于临界压强的情况下,只要温度大大超过临界温度也能给出足够准确的结果。本课所讨论的问题,往往是高温和高压同时出现,因而在实际的工程计算中仍然是经常采用理想气体的状态方程。

0.3.2 热力学的一些基本概念

一、热力学第一定律

在一般的情况下,当系统的状态发生变化时,做功和传递热量往往是同时存在的。如果有一系统,外界对系统传递的热量为 Q ,系统从内能为 E_1 的状态(初状态)改变到内能为 E_2 的状态,同时系统对外做功为 A ,那么:

$$Q = E_2 - E_1 + A \quad (0-3-2)$$

上式就是热力学第一定律的数学表达式。热力学第一定律说明:外界对系统所传递的热量,一部分使系统的内能增加,一部分用于系统对外所做的功。显然,热力学第一定律就是包括热量在内的能量守恒和转换定律。

对于状态的微小变化过程,热力学第一定律可写作:

$$\delta Q = dE + \delta A \quad (0-3-3)$$

式中 dE 为内能的全微分。因为内能是状态函数,其变化量只决定于系统的初态和终态(始末状态)而与所经历的过程无关。而 Q 和 A 不是状态函数,它的变化量与经历的过程有关。因此,一般不能写成全微分的形式。

为了研究系统在状态变化过程中所做的功,我们举气体膨胀为例。如图 0-3-1 所示,

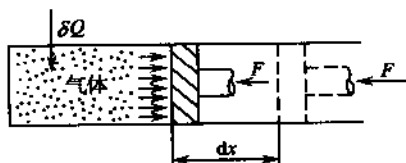


图 0-3-1 气体膨胀过程

设有一气缸,其中气体的压强为 p , 活塞的面积为 S , dx 为活塞移动的距离, F 为总的外界负载力,则系统所做的功为:

$$\delta A = Fdx = pSdx = pdV$$

将上式代入式(0-3-3)可以得到:

$$dQ = dE + pdV \quad (0-3-4)$$

以上讨论的是对于一定质量的气体而言的。对于单位质量的气体来说,式(0-3-4)可写为:

$$dq = de + pdv \quad (0-3-5)$$

式中 dq 为单位质量气体吸收或放出的热量; de 是单位质量气体的内能增加量; dv 是单位质量气体的比容改变量。

二、内能、比热、热焓、熵

前已述及,压强 p 、温度 T 和密度 ρ 是代表气体状态的三个基本参量。此外,热力学还引进了几个状态函数来表示气体的状态。内能 e 、热焓 h 和熵 s 是其中常用的三个状态函数,现分别予以简要地介绍。

1) 内能和比热

在物理学中内能的概念为系统所储存的总能量,它包括系统内分子的热运动能,分子之间相互作用所形成的分子作用势能(称为冷内能或弹性能),原子内各层电子做旋转运动的旋转能和电子所在电子层的位势能,原子核所包含的核能及其它种类的能量等;但是,不包括整个系统(物体)的运动能和位势能。现在还不能测定某系统内能的绝对值,但可以测定在某一过程中系统内能的变化量。

在一般的过程中,系统内分子的电子能和核能通常是不易激发的,所以系统内能主要由分子热运动能和相互作用势能构成的。其中分子热运动能主要与温度有关,也受密度的影响,而分子相互作用势能则表现为压强的高低,它主要与比容(密度)有关。因此,内能为比容 v 和温度 T 的函数,即:

$$e = e(v, T) \quad (0-3-6)$$

取微分后得到:

$$de = \left(\frac{\partial e}{\partial v} \right)_T dv + \left(\frac{\partial e}{\partial T} \right)_v dT \quad (0-3-7)$$

式中 $\left(\frac{\partial e}{\partial v} \right)_T$ 代表等温过程中内能随比容的变化率;而 $\left(\frac{\partial e}{\partial T} \right)_v$ 代表等容过程中内能随温度的变化率,换言之, $\left(\frac{\partial e}{\partial T} \right)_v$ 表示的是在等容过程中,温度提高或降低一个微小量所吸收或放出的热量,将其定义为定容比热,用 C_v 表示,即:

$$\left(\frac{\partial e}{\partial T} \right)_v = C_v \quad (0-3-8)$$

实验证明,对于理想气体, $\left(\frac{\partial e}{\partial v} \right)_T = 0$, 它表明理想气体内能的变化与比容变化无关,而只取决于温度。由于 $\left(\frac{\partial e}{\partial v} \right)_T = 0$, 则式(0-3-7)可以写为:

$$de = C_v dT \quad (0-3-9)$$

两边积分,得到:

$$e - e_0 = C_v(T - T_0)$$

如果取 $T_0 = 0\text{K}$ 时的内能 $e_0 = 0$, 则得到:

$$E = C_v T \quad (0-3-10)$$

上式表明, 单位质量理想气体的内能等于定容比热与绝对温度的乘积。

在等压过程中, 温度提高或降低一个微小量时, 单位质量物质吸收或放出的热量, 定义为定压比热 C_p , 即:

$$C_p = \left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_p$$

由于 $de = C_v dT$, $p dv = d(pv) - v dp$, 则式(0-3-5)可改写为:

$$dq = C_v dT + d(pv) = v dp$$

在等压条件下, 由于 $dp = 0$, 则由上式可得到:

$$\left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_p = C_v + \frac{d(pv)}{dT} = C_p \quad (0-3-11)$$

对于理想气体, 有:

$$pv = RT$$

代入式(0-3-11)后得到:

$$C_p = C_v + \frac{d(RT)}{dT} = C_v + R \quad (0-3-12)$$

此即理想气体定压比热与定容比热的关系式。

需要指出的是, 一般说来, 物质的比热并不是固定不变的值。实验证明, 它是随着温度变化而变化的, 而且密度的变化也对比热值有影响。在温度和密度变化不大的情况下, 作为一种近似, 可以取比热为常数。

理想气体的定压比热与定容比热之比, 称为理想气体的绝热指数(或等熵指数, 物理学中称为比热比)。这一比值用 γ 表示, 即:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (0-3-13)$$

由式(0-3-12)和上式可以得到:

$$C_v = \frac{R}{\gamma - 1} \quad (0-3-14)$$

$$C_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$$

绝热指数 γ 的取值取决于气体分子结构: 单原子气体, $\gamma = 1.67$; 双原子气体, $\gamma = 1.4$; 多原子气体 $\gamma = 1.33$ 。对于理想气体, 一般取 $\gamma = 1.4$ 。

2) 热焓

热力学中还引进了如下一个状态函数叫做热焓。其定义为:

$$\left. \begin{aligned} H &= E + pV \\ h &= e + pv \end{aligned} \right\} \quad (0-3-15)$$

式中 H 是对一定质量的物质而言的; h 是对单位质量而言的; E 为内能; pV 为系统的体积乘以压强, 量纲为功(能), 通常称为压力位能。

显然压强越高, 体积越大, 所所有的压力位能越高。因此, 当气体处于静止时, 焓

$H = E + pV$ 概括了气体的总能量。故热焐代表了气体所含有的总能量。

由热力学第一定律 $dq = de + p dv = de + d(pv) - v dp$

故

$$dh = de + d(pv) = dq + v dp \quad (0-3-16)$$

由此可见,在等压过程中($dp = 0$),向系统中加入的热量 dq 全部转化为系统的热焐。

即:

$$(dh)_p = (dq)_p$$

由 C_p 定义,有 $(dq)_p = C_p dT$

故

$$dh = C_p dT \quad (0-3-17)$$

积分后得到:

$$h - h_0 = C_p(T - T_0)$$

在绝对温度时的热焐为 $h_0 = C_p T_0 = 0$,因此有:

$$h = C_p T \quad (0-3-18)$$

这就是说,理想气体单位质量的焐值等于定压比热与温度的乘积。

3) 熵

熵和内能、热焐等类似,也是一种状态函数。它在某一过程中的变化只与物质的始末状态(初态和终态)有关,而与过程所走的路径无关。

熵的概念是在研究理想热机的循环过程中引出来的,它已成为判定一个过程能否自动进行以及进行的方向和限度的一种判据。熵在一切热力学过程的研究上得到了广泛的应用,具有很重要的实际和理论意义。在这里我们不追究熵概念的由来,只讨论熵及等熵过程的物理含义。

由式(0-3-16)和式(0-3-17)可以得到:

$$dq = C_p dT - v dp \quad (0-3-19)$$

考察该式可知,它不是一种全微分式,由微分学的概念可知,假如量 φ 的微分式:

$$d\varphi = M dT + N dp$$

为全微分式,其充分条件为 $\frac{\partial M}{\partial p} = \frac{\partial N}{\partial T}$ 。据此,由式(0-3-19)不难看出:

$$\frac{\partial M}{\partial p} = \left(\frac{\partial C_p}{\partial p} \right)_T = 0$$

而:

$$\frac{\partial N}{\partial T} = - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \neq 0$$

可见式(0-3-19)中的 $\left(\frac{\partial C_p}{\partial p} \right)_T \neq - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$,这表明该式不是一个全微分式。因此,量 q 不是状态函数,就是说由某一状态 A 变到状态 B 的过程当中, q 值的改变量不是一个固定的值,而是与所经历的过程有关的。如图 0-3-2,由 A 状态沿实线 AB 变到 B 状态所需的热量为

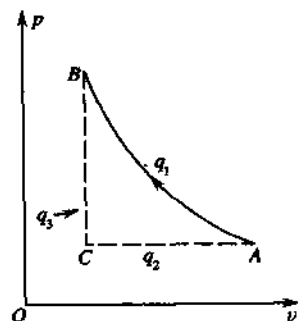


图 0-3-2 $v-p$ 曲线

q_1 , 而由 A 沿等压过程到 C , 再沿等容过程到 B 状态所需的热量就与 q_1 不同, 而是 q_2 与 q_3 之和, 并且 $q_1 \neq q_2 + q_3$ 。

但是如果把 dq 用 T 除一下, 则式(0-3-19)变为:

$$\frac{dq}{T} = C_p \frac{dT}{T} - \frac{\nu}{T} dp$$

对于理想气体, 则上式可改写为:

$$\frac{dq}{T} = C_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

考察上式可看出, $\frac{dq}{T}$ 为某一量的全微分, 这个量为状态函数 T 和 p 的函数, 它的变化只取决于始末状态而与所经历的过程无关。热力学上把这个量叫做熵, 以 s 表示, 即:

$$ds = \frac{dq}{T} = C_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \quad (0-3-20)$$

由于式(0-3-20)为 s 的全微分, 因此可以对其进行积分, 从而可以得到:

$$s - s_0 = C_p(\ln T - \ln T_0) - R(\ln p - \ln p_0)$$

由式(0-3-14)可得理想气体的 $R = \frac{\gamma-1}{\gamma} C_p$ 。将其代入上式可以得到:

$$s - s_0 = C_p \left(\ln \frac{T}{p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} - \ln \frac{T_0}{p_0^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) \quad (0-3-21)$$

对于等熵过程, 即 $s = s_0$ 时, 有:

$$\frac{T}{p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = \text{常数} \quad (0-3-22)$$

此式是以状态参数 T 和 p 表示的理想气体的等熵方程式。

由于 $T = \frac{p\nu}{R} = \frac{p}{\rho R}$, 代入上式后, 便可整理得到以 p 和 ρ (或 ν) 表示的等熵方程, 其形式为:

$$p\rho^{-\gamma} = \text{常数}$$

或

$$p\nu^{\gamma} = \text{常数} \quad (0-3-23)$$

式(0-3-22)和式(0-3-23)具有相同的意义, 它概括了等熵过程中, 理想气体状态参数变化所遵循的规律。

具体说来, 怎么样的过程才是等熵过程呢?

由熵的定义可知, 等熵过程中必须服从:

$$ds = \frac{dq}{T} = 0 \quad \text{即} \quad dq = 0$$

就是说, 在整个过程中系统的热量没有变化。这就要求: ①在整个过程中系统与外界没有任何热量交换, 即过程是绝热的; ②在整个过程中, 系统内部不容许由于气体分子间的粘性摩擦或气体分子与容器壁的摩擦而产生热量。而实现这一点, 过程本身必须是极其缓慢的、无摩擦的可逆过程。由此可知, 等熵过程就是绝热的可逆过程。显然, 理想的等熵过程在实际上几乎是不存在的。然而在处理问题时, 为了使问题简化, 我们常常把某些熵变很小的过程近似地视为等熵过程。

三、热力学第二定律

热力学第一定律给出了机械功与热能相互转化的关系式,但并未涉及这种转化与过程性质的关系,也未涉及过程进行的可能性、方向和限度。热力学第二定律则回答了这些问题。

热力学第二定律的叙述方法很多。例如,克劳修斯是这样叙述的:热量不能自动地从低温物体传向高温物体。开尔文是这样叙述的:不可能制成一种循环动作的热机,只从一个热源吸取热量,使之完全变为有用的功,而其它物体不发生任何变化。一种理论性的说法是:在任何一种与外界无能量交换的隔离系统中所发生的过程若是可逆的过程(即绝热的可逆过程),则熵值始终保持不变,然而一旦发生了不可逆过程,系统的熵值就要增大。其数学表达式为:

$$ds = \frac{dq}{T} \geq 0 \quad (0-3-24)$$

这个结论是显而易见的。因为,一切不可逆过程中,总有不可逆的机械功转化为热,从而使得量 $\frac{dq}{T} > 0$,因而隔离系统中发生的不可逆过程总是使系统的熵值增大。

由于隔离系统中的可逆过程(即绝热的可逆过程)具有 $ds = 0$ 或 s 保持不变的特性。因此,对于绝热可逆过程由于:

$$dq = de + pdv$$

故得到:

$$Tds = de + pdv \quad (0-3-25)$$

此式即为热力学第一定律和第二定律用于可逆过程的解析表达式。

同理,对于绝热的不可逆过程有:

$$Tds > de + pdv \quad (0-3-26)$$

及

$$Tds > dh - vdp \quad (0-3-27)$$

(因为 $dh = dq + vdp = de + pdv + vdp + vdp$ 即 $de = dh - pdv - vdp$)

四、气体的各种状态变化方程

在叙述前而几个问题时,我们已谈到过等容过程、等压过程、绝热及等熵过程等,下面我们简要地讨论气体变化过程及特点。

1) 等容过程

气体的体积保持不变的状态变化过程称为等容过程。显然在等容过程中有 $dv = 0$ 。由热力学第一定律有:

$$dq = de + pdv = de = C_v dT \quad (0-3-28)$$

这表明,系统吸收的热量全部用来提高系统的内能。对于理想气体,因为 $p\nu = RT$,故得到:

$$\frac{p}{T} = \text{常数} \quad (0-3-29)$$

因此说,在等容过程中,系统的压力随温度的升高成比例地增加。

2) 等压过程

气体压力保持不变的状态变化过程称为等压过程。在此过程中, $dp = 0$ 或 $p = \text{常数}$,

由热力学第一定律,在此条件下得到:

$$dq = de + p dv = (dh - p dv - v dp) + p dv = dh = C_p dT \quad (0-3-30)$$

而式中 $de = C_v dT$, 代入上式后得到:

$$(C_p - C_v) dT = p dv$$

$$\text{或} \quad \frac{dv}{dT} = \text{常数} \quad (0-3-31)$$

这表明,在等压过程中,气体的体积与温度成正比。

3) 等温过程

气体温度保持不变的状态参数变化过程称为等温过程。由热力学第一定律,可知:

$$dq = C_v dT + p dv = p dv \quad (0-3-32)$$

显然,等温过程中,系统吸收的热量全部转化为外功。另外,由理想气体状态方程:

$$p v = RT = \text{常数}$$

可看出,等温过程中 p 与 v 成反比。

4) 绝热过程

与外界无能量交换的状态变化过程称为绝热过程。绝热过程又可分为可逆的绝热过程和不可逆的绝热过程,前者称之为等熵过程,后者称之为绝热过程。

由热力学第一定律可知,在理想的可逆过程即等熵过程中,有:

$$de = - p dv \quad (0-3-33)$$

就是说,等熵过程中,系统内能的减少量全部转化为外功。但是,在不可逆的绝热过程中,由于过程中存在着不可逆的能量消耗(如气体的粘滞摩擦等),实际上, $de \neq - p dv$ 。

对于理想气体,正如式(0-3-23)所表明的,等熵过程中状态变化规律遵循如下公式:

$$p v^\gamma = \text{常数}$$

此式表明,等熵过程中,比容 v 随 p 增大而减小,但和等温过程相比,减小得慢些。

5) 多方过程

以上诸过程可用如下的普诸式概括起来,称为多方方程,即:

$$p v^k = \text{常数} \quad (0-3-34)$$

式中 k 称为多方指数。 k 值不同代表不同的过程。

当: $k=0$ 时,得到 $p = \text{常数}$,即等压过程;

$k=1$ 时,得到 $p v = \text{常数}$,即等温过程;

$k = \frac{C_p}{C_v} = \gamma$ 时,得到 $p v^\gamma = \text{常数}$,即等熵过程;

$k = \infty$ 时,得到 $v = \text{常数}$,即等容过程。

实际上常常遇到一些过程,其 k 值不等于上面给出的特定值,则称为多方变化过程。炸药爆轰产物的膨胀过程本身就是一种多方过程,在高压下,它的 k 值近似等于 3,随着膨胀的进行, k 值逐渐减小,膨胀到常压状态下, k 值近似等于 1.4。

第一章 炸药的爆炸

炸药之所以在国防和民用事业上获得广泛的使用,主要是因为炸药在发生爆炸时能够在极短的时间内对环境介质做出大量的机械功。炸药能够对外界做功的根本原因,在于炸药爆炸瞬间极为迅速地释放出其全部化学能,将反应的气体产物立即加热到数千度,并在气体产物中造成数十吉帕的压力,从而导致爆炸产生的气体产物迅速向四周膨胀做功。炸药爆炸的做功能力称为炸药的威力,它主要取决于炸药爆炸时所放出的热量及所产生气体产物的多少,炸药的威力可用下式表示:

$$A = \eta Q_v$$

式中 A 为爆轰产物在膨胀过程中,对外界所做的功; η 为热能转变成功的效率; Q_v 为炸药的爆热。

本章首先介绍炸药爆炸的特征、炸药的组成与分解、炸药的化学变化及分类,并应用热化学的有关知识讨论爆热、爆温和爆容等特性数的确定方法。最后还将简要说明炸药爆炸对介质的作用。

1.1 炸药爆炸的特征

从热力学意义上说,炸药是一种相对不稳定系统,它在外界作用下能够发生高速的放热反应,同时造成强烈压缩状态的高压气体。例如,一个炸药包用雷管引爆时,人们可以看到,炸药包瞬间化成一团火光,形成烟雾并产生轰隆巨响,附近形成强烈的爆炸气浪,建筑物等或被破坏或受到强烈震动。

我们分析一下上述爆炸现象:一团火光表明炸药爆炸过程是放热的,因而形成高温而发光;爆炸刹那间完成说明爆炸过程的速度极高;仅用一个很小雷管即可将大包炸药引爆,说明雷管爆炸后炸药中所产生的爆炸化学反应过程是能够自动传播的,烟雾表明炸药爆炸过程中有大量气体产生,而气体的迅速膨胀则是建筑物等发生破坏或震动的原因。

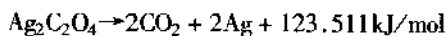
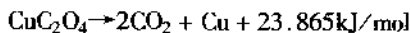
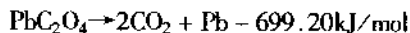
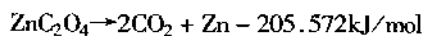
综上所述,炸药爆炸过程具有如下三个特征:过程的放热性;过程的高速度(或瞬时性)并能自行传播;过程中生成大量的气体产物。这三个条件正是任何化学反应成为爆炸性反应必须具备的,三者互相关联,缺一不可。

下面对每个条件的重要性和意义进行概略的讨论。

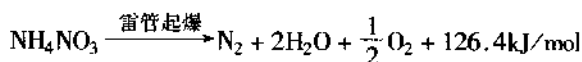
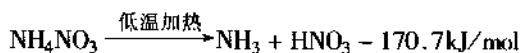
1.1.1 反应过程的放热性

炸药的爆炸过程必须是一种放热的分解反应,这是构成爆炸反应的第一个必要条件,没有这个条件,爆炸过程就根本不能发生,反应也就不能自行延续,因此也就不可能出现爆炸过程的自动传播。

例如,草酸盐的分解反应:



在上述草酸盐的分解反应式中,产物是相似的。但分解时的热效应却不相同。草酸锌、草酸铅的分解是吸热反应,不能发生爆炸,而草酸汞和草酸银的分解是放热反应,因而具有爆炸性,草酸铜虽然在分解时也能放出热量,但因为热量很小,故爆炸性不明显。再如硝酸铵的分解:



上例表明,一个反应是否具有爆炸性,与反应过程能否放出热量很有关系。只有放热反应才有可能具有爆炸性,而靠外界供给能量来维持其分解的物质,显然是不可能发生爆炸的。

爆炸反应过程所放出的热称为爆炸热(或爆热)。它是爆炸破坏作用的根据,是炸药爆炸做功能力的标志。因此,它是炸药的一个极为重要的特性数。

1.1.2 反应过程的高速度

爆炸反应同一般化学反应的一个最突出的不同点,是爆炸过程的极高速度。一般化学反应也可以是放热的,而且许多普通反应所放出的热量比炸药爆炸时放出的热量大得多,普通燃料的燃烧热和炸药的爆热如表 1-1-1 所列。

表 1-1-1 几种炸药和燃料在爆炸的燃烧时放出的热量

物质名称每	爆热或燃烧热/kJ		
	千克物质	每千克物质和氧的混合物	每升物质和氧混合物(能量密度)
黑火药	2929	2929	2803
梯恩梯	4184	4184	6485
硝化甘油	6270	6270	10041
无烟煤	3347	9205	18
汽油	41840	9623	17

但一般燃料的燃烧反应进行得比较缓慢,因此不会出现爆炸现象。例如:每千克无烟煤与空气的混合物燃烧反应放出 9205kJ 的热量,而每千克梯恩梯的爆热只有 4184kJ,但前者反应所需的时间为数分钟到数十分钟,而后者仅仅需要十几到几十微秒,反应速度相差数千万倍。

由于炸药爆炸反应速度极高,一块炸药可能在 $10^{-5}\text{s} \sim 10^{-6}\text{s}$ 内就反应完了。因而在爆炸结束时可以近似地认为,气体产物还没有膨胀,爆炸反应所放出的热量全部集中在炸药爆炸前所占据的体积内,从而使爆轰产物处于高温高压的状态中,同时造成了一般化学反应所无法达到的能量密度。

从表 1-1-1 所列数据可知,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。

爆炸过程进行的速度,一般是指爆轰波在炸药装药中传播的直线速度,这个速度称为炸药的爆速。一般炸药的爆速大约在每秒数千米到每秒一万里之间。

1.1.3 反应过程必须形成气体产物

炸药爆炸时之所以能够膨胀做功并对周围介质造成破坏,根本原因之一就在于,炸药爆炸瞬间有大量气体产物生成。假如一个反应过程不产生大量气体,那么爆炸瞬间就不能造成高压状态,因此也就不可能产生由高压到低压的膨胀过程及爆炸破坏效应。这首先是因为气体在标准状态条件下密度比固体和液体物质要小得多,而在爆炸瞬间,炸药由固体立即等容地转化为气体,再加上反应的放热性,因此使气体处于强烈的压缩状态形成高温高压。其次,气体与固体和液体物质相比具有大得多的体积膨胀系数,这使得气体应为爆炸做功的优质工质。炸药爆炸过程正是利用气体的这种特点将炸药的势能迅速转变为爆炸机械功。

表 1-1-2 给出了几种炸药爆炸气体产物在常压下的体积。

表 1-1-2 炸药爆炸气体产物在常压下的体积

炸 药 名 称	气体产物的体积/L		炸 药 名 称	气体产物的体积/L	
	每千克炸药	每升炸药		每千克炸药	每升炸药
硝化棉(13.3%N)(NC)	765	995	特屈儿	760	
苦味酸(PA)	715	1145	太安(PETN)	790	
梯恩梯(TNT)	740	1180	硝化甘油(NG)	690	1105
黑索金(RDX)	908		奥克托今(HMX)	908	

由表 1-1-2 可看到,1L 炸药在爆炸时可以产生 1000L 左右的气体产物,在爆炸瞬间它们被强烈地压缩在 1L 之内,因而造成了数十万个大气压的高压。

综上所述,反应的放热性、高速度和生成气体产物是炸药爆炸的三大特征。放热性给爆炸变化提供了能源;高速度使有限的能量迅速放出,在较小的容积内集中着较大的功率;反应生成气体产物则是能量转换的工质。具有这三方面性质是炸药的共性,而各种炸药的化学结构和物理状态不同,反应后它们表现的程度也各不相同,这是每种炸药的个性。通过上述讨论,我们可以对炸药的爆炸现象下这样的定义:炸药的爆炸现象是一种以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。

1.2 炸药的组成与分解

我们已经知道,炸药是在外界因素作用下可以引起高速化学反应并能生成大量气体产物和放出大量热量的物质。这就是说炸药是一种能把它所集中的能量在瞬间释放出来