

高等学校十二五规划教材·国防科技类

炸药与火工品

ZHAYAO YU HUOGONGPIN

王玉玲 余文力 编

西北工业大学出版社

比较基础理论知识内容, 重点阐述炸药与火工品基础知识与工程应用

本书可作为相关专业工程技术人员、技术人员及从事火工品工作者

的参考书, 也可作为相关专业工程技术人员、技术人员及从事火工品工作者

的参考书

炸药与火工品

王玉玲 余文力 编

西北工业大学出版社

ISBN 7-5612-2305-5
图号: M.1
CIP 数据: 炸药 (CIP) 目录
ISBN 978-7-5612-2305-5
中国版本图书馆 CIP 数据 (2011) 第 28781 号

西北工业大学出版社
西安 710072

炸药与火工品
王玉玲、余文力 编

ISBN 978-7-5612-2305-5
定价: 38.00 元

2011 年 12 月第 1 次印刷
2011 年 12 月第 1 次印刷

【内容简介】 本书系统地讲述了炸药与火工品的基本性质和作用原理,主要包括热力学基础知识、炸药爆轰理论、起爆药和猛炸药的基本性质、火工品的知识以及炸药、火工品的安全使用与管理。

本书可作为从事有关炸药与火工品专业及相关专业的技术与管理人员学习和了解有关炸药与火工品知识的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

炸药与火工品/王玉玲,余文力编. —西安:西北工业大学出版社,2011.12

ISBN 978-7-5612-3251-4

I. ①炸… II. ①王…②余… III. ①炸药—基本知识②火工品—基本知识 IV. ①TQ56

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第256761号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西兴平报社印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:13.5

字 数:326千字

版 次:2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷

定 价:28.00元

前 言

炸药与火工品是武器系统中不可缺少的成分和部件,在常规武器、核武器及航空航天系统等军事工程中得到广泛应用。作为爆炸能源,炸药、火工品既是武器和爆炸系统完成预定功能的“源”,同时又是这些系统发生意外爆炸、造成人身伤亡事故的“根”。因此,对于从事相关专业的人员,学习和掌握炸药与火工品的基础知识和基本理论是十分必要的。

本书是以对炸药与火工品的基本性质、作用原理及使用管理的阐述为主线组织编写的,主要内容包括热力学基础知识、炸药爆轰理论、起爆药和猛炸药的基本性质、火工品的知识,以及炸药、火工品的安全使用与管理。本书适合于用做从事炸药与火工品专业及相关专业的技术与管理人员学习和了解有关炸药与火工品知识的参考书。

本书第一章至第七章由王玉玲编写,第八章、第九章由余文力编写。

由于水平和经验有限,书中难免存在不妥之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

2011年3月

目 录

131	.....	.....	章三第
131	.....	.....	章四第
131	.....	.....	章五第
131	.....	.....	章六第
131	.....	.....	章七第
第一章 热力学基础知识			1
第一节 气体的状态参量和状态方程.....			1
第二节 热力学第一定律.....			2
第三节 热力学的一些基本概念.....			3
第四节 热力学第二定律.....			7
第五节 气体的各种状态变化方程.....			8
第二章 炸药概述			10
第一节 爆炸现象及特征.....			10
第二节 炸药及其特点.....			13
第三节 炸药化学变化的基本形式.....			15
第四节 炸药的分类.....			16
第五节 炸药的发展简史和应用.....			20
第三章 炸药的热化学及爆炸反应方程式			25
第一节 预备知识.....			25
第二节 爆炸反应方程式.....			29
第三节 炸药的爆热.....			31
第四节 炸药的爆温.....			41
第五节 炸药的爆容.....			44
第四章 冲击波与爆轰波			46
第一节 冲击波的基础知识.....			46
第二节 爆轰波的经典理论.....			63
第三节 凝聚炸药的爆轰理论.....			80
第四节 炸药爆速的实验测定.....			98
第五节 影响炸药爆速的因素.....			102
第五章 炸药的感度			113
第一节 机械感度.....			114
第二节 热感度.....			119

目 录

第三节	冲击波感度	122
第四节	爆轰波感度	127
第五节	静电感度	128
第六节	激光感度	134
第七节	影响炸药感度的因素	135
第六章	炸药的爆炸作用	139
第一节	炸药的做功能力	139
第二节	炸药的猛度	146
第三节	聚能效应	154
第四节	炸药在空气中的爆炸作用	162
第七章	起爆药和猛炸药	168
第一节	起爆药	168
第二节	猛炸药	174
第八章	火工品简介	179
第一节	火工品概述	179
第二节	常用火工品	184
第九章	炸药、火工品安全使用与管理	193
第一节	炸药、火工品静电防护	193
第二节	炸药、火工品的储存和运输	197
第三节	炸药、火工品销毁安全	199
附录		205
参考文献		209
01		章四第
04		章一第
03		章二第
08		章三第
80		章四第
501		章五第
11		章五第
11		章一第
11		章二第

$$T \Delta n = Vq$$

量飽飽科戶式 $m; M; m = n$, 量飽飽飽飽科戶式 n ; 科古飽科戶式 V , 中先

第一章 热力学基础知识

作为宏观描述热现象的热力学是爆炸现象的研究基础之一,因此,本章主要介绍热力学的部分理论知识,为后续炸药与火工品知识的学习奠定基础。

在热力学中,表征系统状态的基本参数(即状态参数)是压强、密度(或比体积)和温度。联系这些参数并用来描述系统状态变化规律的关系式,即为状态方程式。此外,在热力学中还引入了只与状态有关的所谓状态函数,诸如热力学能(热力学能也称为内能)、焓和熵等。

第一节 气体的状态参量和状态方程

一、气体的状态参量

在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 (或比体积 $v = 1/\rho$) 和温度 T 。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。气体从一种状态不断地变化到另一种状态,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、理想气体的状态方程

在讨论压力变化小于几个兆帕的气体流动时,往往近似地视气体为理想气体。所谓理想气体,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。

$$pv = R_g T \quad \text{或} \quad p = \rho R_g T$$

对于理想气体,其状态方程为 $pv = R_g T$ 或 $p = \rho R_g T$ 。其中, R_g 为理想气体常数,它可以取为摩尔气体常数 R 除以气体的摩尔质量 M ,即 $R_g = R/M$ 。实验结果表明,所有气体的 R 值均相同,并有 $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。显然,对于不同的气体, R_g 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 为气体的物质的量, $n = m/M$; m 为气体的质量。

理想气体是热力学中理想化了的一种气体, 虽然在实际上并不存在这种气体, 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。

当气体的压力很高、气体密度较大时, 气体分子本身所占有的体积(称之为余容, 一般定义为分子体积的 4 倍) 就不能忽略了。因为随着密度的增大, 气体分子间距离不断缩小, 分子之间的相互作用力就变得明显起来。这时理想气体状态方程已不能描述其状态变化规律, 而必须寻求更为合适的状态方程。

对于气体压力在数兆帕到数十兆帕范围内的真实气体, 其状态变化行为常可用范德瓦耳状态方程描述。当气体压力和密度更高时, 例如火炮炮膛内火药燃烧及火箭燃烧室内推进剂速燃所形成的压力高达数百兆帕, 而凝聚炸药爆轰瞬间所形成的气体产物压力高达数万兆帕(或数十吉帕), 范德瓦耳状态方程也已不能较好地描述它们的状态变化行为, 需要建立更加稠密的气体模型以构造它们的状态方程。

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。本书所讨论的问题, 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。

第二节 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 , 系统从热力学能为 E_1 的状态(初态) 改变到热力学能为 E_2 的状态, 同时系统对外做功为 A , 那么

$$Q = E_2 - E_1 + A \quad (1-2)$$

式(1-2) 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, 一部分使系统的热力学能增加, 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做

$$\delta Q = dE + \delta A \quad (1-3)$$

式中, dE 为热力学能的全微分。因为热力学能是状态函数, 其变化量只决定于系统的初态和终态, 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, 以气体膨胀为例。如图 1-1 所示, 设有一汽缸, 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, 则系统在无摩擦的准静态过程中所做的功为

$\delta A = Fdx = pSdx = pdV$ 将其代入式(1-3), 可以得到

$$\delta Q = dE + pdV \quad (1-4)$$

以上讨论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(1-4) 可写为

微分形式为 $\delta q = de + p dv = de + pd\left(\frac{1}{\rho}\right)$ 因, 故 $\delta q = de + p dv = de + pd\left(\frac{1}{\rho}\right)$ (1-5)

式中, δq 为单位质量气体吸收或放出的热量; de 为单位质量气体的热力学能 (e , 也称比热力学能) 增量; dv 为单位质量气体的比体积改变量。

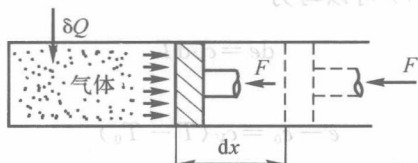


图 1-1 气体膨胀过程

第三节 热力学的一些基本概念

前已述及, 压强 p 、温度 T 和密度 ρ 是代表气体状态的 3 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。热力学能 E 、热焐 H 和熵 S 是其中常用的 3 个状态函数, 现分别予以简要的介绍。

一、热力学能和比热容

在物理学中, 热力学能的概念为系统内部能量的总和, 它是系统本身的性质, 即它在过程中的变化只取决于系统所处的初态和终态, 而与过程进行的路径无关。系统的热力学能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 (称为冷热力学能和弹性势能), 原子内各层电子作旋转运动的旋转能和电子所在电子层的位势能, 原子核内所包含的核能及其他种类的能量等; 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热力学能的绝对值, 但可以测定在某一过程中系统热力学能的变化量。

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, 所以系统热力学能主要由分子热运动能和相互作用势能构成。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, 它主要与比体积 (密度) 有关。因此, 比热力学能为比体积 v 和温度 T 的函数, 即

$$e = e(v, T) \quad (1-6)$$

取微分后得到

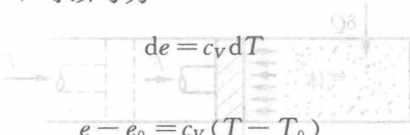
$$de = \left(\frac{\partial e}{\partial v}\right)_T dv + \left(\frac{\partial e}{\partial T}\right)_v dT \quad (1-7)$$

式中, $\left(\frac{\partial e}{\partial v}\right)_T$ 代表等温过程中比热力学能随比体积的变化率; 而 $\left(\frac{\partial e}{\partial T}\right)_v$ 代表等容过程中比热力学能随温度的变化率。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, 将其定义为比定容热容, 用 c_v 表示, 即

$$c_v = \left(\frac{\partial e}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\delta q}{dT}\right)_v \quad (1-8)$$

实验证明,对于理想气体,因忽略了分子之间的相互作用力,故有 $(\frac{\partial e}{\partial v})_T = 0$, 它表明理想气体比热力学能的变化与比体积变化无关,而只取决于温度。

由于 $(\frac{\partial e}{\partial v})_T = 0$, 则式(1-7)可以写为

$$de = c_v dT \tag{1-9}$$


两边积分,得到

$$e - e_0 = c_v (T - T_0) \tag{1-10}$$

如果取 $T_0 = 0K$ 时的比热力学能 $e_0 = 0$, 则得到

$$e = c_v T \tag{1-10}$$

式(1-10)表明,比热力学能等于比定容热容与绝对温度的乘积。

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,定义为比定压热容 c_p , 即

$$c_p = \left(\frac{\delta q}{dT}\right)_p$$

由于 $de = c_v dT$, $pdv = d(pv) - vdp$, 则式(1-5)可改写为

$$\delta q = c_v dT + d(pv) - vdp$$

在等压条件下,由于 $dp = 0$, 则由上式可得到

$$\left(\frac{\delta q}{dT}\right)_p = c_v + \frac{d(pv)}{dT} = c_p \tag{1-11}$$

对于理想气体,有

$$pv = R_g T$$

代入式(1-11)后,得到

$$c_p = c_v + \frac{d(R_g T)}{dT} = c_v + R_g \tag{1-12}$$

此即理想气体比定压热容与比定容热容的关系式。可见,理想气体的比定压热容与比定容热容之间仅相差一气体常数值。

需要指出,物质的比热容是与它们的分子结构及在热运动中的自由度状态相关的,故应是随着温度的变化而改变的,并且物质的密度变化也对比热容有影响。但是,在温度和密度改变不大的情况下,可近似地取比热容为常数。

理想气体的比定压热容与比定容热容之比,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 κ 表示,即

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \tag{1-13}$$

由式(1-12)和式(1-13)可以得到

$$c_v = \frac{R_g}{\kappa - 1}, \quad c_p = \frac{\kappa R_g}{\kappa - 1} \tag{1-14}$$

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

一般说来,物质的比热容是随温度的变化而改变的,因而其绝热指数 κ 也将随温度的变化而改变。表 1-1 给出了空气的绝热指数与温度的变化关系。显而易见,只是在温度发生很大

变化时,绝热指数才发生显著变化,因而在一般情况下,常常把绝热指数 κ 近似视为常数。对于空气,取 $\kappa = 1.4$ 。

表 1-1 空气的绝热指数与温度的关系

T/K	273	287	373	2 273
κ	1.406	1.405	1.396	1.283

二、焓

热力学中还引进了如下一个状态函数叫做焓和比焓,其定义分别为

$$\left. \begin{aligned} H &= E + pV \\ h &= e + pv \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

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,称为比焓; E 为热力学能; 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,所含有的压力位能越高。因此,当气体处于静止时,焓 $H = E + pV$ 概括了气体的总能量,故焓代表了气体所含有的总能量。

由热力学第一定律,有

$$\delta q = de + pdv = de + d(pv) - vdp$$

$$\text{故} \quad dh = de + d(pv) = \delta q + vdp \quad (1-16)$$

由此可见,在等压过程中($dp=0$),向系统加入的热量将全部转化为系统的比焓,即

$$(dh)_p = (\delta q)_p$$

由 c_p 定义,有 $(\delta q)_p = c_p dT$,故

$$dh = c_p dT \quad (1-17)$$

积分式(1-17),得

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

在绝对零度时的比焓为 $h_0 = c_p T_0 = 0$,因此有

$$h = c_p T \quad (1-18)$$

这就是说,理想气体比焓等于比定压热容与温度的乘积。

三、熵

熵和热力学能、焓等类似,也是热力学中的一个状态函数。它在某一过程中的变化只与物质的初态和终态有关,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(1-16)和式(1-17),可以得到

$$\delta q = c_p dT - vdp \quad (1-19)$$

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 的微分式为

$$d\varphi = MdT + Nd p$$

为一全微分式的充要条件为 $\frac{\partial M}{\partial p} = \frac{\partial N}{\partial T}$ 。据此,由式(1-19)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(1-19)中的 $\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T \neq -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$,这表明该式不是热量 q 的全微分式。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 1-2 所示,由状态 A 沿实线 AB 变到状态 B 所需的热量为 q_1 ,而由 A 沿等压过程到 C ,再沿等容过程到状态 B 所需的热量就与 q_1 不同,而是 q_2 与 q_3 之和,并且 $q_1 \neq q_2 + q_3$ 。

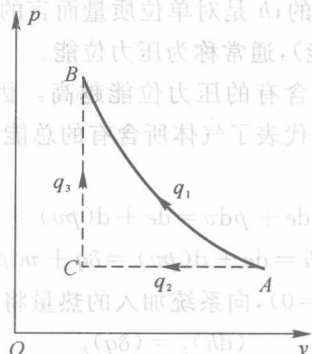


图 1-2 $v-p$ 曲线

如果将式(1-19)等号两边同除以温度 T ,则式(1-19)变为

$$\frac{\delta q}{T} = c_p \frac{dT}{T} - \frac{v}{T} dp$$

对于理想气体,则上式可改写为

$$\frac{\delta q}{T} = c_p \frac{dT}{T} - R_g \frac{dp}{p}$$

考察上式可看出, $\frac{\delta q}{T}$ 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

$$dS = \frac{\delta q}{T} = c_p \frac{dT}{T} - R_g \frac{dp}{p} \quad (1-20)$$

由于式(1-20)为 S 的全微分,因此可以对其进行积分,从而可以得到

$$S - S_0 = c_p (\ln T - \ln T_0) - R_g (\ln p - \ln p_0)$$

由式(1-14)可得理想气体的 $R_g = \frac{\kappa - 1}{\kappa} c_p$ 。将其代入上式,可以得到

$$S - S_0 = c_p \left(\ln \frac{T}{T_0} - \ln \frac{p}{p_0} \right) \quad (1-21)$$

对于等熵过程,即 $S = S_0$ 时,有

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

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 $T = \frac{pv}{R_g} = \frac{p}{\rho R_g}$, 代入式(1-22)后, 便可整理得到以 p 和 ρ (或 v) 表示的等熵方程, 其形式为

$$p\rho^{-\kappa} = \text{常数} \quad \text{或} \quad pv^{\kappa} = \text{常数} \quad (1-23)$$

式(1-22)和式(1-23)具有相同的意义, 它们都描述了等熵条件下单位质量理想气体状态参数之间的关系。

最后, 分析一下等熵过程的物理含义。由熵的定义可知, 等熵过程中必须满足条件

$$dS = \frac{\delta q}{T} = 0$$

可见, 在温度 T 不为零时, 只能是 $\delta q = 0$ 。这就是说, 在整个热力学过程中, 物质系统与外界没有任何热交换发生, 即过程是绝热的; 在整个过程中, 系统内部不容许由于气体分子间的黏性摩擦或气体分子与容器壁的摩擦而产生热量, 这就要求过程是可逆的。简言之, 等熵过程就是绝热的可逆过程。实际上, 这种理想化了的过程是不存在的, 然而在处理具体的工程问题时, 为了使问题简化, 常常把某些熵变很小的过程近似地视为等熵过程。

第四节 热力学第二定律

热力学第一定律给出能量守恒条件下功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; 而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, 只从一个热源吸收热量, 使之完全变为有用的功, 而其他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

$$dS = \frac{\delta q}{T} \geq 0 \quad (1-24)$$

这个结论是显而易见的。因为在一切不可逆过程中, 总有不可逆的机械功转化为热, 从而使 $\delta q > 0$ 。由此可知, 在绝热过程中, 熵值只朝着一个方向变化, 常增而不减。

由于熵值保持不变, 即 $dS = 0$, 因此, 对于绝热的可逆过程, 有

$$dS = de + pdv$$

故得到

$$TdS = de + pdv \quad (1-25)$$

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, 由于熵值的增加而有

$$TdS > de + pdv \quad (1-26)$$

及

$$TdS > dh + vdp \quad (1-27)$$

第五节 气体的各种状态变化方程

气体由某一个状态变化到另一个状态,可以经历无限多的过程。在工程上最有意义的是以下几种特殊过程:等容过程、等压过程、等温过程、绝热过程和等熵过程等。下面简要地讨论气体变化过程及其特点。

一、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

$$\delta q = de + p dv = de = c_v dT \quad (1-28)$$

这表明,系统吸收的热量全部用来提高系统的热力学能。对于理想气体,因 $p v = R_g T$, 故得

$$\frac{p}{T} = \text{常数} \quad (1-29)$$

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。

二、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

$$\delta q = de + p dv = (dh - p dv - v dp) + p dv = dh = c_p dT \quad (1-30)$$

这表明,系统吸收的热量等于系统焓的变化。对于理想气体,因 $p v = R_g T$, 故得到

$$\frac{v}{T} = \text{常数} \quad (1-31)$$

这表明,在等压过程中,气体的比体积与温度成正比。

三、等温过程

气体温度保持不变的状态变化过程称为等温过程。由热力学第一定律,可知

$$\delta q = c_v dT + p dv = p dv \quad (1-32)$$

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

$$p v = R_g T = \text{常数}$$

可看出,等温过程中 p 与 v 成反比。

四、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

$$de = -p dv \quad (1-33)$$

就是说,在等熵过程中,系统热力学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(如气体的黏滞摩擦等),实际上, $de \neq -p dv$ 。

对于理想气体,正如式(1-23)所表明的,在等熵过程中状态变化规律遵循公式

$$pv^\kappa = \text{常数}$$

此式表明,在等熵过程中,比体积 v 随 p 增大而减少,但和等温过程相比,减少得慢些。

五、多方过程

以上诸过程可用如下的普遍式概括起来,称为多方过程,即

$$pv^\gamma = \text{常数} \tag{1-34}$$

式中, γ 称为多方指数。 γ 值不同,代表不同的过程。

当 $\gamma=0$ 时, $pv^0 = p = \text{常数}$,即为等压过程;

当 $\gamma=1$ 时, $pv = \text{常数}$,即为等温过程;

当 $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \kappa$ 时, $pv^\kappa = \text{常数}$,即为等熵过程;

当 $\gamma = \infty$ 时, $p^{1/\gamma}v = p^0v = v = \text{常数}$,即为等容过程。

实际上常常遇到一些过程,其 γ 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 γ 值近似等于 3。随着膨胀的进行, γ 值逐渐减小,膨胀到常压状态下, γ 值近似等于 1.4。

第二章 炸药概述

第一节 爆炸现象及特征

一、爆炸现象

爆炸是自然界中经常发生的一种现象。从最广义的角度来看,爆炸是指物质的物理或化学变化,在变化过程中,伴随有能量的快速转化,热力学能转化为机械压缩能,且使原来的物质或爆炸变化产物、周围介质产生运动。

原则上,爆炸现象包括了两个阶段:①这种或那种的热力学能转化为强烈的物质压缩能;②该压缩能的膨胀—释放,潜在的压缩能转化为机械功。该机械功可使与之相接触或相近的介质运动。因此,迅速出现高压力的作用是爆炸的基本特征。

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以下几类。

(一) 物理爆炸

物理爆炸是系统的物理变化引起的爆炸。例如,蒸汽锅炉、高压气瓶及车轮胎的爆炸是常见的物理爆炸。蒸汽锅炉爆炸是由于锅炉内的水受热成汽超过了额定的蒸汽压力时,压力超过锅炉壁的承受应力,锅炉碎裂。锅炉碎裂后,锅炉内的过热水汽快速膨胀,做破坏功。高压气瓶的爆炸是由于偶然的受热,气瓶内压力急剧升高,或是由于腐蚀、其他机械破损致使气瓶的强度下降,均可使气瓶爆炸。这种爆炸是由压缩气体的热力学能造成的。

由地壳弹性压缩能释放引起的地壳的突然变动(地震)也是一种强烈的物理爆炸。在地壳的个别地区形成的应力可以波及广大区域,并在某些区域集聚,突然释放出大量能量。强烈地震释放的能量可相当于百万吨常见炸药爆炸所释放的能量。

水下的强力火花放电,或者将大电流通过细的导线,均可引起爆炸。这时,电能转化为加热空气、水汽的能量。

当高速运行的物体强烈撞击高强度的障碍时,运动能转化为热能。当能量足够大时,可形成强烈压缩的气体。这种性质的爆炸出现在高速陨石撞击地壳、高速火箭碰击物体等。

在小尺寸空间内也可出现类似性质的爆炸。例如,如果使注满水的钢瓶快速冷冻,也可出现“爆炸”。水在结冰过程中的体积膨胀,使钢瓶压力增加,超过了钢瓶壁所能承受的应力,导致钢瓶爆裂。这时,压缩水的潜在弹性能就转化为破坏钢瓶的机械功。

上述实例都是由物理原因引起的爆炸,属于物理爆炸。

(二) 化学爆炸

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炸,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,都属于化学爆炸现象。它们是由于急剧而快速的化学反应导致大量化学能的突然释放引起的。

炸药爆炸进行的速度高达每秒数千米到1万米之间,所形成的温度为3 000~5 000℃,压力高达数十吉帕,因而能引起爆炸产物的迅速膨胀,并对周围介质做功。

(三) 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,在爆炸中心造成数千吉帕的高压,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高能粒子的贯穿辐射。1 kg ^{235}U 全部进行核裂变放出的能量相当于 2×10^7 kg 梯恩梯(TNT)炸药爆炸的能量,1 kg 氘元素全部进行核聚变放出的能量相当于 1.4×10^8 kg TNT 炸药爆炸的能量,因此比炸药爆炸具有更大的破坏力。

各种爆炸现象已成为专门的科学研究对象,并有专门的论著。本书只涉及由炸药化学反应过程所引起的爆炸,因此,本书后面所提到的“爆炸”,如不加以说明,均是指炸药爆炸。

二、炸药爆炸的特征

炸药爆炸是一个化学反应过程,但炸药的化学反应并不都是爆炸。必须具有一定条件的化学反应才是爆炸。

例如,一个炸药包用雷管引爆,刹那间发生爆炸。人们看到,炸药包瞬时化为一团火光,形成烟雾并产生轰隆巨响,附近形成强烈的爆炸风(冲击波),建筑物或被破坏或受到强烈震动。

分析上述爆炸现象: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快;仅用一个小雷管即可将大包炸药引爆,说明雷管在炸药中所引起的爆炸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本质原因。

综上所述,炸药爆炸过程具有以下三个特征,即反应的放热性、反应的高速率、生成大量气体产物。

下面对每个条件的重要性和意义进行概略的讨论。

(一) 反应的放热性

化学反应释放的热量是爆炸的能源。反应过程吸热还是放热、放热量的多少决定了过程是否具有爆炸性质。例如,常见的草酸盐的分解反应

