

高等教育出版社

自动武器气体动力学

陈惠猷、傅仲良、曹汉山、李一博编

国防工业出版社

自动武器气体动力学

陆家鹏 谭兴良 雷志义 等编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本教材适用于自动武器专业的本科学生,亦可作为自动武器专业科技人员的参考资料。全书共分九章:第一章及第二章介绍与武器气流问题有关的热力学及气体动力学基础知识;第三章分析几种与武器结构有关的典型气体动力装置;第四章及第五章分析火药气体对武器及弹头的后效作用;第六章及第七章研究膛口装置中气体的流动规律;第八章及第九章研究侧向导气装置中气体的流动规律。

本书由欧学炳、苗瑞生主审,经机械电子工业部枪炮教学指导委员会复查,兵工教材编审室审定并经夏咸松编辑加工,同意作为部级教材出版。

自动武器气体动力学

陆家鹏 谭兴良 雷志义 等编著

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京印刷三厂联营厂印装

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.75 字数: 335.4千字

1991年3月 第1版 1991年3月第1次印刷

印数: 1~1000 定价: 3.57元

ISBN 7-80038-243-5/TJ·32(课)

前 言

自动武器工作的原动力是高压火药气体。火药气体的流动特性对武器自动机的工作影响很大。随着现代兵器的发展,新的结构不断出现,武器上利用火药气体作为能源,完成功能的种类日益增多。设计武器时仅借助经验公式已不能满足要求。广大武器设计者愈来愈感到掌握火药气体在膛内及各种装置中的流动规律的必要性。因此自动武器气体动力学已成为武器设计工作者的必备知识。

本教材是根据自动武器专业本科生的教学计划及教学大纲编写的。由于机械类型专业的教学计划中未有工程热力学及气体动力学课程,故在教材的前二章介绍了与本课程有关的热力学知识和气体动力学知识。这些知识是学习本课程的基础。在专业内容方面,本教材是在过去教材的基础上进行修改而成的,并增加了新的章节。在后效期计算中增加了一维非定常流解法。膛口流场对武器射击的影响很大,因此单独成立一章,介绍膛口流场的基本知识,为今后深入研究打下一些基础。在膛口制退器的计算中增加了考虑到膛内存在激波时的计算方法。在导气装置的计算中增加了导气管式导气装置的计算方法,并介绍了微分方程组的数值解法等内容。增加的这些内容,大都是我国武器研究工作者长期科研工作的积累。其中有些是编者亲自进行科研工作所取得的成果。由于本科生的教学时数有限,不可能将所有武器气体动力学方面的问题都一一讲述,有些章节作了删减,如自动武器膛口消声器、膛口引射器等,这次没有编入教材,读者可参阅相应的参考资料。

本教材第一章及第五章由雷志义编写,第二章及第八章由谭兴良编写,第三、四、六、七章由陆家鹏编写,第九章由廖振强编写,全书由陆家鹏任主编。责任编辑申正宾教授,主审苗瑞生教授,欧学炳副教授在审稿过程中提出了很多宝贵意见。这些都对提高教材质量起很大作用,对此深表感谢。由于水平所限,书中肯定有错误和不妥之处,衷心希望读者提出宝贵意见。

编 者

1989年元月

目 录

主要符号表

引 言	(1)
第一章 自动武器工作过程中的热力学基础	(3)
第一节 基本概念	(3)
第二节 热力学第一定律	(6)
第三节 气体的热力性质	(8)
第四节 热力学第二定律	(14)
第五节 熵	(16)
第六节 典型热力过程及多变过程	(20)
第二章 气体动力学基础	(24)
第一节 基本概念	(26)
第二节 一维流动的基本方程	(30)
第三节 声速和气流中截面变化对气流速度、压力变化的影响	(40)
第四节 气体流动时气流参数的确定	(45)
第五节 膨胀波与激波的基本知识	(50)
第六节 变质量热力系热力过程基本方程及其应用	(69)
第三章 气体在变截面管道中的流动	(77)
第一节 气体在收敛管道内的流动	(77)
第二节 气体在收敛—扩张管道中的流动	(81)
第三节 超声速气流通收敛—扩张管道的流动	(83)
第四节 超声速气流在平滑膨胀管道中的流动	(84)
第五节 超声速气流在突然膨胀管道中的流动	(88)
第六节 气体经活塞间隙的流动	(91)
第七节 气体经迷宫密封的流量	(93)
第四章 自动武器后效期	(95)
第一节 概述	(95)
第二节 后效期内膛内气流参数的变化规律	(98)
第三节 自由后坐运动诸元的确定	(102)
第四节 后效期的经验公式	(104)
第五节 用一维非定常流关系式解武器后效期内的气流问题	(106)
第六节 过程指数的确定	(111)
第五章 膛口流场	(114)
第一节 膛口流场的形成与特性	(114)
第二节 膛口激波	(118)

第三节	膛口流场中弹头运动的近似计算	(124)
第六章	自动武器膛口制退器	(128)
第一节	概述	(128)
第二节	膛口制退器的工作原理	(129)
第三节	膛口制退器的效率	(130)
第四节	身管式膛口制退器计算	(131)
第五节	半开腔式膛口制退器计算	(136)
第六节	开腔式膛口制退器计算	(143)
第七节	自动武器膛口助退器及防跳器	(149)
第七章	自动武器膛口消焰器	(151)
第一节	武器射击时产生火焰的原因	(151)
第二节	膛口消焰器的降温计算	(153)
第三节	有消焰器时武器后坐力的变化规律	(155)
第四节	消焰器内弹头速度的增量	(155)
第五节	消焰器对武器射击精度的影响	(157)
第八章	自动武器侧向导气装置	(158)
第一节	概述	(158)
第二节	火药气体自身管侧孔流出时流动参数的确定	(162)
第三节	静力型侧向导气装置的计算方法	(166)
第四节	动力型侧向导气装置的计算方法	(172)
第五节	动力静力型侧向导气装置的计算方法	(176)
第六节	截流膨胀型导气装置的计算方法	(177)
第七节	气体复进装置的计算方法	(180)
第八节	导气式武器导气装置气室内压力随时间变化的经验公式	(183)
第九节	导气式武器导气装置结构诸元对气室压力及冲量的影响	(191)
第九章	导气管式导气装置的流场特点及计算方法	(195)
第一节	变强度运动激波及其对气室压力、自动机运动的影响	(195)
第二节	导气管式导气装置流场三个时期的划分及其主要特征	(200)
第三节	导气管式导气装置的计算方法	(202)
参考文献		(211)

主要符号表

符号	量的名称	单位符号
p	压力	$\text{Pa} (\text{N}/\text{m}^2)$
T	温度	K
ρ	密度	kg/m^3
V	容积	m^3
R	气体常数	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
m	气体的质量, 弹头质量	kg
v_v	比容	m^3/kg
V_m	气体摩尔体积	m^3/mol
M	气体摩尔质量	kg/mol
N	气体克分子数	mol
Q	热量	J
q	比热	J/kg
U	内能	J
u	比内能	J/kg
A	功	J
I	焓	J
i	比焓	J/kg
S	熵	J/K
s	比熵	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_v	定容比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_p	定压比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
γ	比热比	
n	多变指数	
v	气流速度, 弹头速度	m/s
t	时间	s
S	截面积	m^2
c	声速	m/s
q_m	秒流量	kg/s
Ma	马赫数	
λ	速度系数	
μ	马赫角	rad
e	气流膨胀度	
χ	气流压力比	
μ	流量系数	
m_a	装药量	kg

δ	火药密度	kg/m^3
α	余容	m^3/kg
m_H	后坐体质量	kg
e_i	单位质量气体所带入的能量	J/kg
e_e	单位质量气体所带出的能量	J/kg
A	装填密度	kg/m^3
f	火药力	J/kg
ψ	火药相对燃烧量	
e_1	火药厚度之半	m
e	已燃火药厚度之半	m
l	弹头行程	m
v_H	武器后坐体速度	m/s
ζ_d	后效期内膛底压力与平均压力之比	
ζ_x	后效期内膛口压力与平均压力之比	

几个常用的下标

下标符号	名称
0	初始状态或滞止状态参数
k	内弹道结束时膛内气流平均参数
k_0	后效期膛口气流参数
*	临界参数
q	气室内气流参数
i	进口气流参数
e	出口气流参数
∞	未扰动时气流参数
q_0	气室内气流的初始状态参数
a	大气参数
p_j	气流平均参数
b	装置侧孔气流参数 (包括导气孔)
c	装置中央孔道气流参数
p	导气孔处膛内气流参数

引 言

自动武器是一种特种热机，热机的工质就是火药气体。自动武器中的各个自动动作都是靠这种工质在特种热机部件中做功而完成的。

研究自动武器的工作特点首先就得研究武器中的火药气体的流动特点。因为只有将促使机构运动的动力源认识清楚，才有可能将机构运动的动力特性分析清楚。这就是学习本课程的最主要目的。

自动武器射击时，火药气体一方面推动弹头向前运动，另一方面作用于膛底引起武器的后坐，并利用部分气体能量对武器上的特殊装置作用，完成一定的功能。武器气体动力学就是研究武器在射击过程中其内部火药气体的变化情况，并研究如何更有效的利用火药气体能量作出有用的功，以及如何减少或消除由于火药气体而造成的不利影响。火药气体能量利用得好坏，直接影响到武器的结构和性能。因此武器气体动力学是武器设计理论中的重要组成部分。

从非自动武器向自动武器发展的过程中，人们通过实践活动创造了很多种利用火药气体能量的形式来完成自动动作。有利用火药气体对武器膛底的作用而引起身管后坐来完成自动动作的，如历史上最早创造的马克沁重机枪等；有利用火药气体对弹壳底部的作用而完成动作的，如小威力武器上常见的枪机后坐式自动机构；有利用火药气体经身管侧孔流入特殊工作室推动活塞完成自动动作的，这就是目前最常见的导气式自动方式，为了解决威力和机动性之间的矛盾，设计出威力高而重量轻的武器，出现了利用火药气体来减小武器后坐能量的膛口制退器，利用火药气体来减小武器跳动的防跳器。为了满足特殊要求，又出现了消焰器、消声器等装置，以减小武器射击时所产生的声和光。随着新的要求不断出现，逐渐有更多的新的利用火药气体能量的形式出现，如利用火药气体能量作为管退式武器的身管复进装置，以代替身管复进簧，利用火药气体能量作为自动机后坐到位的缓冲装置等。

火药气体在这些装置中的热力变化过程是非常复杂的，它和一般的热机不同。首先武器装置中的火药气体是在高温、高压下进行工作，最高温度可达3000K，最高压力可达3000MPa，而且整个过程是在极短的时间内（几毫秒）完成。在整个热力过程中，系统内的工质不是固定不变的，而是有流入或流出，因此是一个变质量系统热力过程。系统内的气流有着很高的速度，因此研究问题时，不可能象一般热力学那样不考虑气体的动能，而是要看作气体动力学问题来研究。综上所述武器中的热力过程是工质的内能、热能、动能以及机械功等相互转化的不定常气体动力过程。

研究膛口流场对武器性能的影响亦是重要的课题。弹头自膛口飞出后的最初瞬时是在火药气体的包围中飞行，以后火药气体受到阻尼而减速，弹头超过火药气体在大气中飞行。因此，喷出膛口的火药气体影响到弹头的速度和飞行稳定性。膛口气流是一个三维不定常流，且伴有激波，流出膛口时的火药气体压力高达近1000MPa，突然流入大气，产生剧烈的膨胀，是属于高度欠膨胀射流。因此，为了弄清这些流动规律，必须具备气体动力学的基本知识。

在本教材的前几章，详细地介绍了热力学及气体动力学方面有关的基本知识，掌握了这些基本知识，就可以分析武器中的气体动力问题。

人们对武器上气体流动的变化规律是在实践中摸索和积累经验逐渐认识的。最先是建立一些近似的经验式以满足武器设计的需要。随着实际工作的不断发展，要求愈来愈准确的掌握气流在膛内及特殊装置内的变化规律。这就有必要进一步总结经验，提高到理论来指导实践。武器气体动力学这门课就是在实践基础上逐渐形成和发展起来的。近代科学技术的发展，给研究武器中气流的变化规律创造了更有利的条件。测量技术的进步，可以直接测出气流中的某些参数。热力学及气体动力学的发展，为研究武器气流问题提供了理论基础。电子计算技术的发展，为解题提供了方便的方法。今天，人们对武器中气流的变化规律的认识，已由经验发展到理论，形成了一门学科。武器气体动力学已成为设计、研究武器必不可少的理论基础。然而，实际情况是复杂的，人们对于武器气流中的某些物理现象还不能完全从理论上认识，因此还有待我们不断完善和发展武器气体动力学知识。

究中的一个很重要的概念,类似理论力学中取受力自由体一样。图 1-2 就是在流场中所取定的一个微元体热力系(虚线围定的部分),其中 S 表示气体流管截面积, p 、 v 、 ρ 分别表示气流压力、速度及密度, δq 表示热力系和外界交换的热量。在微元段 dx 以外的气流、管壁等物体,均为所取定热力系的外界。

在对热力系分析时,既要考虑热力系内部的变化,也要考虑热力系通过界面与外界发生的能量和质量交换,对外界引起的变化不必追究。

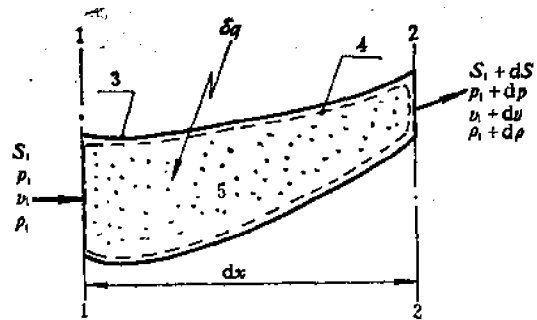


图1-2 流场微元热力系

1—入口; 2—出口; 3—管壁; 4—界面; 5—气体工质。

在自动武器原动机的热力系中,工质是火药气体,它是一种多元(多种化学成份)、多相(气—液—固)且分布不均匀的气体,故形成的系统是复杂热力系。在本书中,常把这种复杂热力系简化为一个均匀、单相、单元热力系,列出状态参数之间的关系式,并借助于实验加以修正,得出满足精度要求的计算结果。

在自动武器热力学分析中,按热力系和外界相互作用情况的不同,可分为闭口系(和外界无质量交换)、开口系(和外界有质量交换)和绝热系(和外界无热量交换)。例如图1-1所示,为一个绝热开口系。如果导气孔不进气,活塞间隙不排气时,则热力系变为绝热闭口系(和外界无任何联系)。图 1-2 为非绝热开口热力系,热力系与外界有热量与质量交换。

二、状态与状态参数

状态是指热力系全部宏观物理性质的综合。用来描述热力系所处状态的宏观物理量称为状态参数。

在热力学中,常用的状态参数有六个,即压力、比容、温度、内能、焓和熵。这里先介绍前四个状态参数。

1. 压力

压力是指单位面积上承受的垂直作用力。

$$\text{即 } p = \frac{F}{S} \quad (1-1)$$

式中 p ——压力, Pa;

S ——面积, m^2 ;

F ——垂直作用力, N。

气体的压力是组成气体的大量分子在紊乱的热运动中与容器壁频繁碰撞的结果。由分子运动的压力公式

$$p = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) = \frac{2}{3} n \bar{E} \quad (1-2)$$

可知:理想气体的压力和单位体积内气体分子数 n 及分子的平均移动能 $\bar{E}$ 有关, n 和 $\bar{E}$ 愈大,压力 p 愈大。式(1-2)中:

m ——每个分子的平均质量;

$\bar{v}^2$ ——分子的速度平方平均值;

E ——分子平均移动能。

按照式(1-1)计算所得的压力值是气体的真实压力,即绝对压力。用测量仪器测得的压力,是绝对压力和当时当地大气压力的差值,这种值在一般工程热力学中称为表压力。在自动武器的压力分析中,由于绝对压力远远大于大气环境压力,所以一般都用表压力近似代替绝对压力。

2. 比容

比容是单位质量物质所占有的容积。即

$$v_i = \frac{V}{m} \quad (1-3)$$

式中 v_i ——比容, m^3/kg ;

V ——容积, m^3 ;

m ——质量, kg 。

单位体积内所具有的质量叫密度,它是比容的倒数,即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-3a)$$

密度 ρ 的单位是 kg/m^3 。

3. 温度

温度表示物体冷热的程度。对于理想气体温度可用分子平均动能大小表示,即

$$\bar{E} = \frac{\bar{m} \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad (1-4)$$

式中 $\bar{m} \bar{v}^2/2$ ——分子平均移动动能;

k ——玻耳兹曼常数 ($k = 1.380662 \times 10^{-23} \text{J/K}$);

T ——热力学温度, K 。

4. 内能

内能是指组成热力系的大量微观粒子本身具有的能量(不包括热力系宏观运动的能量和外场作用的能量)。它包括分子动能、分子力所形成的位能,构成分子的化学能和构成原子的原子能等。在热能和机械能的转换过程中,一般不涉及到化学能和原子能。因此,在自动武器热力学分析中,如同一般工程热力学一样,只考虑前面两种能量。分子动能包括分子的移动能、转动能和分子内部的振动能。

单位质量物质的内能称为比内能

$$u = \frac{U}{m} \quad (1-5)$$

式中 u ——比内能, J/kg ;

U ——热力系内气体的总内能, J 。

三、平衡状态

平衡状态是指热力系在没有外界作用的情况下宏观性质不随时间变化的状态。平衡状态热力系内部状态参数都是均匀一致的,这就给热力学的分析带来很多方便。在自动武器中所要研究的热力系,实际上都是非平衡状态,为了便于理论分析,常将这一非平衡状态的热力系认为是平衡状态。从平衡状态的概念出发,导出自动武器气体动力学的基本规律,为使用

解析法求解问题提供了方便。

四、状态方程

虽然处于平衡状态的热力系内各个状态参数都有确定的值，但是要确定这样的平衡状态并不要求给出全部状态参数值。对于一个和外界只可能有热能和机械能交换的简单热力系，只要给出两个互相独立的状态参数就可以确定它的平衡状态。如可以直接测量的参数比容、压力、温度，可由下式表示它们之间的关系

$$\left. \begin{aligned} v &= f(p, T) \\ p &= f(v, T) \\ T &= f(p, v) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

这一函数关系称为热力系处于平衡状态下的状态方程。式(1-6)也可写成隐函数的形式

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1-7)$$

五、过程

过程是指热力系从一状态向另一状态变化时所经历全部状态的总和。

热力系从一个平衡状态连续经过一系列(无数个)平衡的中间状态，过渡到另一个平衡状态，这样的过程称为内部平衡过程，内部平衡过程可以在状态坐标图中用一条连续的曲线表示。

就热力系本身而言，“平衡”意味着宏观静止；而“过程”则意味着变化，意味着平衡被破坏。内部平衡过程把“平衡”和“过程”这两个矛盾的概念在一定的条件下统一起来。其条件是：要求外界对热力系的作用必须缓慢到足以使热力系内部能及时恢复不断被破坏的平衡。

六、功和热量

热力系通过界面和外界进行的机械能交换量称为作功量，简称功(机械功)；它们之间的热能交换量称为传热量，简称热量。

显然，功和热量是和热力系的状态变化(即过程)联系在一起的。它们不是状态参数，不能说热力系在某一状态下有多少功，多少热量，而只能说热力系在某一过程中对外界作出了或从外界获得了多少功，从外界获得了或向外界放出了多少热量。

功用符号 A 或 a 表示，热量用符号 Q 或 q 表示。热力学中通常规定：热力系对外界作功为正($A > 0$)，外界对热力系作功为负($A < 0$)；热力系从外界吸热为正($Q > 0$)，热力系向外界放热为负($Q < 0$)。

第二节 热力学第一定律

一、热力学第一定律的表达式

能量守恒与转换定律应用在伴有热效应的各种热力过程中，便是热力学第一定律。如同在工程热力学一样，热力学第一定律能说明火药气体的热能和武器体的机械能在转换时总能量守恒的规律。

以图1-3所示的某种自动武器中气室热力系作为考察对象，并假设不考虑火药气体重力位能，建立热力学第一定律的表达式。

设图1-3(a)所示热力系具有的总能量为 E ，它由热力系中内能 U 、宏观动能 E_k 组合而

成, 即

$$E = U + E_s$$

假设这一热力系在极短的时间 dt 里通过界面从外界吸收了微小的热量 δQ (用“ δ ”表示微元过程中热传递的微小量, 以便和微小增量或状态量的全微分“ d ”区别), 由入口 i 界面从外界流进单位质量 dm_i 火药气体的

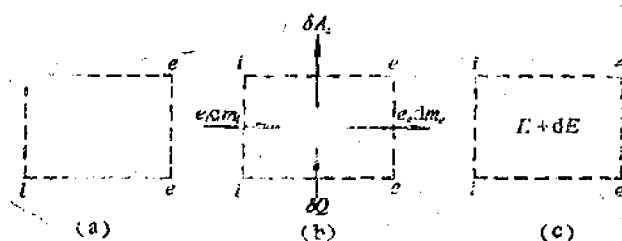


图1-3 不考虑气体重力位能的热力系

的总能量为 e_i ($e_i = u_i + e_{s,i}$); 同时热力系又对外界作了微小的总功 δA_z (各种功的总和), 并由出口 e 界面向外界流出单位质量 dm_e 火药气体的总能量为 e_e ($e_e = u_e + e_{s,e}$), 如图1-(b)所示。经过时间 dt 后, 热力系的总能量变成 $E + dE$, 如图1-3 (c) 所示。

根据热力学第一定律, 此热力系在 dt 时间内的能量守恒与转换关系为

$$(\delta Q + e_i dm_i) - (\delta A_z + e_e dm_e) = [(E + dE) - E]$$

该式说明, 加入热力系能量的总和减去热力系输出能量的总和等于热力系总能量的增量。或

$$\delta Q = dE + (e_e dm_e - e_i dm_i) + \delta A_z \quad (1-8)$$

在有限时间 t 内, 对式(1-8)积分得

$$Q = \Delta E + \int_{t_1}^{t_2} (e_e dm_e - e_i dm_i) + A_z \quad (1-9)$$

式(1-9)说明: 在时间 t 内热力系和外界热量的交换量等于热力系总能量的变化量、流入和流出热力系能量的变化量以及在时间 t 内热力系对外界作功的总功量之和。式(1-8)和式(1-9)为热力学第一定律的最基本表达式。

下面结合对图1-1所示导气装置热力系的分析, 分别以闭口系、开口系的定常流动为例, 进一步对上述热力学第一定律的表达式具体化。

二、闭口系的能量方程

在图1-1所示的导气热力系中, 假定在充气后即关闭导气孔及活塞与活塞孔之间的间隙, 并认为从枪管的膛内传入热量为 Q 时, 就可得到一个封闭型导气装置。活塞靠被封闭的火药气体静力膨胀做功。其热力系为一个与外界没有质量交换的闭口热力系, 如图1-4所示。

当闭口热力系的宏观动能近似不变, 即 $\Delta E_s = 0$, 且与外界无质量交换, 即 $dm_i = dm_e = 0$; 仅通过热力系的容积变化和外界进行膨胀功 A 的交换, 此时用 A 代替总功 A_z , 则根据式(1-9)可得

$$Q = \Delta U + A = U_2 - U_1 + A \quad (1-10)$$

对单位质量火药气体的工质可得

$$q = \Delta u + a = u_2 - u_1 + a \quad (1-11)$$

对 dt 时间内的微元热力过程而言, 将式(1-11)微分得

$$\delta q = du + \delta a \quad (1-12)$$

式(1-10)、(1-11)和式(1-12)都是图1-4所示闭口热力系的能量方程, 即热力学第一定律

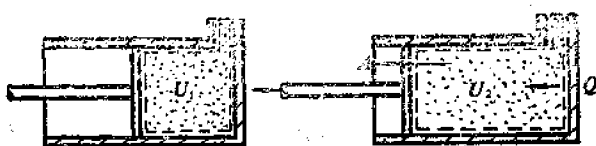


图1-4 和外界无质量交换的热力系

律在闭口系中的具体表达式。

三、开口系的能量方程

如图1-1所示的导气装置, 由于装置内导气孔道和枪膛内相通, 活塞和活塞孔间有洩气间隙, 气室中的火药气体不是一直封闭在气室内, 而是伴有从膛内进气、向环境排气的过程。因此图1-1所示导气装置可视为是一个和外界有质量及热量交换的开口热力系。再按图1-3, 只要视排气间隙为出口界面, 视导气孔为进口界面, 即可得到如图1-5所示的导气装置开口系的能量关系式, 它同式(1-8)和(1-9)完全一样。

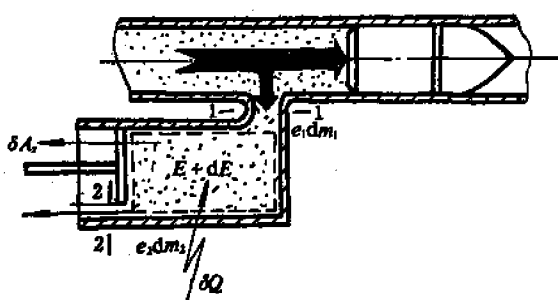


图1-5 自动武器导气装置开口系

四、功和热量的计算

设有活塞截面积为 s_A 的气室, 里面充有单位质量的气体, 如图1-6所示, 并认为气室内的气体处于平衡状态, 气体对活塞的作用力由活塞运动的惯性力与复进簧力之合力 F 、活塞与气室壁之间摩擦力 F_f 加以平衡, 即

$$ps_A = F + F_f \quad (1-13)$$

当外界向气体加入热量 δq 以后, 气体膨胀, 并在平衡状态下使活塞移动 dx 距离, 此时气体对外界作功 δa , 即

$$\delta a = F dx = (ps_A - F_f) dx = p dv_s -$$

$$F_f dx = p dv_s - \delta a_f < p dv_s \quad (1-14)$$

式中 δa_f 是由于摩擦存在而损失的功, 称它为功损, $p dv_s$ 为气体的膨胀功, 由功损产生的热称为热产, 用 q_f 表示。显然

$$q_f = a_f \quad (1-15)$$

如果不考虑摩擦, 可得

$$\delta a = p dv_s \quad (1-16)$$

对式(1-16)积分, 可得膨胀功的计算式

$$a = \int_1^2 p dv_s \quad (1-17)$$

由式(1-12)和(1-16)可得无摩擦的内平衡闭口系的热量微小量计算关系式

$$\delta q = du + p dv_s \quad (1-18)$$

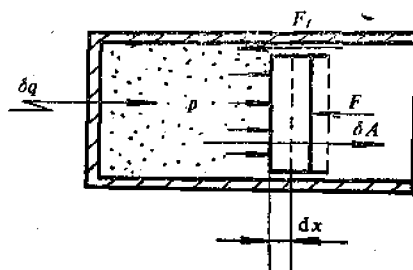


图1-6 活塞式均匀热力系

第三节 气体的热力性质

一、理想气体的状态方程和摩尔气体常数

在火药气体的热力性质研究中, 总是从理想气体状态方程着手, 甚至把火药气体也按理想气体处理, 进行理论分析与推导, 再结合实验研究, 作必要的修正。所以理想气体状态方

程是火药气体状态方程的理论基础。由式(1-2)、(1-4)和(1-3),经整理后得

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m \bar{v}^2}{2} = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \frac{3}{2} kT = \frac{N}{mv_p} kT$$

式中 m 为气体质量,所以

$$\frac{pv_p}{T} = k \frac{N}{m}$$

令

$$\frac{kN}{m} = R \quad (1-19)$$

则得

$$\frac{pv_p}{T} = R \text{ 或 } p = \rho RT \quad (1-20)$$

式(1-20)为单位质量理想气体的状态方程,又称为克拉贝隆方程。 R 称为气体常数,它等于玻耳兹曼常数 k 与单位质量气体所包含的分子数的乘积。气体常数的单位是 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对于同一种气体, N 、 m 是一定的,所以 R 是一个不变的常数;对于不同的气体,由于分子量不同,所以 R 值亦不同。

如果对不同气体都取 1kmol (千摩尔),那公式(1-20)即化为

$$M pv_p = MRT \text{ 或 } pv_{p,M} = R_M T \quad (1-21)$$

式中 M —— 1kmol 气体的分子量;

$v_{p,M}$ —— 1kmol 气体的容积,称为千摩尔容积;

R_M —— 1kmol 气体的常数,对不同气体 R_M 是同一数量,所以称为摩尔气体常数。

对任何气体物质的阿佛加德罗数

$$N(1\text{kmol}) = 6.022045 \times 10^{26} \quad (1-22)$$

则任何气体的摩尔气体常数

$$\begin{aligned} R_M &= kN(1\text{kmol}) = 1.380662 \times 10^{-23} \times 6.022045 \times 10^{26} \\ &= 8314.4\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \end{aligned} \quad (1-23)$$

如果已知某气体的分子量,则可以方便地由摩尔气体常数计算出该气体的气体常数

$$R = \frac{R_M}{M} \quad (1-24)$$

二、理想混合气体

1. 混合气体的成分

火药气体是一种混合气体,它的成分可以用质量成分标出。设总质量为 m 的气体是由几种单一气体组成,其中第 i 种气体的质量为 m_i ,它的相对质量成分

$$g_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{m_i}{m_{\text{mix}}} \quad (1-25)$$

式中 mix 表示混合气体,显然

$$\sum_{i=1}^n g_i = 100\% = 1 \quad (1-26)$$