

# 高膛压火炮技术

曹万有 张文柱 王道宏等编著



国防工业出版社



数据加载失败，请稍后重试！

## 内 容 简 介

本书是在《高膛压火炮研究》课题成果的基础上编写的。

全书共九章。开始一章对国内外高膛压火炮发展概况做了较详细的评介。全书的重点是论述高膛压火炮的内弹道设计、全弹道系统优化模型、脱壳穿甲弹有限元计算、装药结构及其压力波、自紧身管设计、半自动模式闭气炮筒、身管热护套、身管寿命和火炮系统射击精度。在最后一章中介绍了高膛压火炮 $P-t$ 曲线和膛内压力波的测量。本书力求用新理论和有关计算机程序计算,可供从事火炮科研、设计、教学、生产、试验的科技人员参考。

### 高膛压火炮技术

曹万有 张文柱 王道宏 等编著

国防工业出版社出版

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

内部发行

空军西安印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张14 3/4 350千字

1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷 印数: 00,001—1,200册

ISBN 7-118-00638-6/TJ45 定价: 4.00元

## 前言

本书是在《高膛压火炮研究》课题成果的基础上编写的。

高膛压火炮是为了对付日益发展的坦克装甲防护出现的,它主要用于坦克炮和反坦克炮。高膛压火炮的特点就是膛压高(大于400MPa)、初速大,它给火炮内外弹道设计、身管材料和工艺、装药和装药结构、身管烧蚀和寿命、射击精度以及高膛压火炮的膛内压力测量等都提出了新的课题。本书是70年代以来国内外的高膛压火炮技术以及我们自己的研究成果的汇集。这些内容无疑对火炮科学技术工作者有参考价值。

全书共九章。开始一章对国内外高膛压火炮的发展概况做了较详细的评介。第二章是用现代火炮内弹道学理论建立高膛压火炮内弹道方程组。第三章是使用可燃药筒的内弹道解法。第四章是用优化理论建立全弹道优化模型及计算方法。第五章是介绍脱壳穿甲弹的有限元计算。第六章介绍高膛压火炮装药结构及其压力波,第七章分别介绍了自紧身管设计及用弹塑性理论对自紧残余应力分析计算、半自动楔式闭气炮门设计、炮尾强度的有限元计算、身管热护套原理及结构、身管寿命。第八章是应用火炮动力学对火炮系统精度分析计算。第九章介绍高膛压火炮 $P-t$ 曲线测量及高压传感器设计。这些内容在一定程度上反映了当今世界上高膛压火炮理论和今后发展趋势,可以使火炮研究工作者从中得到启发,更好地完善自己在这方面所从事的研究工作。本书的内容除部分来自国内外文献外,相当一部分是我们自己的研究成果,其中部分内容经过实践尚少,可能有不尽完善的地方,供读者参考。

本书第一章由任何梅执笔,第二、三章由杨敏涛执笔,第四章由龚小鹏、张文柱执笔,第五章由王秦安执笔,第六章由李启明、龚海刚执笔,第七章由乔聪伶、刘心和、郁永年、张长琪、曹万有、王道宏执笔,第八章由康新中执笔,第九章由王新文、韦汉忠执笔。全书由王道宏、张文柱、蒋桃清、王文同作了校审。

编者借此机会向参与本书编辑工作的任久东同志和一切热情支持及帮助本书出版的同志们致以衷心的感谢。诚恳地希望阅读和使用过本书的同志们提出批评和指正。

编者

# 目 录

|                           |        |
|---------------------------|--------|
| 第一章 现代高膛压火炮发展概况           | ( 1 )  |
| 第一节 高膛压火炮的发展背景            | ( 1 )  |
| 第二节 国内外高膛压坦克炮现状           | ( 2 )  |
| 第三节 高膛压火炮特点及发展趋势          | ( 4 )  |
| 第四节 结束语                   | ( 5 )  |
| 第二章 高膛压火炮内弹道              | ( 6 )  |
| 第一节 经典内弹道方程系回顾            | ( 6 )  |
| 第二节 高膛压火炮的内弹道特点           | ( 7 )  |
| 第三节 高压下的火药气体状态方程          | ( 8 )  |
| 第四节 密闭爆发器高压试验时的压力修正       | ( 11 ) |
| 第五节 火药气体比热随温度、压力的变化       | ( 19 ) |
| 第六节 气流对燃速的影响              | ( 25 ) |
| 第七节 火药初温对弹道的影响            | ( 25 ) |
| 第八节 弹前压力波对弹道的影响           | ( 26 ) |
| 第九节 高膛压火炮内弹道方程系           | ( 27 ) |
| 第十节 例题计算和分析               | ( 28 ) |
| 第三章 使用可燃药筒的高膛压火炮的内弹道解法    | ( 32 ) |
| 第一节 可燃药筒的结构及燃烧特性          | ( 32 ) |
| 第二节 可燃药筒燃气生成函数的建立         | ( 35 ) |
| 第三节 使用可燃药筒高速炮的势平势解法       | ( 37 ) |
| 第四节 势平衡解法例题计算             | ( 39 ) |
| 第五节 使用可燃药筒的改进型经典内弹道方程组的解法 | ( 41 ) |
| 第六节 改进型经典内弹道方程组解法例题计算     | ( 43 ) |
| 第七节 起始弹道的势平衡研究方法          | ( 46 ) |
| 第四章 穿甲弹全弹道优化设计            | ( 54 ) |
| 第一节 概述                    | ( 54 ) |
| 第二节 系统优化设计的概念、方法及有关问题     | ( 54 ) |
| 第三节 全弹道系统模型               | ( 62 ) |
| 第四节 全弹道系统的设计目标、变量及约束条件    | ( 65 ) |
| 第五节 优化设计在计算机上的实现          | ( 69 ) |
| 第六节 脱壳穿甲弹总体参数的优化设计        | ( 75 ) |
| 第五章 杆式尾翼稳定脱壳穿甲弹的有限元计算     | ( 80 ) |
| 第一节 有限元方法的基本概念            | ( 80 ) |

|            |                                   |              |
|------------|-----------------------------------|--------------|
| 第二节        | 杆式尾翼稳定脱壳穿甲弹简述                     | ( 85 )       |
| 第三节        | 基本模型假设与原始数据                       | ( 87 )       |
| 第四节        | 载荷计算                              | ( 88 )       |
| 第五节        | 弹托与弹体刚性接触的计算模型                    | ( 89 )       |
| 第六节        | 弹托与弹体的局部组合计算模型                    | ( 91 )       |
| 第七节        | 伪单元处理弹体与弹托联接的有限元计算                | ( 93 )       |
| 第八节        | 用ASKA程序的子结构功能计算弹体与弹托的有限元计算        | ( 96 )       |
| 第九节        | 结束语与说明                            | ( 100 )      |
| <b>第六章</b> | <b>装药结构及其压力波</b>                  | <b>(102)</b> |
| 第一节        | 火炮装药结构                            | ( 102 )      |
| 第二节        | 装药设计及应注意的问题                       | ( 105 )      |
| 第三节        | 压力波与装药结构的关系                       | ( 108 )      |
| 第四节        | 装药的安全性问题                          | ( 115 )      |
| 第五节        | 近代内弹道学中的装药结构研究                    | ( 116 )      |
| <b>第七章</b> | <b>高膛压火炮炮身设计</b>                  | <b>(121)</b> |
| 第一节        | 自紧身管设计                            | ( 121 )      |
| 第二节        | 用弹塑性有限元法对自紧身管残余应力的分析              | ( 141 )      |
| 第三节        | 半自动楔式炮门                           | ( 149 )      |
| 第四节        | 炮尾强度计算                            | ( 156 )      |
| 第五节        | 身管热护套的作用原理及结构                     | ( 177 )      |
| 第六节        | 身管寿命                              | ( 189 )      |
| <b>第八章</b> | <b>火炮系统射击精度的分析与计算</b>             | <b>(201)</b> |
| 第一节        | 概述                                | ( 201 )      |
| 第二节        | 动力跳角的理论计算                         | ( 202 )      |
| 第三节        | 起始扰动分析与计算                         | ( 203 )      |
| 第四节        | 脱壳干扰估算                            | ( 210 )      |
| 第五节        | 炮管振动分析                            | ( 211 )      |
| 第六节        | 射击精度预测                            | ( 217 )      |
| <b>第九章</b> | <b>高膛压火炮<math>p-t</math>曲线的测量</b> | <b>(221)</b> |
| 第一节        | 电传感器法                             | ( 221 )      |
| 第二节        | 电阻式测量系统                           | ( 222 )      |
| 第三节        | 压电式测量系统                           | ( 225 )      |
| 第四节        | 测量系统的标定和数据处理                      | ( 228 )      |
| 第五节        | 压力差的测量                            | ( 229 )      |
| 第六节        | 电阻式超高压传感器                         | ( 230 )      |

# 第一章 现代高膛压火炮发展概况

现代高膛压火炮是为了对付日益发展的坦克装甲防护出现的，因此，高膛压火炮主要用于坦克炮和反坦克炮。

高膛压只是提高火炮穿甲威力的措施之一，性能好的高膛压火炮除了具备优选的火炮口径、优化的弹道和高能发射药等条件之外，还必须采用性能优良的动能弹。

现代工业技术的发展是高膛压火炮出现的前提。新型炮钢材料、电渣重熔或真空冶炼技术以及身管自紧新工艺为实现火炮高膛压创造了条件。

由于测压方法的不同，火炮膛压指标的数值也不同，在我国通常把发射动能穿甲弹的膛压大于400MPa（铜柱测压值）的火炮列为高膛压火炮。

## 第一节 高膛压火炮的发展背景

坦克作为攻防结合的武器，其火力和防护一直在互相对抗中发展。火炮威力的提高促使坦克采用更强的装甲防护。装甲防护的增强又要求坦克炮有更高的穿甲威力。

现代坦克普遍采用了性能先进的复合装甲及更大的装甲倾角，使坦克的首上装甲和炮塔正面装甲的防弹能力有了大幅度的提高。当代主战坦克复合装甲状况见表1.1。

表 1.1 国外坦克复合装甲的现有水平

| 坦克型号      | 结 构 与 材 料                     | 装甲倾角(°) | 水平厚度(mm) |
|-----------|-------------------------------|---------|----------|
| T-72/T-80 | 厚装甲(钢)+非金属夹层(玻璃钢)+薄装甲(钢)      | 68      | 550      |
| MI        | 薄装甲(钢)+混合夹层(尼龙、陶瓷、钛合金)+厚装甲(钢) | 68~70   | 600~550  |
| “挑战者”     | 乔巴姆(钢+陶瓷、铝合金+钢)               | 65      | 550      |
| “豹”2      | 薄钢甲(钢)+非金属夹层(陶瓷、板胶)+厚装甲(钢)    | 68~70   | 600~550  |
| “梅卡瓦”     | 间隔化(钢+陶瓷+板胶)装甲                | 65      | 400      |

为了击穿不断发展的敌坦克的装甲，穿甲弹也在不断的发展。先后出现的破甲弹、碎甲弹在复合装甲前暴露了不可克服的弱点，最后靠动能穿甲的尾翼稳定脱壳穿甲弹受到普遍重视。自苏联115毫米滑膛炮上首先使用这种穿甲弹以来，各国都为滑膛炮和线膛炮研究出了这种型式的穿甲弹。尾翼稳定脱壳穿甲弹（简称长杆式动能弹）现有水平如表1.2。

西德的研究起步比苏联晚，但已发展到第四代。第一代弹（DM13）使用钢套的钨合金弹芯。第二代（DM23）采用整体式钨合金弹芯（密度为17.6~17.8g/cm<sup>3</sup>），弹杆较长，取消了钢套，有相应增长的弹托和改进的铝合金尾翼。第三代、第四代DM33和DM43动能弹正在试验中，DM13，DM23，DM33，DM43基本性能见表1.3。

DM33和DM43动能弹具有为世界领先水平。若以DM13弹的穿甲深为100%，则其余三种弹的相对值见表1.4：

表 1.2 国外长杆动能穿甲弹基本诸元

| 基本诸元     | 弹丸型号 | 苏 联<br>BM12 | 西 德<br>DM23 | 美 国<br>XM829  |
|----------|------|-------------|-------------|---------------|
| 配用火炮     |      | 125毫米滑膛炮    | 120毫米滑膛炮    | M265型120毫米滑膛炮 |
| 全弹重(kg)  |      | 19.5        | 18.80       |               |
| 全弹长(mm)  |      |             | 910         | 19.1          |
| 弹丸重(kg)  |      | 5.67        | 7.3         | 7.1           |
| 弹丸长(mm)  |      |             | 513.8       | 518.8         |
| 弹芯重(kg)  |      | 3.615       | 4.61        | 4.6           |
| 飞行弹径(mm) |      | φ44         | φ32         | φ32           |
| 飞行长径比    |      |             | 16.2        | 16.2          |
| 初速(m/s)  |      | 1800        | 1650        | 1650          |
| 膛压(MPa)  |      | 443.6       | 58)         |               |

表 1.3 西德四代长杆式动能穿甲弹基本性能

| 基本性能       | 弹丸型号 | 第一代<br>DM13 | 第二代<br>DM23 | 第三代<br>DM33 | 第四代<br>DM43 |
|------------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 全弹重(kg)    |      | 18.7        | 18.8        | 23.3        |             |
| 弹丸重(kg)    |      | 7.22        | 7.3         |             |             |
| 弹丸长(mm)    |      | 409.2       | 518.8       | 643         | 782.5       |
| 弹芯重(kg)    |      | 4.4         | 4.61        |             |             |
| 弹芯直径(mm)   |      | φ38         | φ32         | φ28         | φ23         |
| 飞行长径比      |      | 12.9        | 16.2        | 22.96       | 30~35       |
| 初速(m/s)    |      | 1650        | 1650        |             |             |
| 膛压(MPa)    |      |             | 500         |             | 670         |
| 垂直穿甲深度(mm) |      | 410         | 510         | 570         | 600         |

表 1.4 几种动能弹的相对穿甲值

| 靶板型式  | 型 号 | DM13<br>(%) | DM 23<br>(%) | DM 33<br>(%) | DM 43<br>(%) |
|-------|-----|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 北约三层靶 |     | 100         | 125          | 140          | 150          |
| 北约单层靶 |     | 100         | 125          | 159          | 165          |

动能穿甲弹穿甲威力的提高,除靠尽量减少飞行速度降外,主要靠提高初速,这就对高膛压坦克炮提出了越来越高的要求。

## 第二节 国内外高膛压坦克炮现状

当代坦克以苏联T-72/T-80、西德“豹”2、美国M1和英国“挑战者”为典型代表,这些坦克均装有大穿甲威力的火炮。西方国家以120mm口径火炮为标准装备,苏联采用125mm口径滑膛炮。

### 一、苏 联

苏联125mm口径滑膛炮是目前世界上口径最大的坦克炮。该炮采用优质炮钢制成。其内弹道特点为短身管,大装填密度,配用高能发射药。火炮装有自动装填机,射速为每分钟

8发。该炮除能发射常的尾翼稳定脱壳穿甲弹之外，还能发射“眼镜蛇”（“KOBRA”）反坦克导弹，其性能如下：

|                |               |
|----------------|---------------|
| 导弹 重：25kg      | 最大射程：4000m    |
| 导弹全长：1.2m      | 最大飞行速度：500m/s |
| 最大飞行时间：8s      | 初 速：150m/s    |
| 破甲威力：600~650mm |               |

## 二、西 德

西德“豹2”坦克装有120mm滑膛坦克炮，炮身材料采用真空冶炼技术和炮管采用自紧镀铬工艺。发射长杆式动能穿甲弹，最大膛压为540MPa，初速1650m/s。由于新技术的应用，该炮的穿甲威力和系统的命中精度目前仍占优势。发射正在研制中的DM33，DM43长杆动能弹将可穿透570~600mm厚的装甲钢板。在1500m距离上原地固定目标射击首发命中率为85%。行进间对运动目标射击首发命中率为65%。

## 三、美 国

美国“艾斯拉姆斯”坦克有一半装英国设计的M68E1式105mm线膛炮，一半装西德莱茵公司的120mm滑膛炮（美国为M256型）。装M256型火炮的坦克称M1A1坦克。

M256型火炮身管长为46倍口径，后坐部分重量为2253kg，配用XM827和XM829钕合金弹芯的长杆式动能弹。初速1650m/s，膛压600MPa，在2000m距离上命中率达80%。

## 四、英 国

英国“挑战者”坦克装备L11A5型120mm线膛炮。现在已由EXP M1高膛压火炮代替，该炮最大膛压556MPa，初速1600m/s。其特点是：炮管为电渣重熔钢的单层结构，用旋转锻造自紧工艺制成；采用全可燃药筒；楔式闭气炮门（膛压达617.6MPa时，机构能可靠的工作）；电发火。

其它如法国、瑞士等国的主战坦克均装120mm滑膛炮。有资料报导：AXM“勒克莱尔”坦克装CN120mm滑膛炮，其身管长7.15m，后坐部分重2620kg，发射长杆动能弹初速达1700m/s，最大有效射程3500m，发射与XM256型火炮相同的弹药。瑞士综合利用并引进西德先进技术，发展了紧凑型120mm坦克炮，穿甲威力达到较高水平。国外典型坦克炮基本诸元见表1.5。

表 1.5 国外典型坦克炮基本诸元

| 炮 种       | 苏 联<br>D <sub>1</sub> -81<br>2A46型滑膛炮 | 西 德<br>莱茵120滑膛炮    | 美 国<br>M256型<br>120滑膛炮 | 英 国<br>EXP32M <sub>1</sub><br>120线膛炮 |
|-----------|---------------------------------------|--------------------|------------------------|--------------------------------------|
| 基本诸元      |                                       |                    |                        |                                      |
| 口径(mm)    | 125                                   | 120                | 120                    | 120                                  |
| 炮身長(mm)   | 6350                                  | 5600               | (46d)                  |                                      |
| 初速(m/s)   | 1800                                  | 1650               | 1650                   | 1600                                 |
| 最大膛压(MPa) | 416                                   | 540                | 612                    | 567                                  |
| 弹重(kg)    | 5.67                                  | 7.2                | 7.2                    |                                      |
| 穿甲威力      | 1000米距离<br>穿14.5mm/69.5°              | 2200米距离<br>击穿北约三层靶 |                        |                                      |

我国在高膛压火炮研究方面也取得了很大的成绩，研制了新一代坦克炮和反坦克炮，其膛压、初速、穿甲威力等均有大幅度的提高。

### 第三节 高膛压火炮特点及发展趋势

高膛压火炮是以坦克为作战目标，那么它的所有特点都是为提高穿甲威力、提高首发命中率产生的，并将继续以此而发展。

#### 一、火炮口径不断增大

目前，苏联坦克炮口径已由115mm增大到125mm。西方国家将用120mm口径的坦克炮取代105mm坦克炮。尽管口径增大会增加后坐阻力，加大全弹尺寸，减少弹药基数，会给装填、操作带来不便，但火炮口径仍有增大的趋势。美国和其它国家已经在探讨140mm口径的火炮了。

#### 二、在使用新技术、研究新理论的基础上不断提高膛压

高膛压火炮身管普遍用新型炮钢材料、电渣重熔、身管自紧等新技术。例如：西德的120滑膛炮身管材料屈服极限强度可达1245MPa，允许设计膛压710MPa。西方国家在新理论指导下，将材料的断裂韧性列为炮钢的重要性能参数，并广泛开展断裂力学的研究工作，与身管自紧等先进工艺联系起来，正在探索“自紧应力对应力强度因子 $K_I$ 和裂纹扩展速率的影响”的课题，以便进一步提高火炮性能。

#### 三、配用新型长杆式动能弹

长杆式动能弹是目前公认最有效的穿甲弹种，各国均已装备并非常重视这种新型动能弹的研究。在弹体材料、弹丸结构方面均有新的突破。西德正在研究的第四代动能弹(DM43)，其长径比达34~35，而飞行弹径只有23mm，穿甲威力有显著提高，能穿透600mm厚的钢装甲。

#### 四、采用半可燃药筒或全可燃药筒

使用可燃药筒可充分利用药室空间，因为可燃药筒能以一定的当量做功，提高弹丸的初速。此外，无论半可燃药筒或全可燃药筒对坦克内射后药筒的处理都会带来方便。当然使用全可燃药筒有时必须使用闭气炮门，如像英国的L11A5型120mm线膛炮一样。

#### 五、采用身管热护套及火控系统

现代高膛压坦克炮普遍配有身管热护套和先进的火控系统，这将大大提高坦克炮的首发命中率。

#### 六、采用自动装填机

在提高坦克炮穿甲威力射击精度的同时，坦克炮的发射速度也是个重要指标。由前所述，由于火炮口径的增大，弹药尺寸增大会影响火炮的装填速度。苏联T-72坦克首先采用了分装式弹药自动装填机，为坦克的自动装填作出了先例，西方国家也正在研究并准备安装自

动装填机。

## 第四节 结 束 语

高膛压火炮的出现,使坦克炮的发展进入了一个新阶段,随之而来也带来了一些新的问题,如炮膛的燃蚀、身管的寿命等。例如美国膛压较高的火炮M68型105mm坦克炮开始研制时,身管寿命只有100发,经过改进寿命提高到430发,现在身管寿命尽管达到了500~800发,但是高膛压火炮寿命仍是目前使用中急待解决的大问题。为了抵抗高膛压火炮的穿甲威力,坦克的装甲防护也在发展和增强,这就使高膛压火炮面临着新的挑战,要求火炮不断提高膛压和初速,这样发射药的能量和爆温也会更高。因此炮膛烧蚀将会成为发展新一代高膛压火炮的障碍。目前各国特别是美国一直在研究火炮炮膛的防烧蚀技术。其它国家也在探讨耐热金属和合金镀层以进一步提高身管寿命,探讨并发展陶瓷衬管和无机纤维增强玻璃基复合材料衬套。可以预言,高膛压火炮技术将会一代一代的发展下去,不断取得新的突破,达到新的水平。

为了获得高初速低烧蚀的火炮,采用液体发射药技术将是从根本上改革火炮大幅度地提高火炮性能的重大技术措施之一。根据目前的技术预测,液体发射药的能量高(比固体发射药高30~40%),能获得较大的初速,烧蚀小。例如在120mm口径火炮上用胂基液体发射药作射击试验,平均初速可达2096m/s,而火焰温度可控制在2500K以下。目前美国、苏联、西德、日本等国对液体发射药技术相继开展了研究,并取得较大进展。

## 参 考 文 献

- [1] R.M.Ogorkiewicz: “主战坦克的最新研制动向和发展趋势” 坦克装甲车辆 第二期 1988。
- [2] 刘胜义译: “复合装甲和主动装甲” 外军炮兵 第三期 1987。

## 第二章 高膛压火炮内弹道

### 第一节 经典内弹道方程系回顾

膛内射击现象是个瞬息万变的热力学过程, 在短短的数毫秒内发生的化学物理现象有点火、燃烧、气体膨胀、弹丸运动、弹丸旋转、摩擦以及传热等。要用精确的数学物理模型来描述射击过程中的各种物理化学现象, 几乎是不可能的。为了分析问题和计算方便, 作为工程问题, 经典内弹道理论在作了一些粗略但成功的假设的基础上, 把射击过程中的基本现象归纳并用如下方程组来描述:

#### 一、火药气体状态方程

体现某瞬间火药气体各状态参量之间关系的阿贝尔—诺贝尔状态方程

$$P(V-\alpha)=RT \quad (2.1)$$

该方程仅考虑气体余容 $\alpha$ 的影响而忽略了分子间的相互作用力。式中 $P$ 、 $V$ 、 $T$ 分别为气体的压力、比容和温度,  $R$ 是单位公斤火药的气体常数。

#### 二、能量方程

体现射击过程中能量转换的能量方程

$$C_v \omega \phi (T_1 - T) = \Delta Q + \frac{\varphi}{2} m v^2 \quad (2.2)$$

式中 $C_v$ 为火药气体在射击过程中的平均定容比热,  $\omega$ 为装药量,  $T_1$ 是火药燃烧温度,  $\phi$ 是相对已燃量,  $\varphi$ 是次要功系数,  $m$ 、 $v$ 分别是弹丸质量和弹速,  $\Delta Q$ 是对膛壁的热散失。

从热力学得知定压比热 $C_p$ 和定容比热 $C_v$ 有如下关系

$$C_p - C_v = R$$

$$\frac{C_p}{C_v} = k$$

因此有

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{R}{\theta}$$

$k$ 是绝热指数,  $\theta = k - 1$

$\Delta Q$ 通常用降低火药力或增大 $\theta$ 的方法进行修正, 因此(2.2)式可化为如下简单形式

$$\frac{R \omega \phi (T_1 - T)}{\theta} = \frac{\varphi}{2} m v^2$$

而定义 $f = RT_1$ 为火药力, 因此上式变成

$$\omega \phi RT = f \omega \phi - \frac{\theta}{2} \varphi m v^2 \quad (2.2')$$

这就是经典内弹道计算中常用的能量方程。

### 三、弹丸运动方程

体现弹丸运动以及考虑各种次要功的弹丸运动方程

$$SP = \varphi m \frac{dv}{dt} \quad (2.3)$$

这是一个忽略了弹前气体阻力的运动方程， $S$ 是弹丸在膛内运动过程中承压截面积，也即身管内膛截面积。

### 四、火药气体生成定律

体现火药燃烧特性的气体生成规律的几何燃烧定律和燃烧速度定律。

对于几何燃烧定律，用三项式的形状函数 $\phi = f(Z)$ 来表示

$$\phi = \chi Z(1 + \lambda Z + \mu Z^2) \quad (2.4)$$

式中 $Z = e/e_1$ 是相对燃烧厚度， $e$ 是某瞬间火药已燃厚度， $2e_1$ 是火药起始厚度， $\chi$ 、 $\lambda$ 和 $\mu$ 是由火药药粒起始尺寸决定的药型系数。若火药是多孔火药，则必须考虑到分裂点前后药型系数的变化。

### 五、火药燃烧速度定律

对于燃烧速度定律，采用燃速为压力的函数 $de/dt = f(P)$ 形式

$$\frac{de}{dt} = u_1 P^v \quad (2.5)$$

式中 $u_1$ 是燃速系数， $v$ 是燃速指数，均为常量， $P$ 是燃烧时的环境压力。这是一个忽略了气流影响的燃速公式。

这五个方程组成了经典内弹道方程系。显然，方程的近似性决定了其适用的范围。经验表明，在常规火炮的压力速度范围内，该方程组得到了成功的应用。至今在内弹道研究及内弹道教科书中仍沿用上述方程组。

## 第二节 高膛压火炮的内弹道特点

六十年代以来特别是七十年代以后，高膛压、高初速火炮逐渐装备在各国军队中。坦克火炮和反坦克火炮的初速超过1600m/s、最大膛压超过500MPa的高膛压高初速火炮已比较普遍。高膛压高初速的特点对弹道的影响主要表现在以下几个方面：

1. 由于膛压的提高，要求装药量增多，火药气体的密度变大，气体分子间的相互作用逐渐增强。在密闭爆发器中，当火药气体密度从0.20kg/dm<sup>3</sup>变化到0.40kg/dm<sup>3</sup>时，内压强导致最大压力的下降量将从0.6%增大到1.9%。在膛内，这种分子间的内压强对弹丸运动起到的减压减速作用将会随着装药量的增多而日益明显。

2. 火药气体的比热比和定容比热是压力和温度的函数。例如，对于硝基胍火药来讲，当火药气体从3000K、500MPa的状态变化到2000K、100MPa时，比热比从1.19增大到1.24；定容比热从1469.6J/kg·K降到1381.6J/kg·K。因此在弹道计算中如继续使用同一的平均比

热和比热比,对弹道计算的影响也会随着压力的增高而变大。

3. 弹后气流速度随着弹丸速度的提高而加快。由于气流运动所引起的火药侵蚀燃烧也由此加剧。试验表明,当气流速度为152.4m/s时,燃速增加15%。这种侵蚀燃烧作用不仅影响膛压和初速,而且明显地影响着燃烧结束点位置,也影响p-t曲线的形状。

4. 弹前气体冲击波必然随着弹丸速度的增大而增强。它对弹丸运动起到的减速作用也会随着弹丸初速的提高而加强。当弹丸速度为1400m/s时,计算表明,弹前压力将会使初速下降1%左右。

随着压力和初速的提高,这些影响将日趋明显。下面几节将详细讨论这些问题。

### 第三节 高压下的火药气体状态方程

#### 一、状态方程的阐述

众所周知,所谓气体状态方程就是表征气体状态的状态参量之间的关系式。在不同的假设基础上得到的各种不同的状态方程均是对真实情况的一种逼近,其适用性要视理论计算和实验结果的符合程度而定,目前可列举的数百种状态方程均是如此。下面简单阐述一下几种主要的状态方程。

##### 1. 克拉伯龙方程

$$PV = RT$$

即理想气体方程。该方程在高温低压时适用。即在高温时忽略了分子间的相互作用,低压时忽略了分子本身的体积。确切地说,高温时分子间的相互作用势与分子本身的动能相比可以忽略;低压时分子间距离较大,因此相互作用势很小,而且由于密度很小,因此分子本身的体积与气体占有的整个体积相比可以忽略。

##### 2. 范得瓦尔方程

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - \alpha) = RT \quad (2.6)$$

其中 $a$ 是分子间互相作用系数,它与分子间的相互作用势有关,是温度的函数, $\alpha$ 是余容,这是一个既考虑了分子本身固有的体积,也考虑了分子间相互作用的状态方程。

##### 3. 克劳修斯方程

$$P(V - \alpha) = RT$$

这是一个在高温下忽略了 $a/V^2$ 项,即忽略了气体分子间相互作用势的范得瓦尔方程。称为克劳修斯方程。在内弹道中就是著名的阿贝尔-诺贝尔方程,在内弹道中应用最多。

##### 4. 卡麦林-昂尼斯方程

$$\frac{PV}{RT} = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \dots$$

这是一个由气体分子理论给出的真实气体状态方程,它有较严格的理论,其中 $B$ 、 $C$ ……称为第二、第三……维里系数,它们与分子间的相互作用势有关,是随温度而变的量,可由实验方法测得。若作一些假定,则 $B$ 、 $C$ ……可由理论上计算而得。在一般资料中所列出的二

级维里系数 $B$ 和三级维里系数 $C$ 是根据林纳德-琼斯 (Lennard-Jones) 势能模型计算的, 而四级维里系数 $D$ 和五级维里系数 $E$ 则是根据刚球模型求得。

## 5. 其他

除上述方程外, 大约还可以举例出150个以上的状态方程, 其中一部分是以理论概念为基础的, 但大多数都是将实验数据归纳而成。

## 二、高压下火药气体状态方程

不同的学者提出了不同的状态方程, 其中以昂尼斯方程最有理论根据。但此方程在描述气体状态时, 物理“直观性”不强, 数学形式也较繁。为了计算混合气体的维里系数而对各成份的同级维里系数进行叠加时会产生不小的误差。而半经验的范得瓦尔方程, 较好地描述了弱引力的气体状态。因此下面将着重讨论一下高压下的火药气体能否用范得瓦尔方程来描述以及分子间的互相作用对压力的影响程度。

### 1. 假定

在一般的分子物理及统计物理教材中都只讨论了分子间的两两作用, 即一个分子在某瞬间只和另一个分子发生作用, 亦即只讨论二级维里系数。如果要考虑三个分子的同时作用, 则要考虑三级维里系数。以此类推……为了大大简化计算, 在此仅考虑分子间的两两作用。

### 2. 分子间的相互作用势

范得瓦尔分子模型的作用势如图2.1所示。

这是一个弱引力的弹性刚球模型。

所谓弱引力的判据标准是当 $r > d$ 时,

$$|u|/KT \ll 1.$$

其中 $d$ 是分子直径,  $r$ 是两分子间的距离,  $u$ 是两分子间的相互作用势,  $K$ 是波尔兹曼常量,  $T$ 是气体的绝对温度。

余容 $a$ 与分子间的排斥能相对应, 分子的直径 $d$ 不是确定的, 而只是一个依赖于斥力定律以及相对速度的有效直径, 因而也就与温度有关。有效直径是平动动能等于斥力势能时的分子间的距离, 因此当温度增高时, 有效直径将变小, 亦即余容变小。内压强 $a/V^2$ 与分子间的引力相对应, 这种引力的主要贡献是来自伦敦 (London) 色散能。排斥能与色散能有各种表示形式, 在这里我们采用林纳德-琼斯表达式。

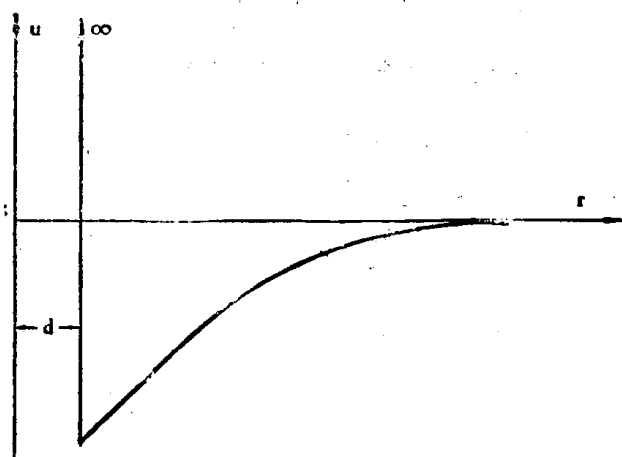


图 2.1 范得瓦尔分子模型的作用势

$$a = a_0 \left( \frac{4\theta_1}{T} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.7)$$

式中 $\theta_1$ 是互作用温度,  $\alpha_0$ 是慢分子余容。

考虑分子两两作用时, 一对非极性分子间的相互吸引能为

$$u = -4k\theta_1 \left(\frac{D}{r}\right)^6$$

式中 $D$ 是慢分子碰撞直径。

在火药气体产物中,  $H_2O$ 是极性分子, 其余均为非极性分子。由于火药气体温度较高, 因此分子的转动自由度已充分激发, 两个固有偶极矩之间偶极性吸引和偶极性排斥由于两个偶极矩的无规则取向而平均掉了, 这样可以不考虑极性分子的固有偶极矩相互作用, 因此同种气体分子间的相互作用均采用普通的林纳德一琼斯表达式。

### 3. 用范得瓦尔方程来描述火药气体

火药气体的主要成份是 $CO_2$ 、 $CO$ 、 $H_2O$ 、 $H_2$ 和 $N_2$ , 燃烧温度在2500~3100K左右。通过计算可知, 当我们采用林纳德一琼斯势能表达式时, 在最大压力为600MPa左右, 温度为爆温时处于平均距离的一对分子间的相互作用势与其动能相比为

$$\frac{|u|}{KT} = 1.5\% \ll 1$$

因此只考虑分子两两作用情况下的火药气体, 可用范得瓦尔方程来描述其状态。

那么, 只考虑分子的两两作用, 是否能“真实”地代表火药气体的状态呢? 实验表明, 用范得瓦尔方程来描述 $P=100\text{MPa}$ 、 $T=273\text{K}$ 的氮气状态时, 其误差为1.7%, 此时氮气的密度为 $0.6\text{kg/dm}^3$ 左右。因此我们完全有理由认为, 用范得瓦尔方程来描述密度为 $0.40\text{kg/dm}^3$ 、温度为1000~3000K的火药气体状态时, 其误差只会比1.7%小, 因为此时分子间的势能更是远小于分子的动能。再者, 计算表明, 在压力为600MPa左右时, 用范得瓦尔方程和用精确到五级维里系数的昂尼斯方程来描述火药气体的状态时, 其精度是一致的。

### 4. 范得瓦尔方程的内压项计算

在(2.6)式即范得瓦尔方程中,  $a/v^2$ 即为考虑分子互作用的内压项, 它等于分子的相互作用能密度的绝对值, 即

$$P_i = \frac{a}{V^2} = \frac{|U|}{V} = \frac{W}{V}$$

式中 $U$ 为公斤气体的相互作用势,  $W = |U|$ 。

下面来计算公斤火药气体的相互作用势。

在林纳德一琼斯势中, 异类分子间的参量 $D_{ij}$ 与 $\theta_{ij}$ , 可用同类分子的 $D_i$ 、 $\theta_i$ 和 $D_j$ 、 $\theta_j$ 以如下规则表示

$$D_{ij} = \frac{1}{2}(D_i + D_j)$$

$$\theta_{ij} = \sqrt{\theta_i \theta_j}$$

分子间的平均距离  $r = \sqrt[3]{\frac{V}{N}}$ , 其中 $N$ 为公斤火药气体中的总的分子数。在一公斤火药气体

中, 每种成份的克分子数为 $n_i$  ( $i=1, 2, \dots$ ), 那么每个分子所具有的势能近似为

$$u_i = \sum_{j=1} \chi_j \frac{u_{ij}}{2}$$

式中  $\chi_j = n_j / \sum n_j$

因此整个系统的势能为

$$U = \sum N_i u_i = \sum N_0 n_i u_i$$

式中  $N_0$ ——阿佛伽德鲁常数

当 $u_{ij}$ 采用林纳德—琼斯形式时,

$$\begin{aligned} U &= N_0 \sum_i n_i \left( \sum_j \chi_j \frac{u_{ij}}{2} \right) \\ &= \frac{N_0}{2} \sum_i n_i \sum_j \chi_j \left[ -4 K \theta_{ij} \left( \frac{D_{ij}}{r} \right)^6 \right] \\ &= -\frac{C}{V^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

其中  $C = 2KN_0^3 n^2 \sum_i n_i \sum_j \chi_j \theta_{ij} D_{ij}^6, \quad n = \sum_j n_j$

这样, 根据热化学计算出火药气体成份, 根据(2.8)式便可计算出范得瓦尔方程中的内压项。以单基药为例, 在不同火药气体密度下的内压值如表2.1所示。

表 2.1 单基药气体在不同密度下的内压值

| $\Delta(\text{kg/dm}^3)$                          | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 |
|---------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $P_i (10^5 \text{ Pa})$                           | 0.2  | 2    | 6    | 15   | 29   | 51   | 81   | 120  | 171  |
| $P = \frac{f\Delta}{1-2\Delta} (10^5 \text{ Pa})$ | 500  | 1056 | 1675 | 2375 | 3167 | 4071 | 5115 | 6333 | 7773 |
| $P_i/P\%$                                         | 0.04 | 0.19 | 0.36 | 0.63 | 0.92 | 1.25 | 1.58 | 1.89 | 2.20 |

从表中可看出, 随着火药气体密度的增大, 由于气体分子间互作用引起的内压将变得不可忽略。

由(2.7)式来计算余容, 也可根据在爆温 $T_1$ 时所测得的余容 $\alpha_1$ 来计算温度 $T$ 时的余容值 $\alpha$ :

$$\alpha = \alpha_1 \left( \frac{T_1}{T} \right)^{\frac{1}{4}}$$

#### 第四节 密闭爆发器高压试验时的压力修正

为了研究火药在高压燃烧时的特性, 如火药力和余容的变化, 燃速的改变等, 必须进行高压燃烧的实验研究。作为静态试验, 密闭爆发器仍是一个主要的实验手段。本节主要介绍密闭爆发器在高压试验时的压力修正问题。