

炮身设计

PAOSHENSHEJI

潘玉田 主编



兵器工业出版社

炮身设计

主 编：潘玉田

副主编：郭保全 马新谋 郭张霞

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书是作者在多年从事火炮专业教学和科研的基础上编写的。全书共分四篇 10 章内容:第一篇共分 4 章,讲述的是单筒炮身设计(炮身设计的基本知识、内膛结构和设计、单筒身管设计、炮尾结构设计);第二篇为 1 章,讲述的是活动衬管(身管)炮身设计(活动衬管和活动身管炮身设计);第三篇共分 2 章,讲述的是增强身管设计(筒紧身管设计、自紧身管设计);第四篇共分 3 章,讲述的是炮身设计的其他问题(身管寿命问题、炮身的振动与弯曲、身管的发热与冷却)。

本书可作为高等院校或军队院校相关专业本科生和研究生的必修课或选修课教材,也可供院校教学科研人员、科研院所和机关工作人员及兵工企业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

炮身设计/潘玉田主编. —北京:兵器工业出版社,
2007. 4

ISBN 978 - 7 - 80172 - 839 - 5

I. 炮… II. 潘… III. 炮身—设计 IV. TJ303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 024233 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:华北工学院印刷厂

版 次:2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1—650

责任编辑:李翠兰

封面设计:李 晖

责任校对:郭 芳

责任印制:赵春云

开 本:787×1092 1/16

印 张:21.25

字 数:515 千字

定 价:40.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

本书是作者在多年从事火炮专业教学和科研的基础上编写的。全书共分为四篇 10 章内容:第一篇共分 4 章,讲述的是单筒炮身设计(炮身设计基本知识、内膛结构与设计、单筒身管设计、炮尾结构设计);第二篇为 1 章,讲述的是活动衬管(身管)炮身设计(活动衬管和活动身管炮身设计);第三篇共分 2 章,讲述的是增强身管设计(筒紧身管设计、自紧身管设计);第四篇共分 3 章,讲述的是炮身设计的其他问题(身管寿命问题、炮身的振动与弯曲、身管的发热与冷却)。

本书的第一篇、第三篇和第四篇的身管寿命为潘玉田同志所编写,第四篇的炮身振动与弯曲为郭保全同志所编写,第四篇的身管的发热与冷却为马新谋同志所编写,第二篇的活动衬管和活动身管炮身设计为郭张霞同志所编写。

在本书的编写过程中,研究生田伟鹏、胡会芳、彭顺、汤长俊同志参与了编写工作,在此对他们表示谢意。

由于时间仓促和我们水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

2006 年 12 月

于中北大学

目 录

第一篇 单筒炮身设计	1
第1章 炮身设计基本知识	3
1.1 炮身的组成和分类	3
1.2 发射时炮身的受力分析	8
1.3 身管设计采用的内压规律	12
1.4 对高低温压力曲线的讨论	17
1.5 高低温压力曲线的计算	20
1.6 高低温压力曲线计算举例	24
1.7 身管应力应变分析——厚壁圆筒理论	28
第2章 炮膛结构设计	37
2.1 药室的结构	37
2.2 确定药室结构时应注意的问题	42
2.3 膛线的分类和结构	43
2.4 发射时膛线的受力	46
2.5 炮口缠度和膛线曲线的确定	48
2.6 膛线参量的确定及其强度验算	51
2.7 膛线导转弹丸存在的问题	55
第3章 单筒身管设计	57
3.1 单筒身管弹性强度极限	57
3.2 单筒身管弹性强度极限与壁厚的关系	70
3.3 安全系数	72
3.4 身管材料和理论强度曲线	75
3.5 身管外形的设计	78
3.6 单筒身管设计的一般程序	83
3.7 单筒身管设计举例	84
第4章 炮尾结构和设计	91
4.1 概述	91
4.2 发射时作用在炮尾上的力	93
4.3 炮尾前室的强度计算	95
4.4 楔式炮尾闭室部的强度计算	100

第二篇 活动衬管(身管)炮身设计	109
第5章 活动衬管和活动身管炮身设计	111
5.1 概述	111
5.2 发射时活动衬管(活动身管)炮身受力分析	112
5.3 活动衬管(活动身管)炮身的强度极限	115
5.4 间隙的确定	117
5.5 举例	119
第三篇 增强身管设计	123
第6章 筒紧炮身设计	125
6.1 概述	125
6.2 筒紧身管的紧缩量	126
6.3 筒紧身管的应力、应变分析	129
6.4 筒紧身管的弹性强度极限	133
6.5 筒紧身管的计算方法	137
6.6 筒紧身管计算举例	141
第7章 自紧炮身设计	145
7.1 概述	145
7.2 自紧身管的应力状态	149
7.3 自紧身管的基本计算	155
7.4 不同屈服条件下的自紧压力、应变、位移公式	169
7.5 残余应力的计算和测定	173
7.6 考虑鲍辛格效应和机械加工影响因素的液压自紧身管设计	185
7.7 高效液压自紧技术	209
7.8 自紧技术的几个有关问题	218
7.9 闭式液压自紧法的模具设计	221
7.10 机械自紧冲头设计	223
7.11 自紧身管的设计方法	227
第四篇 炮身设计的其他问题	237
第8章 身管寿命问题	239
8.1 身管内膛破坏特点和身管寿命标准	239
8.2 炮膛烧蚀磨损现象分析	247
8.3 影响炮膛烧蚀磨损的因素	250
8.4 提高身管寿命的措施	257
第9章 炮身的振动与弯曲	265
9.1 径向振动	265

9.2	横向振动	268
9.3	扭转振动	275
9.4	定起角	276
9.5	计算举例	286
第 10 章	身管的发热与冷却	289
10.1	热交换与热弹性理论的现状和主要问题	289
10.2	温度场计算概念	290
10.3	射击过程中身管的发热	292
10.4	身管发热对射击密度和精度的影响	308
10.5	身管的冷却	309
10.6	平面应变状态下的温差应力	315
10.7	发热不均匀身管的轴向和径向应力	322
附录 A	系数 α 表	325
附录 B	系数 β 表	328

第一篇 单筒炮身设计

第 1 章 炮身设计基本知识

炮身是火炮的一个主要部件，包括身管、炮尾、炮闩等零件。它的主要作用是承受火药气体压力和导引弹丸的运动。

炮身设计主要包括：强度设计和结构设计。结构设计又包括膛内结构设计和外形结构设计。膛内结构设计要保证满足内、外弹道对炮身提出的各个参量（如口径、弹丸行程、药室容积、炮口缠度等的要求和使炮膛结构合理）。外形结构设计主要考虑炮身各个零件的连接，炮身同摇架、反后坐装置的连接以及火炮总体对炮身质量、质心的要求等。

炮身强度是炮身设计的一项基本任务。本章除了介绍炮身组成和分类外，主要是介绍身管设计的基本知识，即对膛内压力分布规律以及厚壁圆筒理论进行讨论。

1.1 炮身的组成和分类

1.1.1 炮身的组成

炮身主要的组成零件是：身管、炮尾和炮闩，如图 1.1 所示。

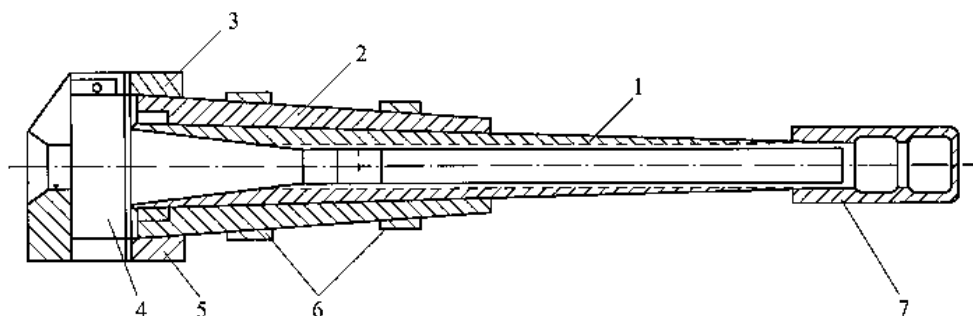


图 1.1 炮身的组成

1—身管；2—被筒；3—制转键；4—闩体；5—炮尾；6—导箍；7—炮口制退器

身管是炮身的主要零件，发射时承受高温高压高速火药气体的作用。炮闩、炮尾共同承受火药气体向后的作用力并使炮身后坐。它们还同药筒或紧塞装置一起，在发射时可靠地密闭火药气体，防止火药气体由后方泄漏出来。采用炮闩可使炮弹能从后方装填，并在发射后由后方抽出药筒，以便进行下一次发射。炮闩主要由闩体、开门机构、关门机构、击发装置和抽筒装置组成。有的炮身上还带有被筒。被筒和身管有些是有过盈的套合，有些是有间隙的套合。可以设计成在发射时使其间隙消失（此时被筒也承受压力的作用）；也可以设计成在发射时不使其间隙消失。被筒还起到身管同炮尾的连接作用（关于被筒的作用将在炮身分类中讨论）。对单筒炮身来说，身管同炮尾可以用螺纹或断隔螺纹连接（如 55 式 37mm 高射炮），也可通过连接筒连接（如 56 式 85mm 加农炮和 59 式 100mm 高射炮）。发射时身管导引

弹丸右旋，使身管受到一个左旋力矩的作用。为防止发射时身管相对于炮尾转动在二者之间设有一制转键。由于后坐和复进的需要，炮身上需要有相应的结构，如 76mm 加农炮炮身上的导箍、65 式 37mm 高射炮复进机的定向环，以及 56 式 85mm 加农炮身管上的光滑圆柱面等。

炮口制退器通常用螺纹固定于身管口部，它的作用是在弹丸飞出炮口后，使一部分火药气体通过炮口制退器侧孔喷出，产生与后坐相反的作用力，从而减小发射对炮架的作用力。

有些火炮的炮身还有抽气装置和热护套。

1.1.2 炮身的分类

在设计上通常采用下述两种分类法：一种是按炮膛的结构来分；另一种是按身管结构来分。按前一种方法，炮身可以分为线膛炮身（图 1.1）和滑膛炮身（图 1.2）。

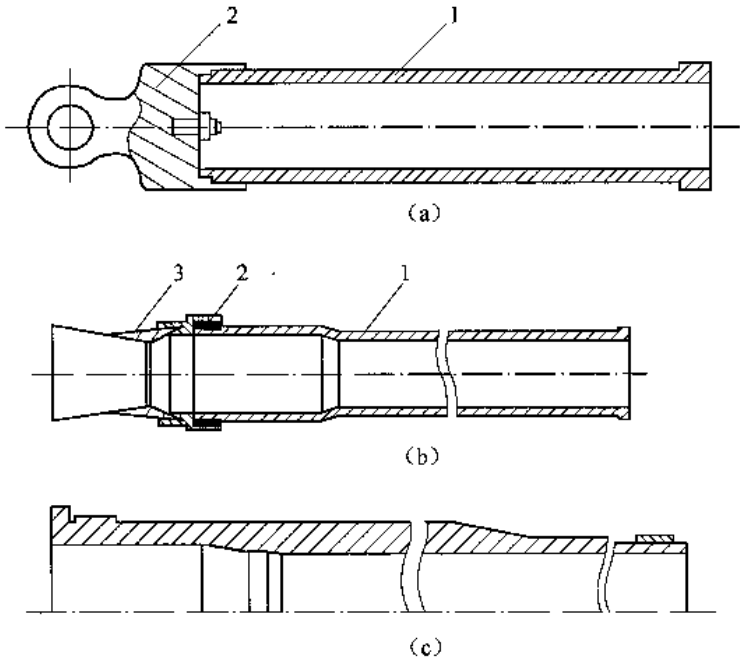


图 1.2 滑膛炮炮身
(a) 迫击炮炮身；(b) 无后坐炮炮身；(c) 反坦克滑膛炮身
1 - 身管；2 - 炮尾；3 - 喷管

线膛炮炮身使弹丸产生高速旋转运动，以保证弹丸的飞行稳定性。它的炮膛一般由药室、坡膛和线膛三个部分组成。坡膛是弹丸导转部（弹带）开始切入膛线的部位。通常将药室和坡膛统称为药室部，所以线膛炮身的内膛一般是分为线膛部和药室部两部分。滑膛炮身的炮膛由光滑的圆柱面和圆锥面组成。滑膛炮身目前主要用于迫击炮、无后坐炮滑膛反坦克炮和坦克炮。无后坐炮药室有扩大部，而且药室后面有喷管，发射时一部分火药气体经喷管向后喷出，达到动量平衡，使炮身不产生后坐。滑膛反坦克炮的内弹道参量和炮膛结构基本上和一般线膛炮一样，只是没有膛线，弹丸依靠尾翼稳定，在发射次口径箭形穿甲弹时，初速可以达到 1500m/s 左右。

炮身按照身管的结构分类有：单筒炮身、紧固炮身和衬管炮身 3 类。

1. 单筒炮身

这类炮身的身管由一个毛坯制成，它结构简单，加工方便，因而得到了广泛的应用。目

前制式火炮中大部分炮身都是单筒炮身，如 85mm 加农炮，37mm、57mm、100mm 高射炮以及各种迫击炮和无后坐炮等等。单筒炮身发射时，内层产生的应力很大，而外层的应力很小。也就是说，外层材料没有得到充分利用。对高压大威力火炮来说，采用单筒炮身，必须增加壁厚和采用高强度炮钢材料等技术措施，这对火炮的使用和生产都是不利的。

2. 紧固炮身

采取工艺措施使身管内层产生与其工作时方向相反的应力（预应力），外层产生与工作时方向相同的应力。发射时由于预应力的存在，身管内层的最大应力降低，外层的应力则提高，整个身管应力的分布趋于均匀一致，因而可以在同样壁厚、同样材料的条件下，使身管能承受更大的内压。我们把这种炮身称为紧固炮身。由于产生预应力的方法不同，紧固炮身又可分为以下 3 类：

(1) 筒紧炮身

身管由两层或多层同心圆筒过盈地套合在一起，这样内筒存在与发射时方向相反的应力，外筒存在与发射时方向相同的应力，从而提高了身管的强度，两层筒紧身管的结构见图 1.1。身管内、外筒多用外筒加热和内筒冷却的方法套合在一起。这种炮身的层数越多，其径向应力分布越均匀，因而强度提高亦越多，但工艺上也越复杂。过去由于炮钢强度较低，这种身管曾得到过较多的采用。现在为了减轻某些大威力火炮身管的质量以及一些特殊需要，这种身管又开始得到了采用。

(2) 丝紧炮身

它以一定的拉力将钢丝（带）缠绕在钢制的衬管上，使衬管（内管）产生预应力，以此来提高身管的强度，这种炮身叫做丝紧炮身。因为钢丝拉力较易控制，这样就可使整个身管的应力分布均匀合理。这种控制多采用矩形断面钢丝或特殊断面的钢带绕制。绕制原理如图 1.3 所示，其中重锤用以产生所要求的钢丝拉力。因为丝紧身管的纵向刚度较差，所以通常在身管外面再加上一个被筒以提高刚度，如图 1.4 所示。这种炮身使用较少，但为了减轻迫击炮和无后坐炮身管的重量，国外有在薄壁内管上用钢丝缠绕、外层用玻璃或其他材料增强的试验性身管。

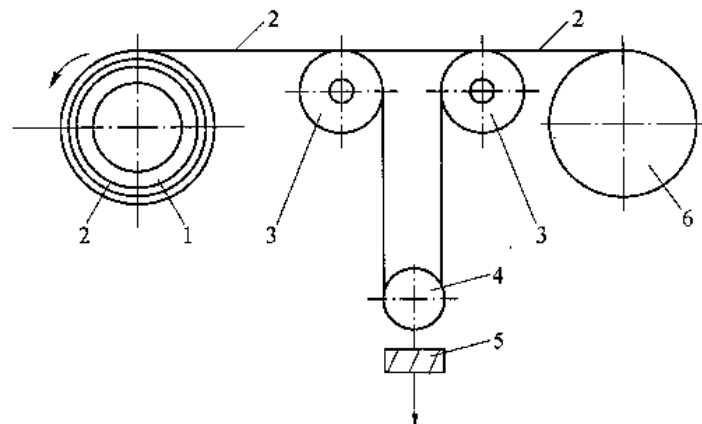


图 1.3 丝紧身管缠绕钢丝原理

1 - 身管；2 - 钢丝；3 - 定滑轮；4 - 动滑轮；5 - 重锤；6 - 钢丝卷筒

因为丝紧身管的纵向刚度较差，所以通常在身管外面再加上一个被筒以提高刚度，如图 1.4 所示。这种炮身使用较少，但为了减轻迫击炮和无后坐炮身管的重量，国外有在薄壁内管上用钢丝缠绕、外层用玻璃或其他材料增强的试验性身管。

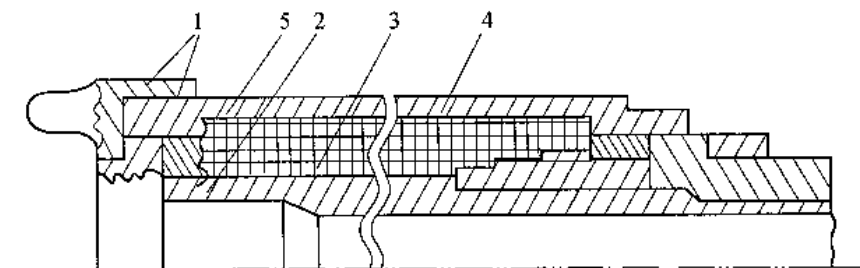


图 1.4 丝紧炮身

1 - 炮尾；2 - 身管；3 - 钢丝；4 - 被筒；5 - 钢丝头固定环

我国一些石油化工厂和化肥厂所用的高压容器，比较广泛地采用了丝紧结构，有绕带式高压容器和扁平钢带式高压容器等。为了提高容器的纵向刚度和强度，通常采用倾角为 $26^{\circ} \sim 31^{\circ}$ 的斜绕法，这种方法可供设计丝紧炮身时参考。

(3) 自紧身管（自增强身管）

这种身管结构同单筒身管完全一样，但在制造时对其膛内施以高压，使身管由内到外局部或全部产生塑性变形。在高压去掉以后，由于各层塑性变形不同，造成外层对相邻内层产生压应力，即内层受压、外层受拉，就像无数层筒紧身管一样，因而可以使身管强度提高。对内壁施加高压的方法一般有液压法、冲头挤扩法和爆炸法等。由于此种身管结构简单，加之自紧工艺不断改进，在国外一些新设计的火炮中得到了广泛的应用。

3. 活动衬管（活动身管）炮身

随着火炮初速、膛压、射速的提高，炮膛的烧蚀、磨损问题变得日益严重。烧蚀、磨损造成火炮膛压、初速和射击密集度的下降，最终使火炮寿命终止。这个问题在大口径、高初速的加农炮和小口径自动炮中表现得非常突出。解决这个问题的一個方法是，把身管做成内、外两层，在内层寿命结束后，可换上一个新的内管使火炮恢复原有的战斗性能。

为了保证内管更换方便，在内、外管之间留有一定的间隙。在发射时由于内管膨胀，间隙消失，因而外筒也承受内压的作用。此种炮身又可以分为活动衬管炮身（被筒全长覆盖）和活动身管炮身（被筒在身管尾部一定长度上覆盖），这两种炮身分别如图 1.5 和图 1.6 所示。

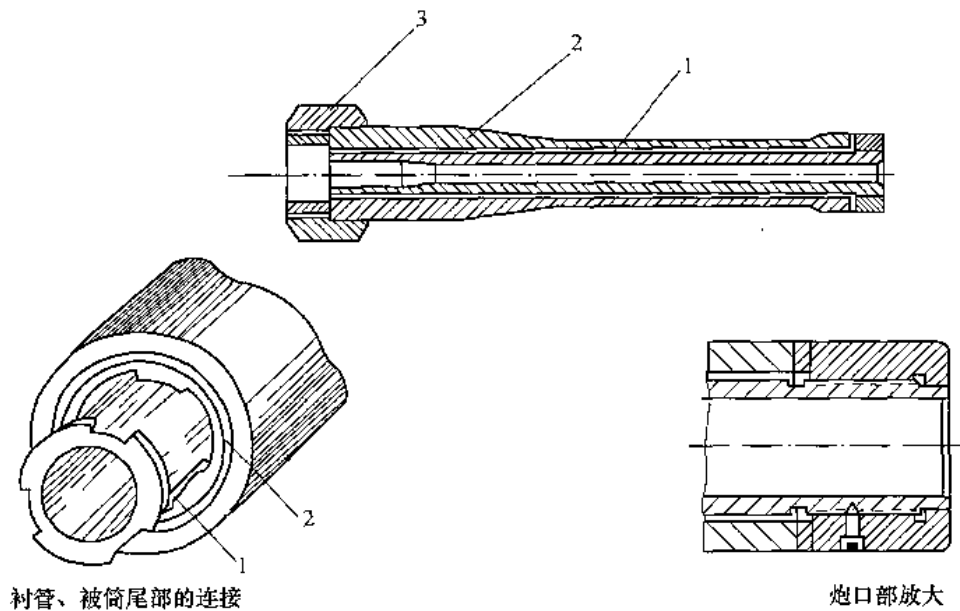


图 1.5 活动衬管炮身
1 - 活动衬管; 2 - 被筒; 3 - 炮尾

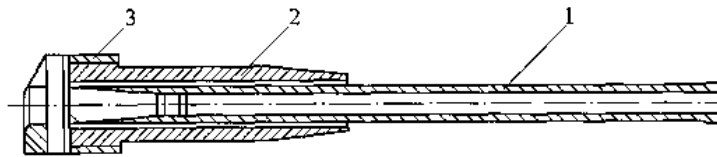


图 1.6 活动身管炮身
1 - 活动衬管; 2 - 被筒; 3 - 炮尾

另外有一种活动身管炮身，其被筒和身管之间留有较大的间隙，发射时被筒并不承受内压的作用。采用被筒的目的是为了增加火炮后坐部分的质量。由反后坐装置原理可以知道，后坐部分质量的增加将使发射对火炮的作用力减小，因而可以减轻炮架质量。我们把这种炮身叫做带被筒的单筒炮身，例如 54 式 122mm 榴弹炮采用的就是这种炮身，其结构如图 1.7 所示。

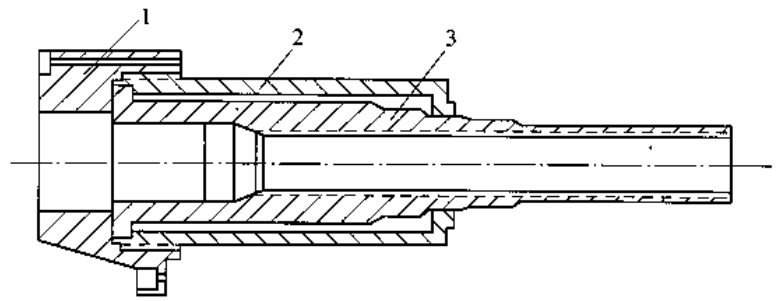


图 1.7 带被筒的单筒炮身
1 - 炮尾；2 - 被筒；3 - 身管

实践表明，炮膛烧蚀比较严重的部位，仅在由膛线起始部向炮口方向大约 10 倍口径左右的长度上，为此而更换整个内管是不合算的，于是出现了短衬管炮身，例如 69 式双管 30mm 海军炮就采用了短衬管炮身。图 1.8 就是这种炮身的一种方案。衬管的材料可以采用高强度炮钢或是特殊的耐热合金。在设计这种衬管时，要考虑更换方便和膛线准确对正的问题。有的筒紧炮身也采用耐热合金的短衬管，但衬管同身管是过盈配合在一起，衬管不能更换。

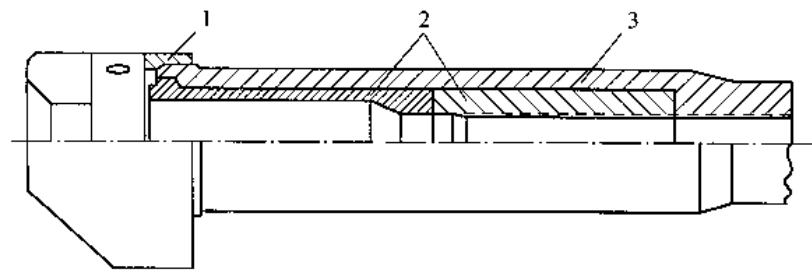


图 1.8 短衬管炮身
1 - 炮尾；2 - 组合衬管；3 - 身管

炮身按结构的分类及其特点可以综合如下表：	
炮身	单筒炮身：身管由一个毛坯制成，工艺简单。
	紧固炮身
	筒紧炮身：内外筒过盈套合。
	丝紧炮身：钢丝（带）紧绕在内管上。
	自紧炮身：用使壁内产生塑性变形的办法在壁内产生与发射时方向相反的预应力。
活动衬管（身管）炮身	活动身管炮身：被筒局部覆盖。
	活动衬管炮身：被筒全长覆盖。
	短衬管炮身：在膛线起始部向前一段长度上有衬管。
	带被筒的单筒炮身：发射时被筒与内管的间隙不消失。

1.2 发射时炮身的受力分析

火炮发射时, 高压、高温、高速火药气体推动弹丸向前运动, 同时使炮身后坐。炮身在发射时承受径向、轴向和切向三个方向的力和矩。径向作用力主要由身管本身承受, 而轴向合力(炮膛合力)和切向力和矩则通过反后坐装置、摇架等传递到炮架上去。分析炮身受力的目的在于解决全炮受力和强度设计等问题。下面以炮身为受力对象, 就这三个方面的作用力进行分析。

1.2.1 径向作用力

此力主要由两个部分组成, 即火药气体对身管壁的压力和弹丸的径向作用力。火药气体的径向压力为身管强度设计的主要依据, 它的规律在下一节中将要进行研究。弹丸对身管的径向作用力主要是指弹带(弹丸导转部)对身管的径向作用力 F_r 及弹丸定心部对膛壁的作用力。

弹带在开始切入膛线时, 弹带对膛壁产生很大的径向作用力, 随着弹带的挤进, 此径向作用力迅速减小。弹丸在膛内加速运动时, 由于弹丸旋转及质量分布不均匀, 会使弹带对膛壁的作用力加大(在炮口附近有较大的数值)。弹带对膛壁径向作用力的规律如图 1.9 所示。

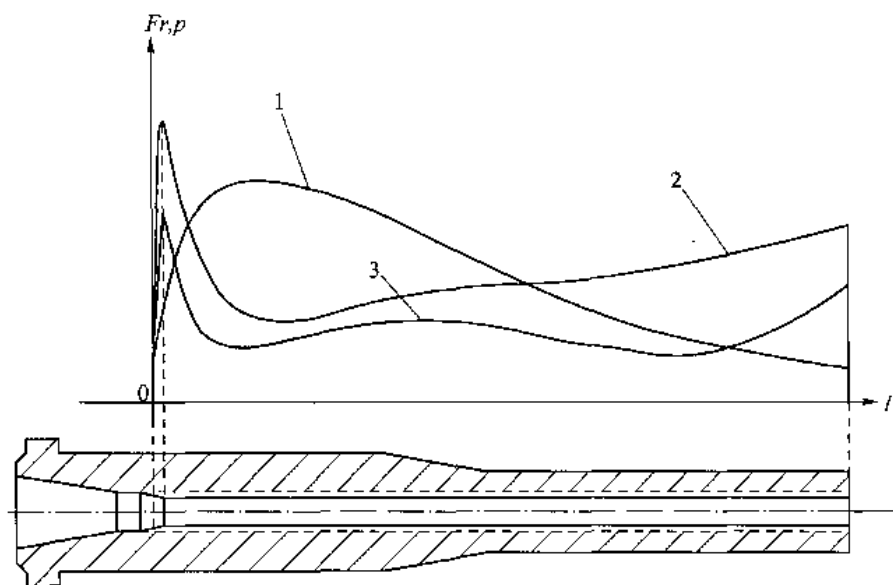


图 1.9 弹带对膛壁的作用力

1 - 膛压曲线; 2 - 穿甲弹; 3 - 杀伤爆破弹

由图 1.9 中可以看出, 弹带挤入膛线时的径向作用力有可能超过膛内最大压力; 穿甲弹的弹体壁较厚, 对身管的径向作用力比弹体壁较薄的杀伤爆破榴弹更大一些。弹带对膛壁的径向作用力对身管强度有一定的影响, 但它的作用是局部的, 而且没有适当的工程计算方法求出其数值, 因而它对身管强度的影响只能在安全系数选择上给以考虑。由于弹丸与炮膛之间的不同心和间隙的存在, 火药气体对弹丸作用的合力不通过弹丸质心, 因而会引起定心部对膛壁的作用。此外, 长身管的火炮因有身管静力弯曲, 弹丸在膛内实际上做曲线运动, 因

而弹丸产生离心力，作用于身管弯曲的半径方向，将引起身管的横向振动，这对火炮的射击精度、密集度有一定影响。

1.2.2 轴向作用力

发射时，炮身承受的轴向作用力包括炮膛合力 P_{pt} 、惯性 J 、驻退机和复进机的作用力 R_d 和 R_f ，以及炮身同摇架间的摩擦力 R_f 等，如图 1.10 所示。弹丸在膛内运动时期，炮膛合力 P_{pt} 由以下各力合成：弹带对炮膛作用力的轴向分力 F_z 、火药气体对药室底部的作用力 P_b 、火药气体对药室锥面作用力的轴向分力 P_k 。在弹丸出炮口后的一段时间内有炮口制退器产生的拉力 R_T 。在研究这些作用力时必须注意作用部位、时间和方向。下面对上述各作用力分别进行讨论。

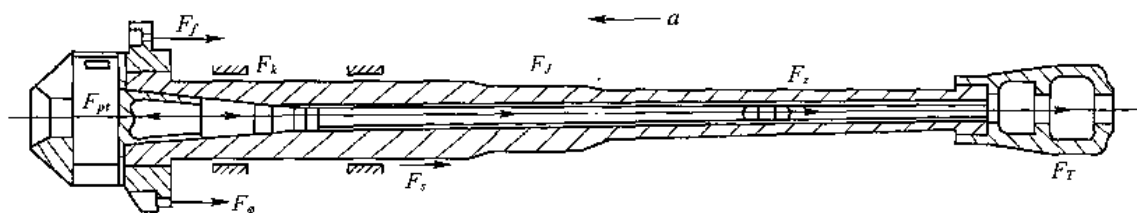


图 1.10 炮身轴向作用力

1. 炮膛合力 P_{pt}

(1) 弹带对炮膛的轴向作用力 F_z

现以弹丸为示力对象（参看图 2.18），则各条膛线和弹带的相互作用力为导转侧正压力 N 和沿膛线的摩擦力 fN 。 N 、 fN 在炮膛轴线方向的投影之和即为弹带对炮膛的轴向作用力 F_z 。若以炮身为示力对象时，则 F_z 的方向指向炮口，其计算式为：

$$F_z = nN(\sin\alpha + f\cos\alpha) \quad (1.1)$$

式中： N ——每条膛线导转侧压力；

n ——膛线数目；

α ——膛线缠角；

f ——弹带同膛线之间的摩擦系数，它随着弹丸速度的增高而减小，一般取 $f=0.1$ 。

通常 $F_z \leq 0.02p_m \cdot S$ ，其中 p_m 为药室底部的火药气体最大压力（膛底最大压力）；

S 为炮膛断面积，可用下面近似公式计算

$$S = \frac{\pi}{4} \frac{ad^2 + bd_1^2}{a+b}$$

式中： d ——身管阳线直径，即口径；

d_1 ——身管阴线直径，若令 t 为膛线深度，则 $d_1 = d + 2t$ ；

a ——阳线宽度；

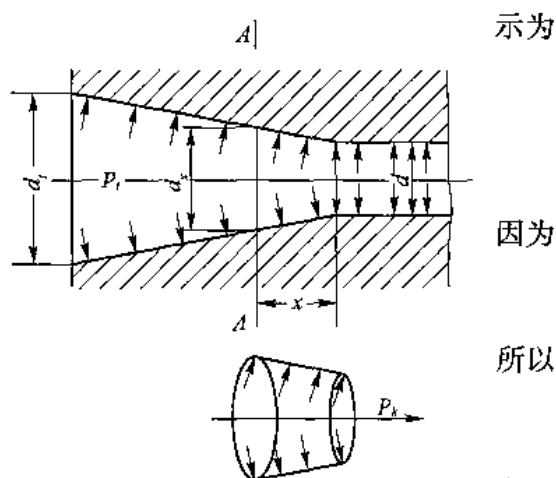
b ——阴线宽度。

弹带轴向作用力 F_z 作用在药室底到弹丸膛内位置之间的一段身管上。

(2) 药室锥面产生的轴向力 P_k

药室部有锥度，火药气体垂直于锥面的作用力有一个沿身管轴向的分力。图 1.11 为药室锥面轴向力的示意图。设线膛部的相当直径为 d ，其截面积为 S 。在药室上取任一垂直截

面 $A-A$ ，由此截面向炮口方向的圆锥段长为 x ，截面的内直径为 d_x ，其相应面积为 S_x 。在此圆锥段药室壁上作用着垂直于表面的内压 p_t （即认为是膛底压力）。此截锥体的回转表面积为 $\frac{\pi}{2} (d_x + d) \times \frac{x}{\cos \alpha}$ ，其中 α 为药室锥面倾角。此面积上作用力的轴向分力为 P_{kx} ，可表示为



$$P_{kx} = \frac{\pi}{2} (d_x + d) \frac{x}{\cos \alpha} \sin \alpha \cdot p_t$$

$$= \frac{\pi}{2} (d_x + d) x \tan \alpha \cdot p_t$$

因为

$$x \tan \alpha = \frac{1}{2} (d_x - d)$$

所以

$$P_{kx} = p_t \frac{\pi (d_x^2 - d^2)}{4}$$

即

$$P_{kx} = p_t (S_x - S) \quad (1.2)$$

可以看出，药室锥面的轴向作用力 P_k 存在于身管药室部的各个断面上，方向指向炮口，而且它随着 x 的增大而增加，即愈靠近尾部其数值愈大，在尾端面处有最大值

$$P_k = p_t (S_t - S) \quad (1.3)$$

式中： p_t ——药室底部的火药气体压力（膛底压力）；

S_t ——药室底面积，如用 d_t 表示药室底的直径，则 $S_t = \frac{\pi}{4} d_t^2$ 。

(3) 炮口制退器对身管产生的拉力 R_T

对于具有炮口制退器的炮身，在弹丸飞出炮口以后，火药气体通过炮口制退器对身管产生向前的拉力 R_T ，阻止炮身的后坐。此力作用于全身管上，其大小可以由式 (1.4) 求出

$$R_T = (1 - x) p_g \cdot S \quad (1.4)$$

式中： x ——炮口制退器的冲量特征量， $1 \geq x > -1$ ；

p_g ——炮口压力。

在炮口制退器拉力 R_T 作用时，弹丸已脱离炮膛。在身管设计中 R_T 用以校核炮口联结螺纹的强度。

下面我们讨论一下炮膛合力 P_{pt} ：

弹丸膛内动力时期

$$P_{pt} = P_t - P_k - F_x$$

式中： $P_t = p_t \cdot S_t$ 。

由式 (1.3)

$$P_k = p_t (S_t - S)$$

所以

$$P_{pt} = p_t \cdot S - F_x \quad (1.5)$$

因为