



孔德仁 狄长安 范启胜 著

塑性测压技术

SUXINGCEYAJISHU

兵器工业出版社

塑性测压技术

孔德仁 狄长安 范启胜 著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书以塑性测压器具为研究对象,简要概述了塑性测压的发展史、工作原理、产生静动差的原因及修正方法。本书首先从理论上初步探讨了测压铜柱的工作机理并进行了数值分析计算,针对静标体制中存在的问题,深入探讨了准动态标定方法,并对压力脉宽的影响作了深入的实验研究,对温度修正方法进行了初步的探讨;其次结合工程应用,介绍了基于落锤液压动标装置准动态校准的工作模型及传感器准静态校准方法;最后介绍了塑性测压器件压力智能判读系统的总体方案及塑性测压器件数据库管理系统。

图书在版编目 (CIP) 数据

塑性测压技术/孔德仁,狄长安,范启胜著. —北京:
兵器工业出版社, 2006. 12
ISBN 7-80172-771-1

I. 塑... II. ①孔... ②狄... ③范... III. 塑性理
论—应用—武器—压力计量 IV. TJ03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 129619 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: 北京蓝海印刷有限公司

版 次: 2006 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1—550

责任编辑: 范小伊

封面设计: 李 晖

责任校对: 郭 芳

责任印制: 赵春云

开 本: 850×1168 1/32

印 张: 7.5

字 数: 193 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

武器膛压是各类武器系统的重要战术技术指标之一，是各类武器系统在设计、研制、设计定型及生产交验几个环节中必测的一项参数。长期以来，测试界一直在孜孜不倦地研究如何提高武器膛压的测试精度，并积累了许多宝贵的经验及理论。膛压测量方法总体来说可以分为两大类：一是电测法；二是塑性测压法。随着现代测试技术的发展，电测传感器的性能越来越好，测试精度也越来越高，出现了许多新型的测试方法，如存储式电测装置等。虽然时光已进入了 21 世纪，但是自 1860 年诺贝尔发明了铜柱测压法至今，在各类武器的研制中，尤其是武器系统的设计定型试验及生产交验中，塑性测压法仍然被广泛采用。这主要是因为使用方便、操作简单、不需破坏被试武器、测量值的一致性较好。在过去的几十年中，国内外对塑性测压法都进行过深入细致的研究，并研制出了许多新型的测压器具，尤其是在对标定体制的研究中，美国在 20 世纪 80 年代曾一度三改操作规程，我国在这方面研究起于“七五”期间，经过“八五”、“九五”、“十五”的进一步发展，也积累了许多具有我国特色的塑性测压理论体系及工程实践经验，如研制了具有我国特色的 $\phi 4\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 、 $\phi 3.5\text{ mm} \times 8.75\text{ mm}$ 铜柱系列，这些测压元件基本上覆盖了各类武器系统的膛压测量范围，而且我国自行研制的准动态校准系统无论在功能上，还是在校准精度上都比目前国外的校准系统好。毫无疑问，塑性测压法在各类武器系统研制、生产中还将具有很强的技术寿命。

作者有幸在南京理工大学工作，多年在朱明武教授领导的学术团队中参与科研，并在朱老师的辛勤指导下完成了硕士、博士学位。塑性测压法是作者攻读硕士、博士学位时的研究专题，并撰写过一些文章；近几年，由于科研任务的需要，在与相关单位的协作中，又有了一些新的认识。本书就是在此基础上经同行们的再三鼓励整理而成的。由于学术疏浅，只想到抛砖引玉的作用。

本书全部工作都是在朱明武老师辛勤指导下完成的，有些地方学生的认识并不达意，还恳请同行专家不吝赐教。

参加本书编写工作的有南京理工大学精仪系狄长安博士，中国人民解放军总装第三十一基地轻武器所范启胜总工。

本书全部工作是在朱明武老师辛勤指导下完成的，书中还引用了许多专家、学者的著述，在此，谨向他们表示衷心的感谢。同时，也感谢南京理工大学柳光辽教授、王昌明教授、李永新教授多年的关心和爱护。

由于编写时间仓促，再加上认识不够，许多地方存在错误之处，敬请同行们批评指正。

作 者

2006 年 10 月 1 日

目 录

绪论	(1)
1. 膛压测量的意义	(1)
2. 膛压测量特点	(1)
3. 膛压测量历史回顾	(2)
4. 膛压测量方法	(4)
5. 本书研究的内容	(5)
第 1 章 塑性测压器件工作原理及静态标定方法	(7)
1.1 塑性测压法原理	(7)
1.1.1 铜柱测压法	(9)
1.1.2 铜球测压法	(11)
1.2 静态标定及静态压力对照表编制	(12)
1.2.1 测压铜柱的静态标定及压力表的编制	(12)
1.2.2 铜柱变形量压力表的编制及使用方法	(14)
1.2.3 铜柱测压换算方法	(15)
1.3 静态压力对照表的温度修正方法	(17)
1.4 静标体制铜柱测压的技术要点归纳	(18)
第 2 章 测压铜柱静动差分析及修正方法探讨	(20)
2.1 静标铜柱产生静动差的原因	(20)
2.2 静动差修正方法实践之一	(23)

2.2.1	实验方案制定	(23)
2.2.2	理论基础及数据分析处理	(25)
2.2.3	修正公式的有效性评估	(28)
2.3	静动差修正方法实践之二	(29)
第 3 章	测压铜柱的理论建模及仿真分析	(32)
3.1	概述	(32)
3.2	测压铜柱理论模型	(34)
3.3	测压铜柱工作规律的仿真计算	(40)
3.3.1	仿真计算程序编制	(40)
3.3.2	仿真计算结果及实验验证	(45)
3.4	压力脉宽变化的影响仿真分析	(47)
第 4 章	落锤液压动标装置的工作原理	(51)
4.1	概述	(51)
4.2	落锤液压动标装置的构成	(52)
4.2.1	膛压准动态标定系统的组成	(52)
4.2.2	落锤液压动态标定装置	(52)
4.2.3	半正弦压力源的工作原理	(55)
4.2.4	落锤液压动标装置的功能及用途	(56)
4.2.5	落锤液压动标装置关键部件设计概要	(57)
4.3	落锤液压动标装置数学模型	(63)
4.3.1	不考虑铜柱、铜球变形的数学模型	(63)
4.3.2	考虑铜柱、铜球变形的数学模型	(66)
4.4	“标准”压力监测系统分析	(78)
4.4.1	“标准”压力监测系统的组成	(78)
4.4.2	不确定度分析	(79)
4.5	压力监测系统一致性及误差统一模型理论研究	(80)

4.5.1	压力监测系统的频域等效系统	(81)
4.5.2	统一误差模型	(82)
4.5.3	基于统一误差模型的修正方法	(86)
第 5 章	塑性测压器材准动态标定实践	(87)
5.1	引言	(87)
5.2	关于准动态校准的几个技术问题	(89)
5.2.1	准动态校准的实施方法	(89)
5.2.2	各测压孔一致性问题	(90)
5.2.3	测压器渗硅脂的影响分析	(92)
5.3	测压铜柱准动态校准实践	(94)
5.4	测压铜球的准动态校准实践	(96)
5.5	动态压力对照表的稳定性及不确定度分析	(97)
5.5.1	稳定性分析	(97)
5.5.2	不确定度分析	(98)
第 6 章	压力脉宽对动态压力对照表的影响分析及修正方法	(100)
6.1	引言	(100)
6.2	测压铜柱变脉宽准动态校准实验研究	(102)
6.3	实验数据分析处理	(104)
6.3.1	多元多项式回归	(104)
6.3.2	压力脉宽对准动态校准表的影响分析	(108)
6.3.3	准动态校准压力对照表的适用范围	(112)
6.4	测压铜柱动态压力对照表脉宽修正方法探讨	(114)
6.4.1	多项式修正法	(114)
6.4.2	量纲分析修正法	(117)
6.5	测压铜球变脉宽准动态校准实验研究	(122)
6.5.1	测压铜球变脉宽准动态校准实验	(122)

6.5.2	实验数据分析处理	(123)
6.5.3	脉宽修正方法探讨	(127)
第7章	准动态校准温度误差统一修正方法	(132)
7.1	概述	(132)
7.2	高低温准动态校准实验研究	(133)
7.2.1	测压铜柱、铜球高低温校准实验	(135)
7.2.2	高低温准动态校准实验数据分析	(139)
7.3	温度修正方法探讨	(143)
7.3.1	测压铜柱温度修正	(143)
7.3.2	测压铜球温度修正	(148)
7.4	温度统一修正公式建立	(155)
7.4.1	测压铜球温度统一修正方法探讨	(155)
7.4.2	测压铜柱温度统一修正方法探讨	(159)
7.5	温度误差统一修正公式适用范围	(163)
7.5.1	测压铜柱温度误差统一修正公式适用范围 ..	(163)
7.5.2	测压铜球温度误差统一修正公式适用范围 ..	(168)
第8章	塑性测压器件准动态校准及传感器准静态 校准工作模型	(171)
8.1	铜柱准动态校准工作参数与压力经验模型	(171)
8.1.1	理论基础	(171)
8.1.2	工作参数经验公式建立	(174)
8.1.3	工作参数经验公式推广应用	(176)
8.2	铜球准动态校准工作参数与压力经验模型	(177)
8.2.1	经验模型建立	(177)
8.2.2	高压下蓖麻油的体积弹性模量分析	(180)
8.3	基于落锤液压动标装置的传感器准静态校准	(181)
8.3.1	引言	(181)

8.3.2	传感器准静态“绝对校准”	(182)
8.3.3	多项式“绝对校准”模型	(184)
8.3.4	基于量纲分析的“绝对校准”模型	(186)
第9章	塑性测压器件压力智能判读系统	(191)
9.1	概述	(191)
9.2	压力智能判读系统的总体设计	(192)
9.2.1	主要技术指标	(192)
9.2.2	压力智能判读系统总体描述	(193)
9.3	硬件系统实现	(195)
9.3.1	传感器选型	(195)
9.3.2	传感器安装支架及工作台基准面设计	(197)
9.3.3	下位机硬件实现	(198)
9.4	下位机与上位机通信	(202)
9.4.1	通信电路设计	(202)
9.4.2	通信软件设计	(202)
9.5	数据库管理系统	(206)
9.5.1	概述	(206)
9.5.2	数据库关系模型	(207)
9.5.3	数据库软件结构	(210)
9.5.4	应用举例	(215)
参考文献		(220)

绪 论

1. 膛压测量的意义

根据火药在定容中燃烧测量得到的压力随时间变化的实验曲线，可以进行火药的弹道分析，确定各种火药的火药力 f 、余容 α 、全冲量 I_k 以及火药的燃烧定律等。这些量不仅标志着火药的弹道性能，而且也是弹道计算中的重要弹道特征量。

火药燃气是各类兵器用于发射弹丸和推动武器的各个机构完成规定动作的原动力，因此，用实验的方法准确地测出膛内或其他部位的火药燃气压力随时间变化的规律——压力曲线，探讨各种结构参数和影响因素对压力曲线的影响，不论是对研究兵器设计理论还是分析武器性能，提供进一步改进的措施，都具有十分重要的意义。

依据测得的膛内压力随时间变化的曲线，还可以验证弹道理论与实际所测得的结果的符合程度，以确定弹道计算中某些符合系数的数值。众所周知，火炮膛内最大压力值对炮身、炮架、火炮各部分机构的强度以及对引信动作的正确性有很大影响。因此，在工厂、部队和国家靶场，常常用火炮燃气的最大压力作为检验试验和验收试验时评定火炮、火药装置和弹丸的弹道性能好坏的重要指标之一。

2. 膛压测量特点

火药燃气压力是一个动态量，膛压的变化范围较宽，从零至

数百兆帕，持续时间有长有短，从零点几毫秒到数十毫秒。动态压力测量与静态压力测量不同点在于动压测量中存在着动态误差。许多在静态压力测量中被认为是非常优良的仪表，用于动态压力测量时可能出现高达百分之百的动态误差，这就是动态压力测量中要特别注意的问题。但对于兵器膛压测量来说，由于其显著的特殊性，如压力量程大、振动、高温及作用时间短，要准确测量其压力值，就形成了膛压测量的一系列的技术，虽然动态压力测量所涉及的对象是包罗万象的，但其测试技术却有着内在的共同规律，形成了与静压测量迥然不同的技术。

有些武器，尤其是设计定型武器，在验收时可能不允许开相关的测压孔，这给压力的准确测量带来了不便，在选择测试方法时需根据实际情况而定。膛压测量的客观环境十分恶劣，其内弹道过程是一个十分复杂的物理—化学过程，火药的点火与燃烧状况，火药颗粒与火药燃烧弹后空间的两相流等，都使得膛内的压力分布呈非均匀性。因此，测点的设置，应当使膛压的测得值具有代表性，能从其随机表现中提取出内弹道规律性的内涵。另一方面，发射过程是不可复现的，只能多次测量同一批次炮弹的性状，而不能重复测量同一发炮弹的性状，因此，测量值不可避免地包含着被试炮弹的个性，且无法通过重复测量来遏制随机误差的影响。兵器膛压测量所用方法有着特殊的要求，要能承受高温、高压和高加速度，量程要宽，要有良好的频率响应，同时要具有快速综合处理数据的能力。

3. 膛压测量历史回顾

翻开自然科学史，我们不难发现，任何新的发明、创造以及新理论的发现都是建立在实验科学基础上的。从弹道学的发展史，我们可以清楚地看出弹道试验是理论弹道学发展的前驱。

大约在公元 10 世纪已经有了火器，那时，人们是依据经验来处理发射时碰到的各种问题。如对于火炮，关心的是火炮中装

多少药及发射一个多重的弹丸，会不会引起膛炸，炮身放置成怎样的角度，弹丸可以打多远等。一直到 18 世纪中期，鲁宾斯（Robins, 1740 年）第一次用实验的方法，测得了小口径武器的初速。从那时起，弹道学才开始分为内弹道学和外弹道学两个分支。而此时的内弹道学理论和实验理论是相对应的，只限于用经验方法去寻求弹丸和装药重量以及火炮结构尺寸与初速的有关公式。直到 19 世纪 60 年代诺贝尔（Nobel, 1860 年）利用铜柱测压器，测得了膛内火药燃气最大压力之后，才逐渐形成了内弹道学的学科体系。差不多在同一时期布朗节发明的测速仪，替代了古老的弹道摆测速法。1880 年，维也里（Vieille）为研究火药的燃烧规律问题，在密闭爆发器上，采用铜柱测压记录装置，测出了 $p-t$ 曲线，从而根据密闭爆发器的实验结果，得出弹道理论上所使用的发射药的一些重要特征量。但此后的 50 年时间里，人们却很难在火炮上，特别是大口径火炮上获得实验的 $p-t$ 曲线，这主要是因为火炮的后坐干扰了记录。因此，在 1930 年以前的内弹道理论主要是从已知火炮和弹丸的某些特征量，以及从密闭爆发器实验中得到的火炮特征量来估算火炮的初速及最大膛压，虽然当时在理论上也经常讨论膛内 $p-t$ 曲线问题，但也只能是没有实验的推测。大约在 1914 年~1918 年之间，汤姆逊（Thmson）发明了压电测压法测定膛内压力曲线，但是直到 1930 年左右，这种原理的测试系统才较完整和可靠地记录出膛内压力曲线，从此，内弹道理论才以研究射击现象的整个时间过程为主，而不再是研究某个弹道诸元问题了。在第二次世界大战中，发展了目前广泛应用的应变测压法。随着半导体技术的发展，人们研制了以半导体为基底的压阻式压力测量方法。在兵器压力测量的今天，膛压测量系统也在不断地更新，随着计算机技术的发展，传统仪器开始向着计算机化的方向发展，虚拟仪器（Virtual Instrument）是 20 世纪 90 年代提出的新概念，是现代计算机技术、仪器技术及其他新技术完美结合的产物。虚拟仪器

技术在兵器膛压测量系统中也得到广泛的应用。

4. 膛压测量方法

膛压是各类兵器在设计、研制、生产、验收中必须测量的一个重要参数，兵器技术的发展给膛压测量提出了越来越苛刻的要求。多年来，测试界为提高膛压测量精度一直在进行着不懈的努力。但是由于膛压变化较快、压力很高，且伴随着高温和振动，因此在其测试方法上有一定的特殊性。目前广泛采用的测量方法有两种：一是电测法；二是塑性变形测压法。

19 世纪 60 年代诺贝尔首次使用铜柱测压器测得膛内火药燃气最大压力后，100 多年来，古老的塑性变形测压法在“实用弹道学”领域内一直是膛压测量的主要技术手段，至今仍为世界各国采用。

塑性变形测压法用专门制作的测压试件在压力作用下产生的塑性变形量作为压力值的量度，因此，它只能测定火药燃气的压力峰值（最大压力法），不能反映火药燃气压力变化的全过程。但是，这种方法设备简单，操作方便，工作稳定，成本低廉，在武器的生产验收中起着重要的作用。

根据所用测压试件形状的不同，塑性变形测压法可分为铜柱测压法和铜球测压法两种，铜柱测压法为我国、前苏联及东欧各国所采用，铜球测压法为美、英等西方国家所采用。铜柱测压法又分为柱形铜柱及锥形铜柱两种。不论是采用铜柱还是铜球进行压力测量，都有一套严格的技术规程，对铜柱（铜球）测压器的制作及操作使用等都作了严格的规定。

电测法是基于将敏感元件感受压力而产生的弹性变形量转换为电量进行压力测量的原理进行的，属于弹性测压法。可分为：

① 基于弹性敏感元件的应力—应变特性的压力测量系统，主要是利用弹性敏感元件在被测压力作用下所产生的应力—应变来测量压力的，如应变式压力测压系统等。

② 基于弹性敏感元件的压力集中力特性的压力测量系统，主要是利用弹性敏感元件将被测压力转换为集中力的原理，通过测量集中力来测量压力的，如压电式压力测量系统。

③ 基于弹性敏感元件的压力位移特性的压力测量系统，主要将被测压力转换为弹性敏感元件的位移来进行测量的，如电容式压力测量系统等。

④ 基于弹性敏感元件的压力谐振频率特性的压力测量系统，主要是弹性元件在被测压力作用下其谐振频率发生变化，利用谐振频率来测量压力的，如振筒式压力测量系统等。

随着大规模集成电路技术及计算机技术的发展，存储测压技术也得到了长足的发展，存储测压装置是将传感器、调理电路、采集、存储及数据通信集成在一个很小的空间内，实现膛内压力的测量。

5. 本书研究的内容

塑性变形测压法具有工作可靠、使用方便、成本低廉等突出的优点，100多年来一直是常规兵器膛压检验的主要手段。在实用弹道学领域，兵器的验收试验中，我国铜柱测压基本上仍沿用静态标定体制，而静标铜柱用于动态膛压测量会产生严重的静动差。在研究弹道学领域和对某些引进兵器的验收，则广泛采用电测法和向膛压电测值靠拢的准动态标定体系的铜球测压法，这两种测压体系平行的“双轨制”局面，造成了一种物理现象：一个技术数据，却出现了两种取值方法。两种语言间的交流，需要翻译，同一技术数据的两个取值间，需要有换算关系，研究静态标定体系的动态误差，意义就在此。本书从塑性测压法的工作机理出发，介绍了塑性测压法工作原理，静标体系的具体内容，分析了其存在静动差的主要原因及其修正方法，建立了铜柱测压系统的动态数学模型，并进行仿真分析。介绍了准动态标定的含义及落锤液压力动标装置的工作原理。在此基础上，阐明了塑性测压器

材准动态校准的实验方法。

本书详细介绍了塑性测压器材准动态校准的动态压力表编制方法,对其稳定性及不确定度进行了分析。经过试验,阐明了被测压力脉宽变化时,动态压力表存在的问题,并针对我国研制的 $\phi 3.5\text{ mm} \times 8.75\text{ mm}$ 铜柱及 $\phi 4.763\text{ mm}$ 铜球进行了实验研究,给出了准动态校准压力对照表使用范围及被测压力脉宽发生变化时,使用准动态校准的动态压力对照表的修正公式。

塑性测压法使用的敏感元件(铜柱、铜球)的固体力学特性和温度有关,如果测压时的环境温度和标定时环境温度不一致,就会引入系统误差,这种误差甚至可高达 $5\% \sim 8\%$,针对这一物理现象,本书分别介绍了静态体制的温度修正方法、准动态标定体制的温度修正方法及准动态标定体制的温度误差统一修正方法。

落锤液压动标装置是目前国际上广泛用于准动态校准的设备,本书在介绍其工作原理的基础上,分别介绍了用于铜柱、铜球准动态校准的方法及其工作参数调试的经验模型。结合电测传感器的特点,介绍了基于落锤液压动标装置的传感器电测压系统的准静态校准及绝对校准的内涵及实现方法。

塑性测压法是通过塑性测压元件的变形量(或压后高)来反映被测压力大小的,因此,需对塑性测压元件的高度进行精确测量,常用的测长器具有:千分尺等,根据测得的塑性元件的长度,还需进行查表、计算、填表等人工操作,工作繁琐,容易出错。目前我国采用的塑性测压器材型号、规格较多,且标定体制不一,为便于管理及使用,本书介绍了塑性测压元件的计算机自动压力判读系统。

第1章 塑性测压器件工作原理及静态标定方法

1.1 塑性测压法原理

塑性变形测压法用专门制作的测压试件在压力作用下产生的塑性变形量作为压力值的量度。因此，它只能测定火药燃气压力峰值（最大压力法），不能反映压力变化的全过程。根据所用测压试件形状的不同，塑性变形测压法又分为铜柱测压法和铜球测压法两种。自19世纪60年代诺贝尔首次使用铜柱测压器测得膛内火药燃气最大压力后，100多年来，古老的塑性变形测压法在“实用弹道学”领域内一直是膛压测量的主要技术手段，至今仍为世界各国采用，究其原因主要是塑性变形测压法具有以下几个特点：

（1）使用方便。采用电测技术测量压力信号时，不仅需要高精度的压力传感器，而且需要复杂的信号放大设备及记录设备，需要稳定的供电系统，这对于实际测量（尤其是野外实验）极为不便。如果采用塑性测压法进行膛压测量，只需一个塑性测压器件（由测压器、塑性敏感元件组成）即可，敏感元件受压后塑性残余变形就是实验结果的记录，因而毋须采用专门的记录仪器及供电系统。

（2）操作简单。使用电测法测量膛压时，由于需采用专门的仪器设备，为了获得完整的实验结果，常常需要对测试系统的各仪器反复进行调试。采用塑性测压法进行测压，操作过程要简单