

电子测压器与铜柱测压器在膛压测试中 结果差异分析*

尤文斌^{1,2}, 马铁华^{1,2}, 丁永红^{1,2}, 张晋业³

(1. 中北大学电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 晋西集团技术中心, 山西 太原 030027)

摘要: 火炮膛压作为火炮和弹药的内弹道重要参数, 在研制、生产、交付、存储校验等环节都需要测量。针对当前同时采用放入式铜柱测压器和电子测压器测量某一批弹药时, 电子测压器峰值出现散布较大, 而铜柱测压法一致性好的问题, 在分析两种测压法测压原理的基础上, 利用铜柱动态校准数据作用到其 ANSYS 模型上修正了铜柱的 Johnson-Cook 模型参数; 分析发现出现差异时电子测压器测量的压力变化率时程曲线不同, 铜柱实际测试形变量与施加压力时程曲线作用于模型得到的形变量一致。研究表明: 同时测量某一批弹药时, 电子测压器比铜柱测压器出现压力峰值散布大的原因是由膛压上升过程变化率不同导致铜柱的应变率不同造成的。

关键词: 火炮膛压; 电子测压器; 铜柱测压器; Johnson-Cook 模型参数

中图分类号: O384

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

火炮膛压是指火炮药室内火药高速燃烧使气体膨胀所产生的压力, 用以推动弹丸实现发射^[1], 一般火炮膛压小于 700 MPa^[2-3]。各种火炮系统在出厂前都必须进行膛压测试, 以便于考核火炮的精度、强度等指标是否满足设计要求^[4-6]。2008 年, 铜柱、铜球测压, 引线式测压及放入式电测压 3 种方法被作为膛压测试的并行标准写入由中国人民解放军总装备部制定的《火炮内弹道试验方法》中^[5]。

放入式电子测压器与铜柱测压器同时测量一批弹药的发射膛压, 在 90% 的测试中两者测量结果相对误差小于 0.5%^[7]; 但是, 在某些批产品测量结果中出现了电子测压器测得峰值压力散布大, 而铜柱测得的峰值压力一致性好的现象。本文中主要通过对内置式电子测压与铜柱测压产生差异的机理和实验数据的分析, 探究在测量同一批弹药时, 放入式电子测压器与铜柱测压器出现差异的机理, 以期为后续工作提供依据。

1 膛压测试原理

根据敏感元件的不同, 膛压测试方法主要有两种: 塑性变形测压法和弹性变形电测法^[8]。

1.1 放入式铜柱测压器原理—塑性变形测压法

放入式铜柱测压器的工作原理如图 1 所示。将测压器置入火炮膛底, 发射药燃烧压力 $p(t)$ 经硅脂传递到活塞后, 再作用到铜柱上, 使其产生轴向压缩变形, $p(t)$ 卸载后, 铜柱具有残余变形量, 则可通过残余变形量得到峰值压力 p_m 。铜柱测压整个过程中应力应变如图 2 所示, 压力小于比例极限 σ_p 为直线段 OA, 弹性极限 σ_e 前的 AB 段是弯曲的, 在这个阶段卸除载荷, 应力和应变都随原有曲线降到零。超过 σ_e 以后, 铜柱开始屈服并进入塑性变形阶段, 对应的应力称为屈服应力 σ_s , 当压力达到最大时, 应力达到最大为 σ_m , 压力卸载后, 应力应变将不再沿着原有曲线退回原点 O, 应力沿一条近似平行于 OA 的 MF

* 收稿日期: 2015-07-22; 修回日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61471385); 中北大学电子测试技术重点实验室基金项目(9140C120409)

第一作者: 尤文斌(1981—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, youwenbin@nuc.edu.cn。

线下降为零,而应变则停留在 F 点,其值为 ϵ_r 。通过以上分析可知, p_m 越大, σ_m 就越大, ϵ_r 也越大,因此通过测量 ϵ_r 的大小就可判定压力峰值 p_m [9-10]。

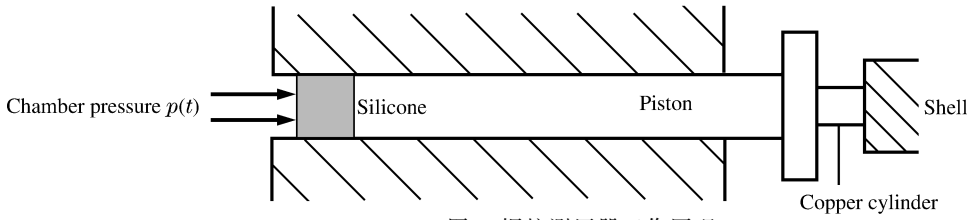


图 1 铜柱测压器工作原理

Fig. 1 Copper cylinder pressure gauge's working principle

铜柱产生动态误差的主要原因缘于塑性敏感元件的应变率效应,即塑性变形的抗力不仅和变形量有关,还和变形速率有关,应变率越大,屈服极限应力越高,因此在相同压力的情况下,静态加载时应变最大,动态载荷下变形量减小,从而产生负误差 [7,9-10]。

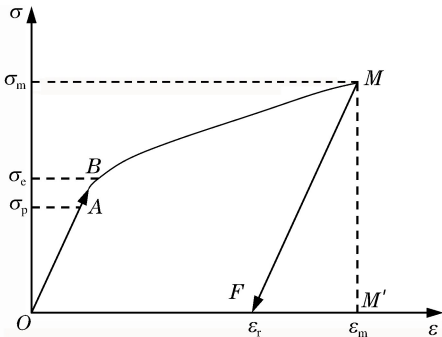


图 2 铜柱受压应力应变曲线

Fig. 2 Copper cylinder's stress-strain curve

1.2 放入式电子测压器原理—弹性变形电测法

放入式电子测压器由压电式压力传感器、电荷放大器、A/D 转换器和存储模块构成,如图 3 所示 [7]。传感器将膛内压力的变化转换为电荷量的变化,经电荷放大器转换成电压信号,再经 A/D 转换器变换为数字量编码存储。

压电式压力传感器的压电元件夹于 2 个弹性膜片之间,膜片采用弹性材料,当外力作用在膜片上时,膜片将作用在表面的压力传递给石英晶体,由弹性理论的胡克定律得 $F = kx = pS$, 其中 F 为作用力, k 为物体的劲度系数, x 为弹性形变量, p 是压强, S 为传感器膜片面积。

石英晶体受到外力 F 作用时,内部会产生电极化现象,且会在某两个表面上产生符号相反的电荷;在外力 F 撤消后,晶体又会恢复到不带电的状态。晶体受力后,所产生的电荷量 Q 与外力 F 成正比 [11], $Q = dF$, d 为压电系数,也可以表示为 $Q = dpS$ 。

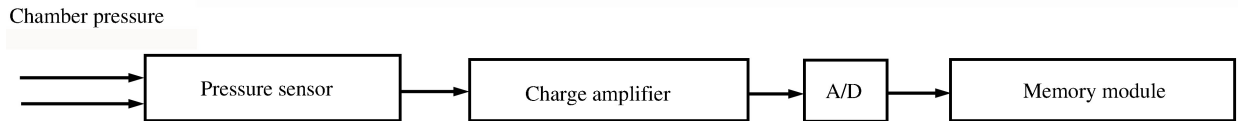


图 3 电子测压器的系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of internal pressure gauge

由于膜片面积 S 是确定的,因此膜片将作用于传感器受力面的压强转化为与压力成正比的力传递给石英晶体,即产生与压强成线性正比的电荷。为了提高测量精度,本放入式电子测压器的传感器选用瑞士 Kistler 公司的 6215 型石英压力传感器(1994 年成为北约组织内弹道膛压测量标准),其固有频率大于 240 kHz [7]。膛内压力的频率在 5 kHz 以内,电荷放大器在这个频带区间可以达到 2% 的误差;12 位 AD 变换器带来的量化误差小于 1%;数字信号在存储电路中不会产生误差。因此,出现误差的环节主要在于压力传感器。

2 放入式铜柱测压的 ANSYS 模拟

铜柱测压中所使用的铜柱是高导无氧铜,其材料特性为刚塑性硬化材料,在受压变形过程中会产生较大的塑性变形,因此采用弹塑性有限元法分析。

2.1 铜柱的材料模型

通常采用 Johnson-Cook 模型对火炮膛压作用下的铜柱材料进行描述,由于 Johnson-Cook 模型属于应变率相关本构模型,因此主要考虑流动应力的应变率效应,屈服应力 σ_y 可表示为^[7,12]:

$$\sigma_y = (A + B\epsilon_p^n)(1 + C\ln\dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \tag{1}$$

式中: ϵ_p 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 为量纲一塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为准静态实验的应变率; $T^* = (T - T_r)/(T_m - T)$ 为量纲一温度, T 是试件环境温度, $T_r = 23\text{ }^\circ\text{C}$, 为参考温度, T_m 为材料的熔点, A, B, n, C, m 为待定的材料参数。

2.2 放入式铜柱测压的 ANSYS 模型

由于铜柱测压器具有轴对称性结构,为了缩短仿真的计算时间,利用 ANSYS 建立的 1/4 对称物理模型如图 4 所示,由壳底、铜柱和活塞 3 个部分组成。其中,壳底和活塞材料为钢,采用弹性体模型,其具体参数:密度为 $7.83 \times 10^{-3}\text{ g/mm}^3$,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.32。铜柱材料为高导无氧铜,采用弹塑性模型,其 Johnson-Cook 模型静态参数的初始值可查阅文献[13]。Grüneisen 状态方程中常数 $a = 0.47, \gamma_0 = 2.02, S_1 = 1.489, S_2 = S_3 = 0, C = 3\ 940\text{ m/s}$,质量热容为 $0.39\text{ J/(g}\cdot\text{K)}$ 。将壳底固定后,在活塞上表面施加压力,铜柱受压力变形后获取对称圆柱变形如图 5 所示。

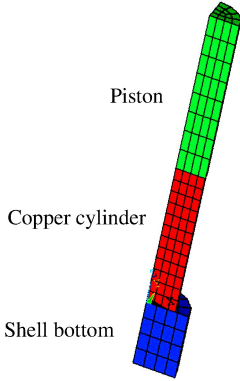


图 4 ANSYS 结构模型

Fig. 4 ANSYS structural model

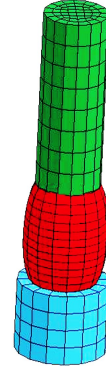


图 5 受压变形效果图

Fig. 5 Compression deformation

2.3 铜柱的 Johnson-Cook 模型参数的修正

由于膛压是动态压力,铜柱的动力特性与静力特性区别很大,铜柱的主要动力特性—瞬时应力随应变率的增大而增大^[14]。直接使用 ANSYS/LSDYNA 系统自带的静态 Johnson-Cook 模型参数,计算结果会和实测结果存在较大误差。为解决这个问题,对铜柱测压器施加脉宽 6 ms 的半脉冲压力,进行落锤实验^[7,9],将得到的压缩量作为动态 Johnson-Cook 模型的实验数据,对模型参数进行修正,修正后剪切模量为 47 GPa,屈服应力常数 $A = 91\text{ MPa}$,应变硬化指数 $n = 0.233$ 。在 ANSYS/LSDYNA 中利用修正后的模型参数对铜柱进行数值模拟^[7],计算结果与实验数据对比及相对误差如表 1 所示。

表 1 实验数据与数值模拟结果对比

Table 1 Comparison of experimental with simulation data

标定点	p_m/MPa	τ/ms	y/mm		$\epsilon/\%$
			实验	数值模拟	
1	270.35	6.49	0.226 8	0.226 5	-0.132
2	310.18	6.45	0.483 0	0.483 6	0.124
3	356.66	6.44	0.783 0	0.780 2	-0.359
4	396.78	6.38	1.045 0	1.042 0	-0.288
5	452.44	6.37	1.361 0	1.356 6	-0.324
6	516.23	6.35	1.749 0	1.751 1	0.120

表中, p_m 为落锤施加半正弦压力脉冲峰值, τ 为脉冲宽度。由表 1 可知最大误差为 0.359%, 验证了修正后的 Johnson-Cook 模型参数正确性。

3 放入式电子测压器与铜柱测压器测试结果差异性分析

放入式电子测压器与铜柱测压器使用前都经过了动态校准,在某加农炮同批次装药的膛压测试中,两者测得其中的两发弹药的压力峰值如表 2 所示,铜柱测得的压力峰值接近,相差 0.7 MPa,电子测压器测得压力峰值相差较大,相差 2.5 MPa。

表 2 不同传感器实测压力峰值对比

Table 2 Comparison of peak pressures measured by different sensors

发次	p_m/MPa	
	电子测压器	铜柱测压器
1	368.52	371.90
2	371.02	372.60

铜柱形变量在瞬态压力作用下,受应变率影响较大,压力变化速率与应变率有关,直接测量铜柱压缩量获得峰值压力的方法不能分析出现差异的原因。为此,通过将电子测压器记录的压力时程曲线对时间求导,比较压力时程曲线与压力变化率时程曲线的差异^[7]。电子测压器记录的压力时程曲线和压力变化率时程曲线如图 6 所示。将压力曲线上升到峰值前的压力变化率部分进行局部放大得到图 7。

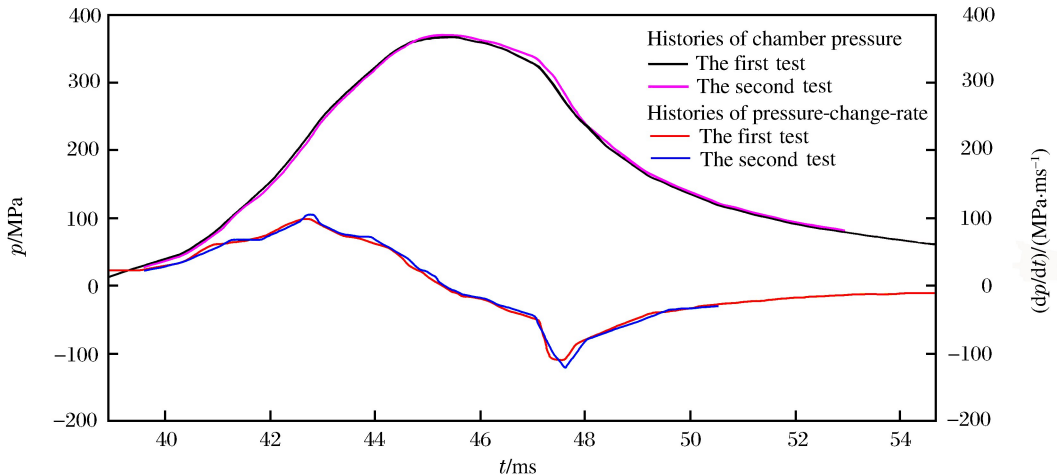


图 6 压力和压力变化率时程曲线

Fig. 6 Histories of pressure and pressure change rate

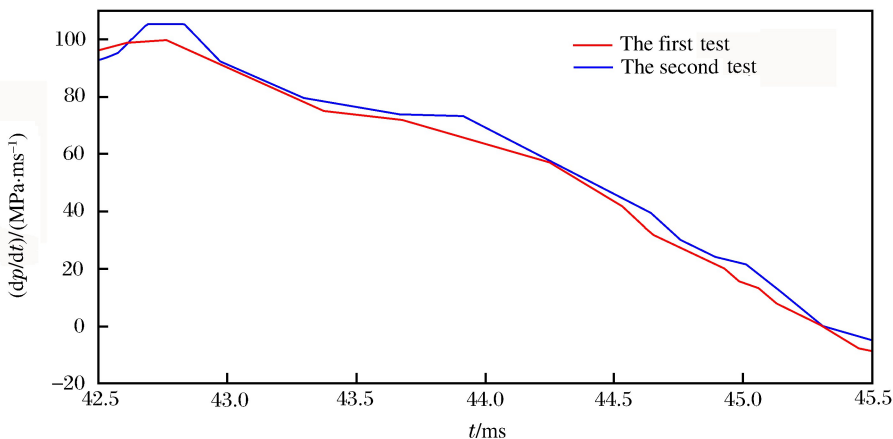


图 7 压力变化率时程曲线局部放大

Fig. 7 Local amplification of pressure-change-rate histories

从图 7 中可以看出,在压力达到峰值前这一段时间第 2 发实验的压力变化率稍大于第 1 发的,又由于第 2 发实验的压力峰值大于第 1 发的,峰值最终起到了主导作用。在两者综合作用下,造成电子测压器与铜柱测得的压力相差较大,同时也表现出电子测压器测得压力峰值散布大于铜柱测得的。

为了找出电子测压器与铜柱测压器测得压力之间的关系,将2发实验电子测压器测得的压力时程曲线作为铜柱测压器的输入压力代入 ANSYS/LSDYNA 铜柱测压模型中,得到图8中所示铜柱压缩的形变量时程曲线,从图8中可知,计算得到的第1发实验的形变量为 -1.6297 mm ,第2发实验的形变量为 -1.6374 mm 。而实测第1发实验铜柱的形变量为 -1.6290 mm ,第2发实验铜柱的形变量为 -1.6350 mm ,数值模拟结果与实测数据一致。

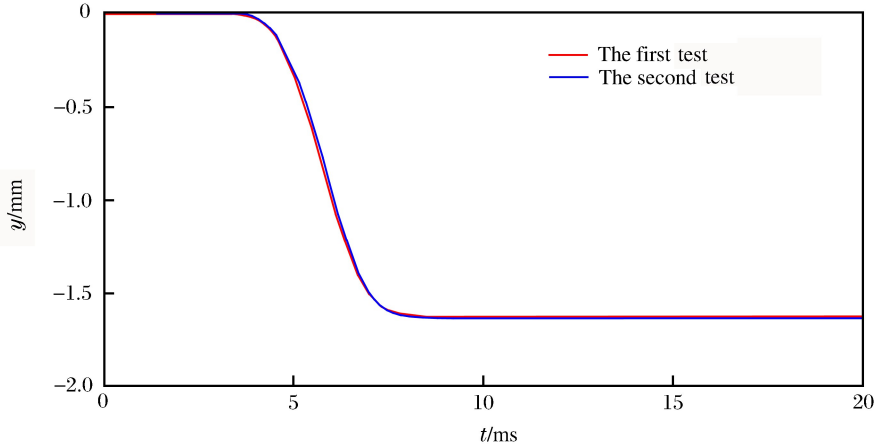


图8 2次实验中铜柱形变量的计算结果

Fig. 8 Simulation results of copper cylinder deformation

4 结论

通过分析铜柱测压器和电子测压器的测压原理,确定两者测量误差可能出现在铜柱本构特征的应变率效应上,建立了铜柱测压器的 ANSYS 模型,并由铜柱动态校准数据修正了铜柱的 Johnson-Cook 模型参数并进行验证。电子测压器测得的压力曲线作用到铜柱模型获得的形变量与铜柱实测形变量一致,该批弹药膛压上升速率不一致,导致铜柱测压器在应变率效应作用下产生了误差,表现出铜柱所测压力峰值趋于一致的假象。

参考文献:

- [1] 金志明,翁春生,宋明. 高等内弹道学[M]. 北京:高等教育出版社,2003:1.
- [2] 李新娥,祖静,徐鹏. 新型应变式高膛压测试系统研制[J]. 高压物理学报,2011,25(4):310-316.
Li Xin'e, Zu Jing, Xu Peng. A novel strain type high chamber pressure test system[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011,25(4):310-316.
- [3] 刘林林,马忠亮,萧忠良. 变燃速发射药膛内燃烧与内弹道过程研究[J]. 兵工学报,2010,31(4):409-413.
Liu Linlin, Ma Zhongliang, Xiao Zhongliang. Research on the actual combustion and interior ballistics process of the variable-burning rate propellant in cannon[J]. Acta Armamentarii, 2010,31(4):409-413.
- [4] Walton W S. Electrical measurement of weapon chamber pressure; ADP002684[S]. Aberdeen Proving Ground MD Materiel Testing Directorate, 1995.
- [5] 中国人民解放军总装备部测量通信总体研究所. 火炮内弹道试验方法:GJB 2973A-2008[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2008.
- [6] Li Xin'e, Zu Jing, Ma Tiehua, et al. Research on a novel capacitive pressure sensor to measure chamber pressures of different caliber artilleries[J]. IEEE Sensors Journal, 2011,11(4):862-868.
- [7] 尤文斌,马铁华,丁永红,等. 铜柱测压器膛压测试产生误差的机理研究[J]. 仪器仪表技术,2015,36(10):2290-2296.
You Wenbin, Ma Tiehua, Ding Yonghong, et al. Deviation mechanism research for copper cylinder pressure gage in the artillery chamber pressure test[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(10):2290-2296.
- [8] Carson J A, Dimeff J, Charters A C. Piston type strain gauge for measuring pressures in interior ballistics research

- [J]. Review of Scientific Instruments, 1955,26(9):879-883.
- [9] 孔德仁. 塑性测压器材准动态校准技术及实验研究[D]. 南京:南京理工大学,2003.
- [10] 张淑宁. 准动态校准技术实验研究[D]. 南京:南京理工大学,2003.
- [11] 边义祥,杨成. 基于压电材料的振动能量回收技术现状综述[J]. 压电与声光,2011,33(4):612-622.
Bian Yixiang, Yang Chenghua. A review of current research for energy harvesting based on vibration of piezoelectric materials[J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2011,33(4):612-622.
- [12] Johnson G R, Inc H, William H C. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high temperature[C]//Proceedings of 7th International Symposium on Ball. The Hague, Netherlands: International Ballistics Committee, 1983:541-547.
- [13] 吕剑,何颖波,田常津,等. 泰勒杆实验对材料动态本构参数的确认和优化确定[J]. 爆炸与冲击,2006,26(4):339-344.
Lü Jian, He Yingbo, Tian Changjin, et al. Validation and optimization of dynamic constitutive model constants with Taylor test[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(4):339-344.
- [14] 孔德仁,朱明武,铜柱,铜球准动态校准的机理[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2004,28(4):375-379.
Kong Deren, Zhu Mingwu. Mechanism of quasi-dynamic calibration for copper cylinder and copper ball[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2004,28(4):375-379.

Deviation research on internal electronic pressure gauge and copper cylinder pressure gauge in artillery chamber pressure test

You Wenbin^{1,2}, Ma Tiehua^{1,2}, Ding Yonghong^{1,2}, Zhang Jinye³

(1. *Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;*

2. *Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;*

3. *Jinxi Industries Group Technology Center, Taiyuan 030027, Shanxi, China)*

Abstract: The artillery chamber pressure is so important a parameter for interior ballistic performance that it has to be measured repeatedly in the course of artillery development, production, acceptance, storage check. When a batch of ammunitions are measured by internal electronic pressure gauge (IEPG) and copper cylinder pressure gauge (CCPG) at the same time, the distribution of IEPG peak values is found to be much larger than that of CCPG ones. The ANSYS model of CCPG was proposed based on the CCPG working principle, and the Johnson-Cook model parameters were optimized according to the dynamic calibration data. The results shows that when discrepancy occurred with respect to the peak pressures measured respectively by IEPG and CCPG, the pressure-change-rate histories of IEPG were different, and the test pressure exerted on the CCPG model was consistent with the copper cylinder deformation obtained in the copper test. The results also show that the difference in peak pressure, captured by IEPG and CCPG in a batch of ammunition chamber pressure measurement at the same time, is due to the influence of different copper cylinder strain rates as a result of different rising rates of the chamber pressure.

Keywords: artillery chamber pressure; internal electronic pressure gauge; copper cylinder pressure gauge; Johnson-Cook model parameter