

文章编号: 1006-9941(2012)06-0701-04

# 低温感包覆火药装药的内弹道势平衡理论模拟

刘志涛, 徐 滨, 南风强, 廖 昕, 王泽山

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 为了进一步研究低温感包覆火药装药的内弹道特征及其内弹道数值计算方法, 运用内弹道势平衡理论, 对制式装药和低温感包覆火药装药的势平衡点参数进行了比较。分析了低温感包覆火药装药势平衡点处燃去火药相对量  $\psi_E$  随装填密度变化的原因, 并拟合了低温感包覆火药装药的实际燃气生成函数。在此基础上利用势平衡方程对内弹道过程进行了数值模拟。结果表明, 计算曲线与实验曲线基本一致, 应用内弹道势平衡理论描述低温感包覆火药装药的膛内燃烧规律可行。

**关键词:** 材料学; 发射药; 势平衡理论; 内弹道

**中图分类号:** TJ55

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.009

## 1 引 言

低温感包覆火药装药不仅能够降低火炮装药的温度系数, 而且能在不增大膛压的前提下提高火炮初速, 在大中口径火炮上具有良好的弹道性能<sup>[1]</sup>。低温感包覆火药一般由多孔发射药(基体药)及其表面上的包覆层构成。包覆层的性能直接影响了基体药的燃烧。已有的研究表明, 包覆层的燃烧不遵循几何燃烧定律, 在一定的压力下, 基体火药孔上的包覆层在不完全燃尽时就被高压气体所贯穿, 称之为破孔过程。由于点传火的不同时性及包覆层不均匀, 低温感包覆火药的破孔不同时<sup>[2]</sup>。因此, 无论是用经典内弹道还是两相流方法计算其内弹道时, 都必须考虑破孔过程。然而影响破孔过程的因素很多, 比如包覆层的物理化学性质、点传火结构、环境温度、装填密度等, 在现有的条件下很难用数值方法精确描述。

鲍廷钰建立的势平衡理论<sup>[3-5]</sup>, 以实测的膛内  $p-t$  曲线为基础, 确定势平衡点, 建立膛内燃烧的实际燃气生成函数, 从综合、整体的角度对内弹道过程进行分析和计算, 近几年来, 在深钝感球扁药<sup>[6]</sup>、变燃速发射药<sup>[7]</sup>、电热化学炮<sup>[8]</sup>等新型复杂装药的计算中得到应用。

目前势平衡理论在低温感包覆火药装药中的应用研究较少。文献[1]计算了几种低温感包覆火药装药的势平衡点参数及其实际燃气生成函数, 但其内弹道

过程特征、具有这种特征的原因及其势平衡内弹道模型的应用等仍需要进一步的研究。基于此, 本研究运用势平衡理论, 分析了低温感包覆火药装药与制式装药内弹道实验中的  $p-t$  曲线, 对比了两者在内弹道过程中的差异, 并在此基础上对低温感包覆火药装药进行内弹道模拟计算。

## 2 势平衡理论分析

### 2.1 势平衡点的确定

势平衡点是势平衡理论中最重要的特征点。通过对势平衡点的比较分析, 可以发现复杂装药膛内实际燃烧过程的特殊之处。同时势平衡点的各参数也是实际燃气生成函数拟合的基础。

对某大口径火炮制式全装药与低温感包覆火药装药的內弹道过程进行实验研究, 其  $p-t$  曲线如图 1 所示。实验装药条件为: 制式装药: AGU-15 22/19H; 低温感包覆火药装药: 主装药: AGU-15 22/19H, 包覆火药: AGU-15 20/19HB, 主装药与包覆火药质量比 7: 3; AGU-15 火药力: 1070 kJ/kg, 余容:  $1.06 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ; 密度:  $1680 \text{ kg}/\text{m}^3$ ; 两种装药的装填密度相同。火炮条件为: 某大口径火炮, 药室容积:  $22.94 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , 弹丸质量 45.54 kg, 弹丸行程全长: 6.009 m, 次要功系数: 1.10。由图 1 可见, 低温感包覆火药装药  $p-t$  曲线最大压力点时间比制式装药延后, 且最大压力略小。

在  $p-t$  曲线的基础上, 根据态冲量  $J = pt$ 、压力冲量  $I = \int_0^t p dt$  计算得到  $J-t$  曲线和  $I-t$  曲线。在势平衡点

收稿日期: 2011-09-16; 修回日期: 2011-12-30

作者简介: 刘志涛(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事发射药装药, 内弹道计算等研究。e-mail: lzt03304645@yahoo.com.cn

$J_E = I_E$ , 可确定势平衡点的  $t_E$ 、 $J_E$ 、 $I_E$  及  $p_E$ ;

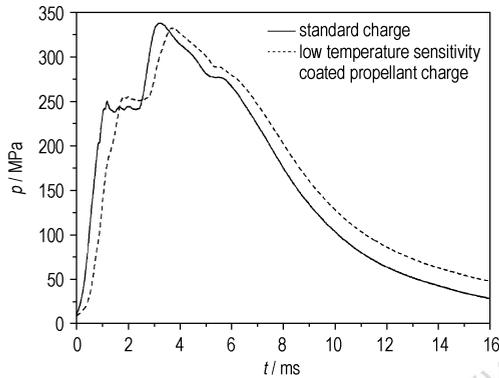


图1 某大口徑火炮制式裝藥與低溫感包覆火藥裝藥的  $p$ - $t$  曲線  
Fig.1  $p$ - $t$  curve of a large-caliber gun with standard charge and low temperature sensitivity coated propellant charge

由公式(1)-(4)分別計算勢平衡點的  $\psi_E$ 、 $\beta_E$ 、 $v_E$ 、 $l_E$

$$\psi_E = \frac{K S^2 I_E^2}{2 f \omega \beta_E \varphi m} \quad (1)$$

$$\beta_E = 1 + \left(\alpha - \frac{1}{r}\right) \frac{p_E}{f} \quad (2)$$

$$v_E = \frac{S I_E}{\varphi m} \quad (3)$$

$$l_E = \frac{1}{2} v_E t_E + \frac{\omega}{S r} - \frac{V_0}{S} \quad (4)$$

式中,  $\psi$  為火藥相對已燃部分,  $K$  為絕熱指數,  $S$  為炮膛截面積,  $f$  為火藥力,  $\omega$  為裝藥質量,  $\beta$  為余容影響係數,  $\varphi$  為阻力係數,  $m$  為彈丸質量,  $\alpha$  為余容,  $r$  為火藥密度,  $v$  為彈丸速度,  $l$  為彈丸行程,  $t$  為時間,  $V_0$  為藥室容積。下標  $E$  表示勢平衡點參數。

表1 制式裝藥與低溫感包覆火藥裝藥的勢平衡點各參數

Table 1 Parameters at the point of equilibrium with standard charge and the low temperature sensitivity coated propellant charge

parameters	$t_E$ /ms	$p_E$ /MPa	$I_E$ /kPa·s	$l_E$ /m	$v_E$ /m·s <sup>-1</sup>	$\beta_E$	$\psi_E$
standard charge	6.350	241.262	1532.950	1.725	610.990	1.088	0.812
low temperature sensitivity coated propellant charge	7.100	236.606	1681.971	1.906	628.579	1.086	0.867

Note:  $t_E$  is the time at the point of equilibrium;  $p_E$  is the pressure at the point of equilibrium;  $I_E$  is the pressure impulse at the point of equilibrium;  $l_E$  is the projectile travel at the point of equilibrium;  $v_E$  is the velocity at the point of equilibrium;  $\beta_E$  is the covolume coefficient at the point of equilibrium;  $\psi_E$  is the relative amount of burned propellant at the point of equilibrium.

表2 不同裝填密度低溫感包覆火藥裝藥的勢平衡點各參數

Table 2 Parameters at the point of equilibrium with the low temperature sensitivity coated propellant charge at different charge density

$\Delta/g \cdot cm^{-3}$	$t_E$ /ms	$p_E$ /MPa	$I_E$ /kPa·s	$l_E$ /m	$v_E$ /m·s <sup>-1</sup>	$\beta_E$	$\psi_E$
0.404	11.040	108.348	1196.753	1.997	424.168	1.040	0.678
0.506	8.670	169.406	1469.206	1.908	515.543	1.062	0.783
0.607	7.100	236.606	1681.972	1.906	628.579	1.086	0.867

由表1可見,低溫感包覆火藥裝藥較制式裝藥達到勢平衡點的時間和對應的彈丸行程都增加,主要原因是包覆藥由於阻燃包覆層的作用,初始燃燒緩慢,總燃燒時間比制式裝藥長。所以,低溫感包覆火藥裝藥的火藥燃燒統計平均分裂點也比制式裝藥向後推移,對應的勢平衡理論中的特徵值  $\psi_E$  的值也比制式裝藥大。

勢平衡理論認為,對於同一批號的火藥而言,其  $\psi_E$  值可以標志該批火藥的燃燒特性,它僅與火藥的裝藥結構和其形狀、尺寸等有關,而與裝填條件無關。表2中三組不同裝填密度的低溫感包覆火藥裝藥的裝藥成分是一致的,三組裝藥的內彈道性能正常,其勢平衡點處的參數  $t_E$ 、 $p_E$ 、 $I_E$ 、 $l_E$ 、 $v_E$ 、 $\beta_E$  的變化均在合理的範圍內。但  $\psi_E$  值的變化與傳統理論不相符,  $\psi_E$  值隨裝填密度的增加而增加。

$\psi_E$  值變化可由低溫感包覆火藥裝藥的破孔過程來解釋。由於破孔過程與裝填密度相關,裝填密度的改變相當於改變了達到包覆火藥破孔壓力的時間,即改變了包覆火藥基體火藥加入燃燒的時間,從而裝藥的燃燒規律則相應的發生改變,  $\psi_E$  值發生變化。  $\psi_E$  值隨裝填密度的變化間接證明了低溫感包覆火藥對燃氣生成規律的調控。

## 2.2 實際燃氣生成函數的計算

根據公式(5)與(6)將  $I$ - $t$  曲線換算為  $v$ - $t$  曲線和  $V$ - $t$  曲線,再由公式得到  $\psi$ - $I$  曲線,令  $Z = \frac{I}{I_E}$  得到  $\psi$ - $Z$  曲線。

$$v = \frac{S I}{\varphi m} \quad (5)$$

$$V = \frac{S^2}{\varphi m} \int_0^I I dt \quad (6)$$

$$\psi = \frac{\rho(V + V_0 - \frac{\omega}{r}) + \frac{1}{2}(K-1)\varphi mv^2}{f\omega + p\alpha\omega - p\frac{\omega}{r}} \quad (7)$$

以图 1 中低温感包覆火药装药的  $p-t$  曲线为例进行实际燃气生成函数的拟合。

主体燃烧阶段,  $0 \leq \bar{Z} \leq 1$ , 采用四次式对  $\psi-\bar{Z}$  曲线拟合:

$$\psi_1 = 2.1035\bar{Z}(1 - 2.5308\bar{Z} + 3.5052\bar{Z}^2 - 1.5694\bar{Z}^3) \quad (8)$$

碎粒燃烧阶段,  $\bar{Z} \geq 1$ , 计算得到如下三次式:

$$\psi_2 = 0.9718\bar{Z}(1 + 0.09973\bar{Z} - 0.2069\bar{Z}^2) \quad (9)$$

图 2 为拟合曲线和原始曲线的比较。由图 2 可见, 除初始阶段拟合有所误差外, 两条曲线基本一致。

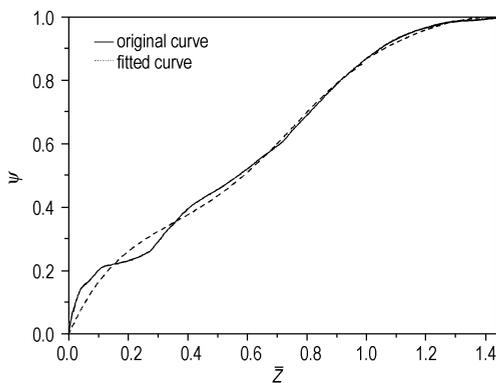


图 2 低温感包覆火药装药  $\psi-\bar{Z}$  曲线

Fig. 2  $\psi-\bar{Z}$  curve of the low temperature sensitivity coated propellant charge

### 3 势平衡内弹道模拟

在已求出的实际燃气生成函数(8)(9)的基础上, 以势平衡点为标准态建立弹道相似方程组。

$$\begin{cases} \bar{p}\bar{V} = K\bar{\pi}_\psi - (K-1)\bar{Z}^2 \\ \bar{p}d\bar{V} = 2\bar{Z}d\bar{Z} \\ \bar{t} = \int_0^{\bar{Z}} \frac{d\bar{Z}}{\bar{p}} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\bar{p} = \frac{p}{p_E}$ ,  $\bar{V} = \frac{V + V_0 - \frac{\omega}{r}}{V_E + V_0 - \frac{\omega}{r}}$ ,  $\bar{Z} = \frac{l}{l_E}$ ,  $\bar{t} = \frac{t}{t_E}$ ,  $\bar{\pi} = \frac{\beta\psi}{\beta_E\psi_E}$

由以上弹道相似方程组结合实际燃气生成函数, 便可进行内弹道计算模拟。同样对图 1 中低温感包覆火药装药的  $p-t$  曲线进行模拟, 利用 2.2 节拟合的实际燃气生成函数, 计算的  $p-t$  曲线如图 3。计算值与实际曲线基本一致。

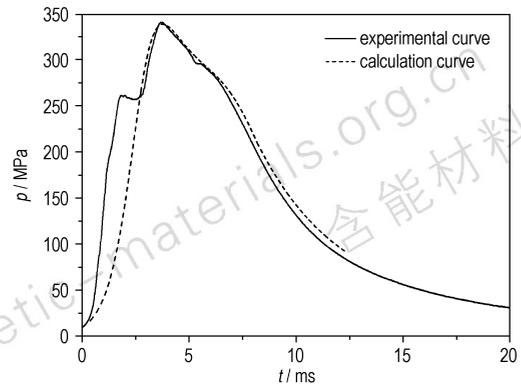


图 3 低温感包覆火药装药的实验和计算  $p-t$  曲线比较

Fig. 3 Comparison of the experimental and calculated  $p-t$  curve with the low temperature sensitivity coated propellant charge

### 4 结论

(1) 运用内弹道势平衡理论对低温感包覆火药装药的的内弹道进行分析, 可以发现, 在相同的装填密度下, 低温感包覆火药装药的势平衡点处  $\psi_E$  值比制式装药大; 低温感包覆火药装药的  $\psi_E$  值随装填密度的增加而增加。

(2) 由势平衡理论确定实际燃气生成函数, 从而建立的弹道解法简单实用, 其计算结果与实验结果基本一致。

#### 参考文献:

[1] 王泽山, 史先扬. 低温度感度发射药装药[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
WANG Ze-shan, SHI Xian-yang. Propelling charges with low-temperature sensitivity[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.

[2] 罗运军, 应三九, 王泽山. 包覆火药破孔规律的研究[J]. 南京理工大学学报, 1995, 19(6): 489-492.  
LUO Yun-jun, YING San-jiu, WANG Ze-shan. Study of exposed-perforation laws of coated propellants[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1995, 19(6): 489-492.

[3] 鲍廷钰. 内弹道势平衡理论[J]. 华东工程学院学报, 1979, (1): 1-36.  
BAO Ting-yu. Potential equilibrium theory of interior ballistics[J]. Journal of Engineering Institute of East China, 1979, (1): 1-36.

[4] 鲍廷钰. 内弹道势平衡理论的应用——膛内实际燃烧规律的研究及其内弹道解法[J]. 兵工学报, 1984, (3): 1-13.  
BAO Ting-yu. The application of the theory of equilibrium of internal ballistic potential - The study of actual burning rules in barrel and its corresponding internal ballistic solving method[J]. Acta Armamentarii, 1984, (3): 1-13.

[5] 鲍廷钰. 内弹道势平衡理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.

- BAO Ting-yu. Potential equilibrium theory of interior ballistics and its application [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1987.
- [6] 肖正刚, 应三九, 徐复铭. 深钝感球扁药混合装药的势平衡理论模拟[J]. 弹道学报, 2006, 18(1): 80-82.
- XIAO Zheng-gang, YING San-jiu, XU Fu-ming. Potential equilibrium theory simulation of deep-deterred oblate spherical powder mixed charge[J]. *Journal of Ballistics*, 2006, 18(1): 80-82.
- [7] 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 Lin-lin, Ma Zhong-liang, XIAO Zhong-liang. 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.
- [8] 林庆华, 栗保明. 电热化学炮内弹道过程的势平衡分析[J]. 兵工学报, 2008, 29(4): 487-490.
- LIN Qing-hua, LI Bao-ming. Potential equilibrium analysis of interior ballistic processes in electro-thermal chemical gun[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(4): 409-413.

## Potential Equilibrium Theory Simulation of Interior Ballistic of Low Temperature Sensitivity Coated Propellant Charge

LIU Zhi-tao, XU Bin, NAN Feng-qiang, LIAO Xin, WANG Ze-shan

(School of Chemical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics and calculation method of interior ballistic with the low temperature sensitivity coated propellant charge, the parameters at the potential equilibrium point with standard charge and the low temperature sensitivity coated propellant charge were compared by the potential equilibrium theory. The reason why  $\psi_E$  (the relative amount of burned propellant) at the potential equilibrium point changed with the charge density was analyzed and the actual burning gas formation function was fitted. The simulation of the interior ballistic was carried out based on the above. The results show that the calculated curve is in good agreement with the experimental curve and the potential equilibrium theory can be used to study the combustion laws of the low temperature sensitivity coated propellant charge.

**Key words:** material science; propellant; the potential equilibrium theory; interior ballistic

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.009