

影响低温度系数装药弹道性能的装填参数

贺晓军 王泽山

(南京理工大学化工学院;南京 210094)

吕桂琴

(北京理工大学六系,北京 100081)

摘要 从理论上分析了影响低温度系数装药弹道性能的装填参数,并具体讨论了主装药和包覆火药的混合比、燃面比及燃面温度系数等对该装药弹道温度系数的影响。研究表明,在一定范围内,包覆火药与主装药的混合比增加、主装药和包覆火药的燃面比减小或燃面温度系数的绝对值增大,有利于降低该装药的弹道温度系数。

关键词 弹道性能 低温度系数 推进剂装药

中图分类号 V512

1 引言

低温度系数装药(Low Temperature Sensitivity Charge,简称 LTSC)是由主装药(MC)和包覆火药(B)组成的混合装药。由于包覆火药结构的特殊性,这种混合装药的弹道性能除受传统的因素影响外,又增加了一些新的影响因素,如包覆火药与主装药的混合比、燃面比及燃面温度系数等。本文先从理论上推导出 LTSC 装药获得零梯度即低温度系数效果的公式,然后对各装填参数的影响进行讨论。

2 影响 LTSC 装药弹道温度系数的装填条件

由弹丸的运动方程及能量平衡方程可导出^[1]:

$$p_m = (f\omega/S) \{ [v_m/(d\psi/dt)] \cdot (1.0 + \theta) - (\alpha - \omega/\delta/S) \}^{-1} \quad (1)$$

式中, p_m 为最大膛压,MPa; f 为火药力,J/kg; ω 为装药量,kg; S 为炮膛横截面积,m²; v_m 为弹丸在最大压力点的速度,m/s; $d\psi/dt$ 为气体生成速率,s⁻¹; $\theta = k - 1$, k 为比热比; δ 为火药密度,kg/m³; α 为火药气体余容,m³/kg。

从上式可以看出,当火炮、弹丸及装药结构确定后, p_m 的大小除 θ 之外主要受对应初温下 $d\psi/dt$ 的影响,即弹道(压力)温度系数 $K_p (\Delta p_m/p_{mc} \times 100\%)$ 主要由对应初温下的 $d\psi/dt$ 决定。因此,解决装药温度系数问题的关键就是控制不同温度下混合装药的气体规律的生成速率。对于低温度系数装药,若不考虑 θ 及可燃药筒、点火药等可燃元件,则有^[2]:

$$d\psi_{MB}/dt = (1.0 - \beta) \cdot (d\psi_M/dt) + \beta \cdot (d\psi_B/dt) \quad (2)$$

式中, β 为包覆火药与主装药的质量比值(通常称混合比)、下标 MB、M、B 分别代表混合装药、主装药、包覆火药, 对上式进一步整理得:

$$d\psi_{MB}/dt = (1.0 - \beta) \cdot S_M u_M / A_{M0} + \beta \cdot S_B u_B / A_{B0} \quad (3)$$

式中, A_{M0}, A_{B0} 为药粒初始体积; S_M, S_B 为燃面, 上式对温度求导得:

$$\begin{aligned} [\partial(d\psi_{MB}/dt)/\partial T_0]_p = & (1.0 - \beta) / A_{M0} \cdot [(\partial S_M / \partial T_0)_p \cdot u_M + (\partial u_M / \partial T_0)_p \cdot S_M] + \\ & \beta / A_{B0} \cdot [(\partial S_B / \partial T_0)_p \cdot u_B + (\partial u_B / \partial T_0)_p \cdot S_B] \end{aligned}$$

因主装药是制式火药, 其初始燃面随初温变化不大, 因此 $(\partial S_M / \partial T_0)_p$ 可以忽略, 则上式简化为:

$$\begin{aligned} [\partial(d\psi_{MB}/dt)/\partial T_0]_p = & (1.0 - \beta) \cdot S_M / A_{M0} \cdot (\partial u_M / \partial T_0)_p + \\ & \beta / A_{B0} \cdot [(\partial S_B / \partial T_0)_p \cdot u_B + (\partial u_B / \partial T_0)_p \cdot S_B] \end{aligned} \quad (4)$$

由(4)式可知, 初温 T_0 对气体生成速率的影响与包覆药的燃速 u_B 、燃面温度系数 $(\partial S_B / \partial T_0)_p$ 、燃速温度系数 $[(\partial u_M / \partial T_0)_p, (\partial u_B / \partial T_0)_p]$ 有关。同样, 以上参数亦是影响 K_p 的因素。当主装药和包覆基药及混合比一经选定, 则影响 K_p 的参数主要为 S_B 、 $(\partial u_B / \partial T_0)_p$ 和 $(\partial S_B / \partial T_0)_p$ 。低温度系数装药获得零梯度的条件是 $[\partial(d\psi_{MB}/dt)/\partial T_0]_p = 0$, 即:

$$\begin{aligned} (\partial u_M / \partial T_0)_p \cdot S_M \cdot (1.0 - \beta) / A_{M0} + \\ \beta / A_{B0} \cdot [(\partial S_B / \partial T_0)_p \cdot u_B + (\partial u_B / \partial T_0)_p \cdot S_B] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

在公式(5)中, 除了 $(\partial S_B / \partial T_0)_p$ 之外, 其余各参量的值均为正, 因此要满足式, 则 $(\partial S_B / \partial T_0)_p$ 必为负值。由此可知, 低温度系数装药具有低温感效果正是由于包覆火药的负燃面温度系数抵消了装药的正燃速温度系数, 从而降低了装药的弹道温度系数, 其值的大小就反映了低温感包覆火药增燃补偿作用的大小。

3 各参量对 LTSC 装药弹道性能的影响

将公式(5)改写为:

$$\begin{aligned} [\partial(\ln u_M) / \partial T_0]_p = - \{ [\partial(\ln S_B) / \partial T_0]_p + [\partial(\ln u_B) / \partial T_0]_p \} / \\ \{ (S_M / S_B) \cdot (A_{B0} / A_{M0}) \cdot [(1.0 - \beta) / \beta] \cdot (u_M / u_B) \} \end{aligned} \quad (6)$$

由该式分析各装填参数对弹道温度系数的影响。在讨论某一参量时, 固定其它参量, 则可观察装填参数变化后, 主装药燃速温度系数 σ_{pM} 即 $[\partial(\ln u_M) / \partial T_0]_p$ 的变化。

3.1 混合比的影响

由公式(6)可以看出, 当 β 值增加, 将使等式右端项系数值增大。由于恒等式的关系, 等式左端也应增大, 即增加混合装药中包覆火药的比例, 达到零梯度时允许主装药 MC 的燃速温度系数加大, 使 MC 燃速温度系数的可调范围变大。当制出的包覆药低温感效果不明显时, 增加混合比 β 就能使装药实现低温度系数效果。表 1 给出了太根包覆火药不同混合比例的弹道试验结果^[3]。

由表 1 可见, 包覆火药与主装药的混合比明显影响火炮的弹道性能和弹道温度系数。高常温时, 随包覆火药所占百分比的增加(从 20% 到 30%), 膛压温度系数 K_p 和初速温度系数 K_v 均上升, 而在常低温时, 随着 β 的增加, 膛压温度系数和初速温度系数均下降, 甚

至出现负值,如 β 为3:7时的最大膛压小于常温最大膛压。

表1 太根包覆火药不同混合比例装药的弹道试验结果

Table 1 Ballistic test results of TEGDN coated-propellant with different mixed proportions

混合比 B/MC	温度/℃	p_m /MPa	v_0 /m·s ⁻¹	K_p	K_v
2:8	-40	438.1	1710		
	+15	451.4	1737	2.95	1.55
	+50	460.0	1757	1.91	1.15
3:7	-40	465.8	1736		
	+15	449.8	1745	-3.56	0.52
	+50	473.0	1776	5.16	1.78

注: 1) 用120mm火炮进行试验; 2) 装药量为11.2kg; 3) 弹丸质量为7.6kg。

3.2 主装药与包覆火药燃面比的影响

由公式(6)可知,减小 S_M/S_B 的值可以扩大主装药燃速温度系数的可调范围,即主装药燃面一定时,增加包覆火药的燃面对解决弹道温度系数问题有利。当 S_M/S_B 值增加时, σ_{pM} 的可调范围扩大倍数设为 K_S ,则有表2和图1的结果。

表2 S_M/S_B 与 σ_{pM} 可调范围扩大倍数

Table 2 S_M/S_B and the extended times of adjustable range of σ_{pM}

S_M/S_B	$ K_S \times 100$
1.0	1.000
1.2	0.833
1.4	0.714
1.6	0.625
1.8	0.556
2.0	0.500
2.2	0.455
2.4	0.417
2.6	0.385
2.8	0.357
3.0	0.333

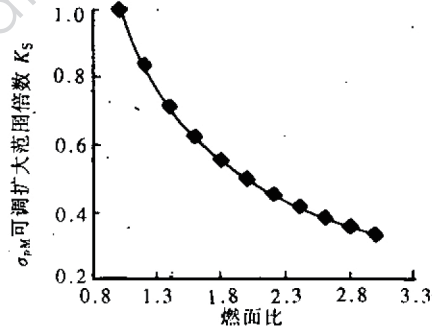


图1 S_M/S_B 与可调扩大范围(K_S)倍数的关系

Fig.1 Relationship between S_M/S_B and the extended times (K_S)

对MC装药,从开始燃烧至分裂点, S_M 一直在增加,但变化不大。而对B装药,开始燃烧时 S_B 很小,当全部破孔后, S_B 增值很大。综合二者,开始时 S_M/S_B 值较大,当膛容较大时, S_M/S_B 变小。当包覆火药的基药弧厚和药型确定之后,影响和决定 S_M/S_B 值的因素(尤其是起关键作用的初始 S_M/S_B 值),是破孔率和包覆层厚度。高、常、低温破孔率之差,也就是 S_M/S_B 之差。一般包覆火药低温破孔率大于高温破孔率,在弹道前期低温燃面比(S_M/S_B)_L小于高温燃面比(S_M/S_B)_H,因此具有低温感效果。包覆层厚度从两个方面影响 S_M/S_B 值。厚度能改变包覆层的强度,凡是能加大高、低温包覆层强度差,并使低温强度低于高温强度的有关因素都使 S_M/S_B 减小,即低温感效果明显。试验表明,包覆层的厚度大有利于这种趋势^[3]。但另一方面,厚度大导致阻燃期延长, S_B 增值慢, S_M/S_B 值大,这又会降低低温感效果。综合结果是包覆层厚度增加,弹道温度系数降低。

3.3 燃面温度系数的影响

低温感包覆火药在燃烧初始阶段一定温度和压力下所暴露的燃面与该条件下的破孔率密切相关。定性分析时, $(\partial S/\partial T_0)_p$ 可用 ΔT_0 区间的平均值 $(\Delta S/\Delta T)_p$ 近似代替。实验中发现: 破孔率越大, 燃面就越大。换句话说, 在初温间隔 ΔT_0 下的破孔率差 $|\Delta\eta|$ 越大, $|(\Delta S/\Delta T_0)_p|$ 就越大。为方便起见, 燃面温度系数 $(\Delta S/\Delta T_0)_p$ 可用 $(\Delta\eta/\Delta T_0)_p$ 或 $(\Delta\eta/\eta)_p$ 来代替。因此, 破孔率对弹道温度系数的影响, 实质上就是燃面温度系数影响。只是由于破孔率容易测定, 才用它来表征。破孔率温度系数的定义为:

$$\text{高温时: } K_{\eta H} = (\eta_H - \eta_C)/\eta_C \times 100\%$$

$$\text{低温时: } K_{\eta L} = (\eta_C - \eta_L)/\eta_C \times 100\%$$

式中, η_H 为高温下破孔率; η_L 为低温下破孔率; η_C 为常温下破孔率。

在弹道温度系数中, 膛压温度系数与速度温度系数的增减趋势是一致的。表 3 和表 4 是几种硝基胍包覆火药的破孔率, 弹道结果及温度系数。

表 3 几种硝基胍包覆火药的破孔率及温度系数

Table 3 Exposed-perforation ratio and temperature coefficient of some nitroguanidine-coated propellants

编号	包覆火药	破孔率 η			$K_{\eta L}$	$K_{\eta H}$
		-40°C	+15°C	+50°C		
1 [#]	SD16-12/19-6/92-11B	18.6	14.8	11.1	-25.68	-25.00
2 [#]	SD16-12/19-2/93-11B	19.8	9.6	4.8	-106.25	-50.00
3 [#]	SD16-12/19-13/91-11B	58.1	49.6	47.1	-17.14	-5.04

表 4 几种硝基胍包覆火药装药在 105mm 火炮上的弹道结果

Table 4 Ballistic results of some nitroguanidine-coated propellants in 105mm gun

装药	装药质量/kg	温度/°C	p_m/MPa	$v_0/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$K_p/\%$	$K_v/\%$
SD16-15/19-5/92+1 [#] (7:3)	5.85	-40	391.7	1536		
		+15	436.5	1551	10.26	0.97
		+50	471.6	1576	8.04	1.61
SD16-15/19-4/93+2 [#] (7:3)	5.85	-40	425.6	1543		
		+15	439.0	1537	3.05	-0.39
		+50	469.8	1560	7.02	1.50
SD16-15/19-6/91+3 [#] (7:3)	5.70	-40	402.3	1520		
		+15	442.9	1548	9.17	1.81
		+50	503.0	1569	13.57	1.36

注: 1) 弹丸质量为 6.3kg。

由表 3 和表 4 可以看出, 弹道温度系数与破孔率温度系数的绝对值成反比, 即:

$$K_p(K_v) \propto C/|K_\eta|$$

其中, C 为系数, 由多种因素决定, 包括装药结构、包覆火药性质、火炮结构、弹丸结构、初温等, 是一个很复杂的量。目前还难以对破孔率与温度系数的关系进行定量分析。

4 结 论

从上面的分析中可得到以下结论:

(1) 主装药和包覆火药的混合比明显影响火炮的弹道性能和弹道温度系数。当制出的包覆药燃面温度系数的绝对值不大时,可通过调整混合比来满足弹道指标的要求,使装药达到低温度系数效果,同时还给装药试验提供了一个方便的条件。

(2) 主装药和包覆火药的燃面比(尤其是起关键作用的初期燃面),主要是由破孔率和包覆层厚度决定。要获得好的低温感效果,宜采用 S_M/S_B 小的混合装药。

(3) 燃面温度系数对弹道温度系数的影响可通过破孔率温度系数来表征。弹道温度系数与破孔率温度系数的绝对值成反比。

参 考 文 献

- 1 金志明等. 现代内弹道学. 北京:北京理工大学出版社,1995.
- 2 刘玉海. 低温感包覆火药装药基本理论与点传火结构:[博士学位论文].南京:南京理工大学,1995.
- 3 王泽山等. 低温度系数装药技术研究(待发表).

LOADING PARAMETERS INFLUENCING THE BALLISTIC BEHAVIORS OF LOW TEMPERATURE SENSITIVITY CHARGE (LTSC)

He Xiaojun Wang Zeshan

(*Chemical Engineering Department of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094*)

Lü Guiqin

(*Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*)

ABSTRACT The loading parameters influencing ballistic behaviors of low temperature sensitivity charge are theoretically analyzed. The effect of mixed proportion of the propellant main charge to nitroguanidine-coated charge, burning surface ratio, S_M/S_B , and the burning surface temperature coefficient on the ballistic temperature sensitivity of the propellant are discussed in detail. The results show that increasing the percentage of coated propellant, decreasing burning surface ratio between the main charge and coated propellant charge and increasing the absolute value of burning surface temperature coefficient under some conditions are beneficial to reduce the ballistic temperature coefficient of LTSC.

KEYWORDS ballistic behavior, low temperature sensitivity, propellant charge.