排气参量工程理论计算数学模型*

周 立

(中国兵器工业第203研究所,西安 710065)

摘　要:排气参量 I 是底排增程技术中一个十分重要的性能设计参数,但一直采用的是经验估算法,这就使得底排增程技术的应用、研究受到了很大限制。文中首次建立了其工程理论计算数学模型,提出了一种较为简单实用的工程理论算法。理论计算结果与试验结果符合较好,具有较高的参考价值。

关键词:排气参量;计算;数学模型

中图分类号:TJ413.5　　文献标志码:A

Mathematical Model for Mass Injection Parameter Calculation

ZHOU Li

(No. 203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China)

Abstract: Mass injection parameter is a very important parameter in the bleed range extension technology, due to adopt the empirical estimation method and study are significantly limited. The paper setup its engineering calculation mathematical model first time, and put forward a more simple and practical engineering calculation method. The calculation result conforms to experiment. Result well and the reference value is significance.

Keywords: mass injection parameter; calculation; mathematical model

0　引言

底排增程技术是炮射弹药中一种最有效、经济可行的增程技术。该技术以结构简单、效果显著、费效比低而倍受国内外同行的青睐。但这项技术的应用、研究一直受限于实弹射击和经验估算,缺乏必需的理论指导。由于没有成熟有效的工程理论设计计算方法,因此对于不同口径的底排弹药,从头至尾都必须依靠大量试验来研究,很大程度上制约了这项技术的研究应用和推广。

排气参量 I 是底排增程技术中的一个很重要的参数。它的计算设计正确与否直接关系着排气装置的结构和动力源性能参数的确定,决定着增程效果的优劣。而且,这个参数在随着弹道的变化而变化,是一个变量,其变化规律决定着底排内弹道的设计。因此,底排内弹道的设计变化规律只有同实际弹道变化要求相一致,才能取得最佳增程效果。所以,理论上确定其计算方法及其变化规律对实际工程研究设计而言,是十分重要的。

1　力学数学模型

弹丸在出炮口后的一段距离上,膛内火药气体的后效作用还在对弹丸起着加速作用。当后效作用与外界阻力达到平衡时,弹丸速度达到最大值。之后,弹丸的进一步向前运动和气体的绕流作用,使其后的火药气体再也无法跟上弹丸运动,便在弹底形成低压区,即产生所谓的底部涡流阻力。若在此时向弹底施放一定的能量,减小或消除底阻,弹丸定会有更好的弹道性能,这就是底排增程的基本原理。

在底排增程技术中,减小或消除底阻的动力是由底排装置提供的。设该装置在火药气体后效作用的临界点开始作用,弹丸在此点的弹道参数为:V_0、X_0、Y_0、P_0、T_0,弹底压力为 P_{d0},弹底流场分布[1] 如图1所示。

在底排装置工作时,弹丸沿 x 轴(弹轴)方向向前运动一个 dx 距离,如图2所示。

设与 dx 对应的弹丸运动时间为 dt,弹丸速度为 v,则弹后新产生的低压空间为(图中网线部

* 收稿日期:2008-10-15
作者简介:周立(1960-),男,陕西咸阳人,高级工程师,研究方向:弹药安全。

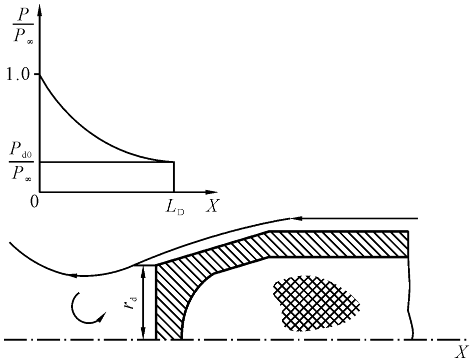

图1 无底排作用时弹底尾流场压力分布示意图

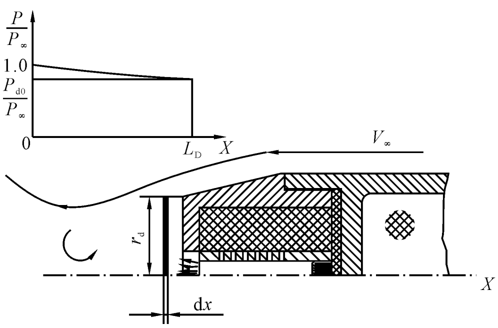

图2 底排工作时弹底流场及压力分布示意图

分):

$$\Delta V = \pi r_d^2 \cdot dx = \pi r_d^2 \cdot v \cdot dt \tag{1}$$

式中 r_d 为弹底半径,m。

在 dt 时间内,由于 ΔV 低压区左端面相对 ΔV 区域内,存在一个明显的压力梯度,在弹后形成 ΔV 低压区的同时,dt 时刻前施放的热工质因压力梯度的存在势必使其产生追逐运动。设追逐气体向前运动一个 de 距离,其运动速度为 V_x,暂忽略 dx 周界影响因素,应用可压缩气体贝努利方程。

等熵条件下,以热工质追逐的初始状态参数 V_{x0}、P 和终止状态参数 V_x、P_{d0},有:

$$\frac{V_x^2}{2} + \frac{P_{d0}}{\rho_d^k} = \frac{V_{x0}^2}{2} + \frac{P}{\rho^k} \tag{2}$$

式中:V_x 为追逐热工质终止速度,m/s;V_{x0} 为热工质追逐的初始速度,m/s;P 为热工质某瞬时初始压力,MPa;P_{d0} 为某瞬时无底排时的弹底压力,MPa;ρ 为追逐热工质气体密度,kg/m^3;ρ_d 弹底气体密度,kg/m^3;K 为气体绝热指数。

弹后气体由于热膨胀,故可设 $V_{x0} \approx 0$,在瞬时只考虑压差则 $\rho \approx \rho_d$。

故式(2)可简化为:

$$V_x = \sqrt{\frac{2(P - P_d)}{\rho_d^k}} \tag{3}$$

$$\rho = \frac{P\overline{M}}{RT} \tag{4}$$

式中:$\overline{M}$ 为热工质平均摩尔质量,kg/mol;R 为气体恒定常数;T 为热工质瞬时温度,K。

由于追逐气流的运动处在来流经弹体形成的包络面内,包络面沿弹轴回转可视为圆管,故其运动可近似按气流在一圆管内紊流处理。考虑其粘性,则沿圆管的速度分布[2]可表示为:

$$V_r = V_m\left(1 - \frac{r}{a}\right)^{\frac{1}{7}} \tag{5}$$

其中:V_m 为假设圆管的中心速度,$V_m = V_x$,m/s;a 为假设的圆管半径,在这里 $a = r_d$,m;r 为假设圆管中任一点处到轴线的距离,m。则平均追逐速度:

$$\overline{V}_x = \frac{1}{a}\int_0^a V_r dr = \frac{1}{r_d}\int_0^{r_d}\left(1 - \frac{r}{r_d}\right)^{\frac{1}{7}} dr = \frac{7}{8}V_x \tag{6}$$

故 dt 时刻前施放的热工质在 dt 时间内因追逐消除的空间为:

$$\Delta V' = \pi r_d^2 \overline{V_x} dt = \pi r_d^2 de \tag{7}$$

则 dt 时间内,在不考虑排气装置释放热工质的条件下,弹后净增的低压区空间为:

$$dV = \Delta V - \Delta V' = \pi r_d^2 (V - \overline{V}_x) \cdot dt \tag{8}$$

由式(8)知,要消除或减小底阻,就必须在 dt 时间内向 dV 区域释放足够的热工质,以使 dV 空间的压力达到或接近此时的环境压力,这就是底排装置在 dt 时间内的工作指标要求。

设在 dt 时间内对 dV 空间需要施放 dm_j 质量的热工质,根据理想气体方程有:

$$dm_j = \frac{\overline{M}P_j dv}{RT} = \frac{\overline{M}P_j}{RT}\pi r_d^2 (V - \overline{V}_x) dt \tag{9}$$

式中 P_j 为底排装置排气压力,$P_j \doteq P$,则不同时刻 t,单位时间的排气质量为:

$$\frac{dm_j}{dt} = w_j = \frac{\overline{M}P \cdot \pi r_d^2}{RT}(V - \overline{V}_x) \tag{10}$$

弹丸单位时间排开空气的质量为:

$$W_p = V_\infty \cdot \rho_\infty \cdot S_d$$

式中:V_∞、ρ_∞ 均为来流气体参数,即速度、密度,S_d 为弹底面积。

$$\text{故:} I_i = \frac{W_j}{W_p} = \frac{\overline{M}P\ \pi r_d^2}{RT} \times \frac{(V - \overline{V_x})}{V_\infty\ \rho_\infty\ S_d} \tag{11}$$

式中 I_i 为底排装置某时刻瞬时排气参量,无量纲。

$\because \quad S_d = \pi r_d^2 V_x$

$$\therefore \quad I_i = \frac{\overline{M}P}{RT} \frac{(V - \overline{V}_x)}{V_\infty \cdot \rho_\infty} \tag{12}$$

将式(3)、式 6)代入式(12)得:

$$I_i = \frac{\overline{M}P}{RT \cdot V_\infty \cdot \rho_\infty}\left(V - \frac{7}{8}\frac{\sqrt{2(\rho - \rho_d)}}{\rho_d^k}\right) \tag{13}$$

底排装置在整个工作过程的总排气量为:

$$M_j = \int_0^{t_k} W_j \mathrm{d}t = \frac{\overline{M}}{RT}\int_0^{t_k} P\left(V - \frac{7}{8}\frac{\sqrt{2(\rho - \rho_d)}}{\rho_d^k}\right)\mathrm{d}t \tag{14}$$

2　算法与示例

求解弹丸在不同时刻的排气参量或总排气量,必须结合弹道方程[3]和有关气动力方程并采用数值方法。

设在确定的时刻 t,由弹道气动力方程解得对应点的弹道诸元为 v、x、y、p、ρ 在底排不工作时的 P_d,利用式(3)、式(4)、式(6)、式(10),求得 W_j、I_i,再以这些参数为起点,重复上述步骤,如此循环下去直至解出全弹道。

以某口径弹丸弹道初始点为例,简介一下具体应用。

已知 $R_m = 0.065$ m(弹丸最大半径),$r_d = 0.050$m,$V_0 = 940$m/s,$x = 0$,$y = 0$,$P = 0.98 \times 10^5$Pa,$P_d = 0.43 \times 10^5$Pa,$\rho_\infty = 1.25$kg/m^3;动力源参数:$R = 848$kg · m/kg · K,$\overline{M} = 26$kg/mol,$k = 1.25$,$\rho_d = 0.167$kg/m^3。

由式(3)得:

$$V_x = \sqrt{\frac{2 \times 0.55 \times 10^5}{(0.167)^{1.25}}} = 1026\text{m/s}$$

由(6)得:

$$\overline{V}_x = V_x \cdot \frac{7}{8} = 900\text{m/s}$$

$$W_j = \frac{\mathrm{d}mj}{\mathrm{d}t} = \frac{P\overline{M} \cdot \pi r_d^2}{\widetilde{R}T}(V - \overline{V}_x) = 0.046\text{kg/s}$$

$$W_p = V_\infty \cdot \rho_\infty \cdot S_d = 940 \times 1.25 \times 3.14 \times 0.05^2 = 9.228\text{kg/s}$$

$$I_i = \frac{W_j}{W_P} = \frac{0.046}{9.228} = 0.005$$

实际采用值 $I_i = 0.0054$(一般经验要求 $I_i = 0.003 \sim 0.008$)。

3　结论

1)理论假设条件下的力学数学模型基本反映了实际情况,避免了经验估算的不足,尤其是用数值解法可求得弹道不同点处对 I_i 值的要求,为底排内弹道设计提供了依据。

2)工程理论算法对底排技术的应用研究具有指导意义和推广作用,在一定程度上解决了研究工作完全依赖试验的问题,节省了人力、物力和财力等。

参考文献:

[1]　魏惠之. 弹丸设计理论[M]. 北京:国防工业出版社,1985.

[2]　沈仲书. 弹丸空气动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1984.

[3]　浦发. 外弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,1989.