

文章编号: 1006-9941(2017)11-0925-07

基于药柱变燃速燃烧的底排减阻增程方法

张竹伟, 张领科

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了深入研究底部排气弹减阻增程的特性, 进一步提高弹丸的射程。针对国内某 155 mm 底排弹, 建立了不同燃速燃烧的底排药柱、变燃速燃烧的包覆药柱和药柱包覆层位置的变化三种情况下的燃烧模型, 模型中引入了燃速改变系数, 并通过数值计算分析了其对底排弹减阻和增程的影响。结果表明, 当燃速改变系数从 0.7 增加到 1.2 时, 底排工作时间减少 27.08 s, 射程减少 1.16 km, 增程率减少 3.86%; 变燃速燃烧的药柱在内层采用高燃速燃烧, 外层采用低燃速燃烧的增程率可达 32.33%; 对药柱分层燃烧位置优化后, 在距药柱内环约 1/4 处有最佳射程 39.76 km。因此, 可以通过寻求底排药柱最优的分层位置, 采用变燃速燃烧的方法来改善底排弹减阻增程特性, 且这种方法具有普遍适用性。

关键词: 底部排气弹; 底排药柱; 可变燃速; 减阻; 增程

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.007

1 引言

弹丸在飞行过程中, 其底部阻力约占整个阻力的一半, 在某些情况下甚至更高, 因此提高炮弹射程的关键因素是降低弹丸的底阻。底部排气弹(简称底排弹)减阻增程的原理是通过在弹丸底部附加一个排气装置, 向弹底低压区排入高温燃气, 提高底压减小底阻从而达到增程的目的^[1]。底排弹技术在大口径火炮系统中已获得广泛应用, 其最大优势在于可以大幅度提高火炮射程, 所以改善底排弹的减阻增程特性具有重要的意义。

理论分析和试验研究表明^[2-6], 底排药柱的燃烧特性对底排弹减阻增程有着重要的影响。当前对于底排药柱燃烧的研究主要包括点火性能上瞬间能使药柱初始燃烧面正常稳定燃烧, 新型药剂的燃烧性能、装药结构以及药剂随燃气流动后进行二次燃烧等方面。在燃烧方式上, 崔新军等^[7]通过分析增面燃烧方式和减面燃烧本质的不同, 指出减面燃烧在提高弹丸射程上

还有潜力。对于变燃速燃烧的方式^[8], 目前被应用于火炮的发射药中, 其具有高能量、高安全性、燃烧的渐增性、工艺制造与武器应用的普遍适用性等优点。但在内外层药量比的控制、各层药的组分及其含量百分比最优化等方面还有待研究^[9]。底排弹在飞行过程中每一时刻底排药柱燃烧对减阻效果的影响都不同, 将变燃速燃烧的方法应用到底排药柱中, 对底排弹的减阻增程特性有一定的改善作用。变燃速发射药与变燃速底排药柱的不同之处在于, 变燃速发射药粒形状为中心开孔管状, 内外层表面同时燃烧, 而变燃速底排药柱首先在内表面及狭缝表面燃烧, 当内层药柱燃尽后在外层药柱的内表面继续燃烧。

以上工作指出了底排减阻增程的研究方向, 为了寻找具体改善底排减阻增程的方法, 本研究拟通过建立不同燃速底排药柱的燃烧、包覆药柱的变燃速燃烧和药柱包覆层位置的变化三种情况下的燃烧模型, 计算分析其对底排弹减阻和增程的影响, 对底排药柱的结构设计与燃烧控制技术和底排弹的进一步增程研究提供参考。

2 计算模型

2.1 底排装置内弹道模型

底排装置内弹道模型采用文献[10]中的模型。底排药柱为中空圆柱形, 端面、外表面包覆和药柱分成三等分, 内圆表面与六个狭缝表面为燃烧面, 不同燃速

收稿日期: 2017-05-12; 修回日期: 2017-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助(51106075)

作者简介: 张竹伟(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事含能材料燃烧控制技术和底排高效增程技术研究。

e-mail: zhangzhuwei_power@yeah.net

通信联系人: 张领科(1978-), 男, 副研究员, 主要从事含能材料瞬态燃烧控制技术和底排高效增程技术的研究。e-mail: nustzk@njust.edu.cn

底排药柱、变燃速燃烧的包覆药柱和药柱包覆层位置的变化三种情况下的药柱结构如图 1 所示。

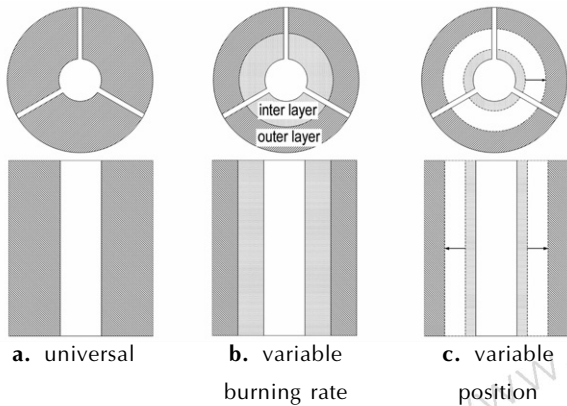


图 1 底排药柱截面

Fig. 1 Three kinds section of base bleed propellant

针对三种不同底排药柱燃烧的模型,作出如下调整:

(1) 第一种模型是通用的底排药柱模型,燃速公式如式(1):

$$\begin{cases} \dot{r} = j \cdot \varepsilon' a p_{\text{mot}}^n \\ \dot{c} = j \cdot a p_{\text{mot}}^n \end{cases} \quad (1)$$

式中, \dot{r} 为弧面燃速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; \dot{c} 为狭缝燃速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; j 为燃速改变系数; ε' 为燃速综合修正因子; a 为燃速系数, $\text{m} \cdot \text{Pa}^{-n} \cdot \text{s}^{-1}$; n 为燃速压力指数; p_{mot} 为底排装置内压力, Pa 。

实际中,可通过调整 AP 粒度^[11]或使用不同的工艺参数^[12]等方法来改变底排药柱燃速,但这会同时改变燃速系数与燃速压力指数,因燃速系数对药柱燃速的影响更显著,作为理论研究,假设在 a 和 n 不变的基础上,研究燃速改变系数 j 分别为 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 和 1.2 时底排弹的减阻增程特性。

(2) 第二种模型是在第一种模型的基础上,采用包覆火药的方式,改变外层燃速,使两层药柱的燃速不同,研究底排药柱的变燃速燃烧时底排弹的减阻增程特性。燃速公式如式(2):

$$\begin{cases} \dot{r} = j_1 \cdot \varepsilon' a p_{\text{mot}}^n, \quad \dot{c} = j_{1,2} \cdot a p_{\text{mot}}^n & r \leq r_{1,2} \\ \dot{r} = j_2 \cdot \varepsilon' a p_{\text{mot}}^n, \quad \dot{c} = j_{1,2} \cdot a p_{\text{mot}}^n & r > r_{1,2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, j_1 为药柱内层燃速改变系数; j_2 为药柱外层燃速改变系数; $j_{1,2}$ 为狭缝燃速改变系数; $r_{1,2}$ 为分层燃烧的位置; r 为弧面燃烧厚度, m 。

由于底排药柱狭缝是复合层,狭缝燃速改变系数按两层燃烧面积所占的比例计算,如式(3):

$$j_{1,2} = \frac{j_1 s_1 + j_2 s_2}{s_1 + s_2} \quad (3)$$

式中, s_1 为狭缝中第一层的燃烧面积, m^2 ; s_2 为狭缝中第二层的燃烧面积, m^2 。

(3) 第三种模型是在第二种模型的基础上,通过改变底排药柱变燃速燃烧的位置,研究底排弹的减阻增程特性。

考虑到转速对燃速的影响,以上模型均采用旋转修正因子加符合修正因子的方法,即 ε' 按式(4)确定:

$$\varepsilon' = \alpha \cdot \varepsilon \quad (4)$$

式中, α 为燃速符合修正因子; ε 满足式(5):

$$\varepsilon(\varepsilon-1) + 279.6 \cdot \sqrt{\varepsilon(\varepsilon-1)} / \sqrt{(r_1+e) \dot{\gamma}} / g = 1.196 \quad (5)$$

式中, $\dot{\gamma}$ 为弹丸自转角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; e 为药柱烧掉的厚度, m ; g 为重力加速度, $9.806 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

2.2 底排弹外弹道模型

底排外弹道模型采用文献[13]中旋转弹丸简化的 2D 模型,忽略科氏力的影响,并增加减阻方程,如式(6):

$$C_D = C_{D_{B0}} - C_{D_{B0b}} \cdot R_{CDb} \quad (6)$$

式中, C_D 为底排弹阻力系数; $C_{D_{B0}}$ 为底排装置不工作时的总阻系数; $C_{D_{B0b}}$ 为底排装置工作时的底阻系数; R_{CDb} 为减阻率。

减阻率采用半经验公式和减阻效果符合修正因子的方法^[10],即 R_{CDb} 按式(7)确定:

$$R_{CDb} = \begin{cases} \beta(A_1 I + A_2 I^2)(B_1 + B_2 Ma + B_3 Ma^2) & I < 4 \times 10^{-3} \\ \beta(A_3 + A_4 I + A_5 I^2)(B_1 + B_2 Ma + B_3 Ma^2) & I \geq 4 \times 10^{-3} \end{cases} \quad (7)$$

式中, β 为减阻效果符合修正因子; I 为排气参数; Ma 为马赫数; $A_1 = 0.3497 \times 10^3$; $A_2 = -0.4143 \times 10^5$; $A_3 = 0.477$; $A_4 = 80.46$; $A_5 = -0.3482 \times 10^4$; $B_1 = 1.16$; $B_2 = -0.285$; $B_3 = 0.049$ 。

3 计算仿真

以国内某 155 mm 底排弹为例^[1],底排装置不工作时射程 30 km,当燃速改变系数为基准燃速,即 $j = 1.0$ 时,底排工作设计射程 39 km。根据模型编写相应的仿真程序,计算分析不同燃速改变系数的底排药柱燃烧、包覆药柱的变燃速燃烧以及包覆药柱变燃速燃烧的位置引起底排弹减阻增程性能的变化。参数设

置如下：底排药柱采用 AP/HTPB 复合底排推进剂^[14]，药柱质量为 1.08 kg，药柱内半径为 21.5 mm，药柱外半径为 60 mm，药柱长度为 76 mm，狭缝数为 3 个，狭缝半宽为 1.5 mm，药剂密度为 1370 kg·m⁻³，气体常数为 401 J·kg⁻¹·K⁻¹，药柱爆温为 1812 K，弹丸直径为 155 mm，弹丸长度为 960.4 mm，弹丸质量为 48 kg，喷口横截面积为 1.56×10⁻³ m²，绝热指数为 1.283，燃速系数为 7×10⁻⁶ m·Pa⁻ⁿ·s⁻¹，燃速指数为 0.484，弹丸初速为 903 m·s⁻¹，射角为 51°，火炮缠度为 20°，燃速符合修正因子为 0.954，减阻效果符合修正因子为 0.948。

3.1 不同燃速药柱燃烧的减阻增程特性

底排药柱燃烧时间 t 、射程 X 和增程率 Δ 的计算结果与燃速改变系数的关系如表 1 所示。从表 1 可以看出，随着燃速改变系数的增大，底排工作时间和射程都会降低，当 j 从 0.7 增加到 1.2 时，底排工作时间减少 27.08 s，射程减少 1.16 km，增程率减少 3.86%。

表 1 不同燃速药柱的弹丸工作参数

Table 1 The operating parameter of projectile using different burning rate of propellant

parameters	j					
	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
t/s	46.88	37.92	31.37	26.48	22.74	19.80
X/km	39.52	39.46	39.26	39	38.69	38.36
$\Delta/\%$	31.73	31.53	30.87	30	28.97	27.87

Note: j is the burning rate change coefficient; t is burning time of base bleed propellant; X is firing range; Δ is extended range rate.

图 2 和图 3 分别为底排装置内压力和燃气质量流率随时间的变化曲线。底排装置内压力直接到底排药柱的燃速与燃气的质量流率，从而影响减阻率的变化。从图 2 可以看出随着燃速改变系数的增加，压力初值升高，从 72761 Pa 上升到 90017 Pa；压力随着药柱的燃烧呈现出下降的趋势，在减阻阶段最后基本重合，说明燃速对底排装置内压力初值的影响较大。

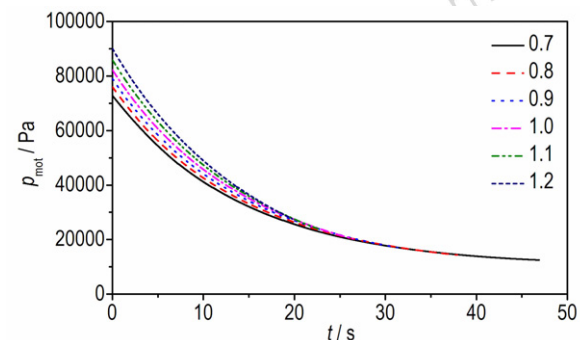


图 2 不同燃速改变系数下底排装置内压力-时间曲线
Fig.2 Internal pressure of base bleed unit-time curves with different burning rate

燃气质量流率的变化趋势与压力的变化趋势相似，但其随着燃速改变系数的增加，质量流率初值变化幅度更大， j 为 1.2 时的质量流率初值是 j 为 0.7 的 1.9 倍；随着时间的增加，质量流率在逐渐降低，在药柱燃尽前基本重合。

图 4 中排气参数随着燃速改变系数的增加初值和峰值皆增大，且随着时间的增加，当排气参数较小时，其升高较快，当排气参数继续增大到超过一定值后，其升高趋势变缓并出现下降的趋势。图 5 为不同燃速改

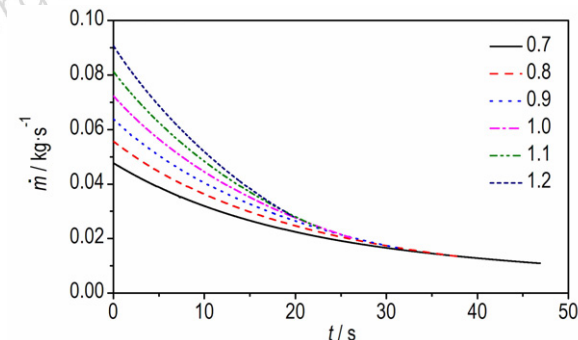


图 3 不同燃速改变系数下燃气质量流率-时间曲线
Fig.3 The mass flow rate of base bleed-time with different burning rate

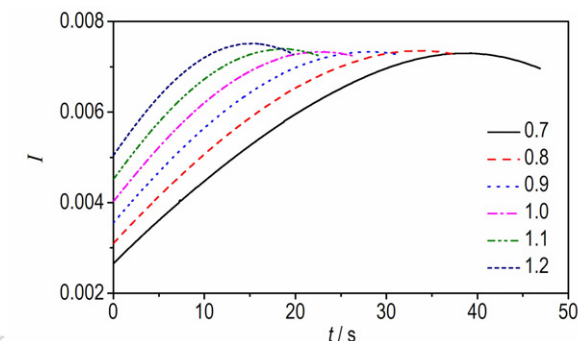


图 4 不同燃速改变系数下排气参数-时间曲线
Fig.4 Parameter of base bleed-time curves with different burning rate

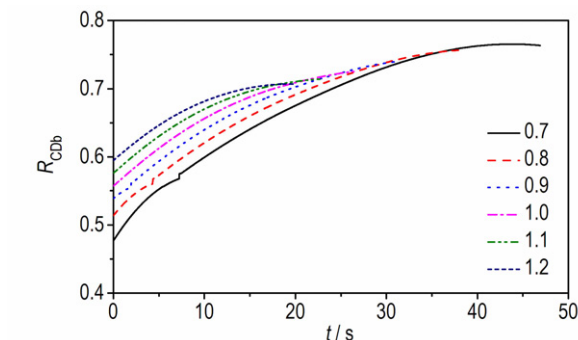


图 5 不同燃速改变系数下减阻率-时间曲线
Fig.5 Rate of reduction drag-time curves with different burning rate

变系数下减阻率随时间的变化关系,燃速改变系数为 1.2 时的初始减阻率比 0.7 时的高 11.82%, 峰值却小了 5.66%, 减阻时间缩短了 57.76%, 故低燃速的底排药柱增程效果更好; 但是过低燃速的药柱反而使减阻效果变差。

3.2 底排药柱变燃速燃烧的减阻增程特性

为了寻求底排药柱的燃烧对底排弹减阻增程特性的改善方法, 考虑药柱分层燃烧的情况。分层燃烧中 1.2/0.7 表示药柱内层的燃速改变系数 j_1 为 1.2, 外层的燃速改变系数 j_2 为 0.7。令分层燃烧位置在底排药柱内外半径的中间即 $r_{1,2} = 40 \text{ mm}$ 时, 底排药柱燃烧时间 t 、射程 X 和增程率 Δ 的计算结果如表 2 所示。从表 2 可以看出药柱从高燃速到低燃速燃烧的增程率高于药柱从低燃速到高燃速燃烧的增程率, 说明弹丸运动前半段采用高燃速燃烧, 后半段采用低燃速燃烧的减阻效果更好。

为方便说明, 选择射程较远的工况作为分析对象, 即令分层燃烧中 1.0/0.7 为工况 1, 0.7/1.0 为工况 2。

表 2 药柱变燃速燃烧的弹丸工作参数

Table 2 The operating parameter of projectile using variable burning rate of propellant

parameters	t/s	X/km	$\Delta/\%$	parameters	t/s	X/km	$\Delta/\%$
0.7/1.2	31.56	39.14	30.47	1.2/0.8	28.82	39.38	31.27
0.7/1.1	33.37	39.22	30.73	1.1/0.8	30.42	39.46	31.53
0.7/1.0	35.60	39.30	31.00	1.0/0.8	32.38	39.52	31.73
0.8/1.2	27.78	38.98	29.93	1.2/0.7	33.11	39.61	32.03
0.8/1.1	29.51	39.09	30.30	1.1/0.7	34.84	39.66	32.20
0.8/1.0	31.67	39.21	30.70	1.0/0.7	36.86	39.70	32.33

Note: t is burning time of base bleed propellant; X is firing range; Δ is extended range rate

图 6 和图 7 分别为弹丸飞行轨迹和速度随时间的变化曲线, 可见初始段弹道基本重合, 之后工况 1 在 51.99 s 时达到最高点 15.08 km, 速度 $360.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 工况 2 在 51.74 s 时达到最高点 14.95 km, 速度 $358.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 前者的弹道轨迹最高点更高, 且弹丸在最高点的速度较大, 最高点时间稍后有移, 说明其在减阻阶段的减阻效果更好。图 8 和图 9 分别为底排装置内压力和燃气质量流率随时间的变化曲线, 两者都呈现出下降的趋势, 由于分层燃烧的存在, 两工况的底排装置内压力和燃气质量流率会先后发生突变, 突变前后曲线基本保持平行; 工况 1 的底排装置内压力和燃气质量流率较高, 突变后变低, 工况 2 的则反之。

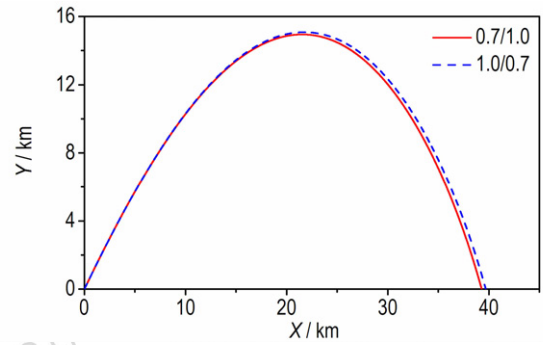


图 6 弹丸飞行轨迹

Fig. 6 The flight trajectory of projectile

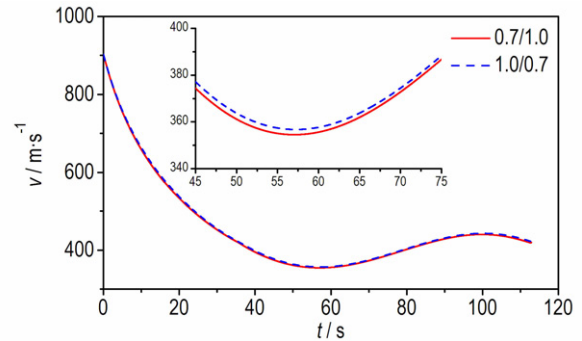


图 7 弹丸飞行的 v-t 曲线

Fig. 7 The v-t curves of flight projectile

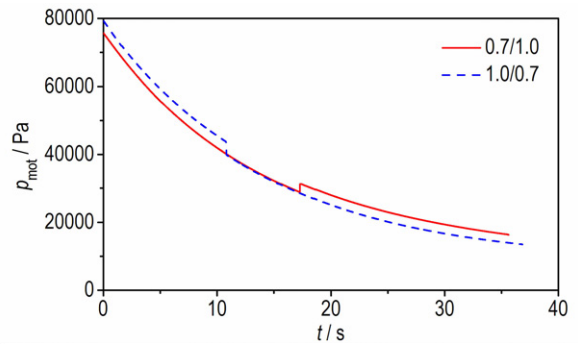


图 8 底排装置内压力随时间的变化曲线

Fig. 8 The internal pressure of base bleed unit variation curves with time

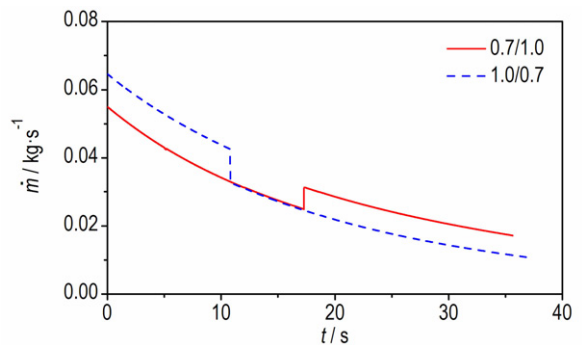


图 9 燃气质量流率随时间的变化曲线

Fig. 9 The mass flow rate of base bleed variation curves with time

图 10 和图 11 分别为排气参数和减阻率随时间的变化曲线,可见药柱变燃速燃烧的排气参数和减阻率变化趋势相似。减阻初期(0~10 s),工况 1 的排气参数和减阻率较高,经突变后降低,工况 2 的则反之;减阻后期(27 s~底排工作结束),工况 2 的最大排气参数比工况 1 的增加了 52.63%,但其减阻率仅增加了 7.53%,说明排气参数对减阻率的影响变小;在两者底排工作时间基本相近的条件下,工况 1 射程较远,说明底部排气在减阻初期的减阻性能比在减阻后期的更好。由于在弹道的不同点,减阻率对射程的影响不同,距炮口越近影响越大;且小排气参数比大排气参数对减阻率的影响更大。综上分析,在减阻初期,药柱燃速较高导致排气参数增大,减阻率增大;在减阻中后期,药柱燃速较低可延长减阻阶段时间,因此药柱的变燃速燃烧更有利于弹丸的减阻增程。

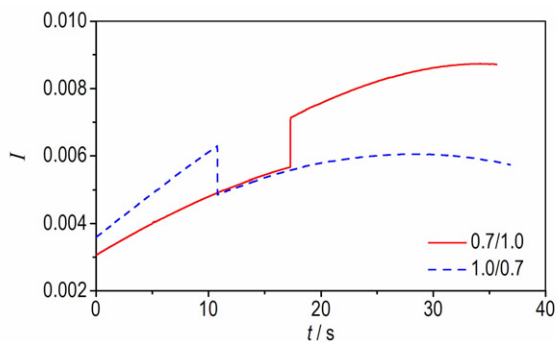


图 10 变燃速燃烧的排气参数-时间曲线
Fig. 10 Parameter of base bleed-time curves with variable burning rate

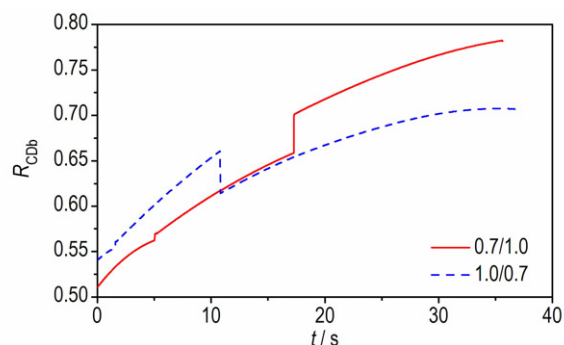


图 11 变燃速燃烧的减阻率-时间曲线
Fig. 11 Rate of reduction drag variation-time curves with variable burning rate

图 12 为变燃速两种情况和固定燃速下的射程随底排工作时间的变化,其随着底排工作时间的增加,射程逐渐变大,到一定程度变得平稳。可以发现,药柱从

低燃速到高燃速燃烧的增程效果有限,且制作包覆药柱工艺复杂,生产成本低,因此不建议采用该方法。而采用从高燃速到低燃速燃烧的包覆药柱,在底排工作时间相同的条件下,能进一步提升射程,增程率可达 32.33%。

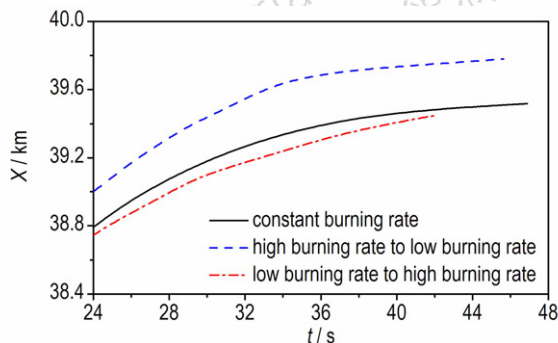


图 12 射程随底排工作时间的变化曲线
Fig. 12 The firing range variation curves with working time of base bleed unit

3.3 分层位置变化药柱燃烧的减阻增程特性

弹丸的射程受到初始段减阻效果和底排工作时间的复合影响,分层燃烧的位置同时与上述两个因素有着直接的关系,为了达到更远的射程,在上面的基础上,以射程最远的工况 1 为研究对象,分层燃烧的位置每变化 2 mm,分析底排弹减阻增程的特性。结果如图 13 所示,射程随分层燃烧位置的后移先增大后减小,分层燃烧的位置越后,射程下降越快,分层燃烧位置在距药柱内环约 1/4 处有最远射程 39.76 km,即初始段减阻效果和底排工作时间的影响耦合到一个最优点。

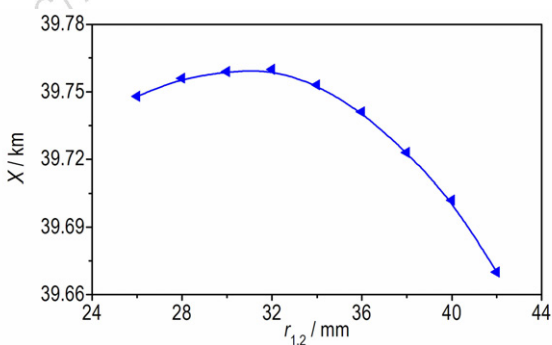


图 13 射程随分层燃烧位置的变化曲线
Fig. 13 The firing range variation curve with subsection burning position

4 结论

针对国内某 155 mm 底排弹,建立了不同燃速燃

烧的底排药柱、变燃速燃烧的包覆药柱和药柱包覆层位置的变化三种情况下的燃烧模型, 计算分析得到如下结论:

(1) 当燃速改变系数从 0.7 增加到 1.2 时, 底排工作时间减少 27.08 s, 减阻率初值升高 11.82%, 减阻率峰值降低 5.66%, 射程减少 1.16 km, 增程率减少 3.86%。

(2) 变燃速燃烧的药柱在内层采用高燃速燃烧, 外层采用低燃速燃烧的减阻效果更好, 在底排工作时间相同的情况下, 比燃烧普通底排药柱的射程有明显提高, 增程率可达 32.33%; 且优化后药柱分层燃烧位置在距药柱内环约 1/4 处有最佳射程 39.76 km。

(3) 可以通过寻求底排药柱最优的分层位置, 并在内层采用高燃速燃烧, 外层采用低燃速燃烧的方法来改善底排弹减阻增程的特性, 且这种方法具有普遍适用性。

参考文献:

- [1] 郭锡福. 底部排气弹外弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 3-17.
GUO Xi-fu. Exterior ballistics of base bleed projectile[M]. Beijing: Publishing Company of National Defence Industry, 1995: 3-17.
- [2] Choi J Y. Numerical study of base bleed projectile with external combustion [R]. AIAA 2005-4352, 2005.
- [3] 丁则胜, 罗荣, 陈少松. 底部燃烧减阻风洞实验技术研究[J]. 空气动力学报, 1993, 11(2): 159-163.
DING Ze-sheng, LUO Rong, CHEN Shao-song. A study of base burning experimental technique in wind tunnel[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 1993, 11(2): 159-163.
- [4] 丁则胜, 刘亚飞, 赵子华, 等. 提高底排减阻增程率的途径[J]. 弹道学报, 1998, 10(1): 35-40.
DING Ze-sheng, LIU Ya-fei, ZHAO Zi-hua, et al. A method of increasing rates of reduction drag and expansion range of base bleed projectile [J]. *Journal of Ballistics*, 1998, 10(1): 35-40.
- [5] 张炎清, 赵子华. 某底部排气弹提高射程途径的探讨[J]. 弹箭与制导学报, 1995(3): 50-53.
ZHANG Yan-qing, ZHAO Zi-hua. The discussion of a method increasing range of base bleed projectile [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 1995(3): 50-53.
- [6] 骆晓臣, 姚文进, 徐文科, 等. 药柱燃速对底排工作过程及底排弹射程影响的数值模拟[J]. 含能材料, 2015, 23(11): 1111-1118.
LUO Xiao-cheng, YAO Wen-jin, XU Wen-ke, et al. Numerical investigation on the effect of combustion rate of propellant on the operation process and firing range of the base bleed projectile [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(11): 1111-1118.
- [7] 崔新军, 吴振宇. 增面燃烧方式与减面燃烧方式对底排弹增程效果的影响[J]. 弹箭与制导学报, 1998(1): 7-10.
CUI Xin-jun, WU Zhen-yu. Effect of increasing and reducing combustion mode on the expansion range of base bleed projectile. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 1998(1): 7-10.
- [8] 萧忠良, 贺增弟, 刘幼平, 等. 变燃速发射药的原理与实现方法[J]. 火炸药学报, 2005, 28(1): 25-27.
XIAO Zhong-liang, HE Zeng-di, LIU You-ping, et al. Principle and realizable approach of variable burning rate propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(1): 25-27.
- [9] 范雪坤, 马忠亮, 朱林. 变燃速发射药燃烧性能研究进展[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(7): 48-50.
FAN Xue-kun, MA Zhong-liang, ZHU Lin. Research advance of combustion performance for launch ammunition of changeable combustion speed [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2011, 32(7): 48-50.
- [10] 张领科, 周彦煌, 余永刚. 底排装置工作不一致性对射程散布影响的研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(4): 442-446.
ZHANG Ling-ke, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang. Research on range dispersion of base bleed projectile caused by inconsistent working characteristics of base bleed unit. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(4): 442-446.
- [11] 张洪林, 刘宝民, 焦宗平, 等. AP 粒度对底排药燃速的影响[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 66-69.
ZHANG Hong-lin, LIU Bao-min, JIAO Zong-ping, et al. Effect of particle size of AP on burning rate of base bleed charge. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(4): 66-69.
- [12] Pasagic S, Antonovic D, Brzic S. Influence of technological parameters on the combustion velocity of pyrotechnic compositions for gas generator of base bleed projectiles [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2015, 12(2): 331-346.
- [13] 闫章更, 祁载康. 射表技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 41-44.
YAN Zhang-geng, QI Zai-kang. Firing tables technology [M]. Beijing: Publishing Company of National Defence Industry, 2000: 41-44.
- [14] 张领科, 余永刚, 刘东尧, 等. AP/HTPB 复合底排推进剂初温对弹丸落点散布的影响[J]. 含能材料, 2015, 23(3): 253-257.
ZHANG Ling-ke, YU Yong-gang, LIU Dong-yao, et al. Scatter of projectile affected by initial temperature of AP/HTPB composite base bleed propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(3): 253-257.

Method of Drag Reduction and Extend Range Based on Variable Burning Rate of Base Bleed Propellant

ZHANG Zhu-wei, ZHANG Ling-ke

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to research the drag reduction and extend range characteristics of base bleed projectile, the three burning models were established for base bleed propellant with different burning rate, cladding propellant with variable burning rate and different cladding layer position of propellant for 155 mm base bleed projectile. The drag reduction and extend range characteristics of base bleed projectile were calculated and analyzed numerically by introducing the burning rate change coefficient. Results show that the burning rate change coefficient increases from 0.7 to 1.2, the working time of the base bleed reduces 27.08 s, the firing range reduces 1.16 km and the extend range rate increases 3.86%. The extend range rate is 32.33% by using the variable burning rate propellant, which the inner layer burning rate is higher than outer layer. The maximum firing range is 39.76 km by optimizing the propellant at 1/4 of the inner ring. Therefore, the drag reduction and extend range characteristics of base bleed projectile could be improved by optimizing the layer position and using variable burning rate of base bleed propellant.

Key words: base bleed projectile; base bleed propellant; variable burning rate; reduction drag; extend range

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.007



《含能材料》“含能共晶”征稿

含能共晶是不同含能分子通过氢键等相互作用力形成的具有稳定结构和性能分子晶体。含能共晶充分组合了单质含能分子的优点,呈现出感度低,综合性能优良的特点,具有潜在的应用前景,共晶研究已经引起国内外含能材料学界的高度关注。为推动含能共晶的研究和交流,本刊特推出“含能共晶”专栏,主要征稿范围包括含能共晶晶体设计与性能预测、含能共晶的制备、结构解析、性能等。来稿请注明“含能共晶”专栏。

《含能材料》编辑部