

包覆层厚度对包覆火药燃烧 和弹道性能的影响

罗运军 王焯军 王泽山 贺晓军

(南京理工大学化工学院, 南京 210094)

摘要 分析了包覆火药装药的原理,研究了火药包覆层厚度对火药燃烧和弹道性能的影响,得出了一些对包覆火药装药技术有重要意义的结论。

关键词 包覆火药 装药 燃烧 内弹道

1 引言

由于以碳、氢、氧、氮为体系的高能发射药的研制受到限制,有关发射药技术的研究逐渐转移到装药技术的研究上来^[1~3]。在武器结构相对稳定的情况下,改进装药技术是大幅度提高身管武器射程和威力的有效途径。装药技术潜力大,比较容易实现,技术先进的国家都在这一领域里进行了广泛、深入地研究^[4]。新概念、新技术不断涌现,如刚性组合装药^[5]、密实装药^[6]、随行装药^[7]、包覆火药装药^[8~10]等。在这些装药技术中,包覆火药装药技术因具有降低弹道温度系数,提高弹丸初速,降低膛内压力波等众多优点而受到各国的重视。Monision^[11]曾指出,包覆火药装药技术是一种近中期的火炮推进技术。因此,研究包覆火药装药技术对提高我国身管武器的战术技术水平具有重要意义。

本研究主要探讨包覆层厚度对包覆火药燃烧和弹道性能的影响。

2 基本原理分析

作者曾著文分析了包覆火药装药降低弹道温度系数和提高弹丸初速的原理^[12],指出:

(1) 制式装药产生弹道温度系数的原因是由于温度影响了火药的线性燃速 de/dt ,使在不同温度下火药的气体生成速率 $d\psi/dt$ 产生差异造成的。包覆火药之所以能降低温度系数,其原理是改变火药的初始燃面与温度的依赖关系,使初始燃面 (σ_0) 随温度的增加而减小,而 $d\psi/dt = (x\sigma_0/e_0) \cdot (de/dt)$ 不随温度变化或变化很小,以此达到降低或消除弹道温度系数的目的。式中: x 为火药特征量, e_0 为火药弧厚, ψ 为火药气体生成量。

(2) 包覆火药装药提高弹丸的初速有三个途径:一是增大 $p-l$ 曲线下的做功面积;二是利用降低温度系数得到的膛压余量,通过提高常温膛压来提高弹丸初速;三是提高装填密度。

由此可见,无论是降低弹道温度系数,还是提高弹丸的初速,包覆火药的包覆层厚度都是一个重要的参数,它直接影响包覆火药初始燃面对温度的依赖关系以及膛内 $p-t$ 曲线的形状。因此,研究包覆层厚度对包覆火药燃烧性能和弹道性能的影响对包覆火药装药设计有重要意义。

3 包覆层厚度对包覆火药燃烧性能的影响

为了研究包覆层厚度对包覆火药燃烧性能的影响,我们以硝基胍包覆火药为基药,分别包成 11B, 13B, 15B 等厚度的包覆火药,再进行密闭爆发器实验,实验条件为:

爆发器容积, 700ml; 点火压力, 10MPa; 实验温度为 $-40, +15, +50^{\circ}\text{C}$; 装填密度为 $0.25\text{kg}/\text{dm}^3$ 。

3.1 不同包覆层厚度包覆火药 $p-t$ 曲线的分析

图 1 是三种不同包覆层厚度硝基胍包覆火药在不同温度定容燃烧时的 $p-t$ 曲线。从图中可看出,包覆层越厚,定容燃烧时的 $p-t$ 曲线上升越缓慢,包覆火药燃烧的时间越长。

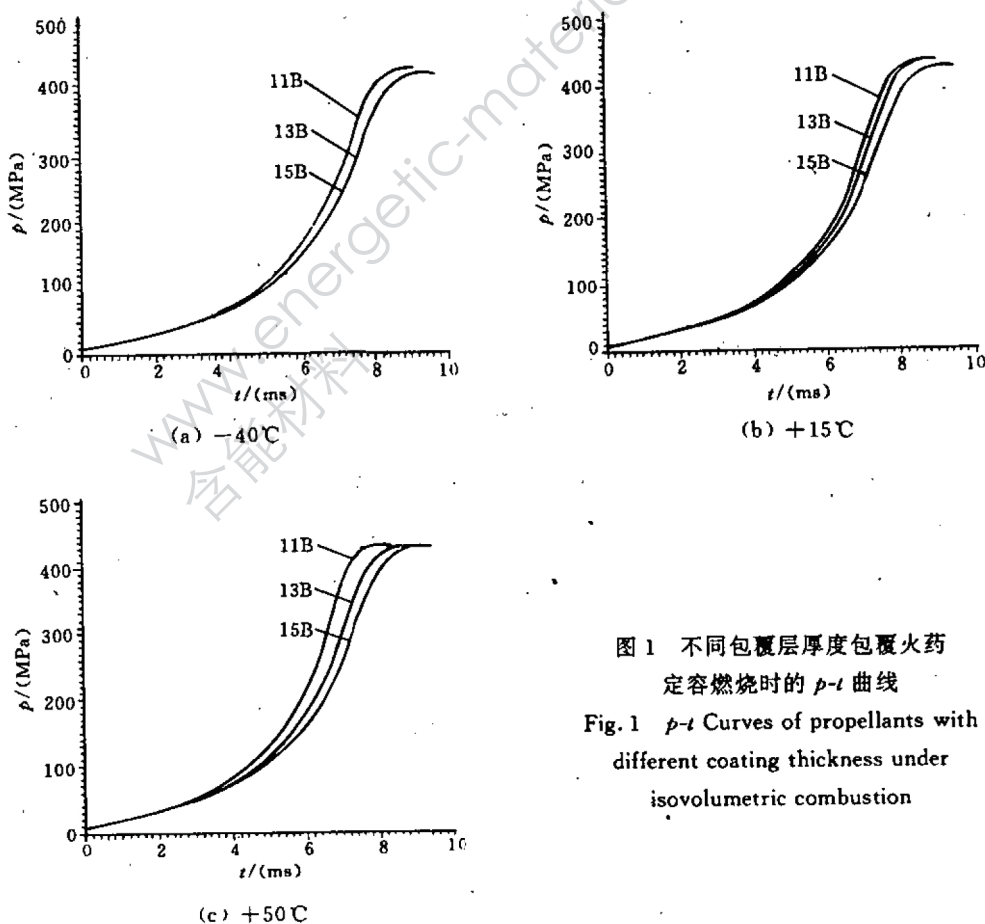


图 1 不同包覆层厚度包覆火药
定容燃烧时的 $p-t$ 曲线
Fig. 1 $p-t$ Curves of propellants with
different coating thickness under
isovolumetric combustion

图 1 中燃烧结束点的值列于表 1 中,从表中的数据可知,随包覆层厚度的增加,各温

度下的密闭爆发器最大压力(p_m)幅度变化不大,即包覆层厚度对包覆火药能量的影响不大。从温度对 p_m 的影响来看,包覆层厚度为 11B 和 13B 时,温度对 p_m 的影响并不规律;当包覆层厚度为 15B 时,随温度的增加, p_m 逐渐增加,这是由于温度除了影响火药的线性燃速外,还影响火药的火药力,从而使 p_m 随温度的改变而发生变化。燃烧结束时间 t_k 随包覆层厚度的增加而增加,这是由于包覆层越厚,包覆火药在燃烧时破孔越晚,内孔及基药燃烧越晚的缘故。随温度的增加, t_k 减小,这是由于温度越高,火药燃速越快的缘故。

表 1 $p-t$ 曲线上的燃烧结束点Table 1 Combustion terminal on $p-t$ curves

包覆层厚度	温度/($^{\circ}\text{C}$)	p_m /(MPa)	t_k /(ms)
11B	-40	429.35	9.10
	+15	437.07	8.75
	+50	434.07	8.30
13B	-40	425.89	9.55
	+15	437.01	8.95
	+50	429.98	8.95
15B	-40	424.15	9.70
	+15	428.34	9.45
	+50	428.90	9.35

3.2 不同包覆层厚度包覆火药 $\frac{dp}{dt}-t$ 曲线的分析

图 2 是所研究的三种包覆火药定容燃烧时的 $\frac{dp}{dt}-t$ 曲线。它表明,包覆层越厚, $\frac{dp}{dt}$ 上升的速率越小,亦即包覆火药燃烧时的压力增长速率越小。这是由于包覆层越厚,包覆火药破孔的时间越晚,反之,包覆层越薄,起始燃烧阶段的燃烧面积越大,气体生成速率越大,故 $\frac{dp}{dt}$ 上升的速率越快。将 $\frac{dp}{dt}-t$ 曲线的最大值列于表 2 中。从表中数据可知:随包覆层厚度的增加, $(\frac{dp}{dt})_m$ 值逐渐减小,与 p_m 相应的 t_m 值逐渐增大。

表 2 $\frac{dp}{dt}-t$ 曲线的最大点Table 2 The maximum on $\frac{dp}{dt}-t$ curves

包覆层厚度	温度/($^{\circ}\text{C}$)	$(\frac{dp}{dt})_m$ /(MPa/ms)	t_m /(ms)
11B	-40	143.31	7.40
	+15	165.73	7.25
	+50	175.22	6.75
13B	-40	133.50	7.65
	+15	159.46	7.35
	+50	156.62	7.10
15B	-40	127.45	7.65
	+15	143.27	7.45
	+50	144.37	7.30

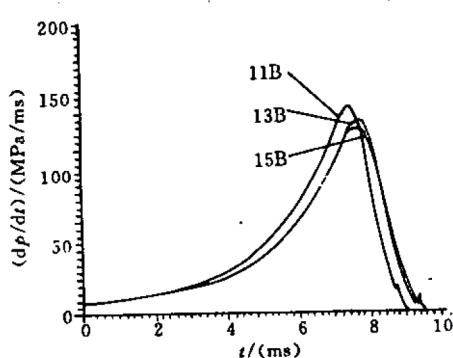
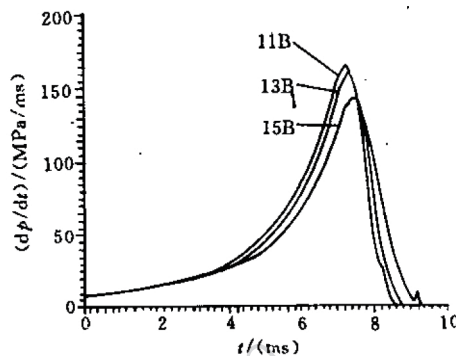
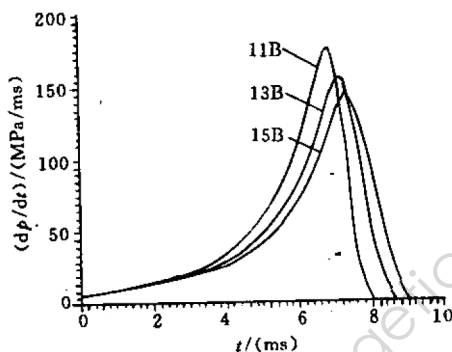
(a) -40°C (b) $+15^{\circ}\text{C}$ (c) $+50^{\circ}\text{C}$

图2 不同包覆层厚度包覆火药

• 定容燃烧时的 $\frac{dp}{dt}$ - t 曲线

Fig. 2 $\frac{dp}{dt}$ - t Curves of propellants with different coating thickness under isovolumetric combustion

3.3 不同包覆层厚度包覆火药 L - B 曲线的分析

火药经过包覆以后,其初始燃烧面积和燃速都发生了变化,为了分析燃面和燃速对气体生成速率的综合影响,我们引入动态活性 L 和相对压力 B 的概念,其定义为:

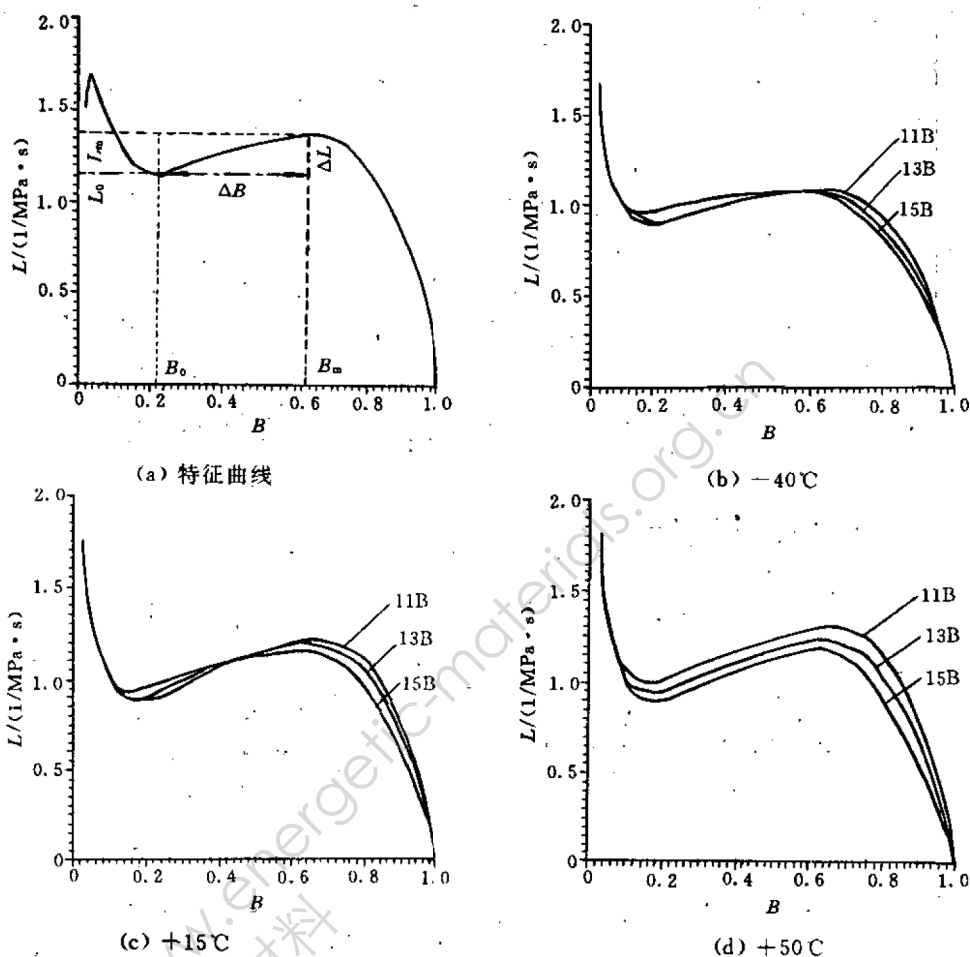
$$L = \frac{1}{p_i p_m} \cdot \frac{dp_i}{dt}$$

$$B = \frac{p_i}{p_m}$$

式中: p_i 为定容燃烧时任一时刻的压力, p_m 为定容燃烧的最大压力。

L - B 曲线反映了气体生成量与火药已燃百分数的关系,典型的 L - B 曲线如图 3(a) 所示,其中 B_m 为分裂点。在爆发器中各药粒点燃和燃完的时间并不相同,燃烧分裂点对应于药粒的统计平均厚度,它受药粒尺寸均匀性和点燃一致性的影响。因此, B_m 的大小反映了药粒燃烧的一致性。

图 3(b)、(c)、(d) 是三种不同包覆层厚度硝基胍包覆火药在不同温度下的 L - B 曲线,其特征点的数据列于表 3 中。由图和表可以看出,随包覆层厚度的增加,火药燃气的活性逐渐减小, ΔB 的值也逐渐减小,表征渐增性大小的 ΔL 值在低温下逐渐增加,高温下逐渐下降。活性减小,这是由于包覆层越厚,起始燃烧的气体生成速率越小造成的。 ΔL 值的变化规律说明:随包覆层厚度的增加,低温时 ΔL 值的渐增性相对增加,高温时则相对减小。

图3 不同包覆层厚度包覆火药的 L - B 曲线Fig. 3 L - B Curves of propellants with different coating thickness表3 L - B 曲线的特征点Table 3 The characteristic point of L - B curves

包覆层厚度	温度 $^{\circ}\text{C}$	B_0	L_0 $1/(\text{MPa} \cdot \text{s})$	B_m	L_m $1/(\text{MPa} \cdot \text{s})$	ΔB	ΔL $1/(\text{MPa} \cdot \text{s})$
11B	-40	0.1443	0.9563	0.6170	1.0940	0.4727	0.1377
	$+15$	0.1287	0.9250	0.6608	1.2067	0.5322	0.2817
	$+50$	0.1443	1.0000	0.6420	1.3067	0.4977	0.3067
13B	-40	1.0600	0.8873	0.6232	1.0750	0.4632	0.1877
	$+15$	0.1632	0.8873	0.6388	1.1877	0.4757	0.3003
	$+50$	0.1568	0.9373	0.6295	1.2380	0.4727	0.3006
15B	-40	0.1945	0.8937	0.6045	1.0393	0.4100	0.1457
	$+15$	0.1757	0.8687	0.6295	1.1563	0.4538	0.2877
	$+50$	0.1725	0.9000	0.6232	1.1817	0.4507	0.2817

从上面的分析可知,包覆层厚度对包覆火药的燃烧性能有着重要影响。随着包覆层厚度的增加,定容燃烧时 $p-t$ 曲线、 $\frac{dp}{dt}-t$ 曲线的上升速率逐渐减小,可以推测,其气体生成速率逐渐下降。就其燃烧的渐增性来讲,只要包覆火药的质量可靠,包覆层厚度对包覆火药常温燃烧的渐增性影响不大。但相比之下,包覆层越厚,低温时的渐增性相对增加,高温时的渐增性相对减小。所以,选择合适的包覆层厚度,就能得到我们所需要的气体生成规律,实现最佳的弹道效果。

4 包覆层厚度对包覆火药弹道性能的影响

前面已经分析过,包覆层厚度是包覆火药的一个重要参数,它不仅影响其燃烧性能,而且还影响其装药的弹道性能。包覆火药装药,一般采用混合装药结构^[12],对于火炮的具体弹道指标要求,往往要选择一个最佳的包覆层厚度,使包覆火药在膛内最大压力附近破孔,产生所谓的“平台效应”,因此,研究包覆层厚度对弹道性能的影响极为重要。

表4是上述三种不同厚度硝基胍包覆火药装药的弹道性能实验结果。

表4 不同包覆层厚度包覆火药装药的弹道性能

Table 4 Ballistic properties of propellant charges with different thickness coating

装药	弹重/(kg)	温度/(℃)	p_m /(MPa)	v_0 /(m/s)	压力温度系数 ×100	速度温度系数 ×100
11B $m_p=5.75\text{kg}$	6.3	-40	359.4	1443.4	8.55	2.9
		+15	393.0	1486.2	14.06	1.69
		+50	448.3	1511.4		
13B $m_p=5.75\text{kg}$	6.3	-40	395.0	1474.7	-1.02	0.32
		+15	391.0	1479.4	13.66	1.92
		+50	444.4	1507.9		
15B $m_p=5.75\text{kg}$	6.3	-40	413.4	1504.4	-5.22	-2.28
		+15	392.9	1470.9	12.06	2.12
		+50	440.3	1502.1		

由表4可见,包覆火药装药能有效地降低装药的弹道温度系数,包覆火药装药在常温、高温的膛压和初速(v_0)随包覆层厚度的增加逐渐下降,但下降幅度很小;低温时的膛压和初速随包覆层厚度的增加而增加,这就使得常温、低温的弹道温度系数越来越小,低温的炮口动能越来越大。产生这种现象的原因是由于包覆层越厚,包覆火药装药的低温效应越明显。进一步研究表明,对于105mm火炮,包覆层厚度为11B时,装药的弹道效果较理想。

5 结 论

(1) 包覆层厚度是影响包覆火药燃烧性能与弹道性能的重要因素。包覆层厚度通过影响包覆层强度和气体生成速率来影响包覆火药装药的弹道温度系数和弹丸的初速。

(2) 随包覆层厚度的增加,包覆火药在前述温度下,定容燃烧时的最大压力逐渐减

小,燃烧结束时间增加,压力增长速率逐渐下降,压力增长速率的极大值也逐渐下降,包覆火药燃气的温度逐渐减小,而燃烧的渐增性逐渐增加。

(3) 随包覆层厚度的增加,包覆火药装药的弹道温度系数大幅度减小,甚至出现负值。这说明包覆火药装药技术是实现零梯度装药的有效技术,通过选择包覆层厚度和装药比例,可以实现装药的最佳弹道效果。

参 考 文 献

- 1 王泽山. 发射药装药技术述评. 火炸药高新技术讨论会论文集. 大连, 1991, 8.
- 2 张豪侠. 国外发射药装药技术及其进展. 火炸药, 1988(4): 20~27
- 3 王泽山等著. 火药装药设计原理. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- 4 Mann D C. Development of a Deterred Propellant for a Large Caliber Weapon System. AD-P004 451, 1982.
- 5 Stiefel L. Gun Propulsion Technology. Published by the American Institute of Aeronautics, 1988.
- 6 王 渊. 提高火炮初速的装药研究[博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 1989.
- 7 Oberle W F, et al. Parameters for Optimizing a Travelling Charge Gun System. AD-A195 666, 1986.
- 8 Mann D C. Design of a Deterred Propellant for the 105mm Tank Gun. The 18th JANNAF Combustion Meeting, U. S. A., 1982.
- 9 Deas R W, et al. Design and Evaluation of Deterred Propellant for Use in Kinetic Energy Communion. The 17th JANNAF Propulsion Meeting, 1980.
- 10 Horst A W, et al. Propelling-charge Temperature Coefficient: Sources and Disparity. The 17th JANNAF Combusting Meeting, U. S. A., 1980.
- 11 Monision F. Trends in Gun Propulsion for Tactical Arm Application. Proceeding of the 13th International Ballistic Symposium, Sweden, 1992.
- 12 罗运军, 王泽山, 徐复铭. 包覆火药装药技术的理论分析. 兵工学报(火化工分册), 1995(1): 23~27

INFLUENCE OF COATING THICKNESS ON THE COMBUSTION AND BALLISTIC BEHAVIOR OF THE COATED-PROPELLANT

Luo Yunjun Wang Xuanjun Wang Zeshan He Xiaojun

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

ABSTRACT It is found from the analysis of the combustion behavior of coated-propellant charge that the coating thickness as an important factor obviously influences the combustion and ballistic behavior of the coated-propellant charge. The experimental results indicate that the coated-propellant charge technique is a valid way to reach the zero-gradient propellant charges. By means of properly selecting the coating thickness and the loading proportion, the optimum ballistic behavior of the coated-propellant can be obtained.

KEYWORDS coated-propellant, charge, combustion, interior ballistics.



作者简介 罗运军(Luo Yunjun), 1964年12月生, 湖北公安县人。1990年毕业于华北工学院, 获工学硕士学位并留校工作。翌年考入南京理工大学, 师从我国著名的发射药专家王泽山教授, 主攻低温度系数装药技术, 1994年毕业, 获工学博士学位。同年底入南京大学, 在程镭时院士指导下做博士后, 从事硝化纤维素构象, 凝聚过程与凝聚态结构的研究。先后参加了七项国家或部级重点项目, 获部级科技进步奖一次, 发表论文30余篇, 与其他人合作出版著作一部。