

文章编号:1006-9941(2020)06-0498-06

双层包覆对超多孔发射药燃烧性能的影响

张丽娜,王英博,南风强,堵平

(南京理工大学化工学院,江苏南京210094)

摘要: 为进一步提高37孔发射药的燃烧渐增性,采用双层包覆工艺对37孔硝基胍发射药进行包覆。通过三维视频、扫描电镜、DSC及定容燃烧测试等方法研究了包覆效果、包覆层与基药的相容性、不同包覆层质量含量及包覆层层数对燃烧性能的影响。结果表明,双层包覆药厚度较为均匀;包覆层和基药相容性良好;在相同包覆层含量8%的条件下,双层包覆药的燃烧增面值较单层包覆药明显提高。双层包覆药的燃烧增面值 ΔL 随着外包覆层的增加呈先增后降的趋势,在内、外包覆层质量含量均为5%的条件下,燃烧渐增性最大,其 ΔL 值为 $0.1431 \text{ MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,相对于37孔基药,其燃烧增面值提高了43.53%。

关键词: 37孔发射药;硝基胍发射药;双层全包覆;燃烧渐增性

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019197

1 引言

提高发射药燃烧渐增性可以提升身管武器的示压效率,是目前身管武器提高炮口初速、降低最大膛压,改善弹道性能的主要途径^[1-3]。提高发射药燃烧渐增性主要包括两种途径:一是改变发射药自身几何形状^[4],二是对发射药表面进行钝感包覆处理^[5-6]。目前应用较多的是将这两种方法相结合,在多孔粒状发射药的基础上进行钝感包覆,进一步提高发射药的燃烧渐增性。国内外针对粒状药等小尺寸发射药进行了大量的研究,Schaedeli U等^[7]使用含25%环三亚甲基三硝胺(RDX)的高分子溶液包覆7孔发射药,弹道结果表明包覆药与制式7孔药相比,炮口初速提高了 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。肖正刚等^[8]通过对球扁药应用双层钝感包覆的技术进一步提高了其燃烧渐增性。高郑^[9]对小粒太根发射药进行包覆工艺研究,实验结果表明双层包覆药的燃烧渐增性效果更佳。目前,国内在小颗粒发射药的钝感包覆方面已经获得了燃烧渐增性较

高、性能稳定的包覆技术。在超多孔等大尺寸发射药的包覆方法的研究中,杨春海^[10]采用端面不堵孔包覆方式,人工徒手对发射药表面部分涂刷,提高了发射药的燃烧渐增性。沈万武^[11]选用 TiO_2 作为阻燃包覆材料,采用单层包覆方式对37孔发射药进行表面全包覆。但因超多孔发射药具有尺寸大、结构复杂的药型特点,上述包覆方法存在力学性能不稳定、工艺操作复杂等问题。

针对超多孔发射药的药型特点,对37孔硝基胍发射药进行双层包覆,文献^[12]发现选用 TiO_2 作为包覆药外层组分,对包覆药能量降低的影响很小。其包覆工艺内层采用与发射药基体同组分的包覆药,包覆层与基体的粘结强度增加,在膛内高压与冲击的作用下,包覆层不易发生脱粘,发射药燃烧稳定进行,同时进一步提高37孔硝基胍发射药的燃烧渐增性。为进一步提高37孔发射药的燃烧渐增性,本研究采用双层包覆工艺对37孔硝基胍发射药进行包覆,制备了不同包覆层含量的37孔硝基胍包覆药,进行三维视频、扫描电镜、DSC及定容燃烧试验,测试了包覆效果、包覆层与基药的相容性、不同包覆层含量及包覆层层数对包覆药燃烧性能的影响。

2 实验部分

2.1 样品制备

按硝基胍发射药配方,经过捏合、压伸、切药、烘干

收稿日期:2019-07-09;修回日期:2019-09-19

网络出版日期:2019-12-16

基金项目:高新工程

作者简介:张丽娜(1994-),女,硕士研究生,主要从事发射药性能研究。e-mail:1124809519@qq.com.

通信联系人:南风强(1975-),男,副研究员,主要从事发射药性能研究。e-mail:nanfq@163.com.

引用本文:张丽娜,王英博,南风强,等. 双层包覆对超多孔发射药燃烧性能的影响[J]. 含能材料,2020,28(6):498-503.

ZHANG Li-na, WANG Ying-bo, NAN Feng-qiang, et al. Effect of Double-layer Coating on Combustion Performance of Super-porous Propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(6):498-503.

等发射药制备工序制得 25/37 梅花型发射药,在转鼓包覆设备中对梅花型发射药(25/37)表面进行双层包覆处理,内层包覆药组分与基药相同;外层包覆药质量的 70% 亦与基药相同,其余 30% 为 TiO₂;其包覆层组分配方如表 1 所示。由于文献[11]研究中存在包覆层脱粘的情况,本研究分别制得不同包覆质量分数的双层包覆药及单层包覆药共 8 个样品,如表 2 所示。

表 1 内外包覆层组分配方

Table 1 The components of inner and outer coating %

components	inner coating	outer coating
TiO ₂ content	0	30
nitroguanidine	47	32.9
sanwa-15 absorption tablets	53	37.1
acetone	400	400
ethanol	400	400

表 2 不同样品中包覆层的百分含量

Table 2 The percentage of coatings for various samples %

sample	w ₁	w ₂	w ₃
1#	0	4	4
2#	0	8	8
3#	4	4	8
4#	5	4	9
5#	5	5	10
6#	5	6	11
7#	5	9	14
8#	0	0	0

Note: w₁ is the quality percentage of inner coating; w₂ is the quality percentage of outer coating; w₃ is the quality percentage of total coating.

2.2 样品表面形貌观测

通过美国科士达 HiROXKH-1000 三维视频观察 37 孔硝基胍发射药(5#)包覆层的形貌;包覆后的样品进行表面切片获取表面断层并喷金处理,采用 S-4800 场发射扫描电子显微镜对包覆药表面进行观察。

2.3 基药与包覆层的相容性研究

通过差示扫描量热法(DSC)评价包覆层与基药的相容性。测试仪器为美国 METTLER TOLEDO HP 827e 型 DSC 差示扫描量热仪。制样时从包覆药(5#)表面刮取包覆层样品,用研钵碾成粉末状与基药粉末按质量比 1:1 充分混合(TiO₂组分与基药的实际质量比为 1.5:7.5),试样质量为(0.5±0.001) mg。测试温度范围为 50~350 °C,升温速率分别为 2.5, 5, 7.5, 10 K·min⁻¹,氮气流速 30 mL·min⁻¹。相容性判断标准参照《GJB770B-2005 火药试验方法》。

GJB770B-2005 的第 502.1 条的安定性评价标准中相容性的推荐等级为:ΔT_p≤2.0 K,ΔE/E_a≤20%,相容性好,1 级;ΔT_p≤2.0 K,ΔE/E_a>20%,相容性较好,2 级;ΔT_p>2.0 K,ΔE/E_a≤20%,相容性较差,3 级;ΔT_p>2.0 K,ΔE/E_a>20%,相容性差,4 级。其中 ΔT_p代表分解峰温的改变量,K,ΔE/E_a代表表观活化能的改变率。

2.4 定容燃烧试验

密闭爆发器容积为 107.39 cm³,装填密度为 0.33 g·cm⁻³,点火药为 2 号硝化棉,药量(1±0.0005) g,点火压力为 10.39 MPa,20 °C 条件下,对 37 孔基药和制备的 37 孔包覆药进行高压定容燃烧测试,并通过中止燃烧试验对包覆药力学性能进行测试。

3 结果与讨论

3.1 37 孔硝基胍发射药包覆层的形貌分析

采用三维视频观察 37 孔硝基胍发射药包覆层的形貌。为研究双层包覆发射药实际包覆情况,选取内外层包覆量相等的双层包覆发射药进行形貌观测(5#样品)。图 1 为 50 倍三维视频显微图像,可以看出,内、外包覆层的界面明显,这是由于外包覆层中加入了 TiO₂。在一定误差范围内,对内、外包覆层厚度进行尺寸测量,不同包覆位置厚度之差在 17% 以内,内外层的包覆厚度较为均匀。

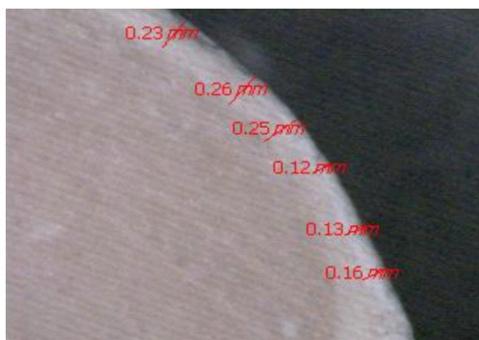


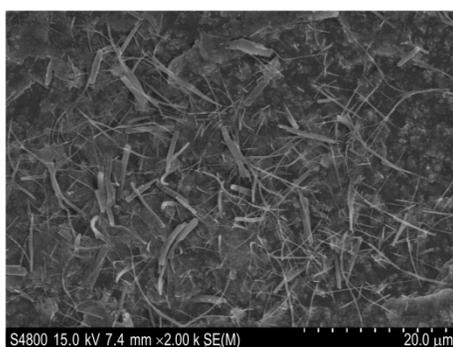
图 1 37 孔硝基胍发射药(5#)包覆层三维视频显微图像

Fig. 1 Three-dimensional video microscopy image of the coating of 37-well nitroguanidine propellant 5#

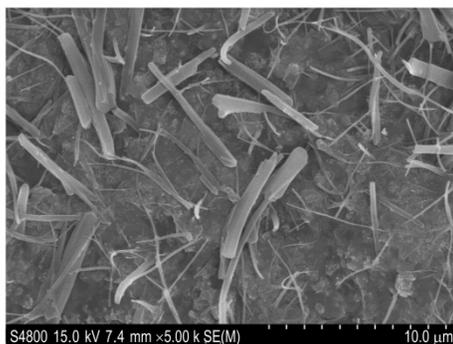
另一方面采用扫描电镜从微观结构进行形貌分析,5#样品的形貌如图 2(2000x、5000x)所示,可以看出在不同的放大倍数下,包覆层表面均匀的附着有大量棒状细硝基胍晶体。结合图 1,表明得到的包覆药表面均匀,包覆层厚度较为均匀,包覆效果良好。

3.2 双层包覆药与基药的相容性

包覆层与 37 孔硝基胍发射药相接触,两者的相容



a. 2000x



b. 5000x

图2 37孔硝基胍发射药(5#)包覆层的扫描电镜图
Fig.2 Scanning electron microscope of the coating of 37-nitroguanidine propellant 5#

性影响着包覆质量、燃烧性能和储存过程的安全性。采用DSC研究包覆层间的相互作用,分别对基药和包覆层的混合体系进行测试,5#样品在不同升温速率下的DSC曲线如图3所示。

使用加热速率趋于0时的分解峰温 T_{p0} 计算值来评价试样的安定性, T_{p0} 值越大则安定性越好;用单独体系相对于混合体系的分解峰温改变量 ΔT_p 以及两体系的表现活化能改变率 $\Delta E/E_a$ 来综合评价试样的相容性。

加热速率趋向0时的样品分解速率计算公式^[13]:

$$T_{pi} = T_{p0} + b\beta_i + c\beta_i^2 + d\beta_i^3 \quad (1)$$

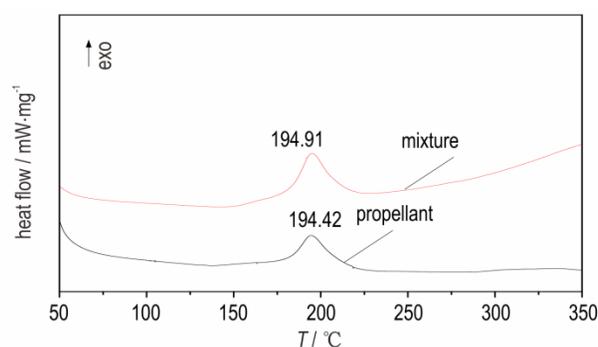
式中, T_{pi} 为加热速率为 β_i 时的分解峰温, K; T_{p0} 为加热速率趋于0时的样品分解峰温, K; β_i 为样品加热速率, $K \cdot \text{min}^{-1}$, $i=1, 2, 3, 4 \dots$, b, c, d 均为常数。

表现活化能改变率计算公式^[13]:

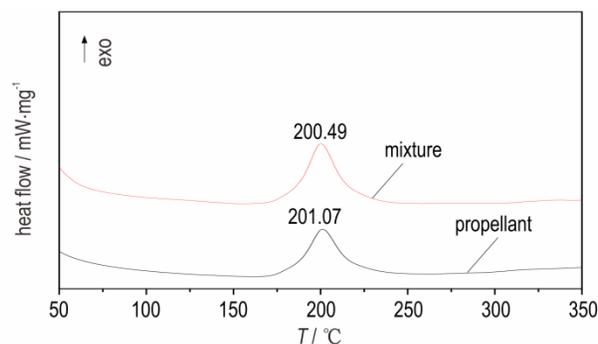
$$\frac{\Delta E}{E_a} = \left| \frac{E_a - E_b}{E_a} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\Delta E/E_a$ 为单独体系相对于混合体系表现活化能的改变率; E_a 为单独体系活化能, $J \cdot \text{mol}^{-1}$; E_b 为混合体系活化能, $J \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

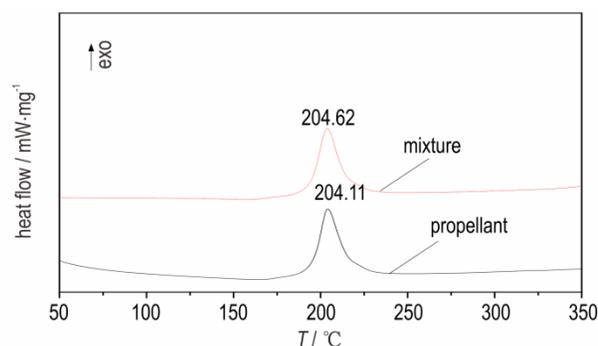
E_a 和 E_b 值用 Ozawa 公式^[13]拟合求得:



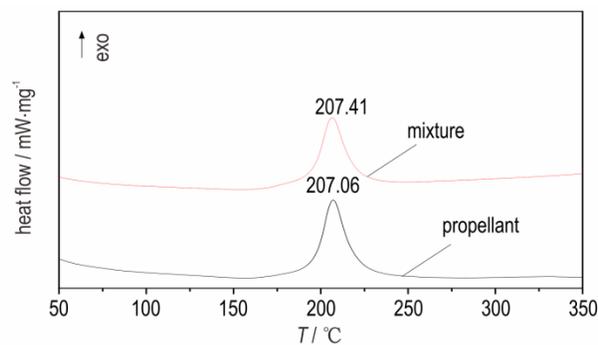
a. 2.5 K·min⁻¹



b. 5.0 K·min⁻¹



c. 7.5 K·min⁻¹



d. 10.0 K·min⁻¹

图3 5#样品不同升温速率的包覆层材料与基药相互作用的DSC曲线

Fig.3 DSC curves of the interaction between the coating material and the base propellant at different heating rates

$$\lg\beta_i = \lg\left[\frac{A_{a(arb)}E_{a(arb)}}{RF(\alpha)}\right] - 2.315 - 0.4567\frac{E_{a(arb)}}{RT_{pi}} \quad (3)$$

式中, $A_{a(arb)}$ 为单独或混合体系的表观指前因子, min^{-1} ; R 为摩尔气体常数, $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $E_{a(arb)}$ 为单独或混合体系的表观活化能, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; $F(\alpha)$ 为机理函数; T_{pi} 为加热速率为 β_i 时的分解峰温, K , $i=1, 2, 3, 4\cdots$

表3 试样的相容性结果

Table 3 Compatibility results of the sample

sample	peak temperature difference				$T_{p0} / \text{°C}$	$E / \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\Delta E/E_a^{-1} / \%$
	$2.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$	$5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$	$7.5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$	$10 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$			
base propellant and coating	-0.49	0.58	0.51	0.35	183.33 186.08	188.75 203.90	8.03

3.3 单层包覆和双层包覆对37孔火药燃烧渐增性的影响

为研究相同外包覆层含量情况下有无内包覆层(有无内层)及总包覆量相同情况下包覆层结构(是否双层)对发射药燃烧渐增性的影响,选取1#、2#、3#三种样品研究包覆层结构对37孔火药燃烧渐增性的影响。表4为1#、2#、3#样品的燃烧特征点。对 $p-t$ 曲线进行处理,得到燃烧活度-相对压力($L-B$)曲线,如图4所示。

表4 单层包覆与双层包覆的燃烧渐增性特征点

Table 4 Progressive combustion feature points of single-layer and double-layer coating

sample	B_0	L_0 $/\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$	B_m	L_m $/\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$	L_m/L_0	ΔL $/\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$
1#	0.1500	0.5019	0.6199	0.6100	1.2154	0.1081
2#	0.1500	0.4860	0.7174	0.6214	1.2786	0.1354
3#	0.1500	0.3607	0.6774	0.5464	1.5148	0.1857

Note: B is the relative pressure. L_0 is the average value of L between $B=0.1$ to $B=0.2$. B_m is the relative pressure at split point. L_m is maximum activity. L_m/L_0 ^[14] is progressive combustion characteristic. ΔL is the combustion enhancement value.

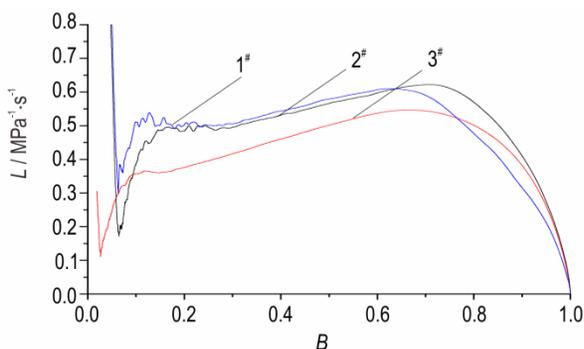


图4 不同包覆层结构37孔硝基胍发射药的 $L-B$ 曲线

Fig.4 $L-B$ curves of 37-well nitroguanidine propellant with different coating structure

E_a 和 E_b 值由 $\lg\beta_i$ 与 $1/T_p$ 进行线性回归拟合得出,相关系数应大于0.97。

由式(1)~式(3)计算得到数据列于表3,由表3可知,在四个加热速率条件下,基药、基药与包覆层的混合体系都满足 $\Delta T_p \leq 2.0 \text{ K}$, $\Delta E/E_a \leq 20\%$,为1级相容性。

药粒燃烧增面性(ΔL)和渐增性燃烧特征值(L_m/L_0)是判定发射药燃烧渐增性强弱的依据^[13], ΔL 和 L_m/L_0 值大,燃烧渐增性增强。由表4可以得出相同外包覆含量时,3#样品的燃烧增面值(ΔL)为0.1857,1#样品的燃烧增面值(ΔL)为0.1081,燃烧增面性 $3\# > 1\#$,双层包覆的燃烧增面值较单层包覆明显提高;相同总包覆含量时,2#样品的燃烧增面值(ΔL)为0.1354,燃烧增面性 $3\# > 2\#$,双层包覆的燃烧增面值较单层包覆明显提高;同时渐增性燃烧特征值(L_m/L_0) $3\# (1.5148) > 2\# (1.2786) > 1\# (1.2154)$,即37孔硝基胍发射药经双层包覆处理后,其燃烧渐增性优于单层包覆效果。

从图4中可以看出,对于单层包覆和双层包覆37孔硝基胍发射药(1#、2#和3#)的定容燃烧,在相近的装填密度下,它们的起始燃烧活度上升幅度相近,主要原因是在发射药燃烧的起始阶段,包覆药外包覆层组分相同。单层包覆的两样品均在相对燃烧量0.1~0.3范围内的燃烧活度值出现明显抖动,说明只进行含阻燃剂的包覆(外层包覆)不利于包覆药燃烧前期的稳定性。上升燃烧段,双层包覆较单层两样品 $L-B$ 曲线更加平缓,即双层包覆药的燃烧一致性和稳定性优于单层包覆药。这是由于与基药成分相同的内层包覆药在基药和外层包覆药间起到过渡作用,将含有阻燃剂的外包覆层更紧密地粘附在发射药表面,使得阻燃层(外包覆层)不易因压力变化或药粒间相互作用剥离。1#样品较于2#、3#样品,急速下降段明显提前,主要因为总包覆层较薄,端面破孔较早,侵蚀燃烧现象更明显。

3.4 外层包覆层含量对定容燃烧性能的影响

为研究相同内包覆层质量含量情况下,外包覆层含量对发射药定容燃烧性能的影响,选取4#~8#样品

进行定容燃烧测试(其中8#样品为未包覆的37孔硝基胍发射基药),4#~8#样品 L - B 曲线如图5所示。其各样品燃烧渐增性特征量见表5。

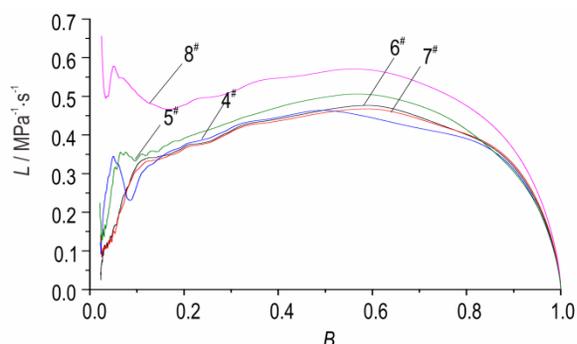


图5 不同包覆含量37孔硝基胍发射药的 L - B 曲线

Fig.5 L - B curves of 37-well nitroguanidine propellant with different coating contents

表5 不同包覆层含量双层包覆药和基药的 L - B 曲线燃烧渐增性特征量

Table5 L - B curves progressive combustion characteristics of double coatings with various content and propellant

sample	B_0	L_0	B_m	L_m	L_m/L_0	ΔL
4#	0.1500	0.3419	0.4985	0.4636	1.3560	0.1217
5#	0.1500	0.3627	0.5790	0.5058	1.3945	0.1431
6#	0.1500	0.3452	0.5908	0.4767	1.3809	0.1315
7#	0.1500	0.3381	0.5904	0.4676	1.3830	0.1295
8#	0.1500	0.4709	0.5707	0.5706	1.2117	0.0997

由图5可以看出:37孔硝基胍发射药(8#)起始动态活度(L)大, L 先快速上升,出现燃烧尖峰。随着发射药进一步燃烧, L 值先下降后上升,即硝基胍发射药燃烧初期发生了侵蚀燃烧现象。包覆药起始燃烧活度 L_0 小,活度逐渐升高,上升速度较缓慢。这主要是由于包覆层的阻燃作用,降低了37孔包覆药的起始燃速,同时,由于采用的是双层全包覆工艺,初期内孔不参与燃烧,避免了起始侵蚀峰的出现。随着燃烧的进行,当密闭爆发器内压力达到一定值时,包覆层破裂并逐渐燃尽,包覆药内孔暴露并燃烧,包覆火药开始增面燃烧,具有良好的燃烧渐增性。从图5可以看出4#样品在燃烧中后期活度值 L 出现异常下降,这是因为4#外层包覆比例较少,阻燃成分含量低且包覆层总含量较小,阻燃效果不明显,导致侵蚀燃烧现象发生;相比于8#,4#侵蚀燃烧现象滞后,表明双层包覆时外层包覆液中的 TiO_2 具有阻燃效果,但在含量低时不明显。

由表5和图5可知,4个样品(4#、5#、6#、7#)的37孔包覆药的燃烧渐增性相对于基药均有提升,并且燃

烧增面性 $5^{\#}>6^{\#}>7^{\#}>4^{\#}$,表明双层包覆过程,当内包覆层含量一定,改变外包覆层含量会影响包覆药的燃烧渐增性,燃烧渐增性会随着外包覆层含量的增加先升高后降低,选择合适的包覆层含量,是获得更好的燃烧渐增性的关键。在本研究中,内包覆层含量为5%、外包覆层含量为5%时包覆药的燃烧渐增性效果最好,其 ΔL 值为0.1431,基药的燃烧增面性 ΔL 值为0.0997,相对于基药其燃烧增面性提高了43.53%。

进一步对不同包覆层含量的37孔包覆药在不同温度下进行中止燃烧实验,通过不同包覆层含量和不同温度下的破孔情况来检验包覆层的强度。实验结果表明(如表6),增加内层包覆后的双层包覆药(3#)相比于相同含量的单层包覆药(2#)其破孔率更低、耐气体冲击的强度更大,包覆后力学性能有所改善。双层包覆药包覆含量越大,破孔数越低;这是因为在相同内包覆药含量条件下,外包覆药含量越大,破孔所需要的气体冲击强度越大。因此在相同的压力条件下(75 MPa),包覆药总包覆含量越大越不易破孔,破孔率越低。

表6 不同包覆含量37孔包覆药的破孔率

Table 6 Broken-hole rate of 37-well coated propellant with different coating contents %

temperature / °C	broken-hole rate					
	2#	3#	4#	5#	6#	7#
+50	60.5	54.5	51.4	49.2	45.9	25.9
+20	85.2	79.0	76.0	70.3	58.8	40.8
-40	92.3	87.0	81.0	73.3	69.9	64.9

4 结论

(1)双层全包覆37孔硝基胍发射药包覆层与基药相容性好,内外层厚度及硝基胍组分均匀分布,相同包覆含量的双层包覆药较单层包覆药相比破孔率更低,耐气体冲击的强度更大,包覆后力学性能有所改善。

(2)在相同包覆层含量8%的条件下,双层等量包覆37孔发射药的燃烧增面值较单层包覆37孔发射药明显提高。主要原因为内层包覆药将含有阻燃剂的外包覆层更紧密地粘附在发射药表面,使得阻燃层(外包覆层)不易因压力变化或药粒间相互作用剥离,阻燃作用更明显。

(3)不同外包覆层含量的包覆药其燃烧性能不同,双层包覆37孔发射药内包覆层含量一定时(5%),实验表明外层含量为5%的包覆药的燃烧渐增性最

好,其 ΔL 值为0.1431,相对于基药其燃烧增面性提高了43.53%。

参考文献:

[1] 王泽山,何卫东,徐复铭.火药装药设计原理与技术[M].北京:北京理工大学出版社,2006:1-3.
WANG Ze-shan, HE Wei-dong, XU Fu-ming. The principle and technique for propellant charging design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 1-3.

[2] 萧忠良,王泽山.发射药科学技术总体认识与理解[J].火炸药学报,2004(03):1-6.
XIAO Zhong-liang, WANG Ze-shan. Overall understanding and understanding of propellant science and technology[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2004(03): 1-6.

[3] Zebregs M, Van Driel A. Experimental set-up and results of the process of co-extruded perforated gun propellants [C]//39th Int Ann Conf of ICT. Karlsruhe:ICT, 2008.

[4] Randall J C, Peters S, Simmons R, et al. Energetic deterrent coating for gun propellant: US 6345577[P], 2002.

[5] LIANG Dao-lun, LIU Jian-zhong, CHEN Bing-hong, et al. Improvement in energy release properties of boron-based propellant by oxidant coating[J]. *Thermo-chimica Acta*, 2016: 638.

[6] 杨春海,何卫东,堵平.环氧树脂复合材料端面包覆多孔粒状发射药的初步研究[J].含能材料,2012,20(2):161-166.
YANG Chun-hai, HE Wei-dong, DU Ping, et al. Preliminary study of multiperforated granular end-surface-coated propellant by epoxy resin composite materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2012, 20(2): 161-166.

[7] Schaedeli U, Andres H, Ryf K, et al. Propulsion system for the acceleration of projectiles[P]. US:8353994, 2013.

[8] XIAO Zheng-gang, YING San-jiu, Xu Fu-ming. Deconsolidation and combustion performance of thermally consolidated propellants deterred by multi-layers coating[J]. *Defence Technology*, 2014, 10(2).

[9] 高郑.小颗粒发射药包覆工艺及燃烧性能研究[D].南京:南京理工大学,2016.
GAO Zheng. The research on coating process of small particles and combustion properties. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.

[10] 杨春海,何卫东,堵平.端面不堵孔包覆对多孔发射药燃烧和弹道性能的影响[J].火炸药学报,2012,35(02):78-81.
YANG Chun-hai, HE Wei-dong, DU Ping. Effect of non-blocking coating on the combustion and ballistic performance of porous propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2012, 35(02): 78-81.

[11] 沈万武.超多孔发射药包覆工艺及燃烧性能研究[D].南京:南京理工大学,2019.
SHEN Wan-wu. Research on coating process of super-porous propellant and combustion properties. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2019.

[12] 堵平,何卫东,王泽山.二氧化钛在发射药燃烧中的阻燃作用研究[J].含能材料,2005(02):99-102.
DU Ping, HE Wei-dong, WANG Ze-shan. Study on flame retardant effect of titanium dioxide in propellant combustion[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2005(02): 99-102.

[13] GJB 770B-2005.火药试验方法[S].
GJB 770B-2005. the test method of propellant [S].

[14] 黄振亚,贾永杰,崔鹏腾,等.叠氮硝胺发射药的燃烧性能调控技术[J].含能材料,2013,21(6):795-799.
HUANG Zhen-ya, JIA Yong-jie, CUI Peng-teng, et al. Modulating technology for combustion performance of azidonitramine gun propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2013, 21(6): 795-799.

Effect of Double-layer Coating on Combustion Performance of Super-porous Propellant

ZHANG Li-na, WANG Ying-bo, NAN Feng-qiang, DU Ping

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

Abstract: In order to further improve the progressive combustion of 37-well propellant, a 37-well nitroguanidine propellant was coated by two-layer coating process. The effects of coating, compatibility of the coating layer and the base propellant, the content and layers of the coating on the combustion performance were investigated by Three-dimensional video microscopy, Scanning electron microscope, DSC and constant volume combustion test. The thickness of the double coated propellant was relatively uniform. The compatibility between coating layer and the propellant was good. When the coating content was 8%, the combustion enhancement value of the double-layer coated propellant was significantly higher than that of the single-layer coated propellant. The combustion enhancement value ΔL of the double-coated propellant increased at first and then decreased with the increasing of the outer coating layer. When the content of inner and outer coating layer was 5%, the progressive combustion was the largest, with ΔL of 0.1431 MPa⁻¹·s⁻¹, which increased by 43.53%, compared with the 37-well propellant.

Key words: 37-well propellant; nitroguanidine propellant; double-layer full coating; progressive combustion

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019197

(责编:姜梅)