

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.01.006

# 利用含废弃丁羟推进剂制备的高能炸药<sup>\*</sup>

常  剑<sup>①</sup>  俞永华<sup>②</sup>  魏晓安<sup>①</sup>  彭金华<sup>①</sup>  王泽山<sup>①</sup>

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②山东银光科技有限公司(山东临沂,276000)

[摘  要]  利用丙烯酸胺氧化剂溶液及铝粉制备得到敏化剂,加入已配好的含能黏结剂中,对丁羟(HTPB)推进剂颗粒间隙进行填补,形成新型高能炸药。通过高速摄影试验观察爆轰过程,炸药空中、水下爆炸等试验测试其性能。结果表明:所制备的新型高能炸药性能良好,随着敏化剂含量的增加,炸药爆轰感度、冲击波超压及水下能量输出均有明显提高;炸药密度 1.53 g/cm<sup>3</sup>,爆速 6 900 m/s;当比例距离为 1.5 ~ 4.5 m/kg<sup>1/3</sup>时,炸药的 TNT 当量系数分布于 1 左右;水下爆炸能量输出为 4.5 kJ/g,高于 TNT,具有较高的能量和冲击作用。

[关键词]  高能炸药;丁羟(HTPB)推进剂;空中爆炸;水下爆炸

[分类号]  TJ55;O389

## A High Explosive Prepared by Obsolete HTPB Propellant

CHANG Jian<sup>①</sup>, YU Yonghua<sup>②</sup>, WEI Xiaolan<sup>①</sup>, PENG Jinhua<sup>①</sup>, WANG Zeshan<sup>①</sup>

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Shandong Yinguang Technology Co., Ltd. (Shandong Linyi, 276000)

[ABSTRACT]  A new type of high explosive was successfully prepared by filling up the obsolete HTPB particle gaps with energetic binder containing a sensitizer formulated by acrylamide oxidizing agent solution and aluminum powder. Detonation performance, overpressure and energy output characteristics were studied by high speed photography, aerial and underwater explosion tests. The results demonstrate the high performance of this new high explosive. The detonation sensitivity, overpressure and underwater power output improve significantly with increased content of sensitizer. For the explosive with density of up to 1.53 g/cm<sup>3</sup> and detonation velocity of up to 6 900 m/s, its equivalent TNT coefficient is slightly about 1 at distance ratio from 1.5 m/kg<sup>1/3</sup> to 4.5 m/kg<sup>1/3</sup>, and energy output from underwater explosion was observed as 4.5 kJ/g which is higher than that of TNT. The explosion of this high explosive has high energy and shock effect.

[KEYWORDS]  high explosive; HTPB propellant; airburst; underwater explosion

## 引言

废弃推进剂的处理一直以来引人关注,当今国内外处理方法大体分为三类:一是燃烧的方式处理,费用低,操作简单,但环境污染较大<sup>[1-3]</sup>;二是回收组分,无污染,但回收成本较高<sup>[4-7]</sup>;三是改制成民用炸药,蒋大勇等曾评测此方式较为安全<sup>[8-10]</sup>。基于第三种处理方式,并针对丁羟(HTPB)推进剂本身难爆轰、提高爆轰感度后能量输出不高的问题<sup>[11]</sup>,根据敏化剂可以降低炸药密度,从而提高爆轰性能的

原理,利用丙烯酸胺氧化剂溶液及铝粉制备得到敏化剂,加入已配好的含能黏结剂中,用含能黏结剂对 HTPB 推进剂颗粒间隙进行填补,得到一种新型高能炸药。通过高速摄影试验观察爆轰过程,炸药空中、水下爆炸等试验测试其性能,为今后废弃推进剂的高效处理方式研究提供参考。

## 1  试验部分

### 1.1  试验样品的制备

1) 考虑到较小尺寸的推进剂颗粒制备较复杂,

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-05-03  
作者简介:常剑(1991-),男,硕士研究生,主要从事推进剂资源化利用研究。E-mail:516288633@qq.com  
通信作者:魏晓安(1968-),男,讲师,主要从事废弃火炸药资源化利用研究。E-mail:weixiaoan@126.com

所以使用直径 15 mm 的推进剂颗粒。将废弃 HTPB 推进剂切割成直径约为 15 mm 的颗粒,放入直径 60 mm 的塑料药卷内。

2)将丙烯酸胺氧化剂溶液及铝粉混合制成敏化剂  $R_1$ ,加入已配好的含能黏结剂中, $R_1$  中铝粉质量分数分别为 0%、5%、10%。根据炸药敏化剂的敏化原理,即敏化剂通过自身分子内结构特性,改善炸药密度,从而提高炸药爆轰性能。敏化剂加入到含能黏结剂中,完全溶解;DSC 测定结果表明两者相容性良好。所配制的含能黏结剂的爆速、爆热等量值与 TNT 爆速、爆热等相近。

3)将含能黏结剂加入到废弃 HTPB 推进剂的颗粒空隙中,通过观察,含能黏结剂完全嵌入 HTPB 推进剂颗粒缝隙,常温下静置半小时左右,使含能黏结剂与颗粒之间固化,形成新型高能炸药。

1.2 爆速的测定

按照 GB/T13228—1991 工业炸药爆速测定方法,利用测时仪法,通过电离探针对新型高能炸药的爆速进行测定。

1.3 高速摄影和空中冲击波超压的测定

通过超高分辨率高速摄像机进行拍摄,拍摄速度为每秒 30 000 帧,爆源与测试点距离 35 m。

压力传感器型号 PCB113B,信号调理仪型号 PCB482A20,数据采集仪为成都微测公司 VXI-1115 型。测定冲击波超压,爆源距离地面 40 cm,爆源中心距离测定点分别为 1.50、2.00、2.50、3.00、3.75、4.50 m。炸药样品直径为 60 mm,总质量为 800 g 左右,3 种样品每种测试 3 次。

1.4 水下爆炸测试

压力传感器型号 PCB138M,电压灵敏度为 6.9 V/MPa,信号调理器型号 PCB482A16,数据采集器为成都纵横公司的 Jovian5200。测试用水池直径为 8.0 m。试样位于水面下方 4.25 m,爆源与测定点距离 2.5 cm。炸药样品直径 60 mm,总质量 250 g 左右,3 种样品每种测试 3 次。

2 结果与讨论

2.1 敏化剂中铝粉质量分数对爆速的影响

3 种敏化剂中铝粉质量分数 0%、5%、10% 的凝胶炸药的爆速结果如表 1 所示。HTPB 推进剂颗粒直径均为 15 mm。

结果表明,敏化剂中铝粉质量分数为 10% 的凝胶炸药爆速提高明显,可达 7 150 m/s,原因可能是铝粉质量分数增加使得反应速率加快,有利于爆轰

表 1 敏化剂中铝粉质量分数对炸药爆速的影响  
Tab.1 Effect of mass fraction of Al powder in sensitizer on detonation velocity of explosive

$\omega(\text{Al})/\%$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0	1.53	6 960
5	1.58	7 020
10	1.52	7 150

的扩展,因此爆速增加。3 种不同铝粉质量分数的敏化剂的凝胶炸药装填密度可达 1.5 g/cm<sup>3</sup>,爆速大于 6 900 m/s,与前人研究的含 HTPB 推进剂的凝胶炸药<sup>[11]</sup>(最高爆速可达 6 500 m/s)相比,爆速提高相对明显,适宜用作大直径的露天炸药。

2.2 高速摄影试验及空中爆炸特性

2.2.1 高速摄影试验

图 1 为高速摄影结果。由图 1 可知,含 HTPB 推进剂的高能炸药被起爆后,球形火光的直径逐渐增大,光亮度也逐渐增强,炸药发生爆轰过程的时间较短,仅为几十微秒,这与炸药第一次发光阶段持续时间在 10<sup>-4</sup>s 级相符,且随着时间的增加球形火光的直径明显增大,光亮度也明显增强。400.0 μs 后呈现明显的后效燃烧阶段。该试验进一步证明炸药发生了爆轰反应。

2.2.2 空中爆炸特性

该高能炸药在空中不同距离处测试的平均冲击波超压如表 2 所示。

按最小二乘法原理,根据炸药在空中爆炸的相似律,冲击波超压与装药量关系式如下:

$$\Delta p = f\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{r}\right)。$$
 (1)

式中: $\Delta p$  为冲击波超压,kPa; $W$  为装药量,kg; $r$  为爆源距离,m。

比例距离与装药量关系为:

$$\bar{r} = \frac{r}{\sqrt[3]{W}}。$$
 (2)

式中: $\bar{r}$  为比例距离,m/kg<sup>1/3</sup>。

通过式(1)、式(2)和表 2 数据,可得到含 HTPB 推进剂的高能炸药拟合的超压公式分别如下:

$$\omega(\text{Al}) = 0\% \text{ 时,}$$
$$\Delta p = \frac{-0.338\ 6}{\bar{r}} + \frac{2.176\ 5}{\bar{r}^2} + \frac{0.111\ 6}{\bar{r}^3};$$
 (3)

$$\omega(\text{Al}) = 5\% \text{ 时,}$$
$$\Delta p = \frac{-0.214\ 8}{\bar{r}} + \frac{1.982\ 0}{\bar{r}^2} + \frac{0.117\ 6}{\bar{r}^3};$$
 (4)

$$\omega(\text{Al}) = 10\% \text{ 时,}$$

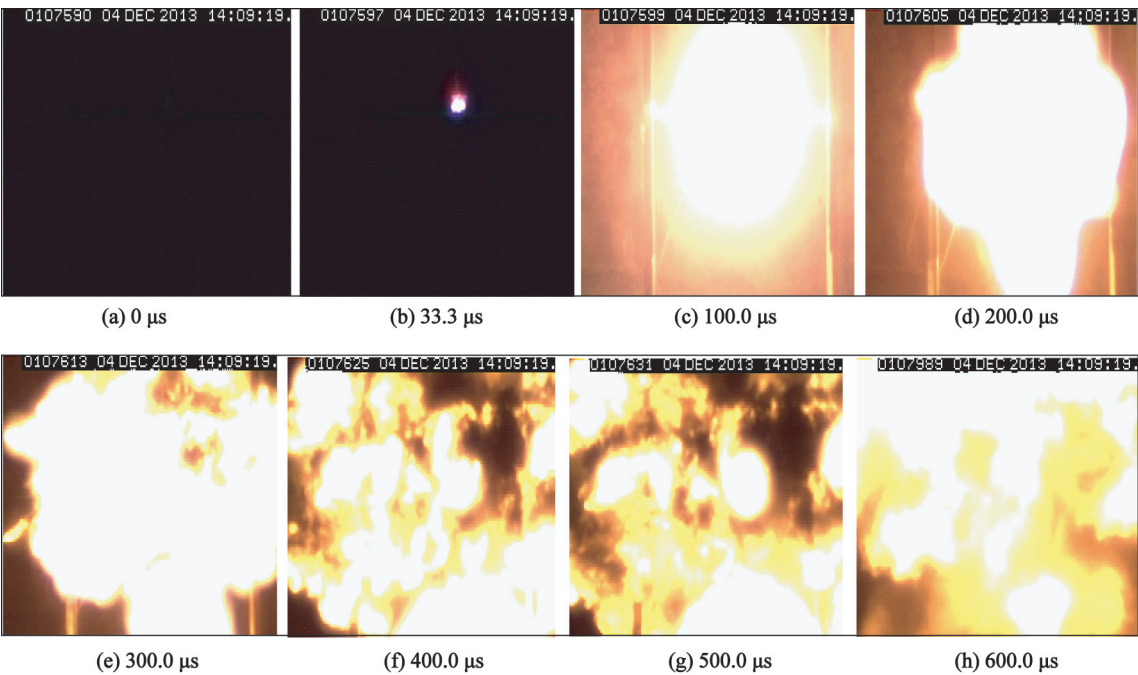


图 1  $\omega(\text{Al}) = 5\%$  时含 HTPB 推进剂的高能炸药的爆炸高速摄影

Fig1 High-speed photography of the high explosive containing HTPB propellant with  $\omega(\text{Al}) = 5\%$

表 2 含 HTPB 推进剂的高能炸药在不同距离处的冲击波超压峰值

Tab.2 Shock wave overpressure of the high explosive containing HTPB propellant at different measurement points

$\omega(\text{Al})/\%$	$m/\text{g}$	冲击波超压/kPa					
		1.50 m	2.00 m	2.50 m	3.00 m	3.75 m	4.50 m
0	815	640.2	351.5	185.4	117.0	65.30	38.50
5	831	665.7	371.8	193.7	123.0	71.75	48.28
10	820	690.4	411.0	241.7	160.6	81.17	60.71

$$\Delta p = \frac{-0.431\ 4}{\bar{r}} + \frac{3.627\ 4}{\bar{r}^2} + \frac{-1.857\ 1}{\bar{r}^3}。 \quad (5)$$

对所得到的超压公式分别进行拟合作图,并与含 HTPB 推进剂的高能炸药的试验数据进行比较,可分别得到图 2(a) ~ 图(c)。由图 2 可知,炸药的试验数据与拟合曲线吻合较好。

由图 2 可以看出,随着  $R_1$  中铝粉含量的增加,冲击波超压也随之增加,在比例距离为 1.5 ~ 4.5 m/kg<sup>1/3</sup> 内按一定幅度增长。

炸药 TNT 当量  $E_q$  的计算公式为:

$$E_q = \frac{W_{\text{TNT}}}{W_E} = \left( \frac{\bar{r}_E}{\bar{r}_{\text{TNT}}} \right)^3。 \quad (6)$$

式中: $W_{\text{TNT}}$ 、 $W_E$  为 TNT 与炸药的质量,kg; $\bar{r}_{\text{TNT}}$ 、 $\bar{r}_E$  为 TNT 和炸药的比例距离,m/kg<sup>1/3</sup>。

分别对以上 3 种铝粉质量分数的炸药进行 TNT 当量系数的计算,通过式(2)的比例距离公式,可分别得出 3 种炸药在同一压力下  $\bar{r}_E$  以及  $\bar{r}_{\text{TNT}}$  的数值,进而可得出:3 种铝粉含量的炸药 TNT 当量系数分

别为 0.938 6、0.980 5、1.194 7。  
岩石型乳化炸药 TNT 的当量系数平均值为 0.708<sup>[12]</sup>。与岩石型乳化炸药的 TNT 当量系数相比,3 种不同铝粉含量的炸药的 TNT 当量系数明显提高,且分别提高 33%、39%、69%。

2.3 水下爆炸能量输出特性

对该凝胶炸药进行水下冲击波压力及气泡脉动情况测试,能量输出情况如表 3。HTPB 推进剂直径为 15 mm。

结果表明,随着 HTPB 推进剂中敏化剂  $R_1$  的铝粉质量分数的提高,炸药的比冲击波能  $e_s$ 、比气泡能  $e_b$  及水下爆炸总能量  $e_t$  逐渐增加,说明  $R_1$  中铝粉质量分数对水下爆炸能量输出具有正向效应,原因可能为敏化剂中铝粉质量分数较大时,炸药反应较完全,会大量地产生气体产物,从而使能量有较为明显的增加。当  $R_1$  铝粉质量分数达到 5% 时,水下爆炸能量输出可达到 4.234 kJ/g,高于乳化炸药的水下爆炸能量输出平均值 3.4 kJ/g;当敏化剂铝粉质量

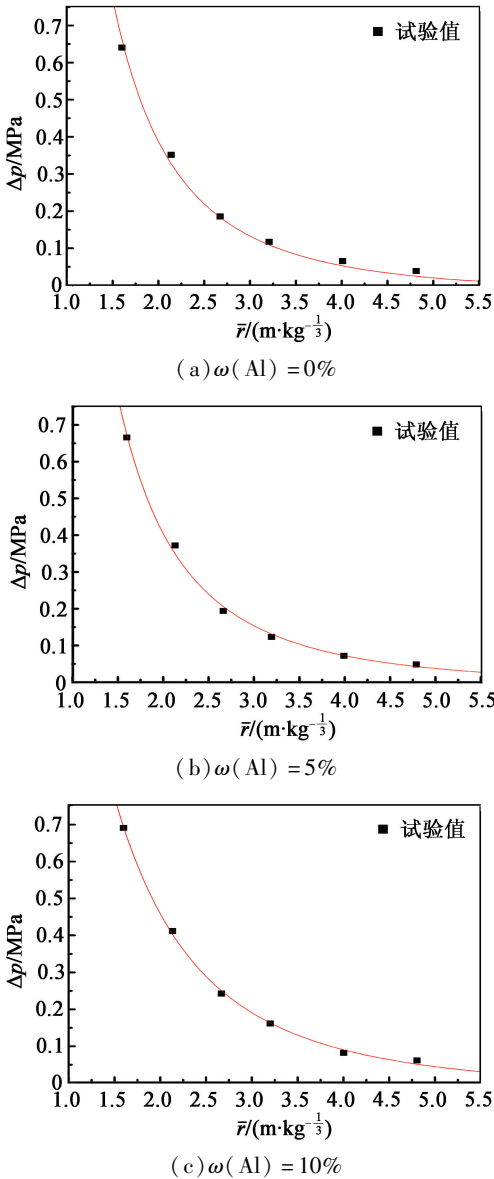


图 2 含 HTPB 推进剂的高能炸药  
超压-比例距离曲线

Fig. 2 Peak pressure-scaling distance curves  
of the high explosive containing HTPB propellant

表 3 含 HTPB 推进剂的高能炸药  
水下爆炸能量输出特性

Tab.3 Energy output characteristics of the high  
explosive containing HTPB propellant in  
underwater explosion

$\omega(\text{Al})/\%$	$m/\text{g}$	$e_s/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$	$e_b/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$	$e_t/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$
0	272.2	0.777	2.893	3.892
5	245.2	0.831	3.190	4.234
10	245.0	0.870	3.410	4.561

分数达到 10% 时,水下爆炸能量输出达到 4.561 kJ/g,高于 TNT 的水下能量输出值 4.3 kJ/g<sup>[13]</sup>。

3 结论

- 1) 该新型高能炸药随着敏化剂中铝粉质量分数的增加,爆轰感度提高明显,能量输出等各性能提高明显。
- 2) 该炸药的密度可达 1.53 g/cm<sup>3</sup>,爆速与敏化剂中铝粉质量分数呈正相关,可达 6 900 m/s。
- 3) 在比例距离为 1.5 ~ 4.5 m/kg<sup>1/3</sup> 范围内,3 种质量分数敏化剂(铝粉质量分数 0%、5%、10%)得到的炸药 TNT 当量系数分布于 1 左右,分别为 0.939、0.981、1.195。当敏化剂中铝粉质量分数为 10% 时,水下爆炸能量输出可达到 4.561 kJ/g,高于 TNT,能量输出较高。

参 考 文 献

[1] 李立远,张丽华,王鹏,等. 废弃丁羟推进剂主要组分回收后的废水处理[J]. 化工时刊, 2011,25(2): 13-18.

LI L Y, ZHANG L H, WANG P, et al. Treatments of wastewater after reclaiming the main component of obsolete HTPB propellant [J]. Chemical Industry Times, 2011,25(2): 13-18.

[2] 程劲松,张丽华. 关于废弃丁羟推进剂的处理研究现状[J]. 广东化工, 2001,38(8): 226-227.

CHENG J S, ZHANG L H. The research of the scrap HTPB propellant [J]. Guangdong Chemical Industry, 2001, 38(8): 226-227.

[3] 李立远,张丽华,王鹏,等. 废弃丁羟推进剂的处理与再利用研究进展[J]. 河南化工, 2010,27(24): 3-7.

[4] 王军,蔺向阳,潘仁明. 废弃复合推进剂组分回收与资源化利用[J]. 材料导报, 2011,25(23): 69-72.

WANG J, LIN X Y, PAN R M. Recycling component and utilization of waste composite propellant [J]. Materials Review, 2011,25(23): 69-72.

[5] 付生旺,赵孝彬,陈教国. 含能材料废料处理技术研究述评( I ):安全销毁技术[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(4): 293-296.

FU S W, ZHAO X B, CHEN J G. Review on the disposal techniques of energetic material wastes ( I ): safety destruction techniques [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006,29(4): 293-296.

[6] BURCH D, JOHNSON M A, SIMS K. Value added products from reclamation of military munitions [J]. Waste Management, 1998,17(3): 159-163.

[7] 韩启龙,王焯军,蒋大勇. 报废固体推进剂处理技术研



究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2008,6(6): 13-17.

HAN Q L,WANG X J,JIANG D Y. Research progress in treatment technology of obsolete solid propellant [J]. Chemical Peopellants & Polymeric Materials, 2008, 6 (6): 13-17.

[8] 蒋大勇,王焯军,李冰. 报废丁羟推进剂的再利用研究进展[J]. 火工品, 2008(2): 27-30.

JIANG D Y,WANG X J,LI B. The research on recycle of the HTPB propellant scrap[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(2):27-30.

[9] 蒋大勇,王焯军,白云,等. 利用废弃 HTPB 推进剂制备民用炸药的可行性探讨[J]. 火炸药学报, 2010,33 (1): 46-52.

JIANG D Y,WANG X J,BAI Y,et al. Feasibility analysis on preparation of civil explosives with obsolete HTPB propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010,33(1): 46-52.

[10] 王泽山,张丽华,曹欣茂. 废弃火炸药的处理与再利用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.

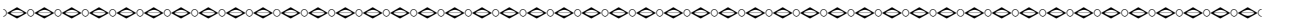
[11] 王鹏,魏晓安,肖学海,等. 含废弃丁羟推进剂的凝胶炸药[J]. 火炸药学报, 2011,34(5): 71-73.

WANG P,WEI X A,XIAO X H,et al. Gel explosive containing waste HTPB propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011,34(5): 71-73.

[12] 乔小玲,胡毅亨,彭金华,等. 岩石型乳化炸药的 TNT 当量[J]. 爆破器材, 1998,27(6): 5-8.

QIAO X L,HU Y T,PENG J H,et al. TNT equivalence of a rock emulsion explosive [J]. Explosive Materials, 1998,27(6): 5-8.

[13] 刘永明,董春海,郑福良. 水下爆炸能量测试法评析工业炸药威力[J]. 煤矿爆破, 2000(3): 20-24.



(上接第 28 页)

出,压力相对缓慢上升,达到峰值后几乎趋于不变;  
3) 过滤网不仅能够过滤燃气中的固体残渣,对于降低发生器出口燃气温度也起到很大作用;  
4) 建立了内压曲线与罐压曲线的对应关系,内压曲线的峰值点就是罐压曲线上升速率最快的点;  
5) 数值模拟能够实现对药剂燃速、气体发生剂规格、装药量及排气孔大小等参数的模拟研究,为烟火式气体发生器的设计工作奠定了基础。

参 考 文 献

[1] 宋健,王伟玮,李亮,等. 汽车安全技术的研究现状和展望[J]. 汽车安全与节能学报,2010,1(2):98-106.

SONG J, WANG W W, LI L, et al. Research status and prospects of automotive safety technology[J]. Journal of Automotive Safety and Energy,2010,1(2):98-106.

[2] WANG J T, NEFSKE D J. A new CAL3D airbag inflation model[J]. SAE Technical Paper 880654,1988,doi:10. 4271/880654.

[3] WANG J T, LIN K H. A CAL3D steering system impact model[J]. SAE Technical Paper 880650,1988,doi:10. 4271/880650.

[4] METERNA P. Advances in analytical modeling of airbag inflators[J]. SAE Technical Paper 920120, 1992,doi: 10. 4271/920120.

[5] BUTLER P B, KRIER H, FAIGLE E,et al. Numerical simulation of passenger-side automotive airbag inflator [J]. SAE Technical Paper 920848, 1992,doi:10. 4271/ 920848.

[6] BUTLER P B, KANG J, KRIER H. Modeling and numerical simulation of the internal thermo-chemistry of automotive airbag inflators[J]. Progress in Energy Combustion Science,1993,19(5):365-382.

[7] SEO Y D, CHUNG S H, YOH J J. Automotive airbag inflator analysis using the measured properties of modern propellants[J]. Fuel,2010,18(6):1395-1401.

[8] ALKAM M K,BUTLER P B. Thermal simulation of a pyrotechnic solid-propellant gas generator[J]. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 2009, 3 (3):198-205.

[9] ULAS A, RISHA G A,KUO K. Ballistic properties and burning behavior of an ammonium perchlorate/guanidine nitrate/sodium nitrate airbag solid propellant [J]. Fuel, 2006,85(14/15):1979-1986.

[10] 黄寅生. 汽车安全气囊的药剂燃烧特性实验研究与数值模拟[D]. 南京:南京理工大学,1996.

[11] 成一,陈守文. 烟火式气体发生器燃烧室喷嘴的设计与研究[J]. 汽车技术,2002(7):20-22.

CHENG Y, CHEN S W. Design and study of nozzle of firework type gas generator combustion chamber[J]. Automobile Technology,2002(7):20-22.

[12] 周奎军. 汽车安全气囊气体发生器的研究[D]. 南京: 南京理工大学,2007.

[13] 周彦煌,王升晨. 实用两相流内弹道学[M]. 北京:兵器工业出版社,1990.

[14] 翁春生,王浩. 计算内弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,2006.

[15] 金志明,袁亚雄,宋明. 现代内弹道学[M]. 杭州:浙江教育出版社,1992.