

文章编号: 1006-9941(2011)05-0561-04

装填密度和燃烧压力对炮用发射装药附着性燃烧残渣的影响

乔丽洁, 堵平, 王泽山

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 用密闭爆发器试验研究了单基、三基发射药在不同装填密度(0.05~0.20 g·cm⁻³)、不同试验压力(49~105 MPa)和不同装药量的点火药(黑火药和清洁点火药(CBI))的附着性燃烧残渣量。比较了试验结果和靶场射击结果。结果表明,随着装填密度和燃烧压力的增加,附着性燃烧残渣减少。CBI点火药使发射药燃烧残渣量减少。用密闭爆发器得到的三基药附着性燃烧残渣是单基药的1.6倍;靶场射击试验中,三基药的附着性燃烧残渣是单基药的1.5倍,表明两种结果基本一致。

关键词: 物理化学; 发射装药; 附着性燃烧残渣; 装填密度; 燃烧压力; 模拟燃烧实验

中图分类号: TJ55; O64

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.018

1 引言

近几年来,炮用发射药燃烧洁净性方面存在的问题已引起广泛关注^[1-3]。研究有效的炮用发射药燃烧残渣测试评价方法,是改进和应用发射药洁净燃烧技术的基础。实际射击中,燃烧残渣可分为附着性残渣、漂浮性残渣和沉降性残渣3种^[4]。炮用发射药连续射击后附着性残渣堵塞药室,严重时导致炮弹留膛的后果,影响勤务处理^[5]。即使燃烧残渣能吹出炮管,也容易暴露目标,易造成环境污染^[6-9]。

如某外贸型号武器火炮模块装药射击后,该模块装药为3号装药,附着性燃烧残渣较多。附着在炮闩处的残渣会因累积而影响炮闩开关,甚至损坏炮闩;附着在药室内的残渣会影响正常的装药;附着在膛线内的残渣会随着射击的进行磨损膛线。国内外关于射击燃烧残渣的主要研究大多数集中在枪药方面,如王琼林等在枪用发射药燃烧残渣测试方面、高分子钝感枪药洁净燃烧方面进行了研究^[4,10],结果是:不同枪用发射药的残渣生成量差异很大,附着性残渣较大时,其漂浮性残渣也较大;采用高氧含量的高分子钝感剂和新型安定剂的高分子钝感枪药具有洁净性燃烧特性。而有关炮用发射药附着性燃烧残渣方面的研究报道较少。

本研究针对炮用发射药的附着性燃烧残渣问题,

采用密闭爆发器定容燃烧试验进行模拟研究,重点对发射药、点火药的附着性燃烧残渣进行了分析。模拟试验测试发射药种类与两种点火药在不同装填密度、不同燃烧压力下产生的附着性燃烧残渣;研究发射药装填密度、点火药种类和燃烧压力对附着性燃烧残渣量的影响;并与靶场射击中的测试结果进行比较。

2 附着性燃烧残渣理论分析和测试方法

2.1 实验设备及样品

实验设备:实际标定容积 $W_0=100.16\text{ cm}^3$ 的密闭爆发器测试系统。

实验样品:发射药为19孔粒状单基药和三基药;点火药为多孔硝化棉点火药(CBI)和黑火药。

2.2 发射药附着性燃烧残渣测试方法

炮用发射药的附着性燃烧残渣,通过测试发射药在密闭爆发器内的燃烧残渣质量,模拟评价其实际射击燃烧残渣。具体操作过程为:将发射药按不同的装填密度置于密闭爆发器中,分别使用清洁点火药和黑火药;打开密闭爆发器,使用已预先干燥、定量的海绵,蘸去离子水擦尽密闭爆发器内壁粘附的残渣,在干燥箱中干燥处理,得到发射药附着性燃烧残渣量。

3 结果与讨论

3.1 炮用发射药和点传火系统的附着性燃烧残渣分析

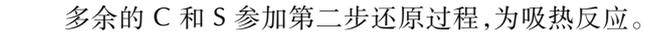
发射药的附着性燃烧残渣主要有两个来源:一是溶塑火药中含有的少量无机盐类和金属氧化物,如:

收稿日期: 2011-06-21; 修回日期: 2011-06-27

作者简介: 乔丽洁(1969-),女,博士研究生,主要从事含能材料的清洁燃烧研究。e-mail: qiaojie624@126.com

KNO_3 或 K_2SO_4 、 TiO_2 等; 二是火药成分中的非能量成分如苯二甲酸二丁酯、二苯胺、石蜡、凡士林、中定剂等。这些物质在火药的燃烧过程中, 有可能产生金属氧化物、中间有机物、游离碳颗粒等凝聚相。

发射装药用点传火材料主要为黑火药, 其燃烧反应分为两步: 第一步为迅速的氧化过程; 第二步为较缓慢的还原过程。氧化过程如下式所示, 为放热反应。



多余的 C 和 S 参加第二步还原过程, 为吸热反应。



由于还原反应进行较缓慢, 因此在火炮装药射击时, 黑火药的第二步反应有可能不完全, 1 kg 黑火药燃烧后约生成固体粒子 0.522 kg^[11-12]。

3.2 不同装填密度下的测试结果

发射药在密闭爆发器中的燃烧产物有气体、水和固态物质。实验中收集的残渣为固态物质, 密闭爆发器中附着性燃烧残渣测试结果见表 1、表 2。表 1、表 2 中 m_B 为点火药药量; m 为发射药装药量; Δ 为装填密度, $\Delta = m/W_0$, m 为发射药装药量, W_0 为密闭爆发器实际标定容积; m_c 为固态附着性燃烧残渣总量; w_c 为固态附着性燃烧残渣质量分数。

表 1 单基药在不同点火药和不同装填密度下的附着性燃烧残渣
Table 1 Adhesiveness combustion residue of single-based propellant under different charge density and powder

powder	m_B /g	m /g	$\Delta/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	m_c /g	$w_c/\%$
CBI	1.00	6.30	0.06	0.10	1.62
CBI	1.00	9.89	0.10	0.09	0.92
CBI	1.00	15.71	0.16	0.06	0.04
CBI	1.00	20.19	0.20	0.09	0.04
black powder	1.00	6.35	0.06	1.58	24.96
black powder	1.00	10.09	0.10	1.98	19.60
black powder	1.00	16.05	0.16	1.77	11.00
black powder	1.00	20.08	0.20	1.72	8.56

由表 1 可知, 对单基药, 采用黑火药作为点火药时产生的固态附着性燃烧残渣较多, 而以 CBI 为点火药时残渣量明显减少; 在相同的装填密度下, 采用黑火药产生的固态附着性燃烧残渣平均是 CBI 的 15 倍以上。这是因为 CBI 与黑火药的组分不同造成的, CBI 的主要组成是硝化棉, 燃烧时几乎不产生固体颗粒, 而黑火药燃烧时, 形成很多炽热的固体粒子。

表 2 三基药在不同点火药和不同装填密度下的附着性燃烧残渣
Table 2 Adhesiveness combustion residue of triple-based propellant on different charge density and ignition powder

powder	m_B /g	m /g	$\Delta/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	m_c /g	$w_c/\%$
CBI	1.00	5.04	0.05	0.16	3.13
CBI	1.00	10.31	0.10	0.15	1.42
CBI	1.00	15.57	0.15	0.19	1.20
CBI	1.00	20.37	0.20	0.22	1.05
black powder	1.00	5.27	0.05	1.74	32.98
black powder	1.00	9.86	0.10	2.35	23.81
black powder	1.00	15.70	0.15	2.16	13.76
black powder	1.00	20.15	0.20	1.87	9.27

由表 1 与表 2 比较结果可知, 在点火药药量一样、装填密度一样的条件下, 三基药比单基药产生的残渣量多。但与单基药相比, 改变点火药的种类, 其附着性燃烧残渣量的相对变化较小。装填密度、发射药和点火药种类对炮用固态附着性燃烧残渣量的影响如图 1。

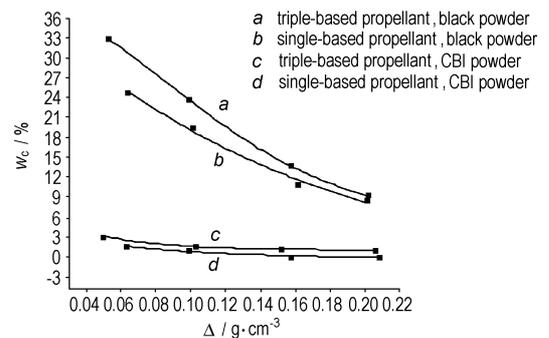


图 1 装药密度、发射药和点火药种类对炮用固态附着性燃烧残渣量的影响

Fig. 1 The effect of charge density of propellant and different powder on adhesiveness combustion residue of gun propellant

从图 1 可知, 黑火药为点火药时(曲线 a 和 b), 在装填密度小时, 三基药和单基药都产生很多的固态附着性燃烧残渣量, 这是因为发射药燃烧不完全造成的。随着装填密度增大, 燃烧压力增大, 两者的固态附着性燃烧残渣都减少, 且三基药燃烧残渣数量的相对变化较单基药变大。CBI 为点火药时(曲线 c 和 d), 装填密度的大小对减少燃烧残渣量的影响很小。

由图 1 可见, 当装填密度达到 0.20 左右、发射药已经完全燃烧时, 以三基药为发射药时(曲线 a 和 c), 黑火药点火药与 CBI 点火药产生的燃烧残渣量之差与以单基药为发射药时(曲线 b 和 d), 黑火药点火药与 CBI 点火药产生的燃烧残渣量之差几乎一样, 表明此时残渣量的差别是由黑火药点火药产生的。同样以黑

火药为点火药时,三基发射药与单基发射药产生的燃烧残渣量之差与以 CBI 为点火药时,三基发射药与单基发射药产生的燃烧残渣量之差几乎一样,表明此时残渣量的差别已与燃烧性能(装填密度)无关,是由发射药的差异产生的。

由此可知,黑火药点火药是产生固态附着性燃烧残渣的主要原因之一,三基药产生的附着性燃烧残渣高于单基药。

3.3 CBI 点火药时不同燃烧压力 (p_m) 下的测试结果

固定装填密度(单基药为 $0.06 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,三基药为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),改变点火药量(m_B)、点火压力(p_B),不同发射药在密闭爆发器中的附着性燃烧残渣的测试结果见表 3,燃烧压力(p_m)对燃烧残渣的影响见图 2。

表 3 单基药和三基药在不同点火药量和不同燃烧压力下附着性燃烧残渣

Table 3 Adhesiveness combustion residue of single-based and triple-based propellant under different igniter charge and combustion pressure

propellant	m_B/g	m/g	p_B/MPa	p_m/MPa	m_c/g	$w_c/\%$
single-based	1.00	6.40	7.91	54.99	0.14	2.17
single-based	2.00	6.56	16.79	67.75	0.10	1.48
single-based	3.00	6.62	27.24	79.41	0.09	1.30
single-based	4.00	6.72	37.15	92.71	0.09	1.32
single-based	5.00	6.63	47.89	103.76	0.09	1.34
triple-based	1.00	5.40	7.82	49.74	0.16	3.02
triple-based	2.00	5.10	16.46	58.04	0.13	2.53
triple-based	3.00	5.16	26.18	69.86	0.12	2.24
triple-based	4.00	5.09	36.24	79.65	0.10	2.07
triple-based	5.00	5.33	46.66	91.61	0.12	2.28

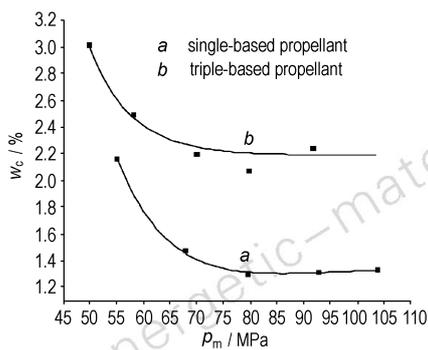


图 2 单基药和三基药燃烧压力对固态附着性燃烧残渣的影响
Fig.2 Effect of combustion pressure of single-based and triple-based gun propellant on solid adhesiveness combustion residue

由表 3 及图 2 曲线 a 可知,单基药燃烧时,增大点火压力,即燃烧压力增大,固态附着性燃烧残渣降低。当燃烧压力达到 82 MPa 以上时,燃烧残渣量变化微

小,即再增大燃烧压力对减少燃烧残渣的影响基本消失。此时所对应的燃烧压力即为燃烧限制压力。据此得到单基药的燃烧限制压力(p_{pro})在 82 MPa 左右; w_c 为 1.33%。

由表 3 及图 2 曲线 b 可知,当三基药燃烧压力达到 85 MPa 以上时,燃烧残渣量变化微小,即再增大燃烧压力对减少燃烧残渣的影响近似于无影响。由此得到三基药的燃烧限制压力(p_{pro})为 85 MPa 左右, w_c 为 2.18%。

由此可知,三基药燃烧限制压力比单基药高 3 MPa,三基药固态附着性燃烧残渣质量分数也明显高于单基药。在限制压力点,固态附着性燃烧残渣量三基药是单基药的 1.6 倍。

4 靶场射击实验验证

为验证模拟实验的结果,用某外贸型号武器火炮模块装药靶场射击实验进行验证。模块装药是由发射药、可燃容器、点传火系统及装药附件等制成的单元模块,并按射程需要,用单元模块组合成不同装药号的发射药装药^[13]。该外贸火炮模块装药为 3 号装药,在其他装药条件(可燃药筒、装药附件)固定,点火药为 10 g CBI,发射药分别为单基药、三基药,改变装药量,全面搜集了炮口和药室处的附着性燃烧残渣,结果见表 4。

表 4 靶场实验中不同发射药在不同装药量下附着性燃烧残渣
Table 4 Adhesiveness combustion residue of different propellant charges in firing range

propellant	m/kg	m_c/g	$w_c/\%$
single-based	2.16	3.20	0.15
single-based	2.21	2.35	0.11
single-based	2.29	1.85	0.08
triple-based	2.15	5.42	0.25
triple-based	2.20	3.30	0.15
triple-based	2.29	2.40	0.11

在实测射击膛压均大于 90 MPa 时,改变装药量,并不能明显减少附着性燃烧残渣,三基药固态附着性燃烧残渣平均量是单基药的 1.5 倍,这与密闭爆发器的模拟实验结果接近,表明密闭爆发器定容燃烧模拟实验结果对靶场实验有借鉴作用。

5 结论

(1) 密闭爆发器模拟实验研究表明,黑火药是发射装药固态附着性燃烧残渣产生的主要原因之一;三基

药、单基药的燃烧限制压力分别为 85 MPa 和 82 MPa 左右,两者燃烧限制压力接近;在限制压力点附近,三基药的固态附着性燃烧残渣 w_c 为 2.18%,单基药 w_c 为 1.33%;三基药固态附着性燃烧残渣量明显高于单基药,是单基药的 1.6 倍。

(2) 靶场射击实验中,在实测射击膛压均大于 90 MPa 时,三基药固态附着性燃烧残渣平均量是单基药的 1.5 倍,与密闭爆发器实验结果基本一致。

参考文献:

- [1] 贺增第,刘幼平,何利明. 硝酸铵对炮口焰的影响研究[J]. 中北大学学报:自然科学版,2008,29(6): 538-541.
HE Zeng-di, LIU You-ping, HE Li-ming. Impacts of ammonium nitrate on muzzle flash[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2008, 29(6): 538-541.
- [2] 丁学波. 关于轻武器科研建设的几个问题[J]. 轻武器, 1998(8): 17-18.
DING Xue-bo. Construction light weapons research on several issues[J]. *Light Weapons*, 1998(8): 17-18.
- [3] 谭兴良,孔德仁. 膛口抑制技术[M]. 北京:兵器工业出版社, 1995.
- [4] 王琼林,刘少武,张远波. 枪用发射药燃烧残渣的测试方法[J]. 火炸药学报,2006,29(5): 57-59.
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, ZHANG Yuan-bo. Test method of combustion remains of gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2006, 29(5): 57-59.
- [5] 王洪杰. 发射药洁净燃烧技术研究进展[J]. 山西化工, 2008, 28(3): 26-28.
WANG Hong-jie. Study on the clear burning gun propellant[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2008, 28(3): 26-28.
- [6] 王琼林. 国外枪炮发射药技术发展概况[J]. 火炸药学报, 1998(4): 55-59.
WANG Qiong-lin. Development of foreign gun propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 1998(4): 55-59.
- [7] 王泽山. 发射药技术的展望[J]. 华北工学院学报:社会科学版, 2001(增刊): 36-40.
WANG Ze-shan. Development and prospect of propellant techniques[J]. *Journal of North China Institute of Technology (Social Sciences)*, 2001(Supplement): 36-40.
- [8] Cramer M, Akester J, Fawcett W, et al. Environmentally friendly advanced gun propellants. AD-A447212[R], 2004.
- [9] Rupert Pengeley. Modular charge systems mature for global artillery operation[J]. *Jane's International Defense Review*, 2004, 37: 32-39.
- [10] 王琼林,刘少武,谭惠民. 具有洁净燃烧特征的高分子钝感枪药[J]. 火炸药学报, 2003, 26(4): 5-7.
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, TAN Hui-min. Study on the clear-burning gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2003, 26(4): 5-7.
- [11] 赵毅,刑浴仁. 关于刚性组合装药“全等式”结构与“不等式”结构的讨论[J]. 火炸药学报, 2001(1): 27-29.
ZHAO Yi, XING Yu-ren. Discussion on problems of uni-modular and bi-modular charges in the modular propelling charge system[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2001(1): 27-29.
- [12] 王泽山,何卫东,徐复铭. 火药装药设计原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006.
- [13] 张洪林,刘宝民,焦宗平. 双模块装药弹道设计[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(7): 45-47.

Effect of Charge Density and Combustion Pressure on Adhesiveness Combustion Residue of Gun Propellant Charges

QIAO Li-jie, DU Ping, WANG Ze-shan

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

Abstract: The closed bomb test was used to study the amount of adhesiveness combustion residue of single-based gun propellant and triple-based gun propellant under the conditions of different charge density ($0.05 - 0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), different test pressure (49 - 105 MPa) and different igniter (black powder and CBI powder) with different ignition charge. The experimental and tested results in firing field were compared. The results show that as the charge density and combustion pressure increase, the combustion residue decrease and that the CBI powder makes adhesiveness combustion residue decrease. The adhesiveness combustion residue of triple-based gun propellant in closed bomb test is 1.6 times greatly than that of single-based gun propellant, and one in firing field is 1.5 times greater than that of single-based gun propellant, showing the experimental results agree with tested results in firing field.

Key words: physical chemistry; propellant charge; adhesiveness combustion residue; charge density; combustion pressure; simulated combustion experiment

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.018