

文章编号:1006-9941(2024)08-0824-08

八苯基笼型聚倍半硅氧烷在硝胺发射药中的缓蚀特性

刘泽昊¹,陈冲¹,卢佳新¹,张波波¹,肖飞¹,刘波²,梁泰鑫¹

(1. 中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原 030051; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为研究新型有机硅材料八苯基笼型聚倍半硅氧烷(OPS)在发射药中的缓蚀特性及作用机理,制备了OPS含量分别为2%、5%、8%的硝胺发射药以及不含OPS的硝胺发射药对照样。通过差示扫描热量热仪(DSC)研究了OPS与硝胺发射药组分的相容性,采用氧弹量热仪、密闭爆发器、半密闭爆发器分别研究了发射药的能量性能、燃烧性能以及烧蚀特性,通过扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)表征烧蚀管内壁表面的微观结构、元素分布和产物组成。结果表明,OPS与硝胺发射药组分相容;OPS会降低发射药的爆热、最大压力和火药力;随着OPS含量的增加,硝胺发射药降烧蚀率逐渐增大,缓蚀效果逐渐增强,当OPS含量为5%和8%时,降烧蚀率分别为23.9%、36.0%。对烧蚀管内壁表面裂纹、产物及其分布情况的分析表明,OPS在高温条件下生成的SiO₂均匀分布在管壁内层,形成了具有优异热阻特性的保护层,降低了高温燃气、固体颗粒对管壁的侵蚀与冲刷作用,实现高效缓蚀。

关键词: 八苯基笼型聚倍半硅氧烷(OPS);功能添加剂;硝胺发射药;烧蚀性能

中图分类号:TJ55;TQ562

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2024109

0 引言

随着身管武器的战斗力需求逐渐提升,身管武器弹药的性能要求也逐渐提高,对发射药提出了更高能量的要求。硝胺发射药是目前高能发射药体系的主要产品,其火药力高达到1200 kJ·kg⁻¹,围绕硝胺发射药烧蚀问题开展了大量的基础研究^[1]。现有数据表明,发射药组分中每增加硝胺含量2%,则烧蚀率增加约3%^[2]。在提升武器威力需求下,发射药中硝胺含量在不断增加,身管武器的烧蚀问题也越来越突出,严重影响了武器的射击精度和使用寿命,已成为制约身管武器发展的关键因素^[3-5]。

国内外学者围绕如何降低身管武器烧蚀开展了大量研究,提出了多种解决方案,包括身管材料改进、添加缓蚀剂、复合身管制造等途径^[6-8]。其中,采用缓蚀剂降低身管武器烧蚀是最方便、有效的方法。缓蚀剂

主要是通过其燃烧产物在身管内壁形成保护层的方法,降低高温火药燃气对身管内壁的侵蚀,进而实现缓蚀效果^[9-11]。TiO₂、石蜡和滑石粉作为传统无机缓蚀剂自20世纪六十年代至今一直在应用,随着新型高能发射药研究,传统无机缓蚀剂已无法满足对降烧蚀的需求^[12-13]。近年来,该领域研究人员研究了许多新型、高效缓蚀材料,其中有机硅缓蚀剂表现出较好缓蚀性,受到了学者的关注。林少森等^[14]采用一步法制备了硅油/脲醛树脂微胶囊缓蚀剂,并证实了有机硅材料的降烧蚀效果优于TiO₂等无机缓蚀剂。聚倍半硅氧烷(POSS)是有机硅材料的一种,是笼状结构的有机/无机杂化聚合物,具有良好的耐热性、热稳定性以及结构的可设计性,有望成为高效缓蚀材料^[15-16]。

为此,研究基于POSS经过苯环取代反应得到多官能团八苯基笼型聚倍半硅氧烷(OPS),并将其作为发射药的功能添加剂,制备了不同OPS含量的硝胺发射药样品,采用差示扫描量热法研究OPS与硝胺发射药组分的相容性,采用绝热法、微分压力法、烧蚀管法研究发射药的能量性能、燃烧性能以及烧蚀特性,通过扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)研究揭示OPS实现缓蚀的作用机理,为实现降低高能发射药对身管武器的烧蚀、提高武器使用寿命提供参考。

收稿日期:2024-04-23;修回日期:2024-06-01

网络出版日期:2024-06-28

基金项目:山西省自然科学(202203021221120)

作者简介:刘泽昊(1994-),男,研究生,主要从事发射药技术研究。e-mail:lzh2022@163.com

通信联系人:梁泰鑫(1988-),男,副教授,主要从事发射药技术研究。e-mail:liangtx@nuc.edu.cn

引用本文:刘泽昊,陈冲,卢佳新,等.八苯基笼型聚倍半硅氧烷在硝胺发射药中的缓蚀特性[J].含能材料,2024,32(8):824-831.

LIU Ze-hao, CHEN Chong, LU Jia-xin, et al. Corrosion Inhibition Properties and Mechanism of Octaphenyl Cage polysilsequioxane in Nitratemine Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(8):824-831.

1 实验部分

1.1 原料与仪器

原料:吸收药片由泸州北方化学工业有限公司提供。吸收药片由硝化纤维(58%)、硝化甘油(40%)和中定剂(2%)组成。环三亚甲基三硝胺(RDX)由泸州北方化学工业有限公司提供。八苯基聚倍半硅氧烷(OPS)由实验室自制^[17]。乙醇(99%)和丙酮(99%)由上海阿拉丁生化科技有限公司提供。

仪器:Sigma 300型扫描电子显微镜,德国ZEISS公司;RF-C7000型氧弹量热仪,长沙瑞方能源科技有限公司;差示扫描量热仪,北京恒久实验设备有限公司;密闭爆发器、半密闭爆发器烧蚀管装置,江西鑫源传感器有限责任公司。

1.2 实验过程

1.2.1 样品制备

研究按表1的配方,以硝胺发射药为基药,添加2%、5%、8%含量的OPS,使用醇酮溶剂(体积比1:1)、溶棉比为0.6,通过捏合机对发射药物料进行塑化,塑化时间6 h,将塑化后的物料药团通过间断成型方法得到发射药样品,最后通过驱溶、干燥等步骤得到最终样品,样品如图1所示。从图1a上可以看出,RDX-20组分分布均匀,发射药表面无明显缺陷,由图1b~d可以看出,加入OPS后的制备得到样品形貌和RDX-20一致,质量较好。

表1 发射药配方表

Table 1 Formulations of four different propellants

sample	absorbed tablet content / %	OPS content / %	RDX content / %
RDX-20	80	0	20
OP-2-RDX	78	2	20
OP-5-RDX	75	5	20
OP-8-RDX	72	8	20

1.2.2 相容性表征

按照GJB 770B方法502.1表征OPS和吸收药片以及RDX的相容性^[18]。首先,将OPS与吸收药片或RDX按质量1:1混合后,放入研钵中研磨均匀。然后,称取(1±0.1) mg样品,置于坩埚内,在压片机上加密封,将密封的坩埚置于差示扫描热量热仪(DSC)的试样天平槽中。分别设定加热速率为2、5、10 K·min⁻¹和20 K·min⁻¹,氮气流量为30 mL·min⁻¹,测试得到对

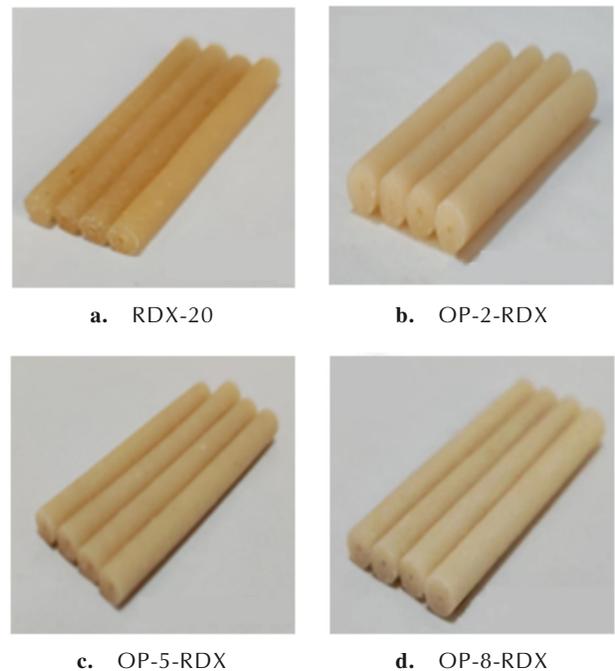


图1 发射药样品实物图

Fig.1 propellant sample photographs

应的4条DSC曲线。通过Kissinger方程(1)^[19]计算试样的表观活化能。依照GJB 770B方法502.1中的相容性评价标准,用分解峰温的改变量(ΔT_p)和表观活化能的改变率($\Delta E/E_a$)综合评价试样的相容性^[18],计算方法见式(2)~(3)。

$$\ln \frac{\beta_i}{T_{pi}^2} = \ln \frac{AR}{E_a} - \frac{E_a}{RT_{pi}} \quad (1)$$

$$\Delta T_p = T_{p1} - T_{p2} \quad (2)$$

$$\Delta E/E_a = (E_a - E_b)/E_a \times 100\% \quad (3)$$

式中, β_i 为升温速率,K·min⁻¹; T_{pi} 为在升温速率 β_i 下,炸药的分解峰温,K; R 为气体常数,8.314 J·(mol·K)⁻¹; E_a 为表观活化能,J·mol⁻¹。 ΔT_p 为单独体系相对于混合体系分解峰温的改变量,K; T_{p1} 为吸收药片的分解峰温,K; T_{p2} 为混合体系的分解峰温,K; $\Delta E/E_a$ 为单独体系相对于混合体系表观活化能的改变率; E_a 为单独体系的表观活化能,J·mol⁻¹; E_b 为混合体系的表观活化能,J·mol⁻¹。

1.2.3 氧弹量热仪实验

按照GJB 770B方法701.1的绝热法表征发射药的爆热值^[18]。实验中,称取1 g标准火药和(5±0.002) g发射药样品,使用直径为0.2 mm长度为10 cm的镍铬点火线(热值6000 J)点火。将试样置于密闭的氧弹中点燃,测出内筒中水的温升值,根据量热系统的热容

和水的温升值计算爆热值, 计算式见式(4), 取3次平行实验的平均值作为最终结果。

$$Q = \frac{\Delta tC - E}{m} \quad (4)$$

式中, Q 为爆炸热值, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; ΔT 为温升, K ; C 为系统热容量, $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$; m 为样品质量, g 。

1.2.4 密闭爆发器实验

按照 GJB 770B 方法 703.1 进行实验, 绘制 $p-t$ 曲线并计算火力值和余容^[18]。密闭爆发器容积为 100 cm^3 , 装填密度为 $0.12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $0.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。点火药为硝化棉(氮含量 13.1%), 按点火压力为 10 MPa 计算点火药的用量, 实验室温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 应变压力传感器精度为 0.005 MPa , 采样间隔为 0.05 ms 。记录燃烧过程中压力随时间的变化, 基于此分析发射药的燃烧性能, 发射药的余容和火药力可根据式(5)和(6)计算得到。

$$\alpha = \frac{P_{m2}/\Delta_2 - P_{m1}/\Delta_1}{P_{m2} - P_{m1}} \quad (5)$$

$$f = \frac{P_{m2}}{\Delta_2} - \alpha P_{m2} \quad (6)$$

式中, f 是火药力, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; P_{m2} 是与对应的 Δ_2 一组经过修正的平均最大压力数值, MPa ; Δ_2 是 0.12 的装填密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; α 是余容, $\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$; P_{m1} 是与对应的 Δ_1 一组经过修正的平均最大压力数值, MPa ; Δ_1 是 0.2 的装填密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

1.2.5 半密闭爆发器烧蚀管实验

采用烧蚀管法表征发射药的烧蚀特性, 实验装置为半密闭爆发器, 容积 50 cm^3 , 烧蚀管材料为 $45\#$ 钢, 点火药为 $2\#$ 硝化棉, 点火药量和试样装药量数据见表 2。发射药在半密闭爆发器中燃烧产生高温高压燃气, 压力达到一定值后, 膜片破碎, 高温燃气通过烧蚀管喷出, 使得烧蚀管的质量减少。实验前后烧蚀管重量的变化称为绝对烧蚀量, 计算式见式(7)。未添加缓蚀剂的发射药的烧蚀量相对于添加缓蚀剂的烧蚀量的变化率称为降烧蚀率, 计算式见式(8)。以降烧蚀率表征发射药烧蚀性的大小, 取3次平行实验的平均值作为最终结果^[20]。

$$m_s = m_a - m_b \quad (7)$$

$$\omega = \frac{m_{s1} - m_{s2}}{m_{s1}} \times 100\% \quad (8)$$

式中, m_s 为绝对烧蚀量, mg ; ω 为降烧蚀率, $\%$; m_a 、 m_b 分别为烧蚀管在实验前后的质量, mg ; m_{s1} 、 m_{s2} 分别为不添加缓蚀剂和添加缓蚀剂的发射药的烧蚀量, mg 。

表 2 试验参数

Table 2 Test parameter

sample	charge mass / g	ignition charge mass / g
RDX-20	1.2758	0.45
OP-2-RDX	1.2941	0.45
OP-5-RDX	0.9711	0.45
OP-8-RDX	0.8165	0.45

2 结果与讨论

2.1 OPS与发射药组分的相容性分析

为研究 OPS 与发射药组分的相容性, 研究采用差示扫描量热法方法对含和不含 OPS 吸收药片以及含和不含 OPS 的 RDX 进行了 DSC 实验, 结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出, OPS 对吸收药片(图 2b)和 RDX(图 2d)的峰形没有影响, 随着升温速率的提高, 峰温位置后移、数值增加, 表明 OPS 对吸收药片和 RDX 的热分解没有影响且不会影响其热稳定性。

利用不同升温速率下放热峰温, 通过 Kissinger 公式可计算出热分解表观活化能 E_a 。其中, $\ln(\beta_i/T_{pi}^2)$ 可看作是 $(1/T_{pi})$ 的线性函数。将 4 个不同升温速率与相应的放热峰温计算所得的数值进行线性拟合得到一条直线, 拟合直线的斜率就是该试样的表观活化能, OPS 与吸收药片以及 RDX 的拟合曲线如图 3 所示。从图 3a 中可以看出, OPS 降低了吸收药片的活化能, 但影响较小。通过计算得到吸收药片相对于 OPS/吸收药片体系的 ΔT_p 为 $-0.26\text{ }^\circ\text{C}$, 表观活化能改变率 $\Delta E/E_a$ 为 1.8% 。根据 GJB 770B 方法 502.1 中的相容性判定标准可以判定 OPS 与吸收药片相容性等级为 1 级, 相容性好。通过计算得到 RDX 相对于 OPS/RDX 体系的 ΔT_p 为 $-0.44\text{ }^\circ\text{C}$, 表观活化能改变率 $\Delta E/E_a$ 为 7.3% , 判定 OPS 与 RDX 片相容性等级为 1 级, 相容性好。

2.2 OPS含量对发射药燃烧性能和爆热的影响

为研究 OPS 对发射药燃烧性能的影响, 研究采用微分压力法进行了密闭爆发器试验。利用压电传感器在燃气作用下产生的压降正比于发射药燃气压力的微分的原理, 记录燃烧过程中压力随时间的变化, 绘制了不同 OPS 含量发射药在装填密度 $0.12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时的 $p-t$ 曲线, 如图 4 所示。由图 4 可知, 随着 OPS 含量的增加, 发射药的最大压力逐渐降低, 达到最大压力的时间逐渐延长。这是因为 OPS 的 Si-O-Si 框架和顶角的苯基使其在燃烧过程中难以分解, 有效抑制硝化棉的火焰传播, 进而延长发射药的燃烧时间。此外, OPS 燃

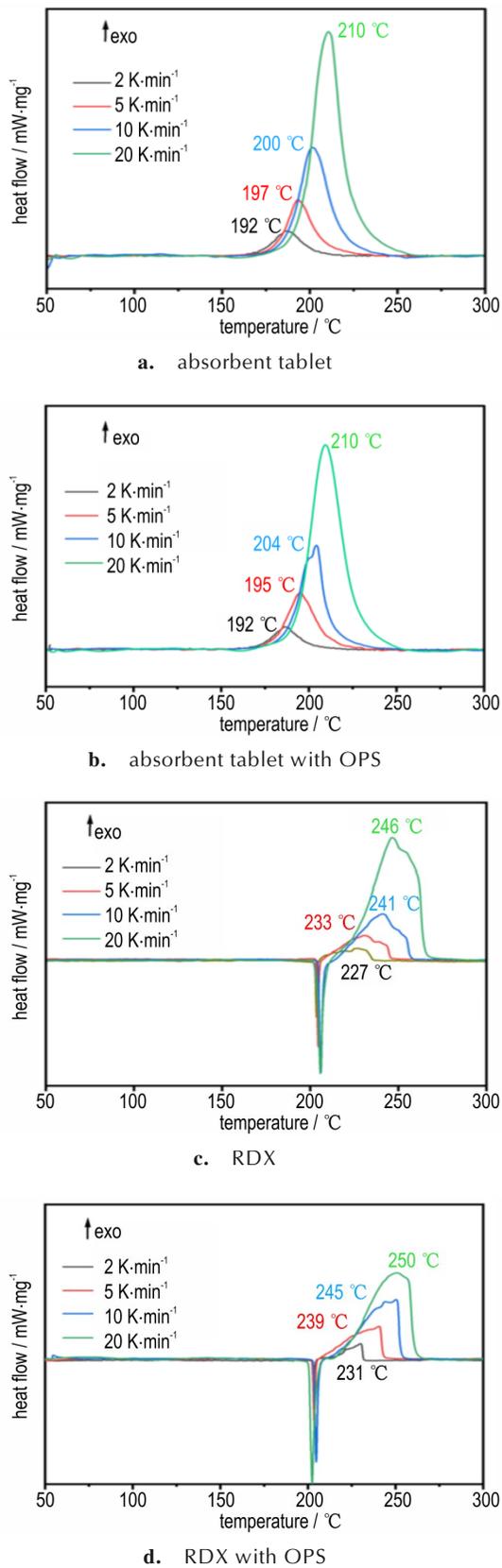


图2 含和不含OPS的吸收药片、RDX的DSC曲线
Fig. 2 DSC curves of absorbent tablet and RDX with and without OPS

烧后形成 SiO_2 固体颗粒, 气体产物相对减少, 降低了发射药的燃气生成量, 最终导致最大压力下降。

为研究 OPS 对发射药爆热的影响, 研究采用绝热法对样品进行了氧弹量热仪试验, 计算得到了不同 OPS 含量发射药的爆热和火药力, 如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 随着 OPS 含量的增加, 发射药的爆热和火药力逐渐降低。当 OPS 含量增加至 8% 时, 发射药

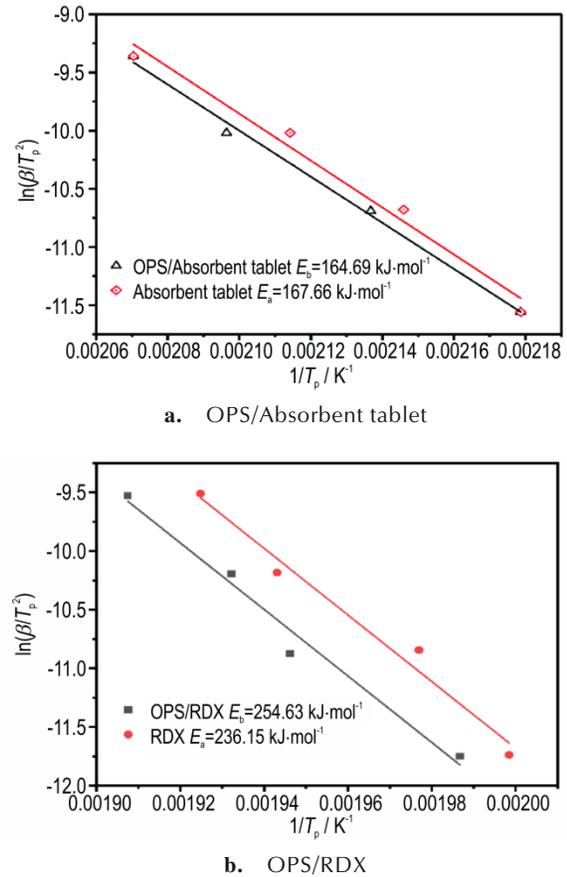


图3 含和不含OPS的吸收药片、RDX的Kissinger拟合曲线
Fig. 3 Kissinger fitting curves of absorption tablets, RDX with and without OPS

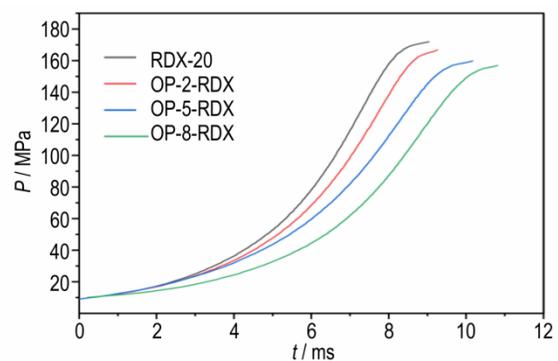
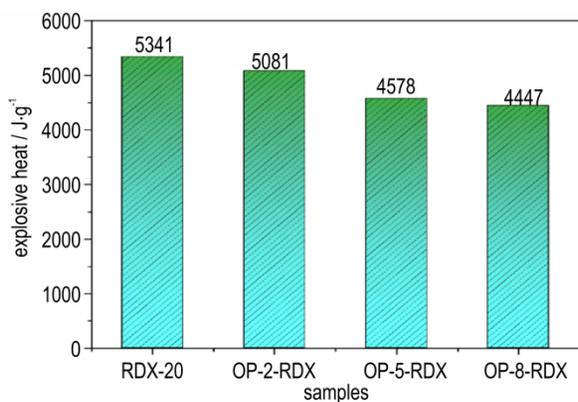
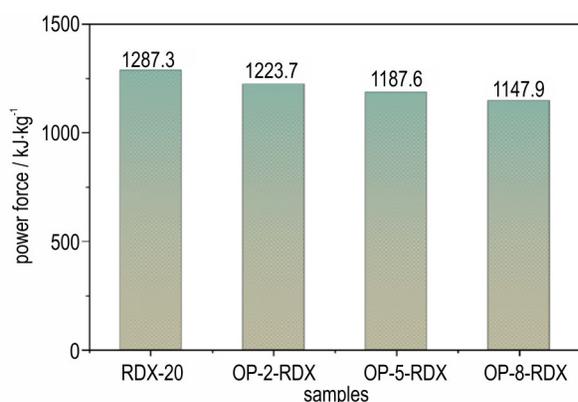


图4 4种不同发射药的 $p-t$ 曲线
Fig. 4 $p-t$ curves of 4 propellant samples with different content of OPS

的火药力和爆热分别降低了16.7%和10.8%,可见OPS对发射药的爆热影响更为显著。由式(4)可知,发射药的爆热与燃烧时的温度呈正相关,说明OPS能有效降低发射药的火焰温度,减少高温燃气对武器身管的热侵蚀。



a. explosive heat



b. power force

图5 4种不同发射药的爆热和火药力

Fig.5 Explosive heat and power force of 4 propellant samples with different content of OPS

2.3 OPS含量对发射药烧蚀性能的影响

为研究OPS与发射药烧蚀性能的影响,研究采用烧蚀管法对4种样品进行了半密闭爆发器试验,通过试验得到了不同含量OPS的发射药的绝对烧蚀量和烧蚀量相对降低率,结果如表3所示。从表3可以看出,硝胺发射药中OPS含量为2%时降烧蚀率为负值,说明没有缓蚀效果。OPS含量为5%、8%时降烧蚀率分别为23.9%和36%,说明在有一定缓蚀效果,且随着OPS含量的增加,缓蚀效果加大。结合2.2节结果可知,综合考虑缓蚀性能和能量性能,OPS含量为5%为本次试验较优值,在对发射药能量性能影响较小的情况下,达到较为明显的缓蚀性能。

表3 4种不同发射药的烧蚀结果

Table 3 Ablative results of 4 propellant samples with different content of OPS

sample	ablative tube number	absolute ablation amount / g	relative ablation rate / %
RDX-20	S0	1.2758	—
OP-2-RDX	S1	1.2941	-1.4
OP-5-RDX	S2	0.9711	23.9
OP-8-RDX	S3	0.8165	36.0

2.4 OPS用于降低发射药烧蚀的作用机理

进而,研究对4种不同发射药的烧蚀管内壁表面产物进行分析,得到图6a1~d1所示的烧蚀管内壁表面产物的SEM图,以及图7所示的烧蚀管内壁表面产物的EDS图谱和特征元素含量。

从图6a1中可以看出,经过发射药高温燃气冲刷的内壁表面分布有剥落的块体,右侧放大图可以观察到烧蚀后熔融团聚在一起的颗粒,这些附着在烧蚀管表面的产物主要是Fe的碳化物和氧化物(图7a)。图6a2可以看出,烧蚀管内壁表面分布了网格状裂纹,在右侧的放大图显示其裂纹明显,裂缝较宽,意味着烧蚀管内壁受热层较深,高温导致烧蚀管金属晶格膨胀产生的剪切应力产生了较宽裂纹。

从图6b1可以看出OPS含量为2%时,发射药燃烧后经气体和颗粒冲刷内壁表层形成波浪状冲刷沟,从图6b2可以观察到燃气和颗粒的冲刷造成了内壁表面的磨损,出现了铁溶胀的现象。从图6c1可以看出OPS含量为5%时内壁表面形成的颗粒均匀分布,从图6c2观察内壁裂缝宽度明显小于图6a2,证明5%含量的OPS形成的保护层有效减缓了热燃气体和固体颗粒对内壁的冲刷,降低了烧蚀。从图6d2观察内壁表面裂纹深度和宽度相较于图6c2更浅更小,证明8%含量的OPS降烧蚀效果还要优于5%含量的OPS。从图7b-d显示,内壁表面颗粒的主要成分是OPS热分解后Si和O元素反应形成的氧化物SiO₂。OPS含量越高, SiO₂颗粒形成的保护层越均匀,保护作用越明显。

分析表明,OPS含量为2%时没有降低烧蚀是因为高温高压下低含量的OPS燃烧后的SiO₂颗粒的冲刷作用大于保护作用。OPS含量为5%和8%时,OPS燃烧后的产物能在内壁表面形成颗粒均匀的SiO₂保护层,并且颗粒均匀性优于2%含量OPS发射药燃烧后的保护层。具有优异热阻特性的SiO₂保护层降低了高温燃气、固体颗粒对管壁的侵蚀与冲刷。

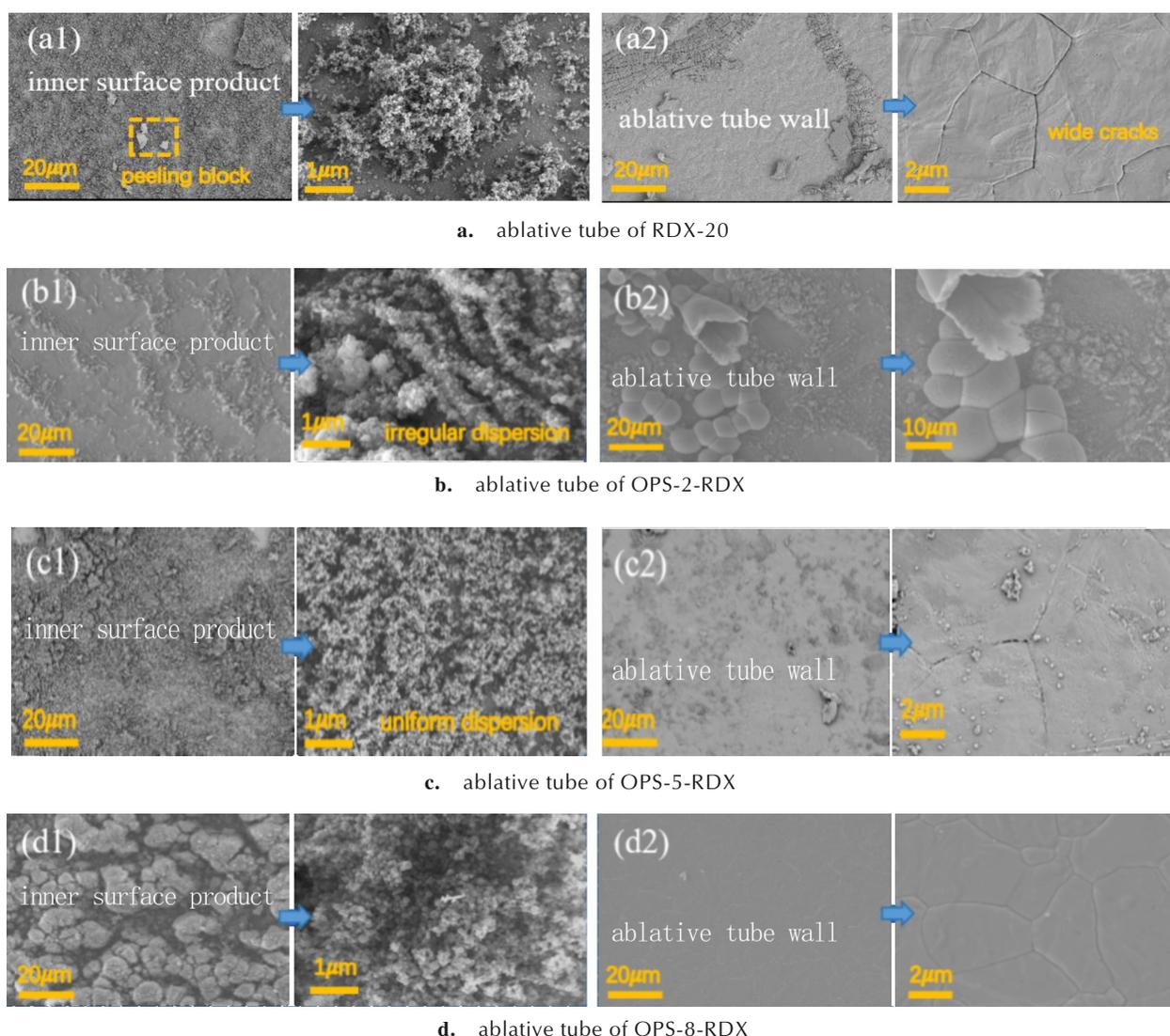


图6 4种不同发射药的烧蚀管内壁表面产物的SEM图

Fig.6 SEM images of product composition of the inner surface of the ablative tube for 4 propellant samples

3 结论

研究设计了不同OPS含量的硝胺发射药样,通过DSC研究了OPS与硝胺发射药组分的相容性,通过氧弹量热仪、密闭爆发器、半密闭爆发器分别研究了发射药的能量性能、燃烧性能以及烧蚀特性,综合分析了OPS含量对发射药烧蚀特性的影响规律和机理。得到以下结论:

(1)OPS与硝胺发射药组分相容性好,OPS可以降低发射药爆热、最大压力和火药力。OPS含量为2%、5%、8%的发射药爆热分别降低了2.7%、8.9%、15.2%,最大压力分别降低了3.0%、5.9%、8.8%,火药力分别降低了5.0%、7.7%、10.8%。可见OPS含量越

高,对发射药爆热特性影响越显著。

(2)OPS的加入会影响发射药的烧蚀特性,2%含量的OPS缓蚀效果不明显,因为高温高压下低含量的OPS燃烧后的 SiO_2 颗粒的冲刷作用大于保护作用。5%和8%含量的OPS可以有效降低烧蚀,降烧蚀率分别为23.9%和36.0%。OPS的降烧蚀机理是OPS分解吸收能量,分解形成气体产物和 SiO_2 颗粒。 SiO_2 在内壁上形成保护层,有效隔绝了高温燃气和固体颗粒对内壁的侵蚀。

(3)综合分析本试验中2%、5%、8%OPS含量发射药的能量性能、燃烧性能以及烧蚀特性,其中5%OPS含量的发射药是本次试验的最优配比,能够具备良好的降烧蚀性能同时保持武器较好的做功能力。

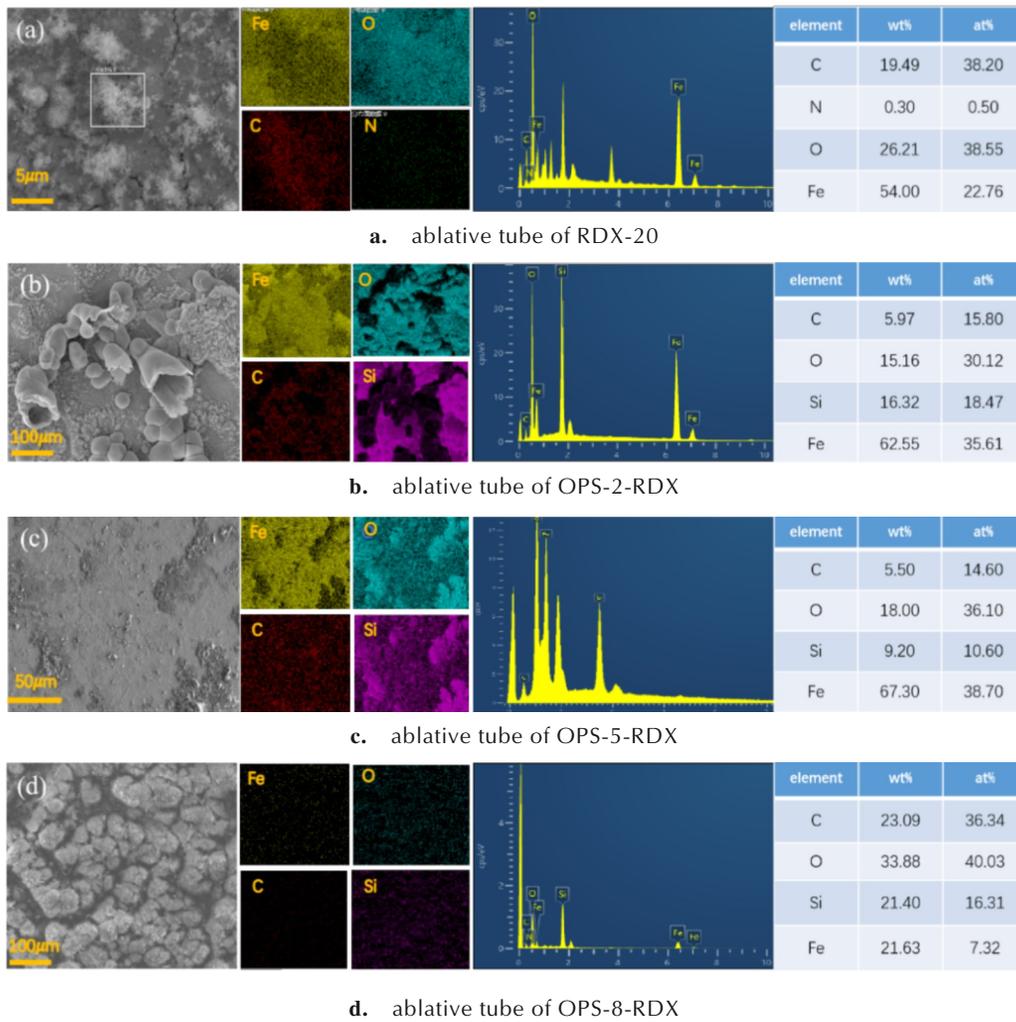


图7 4种不同发射药的烧蚀管内壁表面产物的EDS图像

Fig.7 EDS images of the product composition of the inner surface of the ablative tube for 4 propellant samples

参考文献:

- [1] 韦丁, 靳建伟, 严文荣, 等. 高能硝酸铵发射药烧蚀特性分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(21): 8563-8567.
WEI Ding, JIN Jian-wei, YAN Wen-rong, et al. Analysis of the erosion characteristics of high energy nitramine propellant [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(21): 8563-8567.
- [2] 邹瑞, 肖亦洁, 李强, 等. 三基发射药热烧蚀特性及变化规律[J]. 含能材料, 2024, 32(8): 818-823.
WU Rui, XIAO Yi-jie, LI Qiang, et al. Thermal Erosion Characteristics and Variation Law of Triple Base Propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(8): 818-823.
- [3] 焦贵伟, 胡朝根. 火炮身管寿命评估预测[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(5): 66-69.
JIAO Gui-wei, HU Chao-gen. Gun barrel life evaluation and prediction [J]. *Journal of Ordnance Engineering*, 2018, 39(5): 66-69.
- [4] 金文奇, 宁金贵, 王剑, 等. 基于全膛烧蚀磨损特征的火炮内弹道仿真研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 968-977.
JIN Wen-qi, NING Jin-gui, WANG Jian, et al. Simulation of artillery interior trajectory based on full bore ablative wear characteristics [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(5): 968-977.
- [5] 夏明旗, 段艳君, 赵红瑞, 等. 火炮身管抗磨损烧蚀技术及发展动向[J]. 中国军转民, 2023, (3): 97-99.
XIA Mi-qi, DUAN Yan-jun, ZHAO Hong-rui, et al. Anti-wear ablative technology of gun barrel and its development trend [J]. *China's Military to Civilian*, 2023, (3): 97-99.
- [6] 韦丁, 王琼林, 严文荣, 等. 降低身管烧蚀性研究进展[J]. 火炸药学报, 2020, 43(4): 351-361.
WEI Ding, WANG Qiong-lin, YAN Wen-rong, et al. Research progress on reducing ablative properties of tube [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(4): 351-361.
- [7] COUNTRY L, GILLARD P, EHRHARDT J, et al. Experimental determination of ignition and combustion characteristics of insensitive gun propellants based on RDX and nitrocellulose [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 229: 111402.
- [8] 刘靖, 黄振亚, 汪俊杰, 等. 三基发射药烧蚀性影响因素的实验研究[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 392-396.
LIU Jing, HUANG Zhen-ya, WANG Jun-jie, et al. Experimental study on influencing factors of ablative properties of three base propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(3): 392-396.

- [9] 林少森, 闫军, 俞卫博, 等. 身管烧蚀及缓蚀剂作用机理研究现状[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(1): 92-96.
LIN Shao-sen, YAN Jun, YU Wei-bo, et al. Research status of tube ablation and corrosion inhibitor action mechanism [J]. *Journal of Artillery Launch and Control*, 2016, 37(1): 92-96.
- [10] COMTOIS E, FAVIS B D, DUBOIS C. Linear burning rate and erosivity properties of nitrocellulose propellant formulations plasticized by glycidyl azide polymer and nitroglycerine [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2021, 46(2): 494-504.
- [11] HORDIJK AC, LEURS O. Gun barrel erosion-Comparison of conventional and LOVA gun propellants [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the Asme*, 2006, 128(2): 246-250.
- [12] 戴建建, 何超雄, 官焕祥, 等. 滑石粉填充ABS材料的熔接痕强度研究[J]. 中国塑料, 2018, 32(11): 24-28.
DAI Jian-jian, HE Chao-xiong, GUAN Huan-xiang, et al. Study on weld mark strength of talc filled ABS material [J]. *Chinese Plastics*, 2018, 32(11): 24-28.
- [13] 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, 13(2): 99-102+66.
DU Ping, HE Wei-dong, WANG Ze-shan. Study on flame retardancy of titanium dioxide in propellant combustion [J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(2): 99-102+66.
- [14] 林少森, 杜仕国, 王海洋, 等. 脲醛树脂/TiO₂复合微球缓蚀剂的制备及性能表征[J]. 含能材料, 2020, 28(6): 484-490.
LIN Shao-sen, DU Shi-guo, WANG Hai-yang, et al. Preparation and characterization of urea formaldehyde resin/TiO₂ composite microsphere corrosion inhibitor [J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(6): 484-490.
- [15] 刘木敬, 朱鹏, 许立冬, 等. 笼型倍半硅氧烷的制备和其在阻燃聚合物中的应用概述[J]. 高分子通报, 2022, (6): 22-35.
LIU Shu-jing, ZHU Peng, XU Li-dong, et al. Preparation of cage sesquioxane and its application in flame retardant polymers [J]. *Polymer Bulletin*, 2022, (6): 22-35.
- [16] 赵杨, 金波, 彭汝芳. 碳纳米材料对含能材料降感度进展[J]. 含能材料, 2023, 32(4): 422-434.
ZHAO Yang, JIN Bo, PENG Ru-fang. Progress in reducing susceptibility of carbon nanomaterials to energetic materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2023, 32(4): 422-434.
- [17] 张光亚, 黄光速, 张典. 八苯基取代笼形倍半硅氧烷的合成及表征[J]. 合成橡胶工业, 2012, 35(5): 343-346.
ZHANG Guang-ya, HUANG Guang-su, ZHANG Dian. Synthesis and characterization of polyhedral octaphenylsesquioxane [J]. *Synthetic Rubber Industry*, 2012, 35(5): 343-346.
- [18] 国防科学技术工业委员会. GJB 770B: 火药试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Technology and Industry for National Defense. GJB 770B: Explosive Test Method [S]. Beijing: China Standard Press, 2005.
- [19] LIANG Yue-gan, CHENG Bei-jiu, SI You-bin, et al. Thermal decomposition kinetics and characteristics of spartina alterniflora via thermogravimetric analysis [J]. *Renewable Energy*, 2014, 46(2): 111-117.
- [20] 发射药烧蚀性试验, 半密闭爆发器烧蚀管法, WJ/Z 259-1990 [S]. 军民产品行业标准, 1990.
Ablative test of propellant, Ablative, tube method of semi-closed exploder, WJ/Z 259-1990 [S]. Industry standard of military and civil products, 1990.

Corrosion Inhibition Properties and Mechanism of Octaphenyl Cage polysesquioxane in Nitramine Propellant

LIU Ze-hao¹, CHEN-Chong¹, LU Jia-xin¹, ZHANG Bo-bo¹, XIAO-Fei¹, LIU-Bo², LIANG Tai-xin¹

(1. School of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Xi'an Modern Chemical Research Institute, Xian 710065, China)

Abstract: In order to study the corrosion inhibition characteristics and action mechanism of octaphenyl cage polysesquioxane (OPS) in the propellant, nitramine propellant samples with OPS content of 2%, 5%, 8% and control samples with no OPS were prepared. The ablation characteristics, combustion characteristics and energy properties of the propellant were studied using a semi-closed explosive device, a closed explosive device and an oxygen bomb calorimeter. The compatibility of OPS with nitramine propellant was studied by a differential scanning calorimeter (DSC). The microstructure, element distribution and product composition of the inner surface of the ablative tube were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results showed that OPS had good compatibility with nitramine propellant. When the OPS content was 5% and 8%, the ablation reduction rate was 23.9% and 36.0%, respectively. With the increase of OPS content, the ablation reduction rate gradually increases, while the energy and work ability of the propellant are reduced. The analysis of cracks, products and their distribution on the inner surface of the ablative tube showed that SiO₂ generated by OPS at high temperature was uniformly distributed in the inner layer of the tube wall, forming a protective layer with excellent thermal resistance characteristics, and reducing the erosion and scouring effect of high temperature gas and solid particles on the tube wall.

Key words: octaphenyl cage polysesquioxane (OPS); function additive; ammonium nitrate propellant; ablative property

CLC number: TJ55;TQ562

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024109

Grant support: Natural Science Foundation of Shan Xi Province (No. 202203021221120)

(责编:姜梅)