

文章编号:1006-9941(2019)09-0729-06

纳米镍粉对改性双基推进剂综合性能的影响

袁志锋^{1,2},李军强¹,舒慧明¹,张教强²,宋秀铎¹,高红旭¹,赵凤起¹

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 西北工业大学理学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 为了研究纳米镍粉(nano-Ni)对含铝改性双基(AI-CMDB)推进剂以及含黑索今和铝粉的改性双基(RDX/AI-CMDB)推进剂综合性能的影响,采用吸收-沟槽压延-螺旋压伸法制备了推进剂药柱,测试了nano-Ni对推进剂热安定性能、机械感度、力学性能、能量性能、发动机内弹道性能、室温条件下长贮燃速变化的影响。结果表明,nano-Ni对AI-CMDB推进剂和RDX/AI-CMDB推进剂的热安定性能、机械感度、力学性能、能量性能、长贮条件下燃速变化影响不明显。但是nano-Ni可显著改善AI-CMDB推进剂和RDX/AI-CMDB推进剂的燃烧性能。nano-Ni使AI-CMDB推进剂9.81 MPa燃速从28.32 mm·s⁻¹增加到35.94 mm·s⁻¹,12~22 MPa的压强指数从0.26降低至0.12,nano-Ni使RDX/AI-CMDB推进剂9.81 MPa燃速达到36.63 mm·s⁻¹,16~22 MPa高低常温均出现负压强指数,Φ130 mm发动机-40℃比冲达到241.1 s,50℃比冲达到246.9 s。

关键词: 纳米镍粉(nano-Ni);燃烧性能;内弹道性能;含铝改性双基(AI-CMDB)推进剂;麦撒

中图分类号:TJ55

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018351

1 引言

双基系推进剂是一种重要的固体推进剂,在役武器中已经应用,具有质量一致性好、燃气清洁、特征信号低等独特的优点,广泛应用于载人航天火箭的返回舱、各型导弹的燃气发生器装药、炮射导弹装药和各种导弹的陀螺仪装药及点火药柱等,具有不可替代的作用。但是双基系推进剂也存在其问题及瓶颈,比如燃速难以提高、高能改性双基推进剂的压强指数难以调节等。目前双基系推进剂的燃速一般不超过30 mm·s⁻¹,限制了双基系推进剂的发展,影响了发动机用推进剂装药的设计,在某些需要大推力的发动机中由于燃速不够而不能采用实心装药,从而导致了装载量的降低,因此限制了导弹的射程和威力。

为解决双基推进剂燃速难以提高和高能改性双基推进剂压强指数难以调节的问题,引入纳米材料是一条新的途径。袁志锋等^[1]研究了纳米镍粉对含铝改性双基(AI-CMDB)推进剂和六硝基六氮杂异戊兹烷(CL-20)-CMDB推进剂的燃烧性能的影响,发现纳米镍粉可以提高推进剂燃速。洪伟良等^[2-3]研究了纳米氧化物对推进剂燃烧性能的影响,发现部分纳米氧化物可以改善推进剂的压强指数。赵凤起等^[4-10]研究了纳米材料作为催化剂对推进剂燃烧性能的影响,得到了纳米材料可以提高燃速,并降低压强指数的结论。陈雪莉等^[11-13]研究了纳米铝粉的结构及其对推进剂热分解以及燃烧性能的影响,得出了纳米材料对推进剂燃烧性能有一定的改善效果。以上研究多集中于纳米材料对推进剂燃烧性能的影响,但是纳米材料对改性双基推进剂综合性能影响的研究较少。

为此,本研究采用相应的国军标方法研究了纳米镍粉对AI-CMDB推进剂和RDX/AI-CMDB推进剂热安定性能、机械感度、燃烧性能、力学性能、能量性能、发动机内弹道性能、室温长贮条件下燃速变化等综合性能的影响,以期促进纳米镍粉在双基系推进剂中的应用。

收稿日期:2018-12-17;修回日期:2019-03-19

网络出版日期:2019-05-29

基金项目:国家自然科学基金(21173163);燃烧与爆炸技术重点实验室基金(9140C3503141006)

作者简介:袁志锋(1980-),男,副研究员,从事固体推进剂配方与工艺研究。e-mail:2430837263@qq.com

通信联系人:赵凤起(1963-),男,研究员,博士生导师,从事固体推进剂配方与性能研究。e-mail:zhaofq@163.com

引用本文:袁志锋,李军强,舒慧明,等. 纳米镍粉对改性双基推进剂综合性能的影响[J]. 含能材料,2019,27(9):729-734.

YUAN Zhi-feng, LI Jun-qiang, SHU hui-ming, et al. Effect of Nano-Ni on Overall Properties of AI-CMDB and RDX/AI-CMDB Propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(9):729-734.

2 实验部分

2.1 材料

硝化纤维(NC,含氮量 12.0%),工业纯,四川北方硝化棉股份有限公司生产;硝化甘油(NG),工业纯,西安近代化学研究所制备;黑索今(RDX),工业纯,兰州白银银光化学材料厂;普通微米级铝粉(Al),哈尔滨东轻金属粉业有限责任公司,粒径 12~15 μm ,纯度 99%;纳米镍粉(nano-Ni),河南焦作伴侣纳米材料工程有限公司,粒径 50 nm,纯度 99%。

2.2 试验方法及仪器

采用电子扫描显微镜(QUANTA-600型,荷兰 FEI 公司)测试了纳米镍粉的形貌,见图 1。从图 1 中可以看出,纳米镍粉颗粒大小较均匀,颗粒近似为球形。

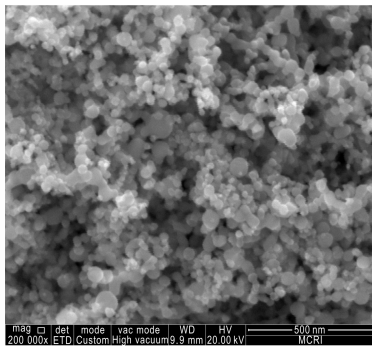


图 1 nano-Ni 扫描电镜图片

Fig.1 SEM images of nano-Ni particles

依据 GJB770B-2005 方法 701.2 爆热和燃烧热——恒温法测定推进剂的爆热。依据 GJB770B-2005 方法 702.1 气体比容——压力传感器法测定推进剂的比容。依据 GJB770B-2005 方法 401.1 密度——密度瓶法测定推进剂的密度。依据 GJB770B-2005 方法 706.1 燃速——靶线法测定推进剂的燃速。依据 GJB770B-2005 方法 503.3 安定性——甲基紫法和 GJB772B-2005 方法 503.1 安定性——维也里法测定推进剂的化学安定性。按 GJB770B-2005 方法 601.2 撞击感度——特性落高法测定推进剂的撞击感度,测试条件:落锤 2 kg,药量 30 mg,撞击感度用 50% 爆炸率的特性落高值 H_{50} 表示。按 GJB770B-2005 方法 602.1 摩擦感度——爆炸概率法测定推进剂的摩擦感度,测试条件:表压 2.45 MPa,摆角 66°,药量 20 mg,摩擦感度用爆炸概率 P 表示。依据 GJB770B-2005 方法 705.2 比冲——推力台法测定推进剂的内弹道性能,测试条件:(1) $\Phi 50$ mm 发动机,点火药 4 g;(2)

$\Phi 130$ mm 发动机,点火药 30 g。

2.3 样品制备

固体推进剂样品采用典型的螺旋压伸工艺:吸收-离心驱水-沟槽压延-螺旋压伸的工艺制备。推进剂配方组成列于表 1 中,其中 Ct 为催化剂,由有机铅盐、有机铜盐和碳黑组成。

表 1 推进剂配方组成

Table 1 The ingredients of CMDB samples and their contents

sample	mass fraction / %					
	NC+NG	Ct	Al	RDX	nano-Ni	others
1	83	5.75	5.5	0	0	5.75
2	83	5.75	5.5	0	0.7	5.05
3	75	5.75	5.0	10.0	0.7	3.55

3 结果与讨论

3.1 nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂热安定性的影响

推进剂的热安定性是衡量推进剂安全性能的重要指标,热安定性差说明组份间存在相容性问题,必然影响推进剂储存安全性能和老化性能。

常用的测试推进剂热安定性的方法有甲基紫试验,5 s 爆发点试验,维也里试验。甲基紫试验的原理是将试样置于试管内,在 120 $^{\circ}\text{C}$ 下加热,测试试样受热分解释放的气体使甲基紫试纸由紫色转变成橙色的时间或试样连续加热 5 h 是否爆燃,以其表示试样的化学安定性。维也里试验的试验原理与甲基紫类似,不同的是在 106.5 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行。5 s 爆发点的测试原理是在一定试验条件下,对定量试样进行加热,经过一定的延滞期后,发生燃烧或爆炸,根据爆发延滞期与爆发温度的关系式求出 5 s 延滞期试样的爆发点。甲基紫和维也里试验的样品采用三维尺寸不超过 5 mm 的颗粒,5 s 爆发点的样品是不超过 3 mm 的颗粒。采用以上三种方法测得的 nano-Ni 的 Al-CMDB 推进剂和 RDX/Al-CMDB 推进剂热安定性结果见表 2。

从表 2 可以看出,含 nano-Ni 的 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂的甲基紫变色时间较长,都超过 60 min,维也里变色时间在 68 h 以上,5 h 均不燃不爆,5 s 爆发点都超过 250 $^{\circ}\text{C}$,这说明 nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂的热安定性没有不利影响,含 nano-Ni 的 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂的热安定性良好。

表 2 nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂热稳定性的影响

Table 2 The effect of nano-Ni on the thermal stability of Al-CMDB and RDX/Al-CMDB propellants

sample	methyl violet, change color time/min	Vieri, change color time/h	5 h explode or burn	5 s outbreak temperature /°C
1	68	68.0	not	268.4
2	69	68.5	not	258.0
3	70	68.0	not	258.0

3.2 nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂机械感度的影响

nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂机械感度的影响结果见表 3。

表 3 nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂机械感度的影响

Table 3 The effect of nano-Ni on mechanical sensitivity of Al-CMDB and RDX/Al-CMDB propellants

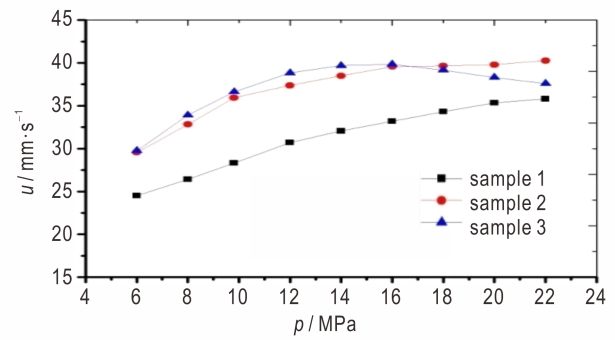
sample	impact sensitivity- H_{50} /cm	friction sensitivity/%
1	10.6	85
2	13.7	81
3	11.0	72

从表 3 可以看出,添加 nano-Ni 可微小幅度改善这两类推进剂的机械感度。其原因可能是纳米镍粉是非含能组分,含量较小,因此对机械感度影响有微小幅度的改善。

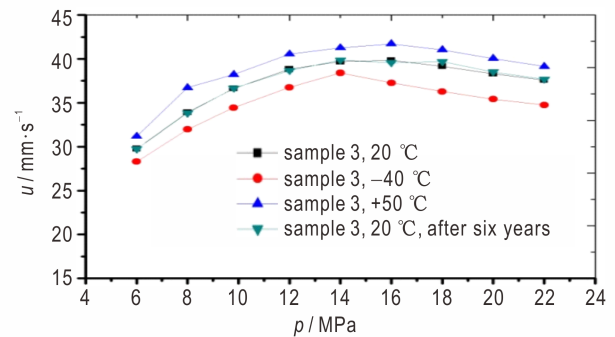
3.3 nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂燃烧性能的影响

研究了 nano-Ni 对 Al-CMDB 常温(20 °C)燃烧性能的影响及高低常温下 nano-Ni 对 RDX/Al-CMDB 推进剂燃烧性能的影响,室温条件下,储存 6 年,常温(20 °C),nano-Ni 对 RDX/Al-CMDB 推进剂燃烧性能的影响结果见图 2 和表 4。图中 u 表示推进剂的燃速, p 表示推进剂燃烧时所处环境的压强。

由图 2 可以看出,加入 nano-Ni 提高 Al-CMDB 推进剂 6~22 MPa 的燃速,12~22 MPa 下压强指数从 0.26 降低为 0.12,16~22 MPa 的压强指数从 0.24 降低为 0.05。加入 nano-Ni 后 RDX/Al-CMDB 推进剂 9.81 MPa 燃速提高到 36.63 mm·s⁻¹,16~22 MPa 为麦撒区间,12~22 MPa 任何相邻区间压强指数小于 0.2,为平台区间。从表 4 可以看出,RDX/Al-CMDB 推进剂在 20 °C、50 °C 时,16~22 MPa 任何相邻区间压强



a. sample 1, 2 and 3 at 20 °C



b. sample 3 at 20 °C, -40 °C, 50 °C and 20 °C after six years

图 2 nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂燃烧性能的影响

Fig.2 The effect of nano-Ni on the combustion performances Al-CMDB and RDX/Al-CMDB propellants

表 4 纳米镍粉对推进剂压强指数(n)的影响

Table 4 The effect of nano-Ni on the pressure exponent of corresponding solid propellants(n)

sample	temperature/°C	n		
		12~22 MPa	16~22 MPa	8~22 MPa
1	20	0.26	0.24	-
2	20	0.12	0.05	-
3	20	-0.06	-0.18	0.10
3	-40	-	-0.22	0.07
3	50	-	-0.20	0.07

指数小于 0, -40 °C 时在 14~22 MPa 任何相邻区间压强指数小于 0, 出现麦撒效应。但是, nano-Ni 不能改善这两类推进剂的燃速温度敏感系数, 与不加 nano-Ni 推进剂一样, 含 nano-Ni 的 RDX/Al-CMDB 推进剂 50 °C 燃速最高, 20 °C 其次, -40 °C 最低。总之, 含 nano-Ni 的 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂的燃烧性能优异, 平台及麦撒区间宽。对比推进剂室温储存 6 年前后的高中低温燃速可看出, nano-Ni 对 RDX/Al-CMDB 推进剂长贮条件下燃速的影响不明显。推进剂经过长贮后出现燃速下降的现象, 这对发

动机内弹道性能影响严重,不利于推进剂的推广应用。显然,nano-Ni不存在长贮后使推进剂燃速下降或升高的问题。

3.4 nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂能量性能的影响

nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂的能量性能的影响结果见表 5。

表 5 nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂能量性能的影响

Table 5 Effect of nano-Ni on the energy properties of Al-CMDB and RDX/Al-CMDB propellants

sample	explosion heat /J·g ⁻¹	specific volume /L·kg ⁻¹	density /g·cm ⁻³
1	4978	624	1.701
2	4963	626	1.701
3	4955	638	1.695

从表 5 可以看出,加入 nano-Ni 后 Al-CMDB 推进剂的爆热下降 16 J·g⁻¹,比容、密度变化不明显。在样品 2 的推进剂中加入 10%RDX、降低 0.5%Al 后推进剂的爆热下降 9.0 J·g⁻¹,密度下降 0.006 g·cm⁻³,但是比容增加 12 L·kg⁻¹,其原因可能是铝粉含量降低导致爆热有所降低,但是加入 RDX 后因为 RDX 的氧含量更高,因此推进剂燃烧更充分,因此增加了比容。含量为 0.7% 的 nano-Ni 对推进剂能量性能影响不明显。

3.5 nano-Ni 对 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂发动机内弹道性能的影响

含 nano-Ni 的 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂的内弹道性能见表 5。Al-CMDB 推进剂(样品 2)的发动机试验曲线见图 3,RDX/Al-CMDB 推进剂(样品 3)的发动机试验曲线见图 6。

从表 6 中的样品 1 的三次发动机试验可以看出,

表 6 Al-CMDB 和 RDX/Al-CMDB 推进剂的发动机内弹道性能

Table 6 The inner ballistic properties of Al-CMDB and RDX/Al-CMDB propellants

sample	engine size /mm	temperature /°C	balance pressure /MPa	burn rate /mm·s ⁻¹	mass /kg	impulse /MPa·s	effuser inner diameter /mm	specific impulse /s
1	50	20	12.63	-	0.080	-	-	227.4
1	50	20	9.88	-	0.080	-	-	226.1
1	50	20	8.65	-	0.080	-	-	222.5
2	50	20	14.12	35.79	0.803	3.784	20.00	-
2	50	20	11.92	34.93	0.787	3.235	22.00	-
2	50	20	9.96	33.85	0.788	2.887	23.50	-
3	130	50	15.97	36.43	3.660	-	26.5	246.9
3	130	-40	15.63	34.94	3.660	-	26.5	241.1

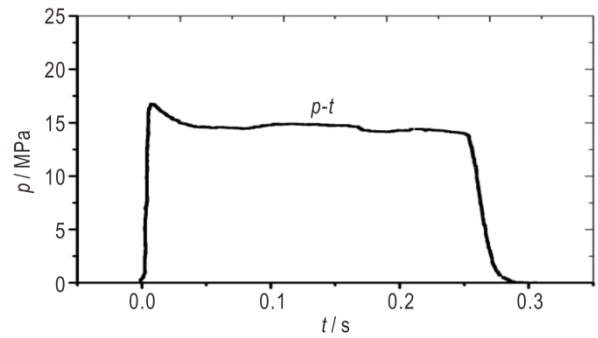


图 3 样品 2 Φ 50 mm 发动机 $p-t$ 曲线(20 °C)

Fig. 3 The dependence of the combustion chamber pressure on time for propellant charge sample 2 at 20 °C

针对同一种配方或装药,在其它条件保持一致的情况下,平衡压强越高,比冲越高。平衡压强从 8.65 MPa 增加到 12.63 MPa 时,比冲从 222.5 s 增加到 227.4 s。针对样品 2,对含 nano-Ni 的 Al-CMDB 推进剂喷管喉径从 22.0 mm 增加到 23.5 mm,平衡压强从 16.38 MPa 降低至 13.68 MPa,冲量由 3.784 MPa·s 降低至 2.887 MPa·s。对比表 4 和表 6,可以看出,样品 2 的内弹道燃速从 9.96 MPa 至 14.12 MPa 比相同压强下的静态燃速低约 2~3 mm·s⁻¹。从样品 3 的试验中可以看出,含 nano-Ni 的 RDX/Al-CMDB 推进剂的不同温度下,推进剂的比冲 50 °C 比 -40 °C 高 5.8 s,其原因可能是推进剂的燃速高,工作时间短,损失的能量如热损失较少是原因之一,推进剂的初始温度高也是原因之一。

从表 6 和图 3、图 4 可以看出,含 nano-Ni 的 Al-CMDB 推进剂发动机曲线平滑,冲量较高,发动机燃速比静态燃速低。含 nano-Ni 的 RDX/Al-CMDB 推进剂的发动机内弹道能量较高,RDX/Al-CMDB 推进剂 Φ 130 mm 发动机比冲在 -40 °C 达到 241.1 s,50 °C 达到 246.9 s, $p-t$ 曲线平滑,内弹道性能良好。

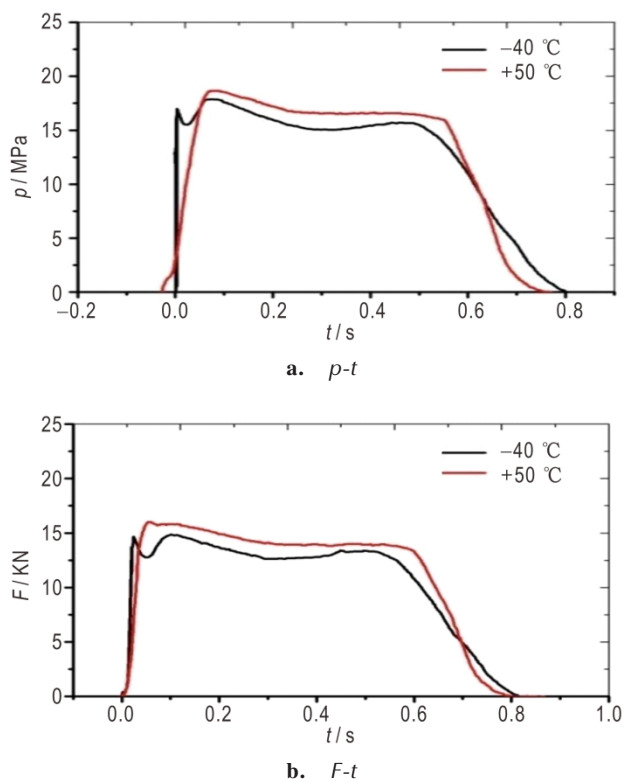


图4 样品3Φ130 mm发动机高低温内弹道曲线
 Fig.4 The dependence of the combustion chamber pressure on time for propellant charge sample 3 at -40 °C and 50 °C

含 nano-Ni 的推进剂药柱在标准 Φ50 mm 发动机和 Φ130 mm 发动机中内弹道性能良好。

总之,推进剂燃速提高对内弹道性能的影响是工作时间变短,燃烧平均压强和燃烧平均推力变大。从能量的角度考虑,首先,同样的装药尺寸,高燃速推进剂比低燃速推进剂工作时间短,工作时损失的热能少,对应的发动机比冲更高一点,更重要的是,燃速提高,单位时间内装药燃烧的更多,产生的高温燃气更多,在其它条件保持一致的情况下可以产生做功更多,这给了装药设计时更多的裕度,可以在一定程度上避免因为提供大推力而设计增大燃面的设计,如果燃速足够高,可以采取实心装药端燃方案,可以大幅度提高发动机的装载量,提高发动机空间利用率,从而增加导弹射程。

4 结论

(1)作为助催化剂,纳米镍粉突破了改性双基推进剂现有的催化剂体系 Pb-Cu-C 的瓶颈,使含 5.5% 铝粉的 Al-CMDB 推进剂 9.81 MPa 燃速从 28.32 mm·s⁻¹ 提高到 35.94 mm·s⁻¹;使 RDX/Al-CMDB 推进剂

14 MPa 燃速达到 39.68 mm·s⁻¹。

(2)纳米镍粉具有降低高能推进剂中高压压强区燃速压强指数的功效,可使 RDX/Al-CMDB 推进剂 16~22 MPa 压强指数降至 -0.18,有利于提高发动机工作的稳定性。

(3)纳米镍粉对推进剂的热安定性能、能量性能、机械感度、发动机内弹道性能、没有不良影响,室温长期储存过程燃烧性能没有明显变化。

参考文献:

- [1] 袁志锋,赵凤起,张教强,等. 纳米镍粉对 Al-CMDB 和 CL-20-CMDB 推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2016, 39(5): 99-103.
YUAN Zhi-feng, ZHAO Feng-qi, ZHANG Jiao-qiang, et al. Effect of nm-Ni on combustion properties of Al-CMDB and CL-20-CMDB propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2016, 39(5): 99-103.
- [2] 洪伟良,赵凤起,刘剑洪,等. 纳米 PbO 和 Bi₂O₃ 粉的制备及对推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2001, 24(3): 7-9.
HONG Wei-liang, ZHAO Feng-qi, LIU Jian-hong, et al. Synthesis of nm meter PbO, Bi₂O₃ and their effect on burning properties of propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2001, 24(3): 7-9.
- [3] 张晓宏,龙村,王铁成,等. 纳米级氧化铅对双基推进剂燃烧性能影响研究[J]. 火炸药学报, 2002, 25(2): 39-41.
ZHANG Xiao-hong, LONG Cun, WANG Tie-cheng, et al. Study on effects of nm-PbO on the combustion properties of double-base propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2002, 25(2): 39-41.
- [4] 赵凤起,洪伟良,陈沛,等. 纳米催化剂对双基系推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2004, 27(3): 13-16.
ZHAO Feng-qi, HONG Wei-liang, CHENG Pei, et al. Effect of nm-catalysts on the combustion properties of DB/RDX-CMDB propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2004, 27(3): 13-16.
- [5] 刘海飞,王梦雨,贾贤赏,等. 纳米金属粉末的应用[J]. 矿冶, 2004, 13(3): 65-67.
LIU Hai-Fei, WANG Meng-yu, JIA Xian-shang, et al. Synthesis of nm meter powder[J]. *Mining And Metallurgy*, 2004, 13(3): 65-67.
- [6] 庞维强,张教强,朱峰. 新型纳米材料在固体推进剂中的应用[J]. 纤维复合材料, 2005, 22(1): 12-15.
PANG Wei-qiang, ZHANG Jiao-qiang, ZHU Feng, et al. Research of application of a new-type of nm meter materials in solid propellants[J]. *Fiber Composites*, 2005, 22(1): 12-15.
- [7] 夏强,李疏芬,王桂兰,等. 超细铝粉在 AP/HTPB 推进剂中的燃烧研究[J]. 固体火箭技术, 1994, (4): 35-42.
XIA Qiang, LI Shu-fen, WANG Gui-lan, et al. Study on effects of superfine aluminum powder on the combustion properties of AP/HTPB propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1994, (4): 35-42.
- [8] 袁志锋,王江宁,张超,等. 纳米材料对双基和改性双基推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 69-72.
YUAN Zhi-feng, WANG Jiang-ning, ZHANG Chao, et al. Effect of nm-materials on combustion properties of DB and

- CMDB propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2013, 36(3): 69-72.
- [9] 赵凤起,仪建华,安亭,等. 固体推进剂燃烧催化剂[M]. 北京:国防工业出版社, 2016: 22.
- ZHAO Feng-qi, YI Jian-hua, AN Ting, et al. Combustion catalysts for solid propellant[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2016: 22.
- [10] 赵凤起,覃光明,蔡炳源. 纳米材料在火炸药中的应用研究现状及发展方向[J]. 火炸药学报, 2001, 24(4): 61-65.
- ZHAO Feng-qi, QIN Guang-ming, CAI Bin-yuan. Research status and development trends of nanometer materials in the application of propellants and explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2001, 24(4): 61-65.
- [11] 陈雪莉,王瑛,王宏,等. 铝粉含量及粒径对CMDB推进剂性能的影响[J]. 含能材料, 2008, 16(6): 721-723.
- CHENG Xue-li, WANG Yin, WANG Hong, et al. Effects of aluminum powder content and granularity on characteristics of CMDB propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 16(6): 721-723.
- [12] 楚广,唐永建,楚士晋,等. 纳米Al粉的结构和性能表征[J]. 含能材料, 2006, 14(3): 227-230.
- CHU Guang, TANG Yong-jian, CHU Shi-jin, et al. Characterization of structure and properties of Al NMParticles[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(3): 227-230.
- [13] 李颖,宋武林,谢长生,等. 纳米铝粉在固体推进剂中的应用进展[J]. 兵工学报, 2005, 26(1): 121-125.
- LI Ying, SONG Wu-lin, XIE Chang-sheng, et al. Progress in the application of nm aluminum powder in solid propellants[J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(1): 121-125.

Effect of Nano-Ni on Overall Properties of Al-CMDB and RDX/Al-CMDB Propellants

YUAN Zhi-feng^{1,2}, LI Jun-qiang¹, SHU hui-ming¹, ZHANG Jiao-qiang², SONG Xiu-duo¹, GAO Hong-xu¹, ZHAO Feng-qi¹

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065 China; 2. School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072 China)

Abstract: In order to understand the effect of nanometer nickel(nano-Ni) on the over-all performances of Al-composite modified double base propellant(CMDB) and hexogen(RDX)/Al-CMDB propellants, the energetic property, thermal stability, mechanical sensitivity, mechanical performances, inner ballistic properties and the dependence of burn rate on the aging process have been studied. The results show that the addition of nano-Ni had little effect on the performances. The effects of nano-Ni on combustion behavior of these propellants have also been studied. The results show that nano-Ni can greatly improve the combustion performances. The inclusion of nano-Ni can increase the burn rate of Al-CMDB propellant from $28.32 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ to $35.94 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ at 9.81 MPa, and lowering the pressure exponent(n) between 12-22 MPa from 0.26 to 0.12. The burn rate of RDX/Al-CMDB containing nano-Ni at 9.81 MPa can reach $36.63 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, with negative n between 16-22 MPa at different initial temperature. The specific impulse of RDX/Al-CMDB propellant could reach 241.1 s at $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ and 246.9 s at $50 \text{ }^\circ\text{C}$ in $\Phi 130 \text{ mm}$ rocket motor.

Key words: nano-Ni; combustion property; inner ballistic property; Al-composite modified double base propellant(CMDB); mesa burning

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018351

(责编:张琪)