

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.04.001

# 液体燃料 DMAZ 的研究进展\*

赵春柳<sup>①</sup> 高福磊<sup>②</sup> 陆婷婷<sup>②</sup> 陈 斌<sup>②</sup> 安 亭<sup>②</sup> 刘卫孝<sup>②</sup> 丁 峰<sup>②</sup>

①国家国防科技工业局军工项目审核中心(北京,100039)

②西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

**[摘 要]** *N,N*-二甲基-2-叠氮乙胺(DMAZ)具有无毒、密度大、生成焓高、燃速高、燃烧产物洁净等优点,是可替代肼类推进剂的新型液体燃料。综述了液体燃料 DMAZ 的合成、性能及应用研究进展。建议:加快 DMAZ 配方的应用研究,推动该材料在液体推进剂中的应用;开发 DMAZ 合成新工艺,解决目前几种工艺存在的收率低、安全风险高、工艺复杂的问题。

**[关键词]** 物理化学;*N,N*-二甲基-2-叠氮乙胺(DMAZ);合成;性能;进展

**[分类号]** TQ560; V511

## Reasearch Progress of Liquid Fuel 2-Azido-*N,N*-Dimethylethanamine (DMAZ)

ZHAO Chunliu<sup>①</sup>, GAO Fulei<sup>②</sup>, LU Tingting<sup>②</sup>, CHEN Bin<sup>②</sup>, AN Ting<sup>②</sup>, LIU Weixiao<sup>②</sup>, DING Feng<sup>②</sup>

① Military Industry Program Evaluation Center of SASTIND (Beijing, 100039)

② Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

**[ABSTRACT]** 2-Azido-*N,N*-dimethylethanamine (DMAZ) has the advantages of non-toxicity, high density, high enthalpy of formation, high burning rate and clean combustion products. It is a new type of liquid fuel that can replace hydrazine propellants. Synthesis, properties and application of liquid fuel DMAZ were reviewed. Suggestions are put forward. On the one hand, accelerate the application research of DMAZ formula and promote the application of the material in liquid propellant. On the other hand, a new DMAZ synthesis process should be developed to solve the problems of low yield, high safety risk and complex process existing in several current processes.

**[KEYWORDS]** physical chemistry; 2-azido-*N,N*-dimethylethanamine (DMAZ); synthesis; performance; progress

## 引言

肼或者肼的衍生物是目前常用液体火箭推进剂的主体燃料。它性能优良,但是存在高毒性<sup>[1]</sup>、强致癌性<sup>[2]</sup>、对环境污染严重<sup>[3-7]</sup>等问题。根据绿色化学及可持续发展的要求,新型绿色低毒燃料的研发成为液体推进剂领域的一个重要课题<sup>[8-9]</sup>。烃类燃料、醇类燃料、叠氮胺类燃料等相继被用于研制液体推进剂。其中,叠氮胺类燃料是一类含叠氮基团的有机胺化合物<sup>[10]</sup>,具有无毒<sup>[11]</sup>、密度大<sup>[12]</sup>、生成焓高<sup>[13]</sup>、燃速高、燃烧产物洁净<sup>[14]</sup>等优点,是可能替代肼类应用于液体推进剂的新型液体燃料之一,可用作单组元液体推进剂<sup>[15]</sup>、双组元液体推进

剂<sup>[16]</sup>、凝胶推进剂<sup>[17]</sup>以及功能添加剂等。

已报道的叠氮胺化合物<sup>[15]</sup>有 *N,N*-二甲基-2-叠氮乙胺(2-azido-*N,N*-dimethylethanamine, DMAZ)、*N*-环丙基-2-叠氮乙胺(CPAZ)、*N*-甲基-2-叠氮乙胺(MMAZ)、*N*-甲基-二叠氮乙胺(BAZ)及三叠氮乙胺(TAEA)等。其中, DMAZ 与一甲肼(MMH)的物理化学性质非常接近,与红烟硝酸(IRFNA)、四氧化二氮(N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)、一氧化二氮(N<sub>2</sub>O)氧化剂混合后可实现自燃,且毒性低、无致癌性。因此, DMAZ 被认为最有可能替代 MMH 等应用于液体推进剂中。美国国家航空航天局(NASA)对 DMAZ 的合成、性能及应用方法开展了大量的研究,已在双组元火箭发动机方面取得重大进展。欧洲航空局、伊朗等也对 DMAZ 进行了相关研究。但是,国内在液体燃料

\* 收稿日期:2022-02-23

基金项目:国家自然科学基金(22005238);陕西省重点研发计划一般项目(2021SF-115)

第一作者:赵春柳(1978-),男,高工,主要从事军工科研项目评估及研究。E-mail:125373606@qq.com

DMAZ 的研制方面落后于西方国家。

综述了 DMAZ 的物理化学性能、制备方法及其在推进剂中的应用,为该类含能材料的制备工艺研究和应用发展提供参考。

### 1 DMAZ 的性能

DMAZ 为无色或淡黄色透明液体,分子式为  $(\text{CH}_3)_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{N}_3$ ,结构式如图 1 所示。

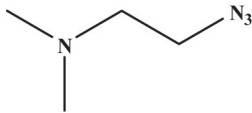


图 1 DMAZ 的结构式  
Fig. 1 Structure of DMAZ

#### 1.1 物理化学性能

25 ℃下,DMAZ 的基本物理化学性能如表 1 所示<sup>[18]</sup>,并将其与 MMH 进行比较。

表 1 DMAZ 与 MMH 的物理化学性能  
Tab. 1 Physical and chemical properties of DMAZ and MMH

性能	DMAZ	MMH
化学式	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{N}_4$	$\text{CH}_6\text{N}_2$
相对分子质量	114	46
生成热/( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ )	+2 461. 2	+1 192. 8
密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	0. 933	0. 870
沸点/℃	135	87
冰点/℃	-68. 9	-52. 4
黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	0. 002 000	0. 000 775
表面张力/( $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	25. 00	33. 83
闪点/℃	29. 4	

从表 1 中可以看到,DMAZ 的冰点、黏度等物理性能与 MMH 的相似。但是,DMAZ 的生成热、密度要比 MMH 高,作为液体燃料时可以提供更大的推力。研究得出,DMAZ 的密度、运动黏度、饱和蒸气压等热力学参数随温度  $T$  的变化公式为:

密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )<sup>[12,19]</sup>

$$\rho = 0. 951\ 7 - 0. 001\ 0T; \quad (1)$$

运动黏度( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$$v = 0. 998 - 0. 010\ 8T + 0. 000\ 05T^2; \quad (2)$$

饱和蒸气压(Pa)

$$p = 4\ 756 + 0. 024\ 34T - 0. 000\ 062\ 9T^2 + 0. 000\ 000\ 116T^3. \quad (3)$$

Mcquaid 等<sup>[20-22]</sup>采用半经验模型结合 B3LYP/6-31G<sup>++</sup>(d,p)模块对 DMAZ 进行了分子结构优化、振动分析以及单点能量计算,优化单点能量计算的结构,计算了分子和原子的热力学参数,获得了生成焓 $\Delta_f H_g$ 、汽化焓 $\Delta H_v$ ,并将通过 RHP AE 模型、DFT 经验模型、分子动力学(MD)模型等获得的计算值与实验值进行了比较。结果如表 2 所示。

表 2 DMAZ 生成焓、汽化焓的不同模型的计算值  
Tab. 2 Formation enthalpy and vaporization enthalpy of DMAZ calculated by different models

参数	实验值	模型计算值		
		RHP AE	DFT	MD
$\Delta_f H_g$	318. 52	286. 33	333. 98	
$\Delta H_v$	39. 30	49. 74		43. 89

通过 RHP AE 模型和 DFT 经验模型获得生成焓、汽化焓的计算值与实验值基本一致。

Sengupta 等<sup>[23]</sup>通过 CBS-QB3 方法计算了 DMAZ 的气相热,使用第一原理 COSMO-RS 方法计算了蒸发热和蒸气压。依据蒸发热和液相密度的数据,通过 PROPEP 预测密度,并且预测了密度比冲。Kokan<sup>[24]</sup>采用 MD 模型计算了 DMAZ 和水的热物理性质。与实验值相比,MD 模型在预测水的密度方面比预测 DMAZ 更准确。这些研究结果已应用于火箭发动机的动力设计<sup>[25]</sup>。获得的 DMAZ 性能参数如表 3 所示。表 3 中,括号内的为实验值。

#### 1.2 毒性

DMAZ 的健康安全数据大致已经明确,属于基本无毒物质<sup>[26]</sup>,对人体健康和周围环境危害较小,未列入 US TSCA (Toxic Substance Contron Act,美国有毒物质管理办法)系统中。相关毒性的实验数据以及与 MMH 的比较如表 4 所示。

毒性实验数据表明:小白鼠在 DMAZ 摩尔分数

表 3 DMAZ 性能参数的计算值

Tab. 3 Calculated values of performance parameters of DMAZ

$\Delta_f H_g /$ ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	比冲/ s	蒸气压/ Pa	蒸发热/ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	密度比冲/ ( $10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ )
307. 1	0. 909 6(0. 933 0)	280. 39	99. 3	2 303. 88(2 426. 72)	2. 499

为 0.2% 的环境下生活 4 h 后,活动情况无变化,随后的 20 d 中未出现死亡;而在 MMH 摩尔分数仅为  $0.02 \times 10^{-6}$  范围内的环境中,4 h 即出现死亡。

1.3 安全性能

Pakdehi 等<sup>[27]</sup>采用 Chetah 软件进行了 DMAZ 的安全性能评估,结果以及与 MMH 的比较如表 5 所示。

从表 5 可以看出,DMAZ 和 MMH 具有较高的分解热和释放潜能。因此,被评估软件定级为危险物质<sup>[28]</sup>。

为了 DMAZ 在生产、使用和储存过程中的安全,防止意外爆炸引发的事故,Pakdehi 等<sup>[27]</sup>对 DMAZ 的撞击感度、摩擦感度、可燃性等进行了研究,实验结果以及和 MMH 的比较如表 6 所示。

DMAZ 的撞击感度、摩擦感度与 MMH 一致,无冲击波感度。但与 MMH 相比,DMAZ 拥有相对安全的可燃性,在空气中的可燃体积分数在 1.3% ~ 22.4% 之间。

在使用过程中,DMAZ 与 MMH 燃料一样,应储存在发射站附近的储罐中,并用惰性气体加压。因此,了解储存液体燃料 DMAZ 的环境条件(如温度、液体 DMAZ 上方大气的压力和成分、水分含量等)非常重要。研究人员在不同温度(60~90 ℃)、不同压力(0.1~0.5 MPa)、不同气体气氛(氮气、氩气、氦气和空气)、不同水分质量分数(0.05%~2.53%)

的加速条件下测试并估算了液体燃料 DMAZ 的储存寿命<sup>[29]</sup>。结果表明,储存 DMAZ 的合适条件为:氮气作为大气气体,压力为 0.3 MPa,水分质量分数为 0.05%。分解曲线为 S 形,表明分解反应应该是自催化的,分解反应速率常数由其温度确定。在适当的储存条件下,该燃料在 25 ℃ 下的储存寿命为 7.73 a。

1.4 相容性

3M 公司进行了 DMAZ 的相容性实验,以期作为 DMAZ 的发动机设计、储存等提供技术支撑<sup>[18]</sup>。选取了铜镍合金、铬镍铁合金等多种金属材料与聚合材料等非金属材料。在相对较高的温度下,所有材料与 DMAZ 都会显示出一定程度的相互反应。但是,实验中并没有出现非常剧烈的反应或严重的分解。另外,NASA 也开展了相关实验。实验条件为在 40 ℃ 下放置 60 d,材料包括不锈钢、钛和铝等样品。这些实验结果表明,只有轻微反应,没有剧烈的化学反应。

2 DMAZ 的制备

2.1 合成方法

2.1.1 N,N-二甲基氯乙胺法

以 N,N-二甲基氯乙胺、叠氮化钠为原料,经叠氮化反应制备得到了 DMAZ,如图 2 所示。

表 4 DMAZ 与 MMH 的毒性对比  
Tab.4 Toxicity comparison of DMAZ and MMH

化合物	急性中毒(小白鼠半数致死量)/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	吸入中毒(小白鼠)	US TSCA
DMAZ	987	暴露在摩尔分数为 0.2% 的环境中 4 h 无变化,随后 20 d 未见死亡	未列入
MMH	60	暴露在摩尔分数 0.02 × 10 <sup>-6</sup> 范围内的环境中 4 h 即出现死亡	列入

表 5 DMAZ 与 MMH 的安全性能评估  
Tab.5 Estimation of safety performances of DMAZ and MMH

化合物	最大分解热/ (kJ · g <sup>-1</sup> )	总能量释放潜能/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	分解热/ (kJ · g <sup>-1</sup> )	能量释放评价	绝热分解温度/ K
DMAZ	-3.896	-0.337	-22.75	963	1 898
MMH	-4.340	0.314	-22.01	964	1 828

表 6 DMAZ 与 MMH 的安全性能  
Tab.6 Safety performances of DMAZ and MMH

化合物	冲击波感度	撞击感度/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	摩擦感度/ MPa	电火花感度/ mJ	可燃性下限/ %	可燃性上限/ %
DMAZ	无	165	3.447 5	525	1.300	22.400
MMH	有	165	3.447 5		0.005	

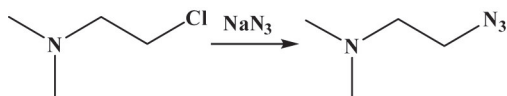


图 2 以 *N,N*-二甲基氯乙胺为原料制备 DMAZ 的反应路线

Fig. 2 Synthetic route of DMAZ from *N,N*-dimethylchloroethylamine

据报道<sup>[30]</sup>, 3M 公司通过该工艺合成 DMAZ, 规模 100 kg/批, 并用于 NASA、美军应用实验, 但尚未公开报道 DMAZ 的生产工艺。常伟林等<sup>[31-32]</sup>报道了采用 *N,N*-二甲基氯乙胺、叠氮化钠在有机溶剂中合成 DMAZ 的方法。实验过程为: 将有机溶剂、相转移催化剂和叠氮化钠投入反应烧瓶中, 充分搅拌; 在氮气保护下加入 *N,N*-二甲基氯乙胺, 于 75 °C 反应一定时间; 反应完成后, 过滤除去过量的叠氮化钠和反应中生成的氯化钠; 所得滤液经减压、蒸馏、浓缩, 得到 DMAZ。通过高温蒸馏将产品与溶剂进行分离, 收率 33.26 %。

*N,N*-二甲基氯乙胺常温条件下不稳定, 在放置过程中可发生聚合反应; 而且在碱性条件下更容易聚合。在以 *N,N*-二甲基氯乙胺为原料合成 DMAZ 时, 应注意抑制该副反应的发生。因此, 选择合适的叠氮化反应溶剂至关重要。

### 2.1.2 *N,N*-二甲基-2-氯乙胺盐酸盐法

早在 1959 年, Schiemenz 等<sup>[33]</sup>首次报道了以 *N,N*-二甲基-2-氯乙胺盐酸盐、叠氮化钠、氢氧化钠为原料制备得到了 DMAZ, 如图 3 所示。

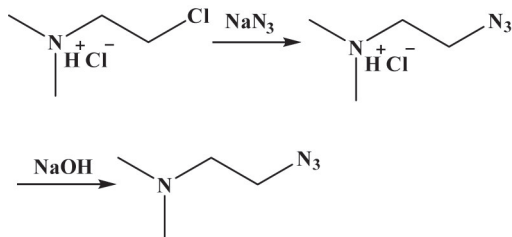


图 3 以 *N,N*-二甲基-2-氯乙胺盐酸盐为原料制备 DMAZ 的反应路线

Fig. 3 Synthetic route of DMAZ from *N,N*-dimethylchloroethylamine hydrochloride

具体过程为: 将 *N,N*-二甲基-2-氯乙胺盐酸盐、叠氮化钠、水加热至 80 °C, 反应 15 h; 得到的溶液经冰浴冷却, 在 10 °C 下加入乙醚、氢氧化钾, 搅拌 2 h; 分离有机层; 水层用乙醚萃取, 干燥, 除去溶剂, 得到 DMAZ。总收率 17%, 纯度 97%。后来, Benalil 等<sup>[34]</sup>以此为基础合成了多种叠氮胺类化合物。

研究者们对该工艺进行了优化, 研究了水介质中 DMAZ 的合成, 讨论了反应时间、原料比、反应介

质和萃取剂等因素对产物收率的影响<sup>[35-38]</sup>。为了提高 DMAZ 的收率, 进一步对反应动力学进行研究。结果表明, 该叠氮化反应为二级反应, 337.15、347.15、357.15 K 下的表观反应速率常数分别为  $1.337 \times 10^{-3}$ 、 $3.403 \times 10^{-3}$ 、 $7.082 \times 10^{-3}$  L/(mol · min), 表观活化能  $E_a$  为 83.5 kJ/mol, 指前因子  $k_0$  为  $1.19 \times 10^{10}$  L/(mol · min)。通过优化反应条件, 以水为反应介质时, DMAZ 纯度可达 99% 以上, 收率大于 50%。该工艺原材料廉价, 方法简单。但是, 该方法反应过程中可能出现极毒、易爆的叠氮酸, 存在安全隐患。为进一步扩大合成规模, 需要采取措施吸收可能产生的叠氮酸, 杜绝安全事故。

### 2.1.3 氨基叠氮乙烷法

Aronson<sup>[39]</sup>在研究以叠氮化钠为原料制备含能化学物过程中设计了一种合成 DMAZ 的方法。以二溴乙烷或 *N*-氯烷基邻苯二甲酰胺为原料, 制备得到中间体氨基叠氮乙烷, 再经甲基化反应合成 DMAZ, 如图 4 所示。该工艺过程路线长, 副产物多, 难以实现工业化生产。

上述几种方法存在着收率低、安全风险高、工艺复杂等问题, 需要开发新技术以支撑工业化生产。

### 2.2 DMAZ 的纯化

当 *N,N*-二甲基氯乙胺盐酸盐与叠氮化钠反应合成 DMAZ 时, 产物中会残留少量水(质量分数 2% 或 3%)。根据航天工业的国际标准, DMAZ 纯度至少应为 99%, 含水质量分数应小于 0.3%。因此, 必须对产品进行脱水纯化<sup>[40-41]</sup>。

Shahram 等<sup>[42]</sup>根据 DMAZ 与水沸点的差异, 通过蒸馏方法进行除水。由于 DMAZ 的热敏感性, 蒸馏时的压力应低于大气压。初步实验测试表明, 蒸馏时 4 kPa 的压力是合适的。通过实验, 获得了该混合物的气液平衡数据, 观察到 DMAZ 质量分数为 96% 时具有共沸物, 从理论上和实验上确定了从混合物中分离出水、直至产生共沸物的浓度的时间, 获得了纯度达 99% 以上 DMAZ 样品。

工业生产中, 常利用吸附剂进行脱水。沸石、活性氧化铝硅胶和其他硅胶吸附剂由于存在多孔性和平衡吸收而具有较高的分离系数和吸收能力, 且操作简单、安全性高, 因而被广泛用于工业干燥过程中<sup>[43]</sup>。Azizi 等<sup>[44]</sup>研究了沸石吸附 DMAZ 中微量水的工艺。设计了正交实验, 考察了初始浓度、搅拌速度、温度和吸附剂量等参数对这种沸石吸附能力的影响。结果表明, 吸附剂质量和初始浓度对吸附剂的吸附能力有重大影响。利用热分析和粉末衍射分析, 得到沸石的总体组成为  $n(\text{K}_2\text{O}) : n(\text{Na}_2\text{O}) :$



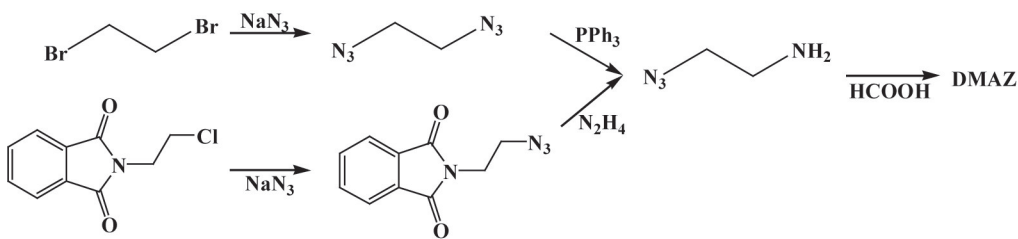


图 4 以 2-叠氮乙基胺为中间体制备 DMAZ 的反应路线

Fig. 4 Synthetic route for preparing DMAZ with 2-azidoethan-1-amine as intermediate

$n(\text{Al}_2\text{O}_3) : n(\text{SiO}_2) : n(\text{H}_2\text{O}) = 0.6 : 0.5 : 1.0 : 1.5 : x$ , 颗粒平均尺寸为 60 nm, 形状均匀。该沸石再生的最佳温度范围为 250 ~ 300 ℃。由于该类吸附剂需要加热至 200 ℃ 以上才能实现再生, 因此, 存在高能耗的问题, 阻碍了工业化的应用。

金属有机骨架材料(MOFs)是一类杂化多孔材料, 由有机连接体和无机节点组成。苯二甲酸铬(III)(MIL-101)是最重要的 MOFs 之一, 热和化学稳定性高, 腔体大, 吸收率高, 且可回收。Noorpoor 等<sup>[45]</sup>利用 MOFs 进行了 DMAZ 的脱水纯化研究。研究发现: 该类材料在常温、常压下便可进行吸附与解吸; 并在 70 ℃ 下实现回收再生, 可循环利用 5 次以上。经 MOFs 处理后, DMAZ 的纯度达 99% 以上。其中, 含乙酸添加剂的 MIL-101 材料具有更高的孔体积和表面积, 吸附能力最强, 吸水量为市售 3A 和 4A 沸石的 3 倍。因此, 该材料作为 DMAZ 的脱水剂具有广阔的工业化前景。

2.3 含 DMAZ 废水处理

在 DMAZ 合成、纯化过程中, 不可避免地产生含有 DMAZ 的废水<sup>[29]</sup>。由于含量较少, 从废水中回收 DMAZ 是不经济的。但从环境保护角度来看, 必须有效去除废水中的 DMAZ。去除废水中含胺基、叠氮基化合物的方法主要有吸附法<sup>[46-47]</sup>、生物法<sup>[48]</sup>、高级氧化法<sup>[49-50]</sup>、光催化降解法<sup>[51]</sup>。

Shahram 等<sup>[46-47]</sup>通过活性炭吸附的方法将废水中 DMAZ 除去。具体方法为: 将经过活化的核壳活性炭加入到废水中, 调节 pH, 充分搅拌, 达到吸附 DMAZ 的目的。结果表明, 吸附剂的吸附能力受溶液 pH、吸附剂用量和搅拌速度的影响。在 DMAZ 初始摩尔分数为 0.05% 时, 最佳吸附条件为 pH = 10、搅拌速度 100 r/min 和吸附剂质量为 0.29 g; 去除率达到 85.95%。

光催化降解法是通过光催化降解有机污染物, 而从水或废水中去除污染物的技术。具有低成本、环保和可持续性等特点, 显示出巨大的潜力。Pakdehi 等<sup>[51]</sup>以 TiO<sub>2</sub> 作为光催化剂, 轻质膨胀黏土团

粒为漂浮载体, 进行了降解废水中 DMAZ 的研究, 考察了催化剂用量、pH 值等参数对 DMAZ 降解的影响。获得最佳 pH = 10.5、最大 DMAZ 去除量约为 25 g/L。在此条件下, 短时间辐照可使废水中 DMAZ 降解 54.7%。

3 DMAZ 的应用

3.1 在单组元推进剂中的应用

美国最初将 DMAZ 替代肼化合物应用于单组元推进剂中, 如导弹系统、轨道调整推力系统<sup>[15]</sup>。但 DMAZ 在单组元发动机上持续工作时间非常短, 导致其应用受到限制。DMAZ 分子中含有碳, 存在积炭现象, 覆盖催化床。所以, 在航天领域, DMAZ 至今没有用作单组元推进剂。MACH 公司研究人员发现: 以酸性沸石为载体的钨催化剂对 DMAZ 和纳米级的铁基催化剂也有很好的分解效果; 开发用于 DMAZ 催化分解的磷钨酸铁催化剂, 可以避免积炭现象, 适合用于单组元发动机。后来, Pakdehi 等<sup>[52]</sup>开发了以 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为载体的铈催化剂, 通过连续流微型反应器研究了 DMAZ 的催化燃烧。结果表明: 在 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 上负载质量分数约 34% 的铈催化剂, 可很好地催化分解 DMAZ, 且燃烧反应动力学为一级反应; 反应活化能为 19.3 kJ/mol。

3.2 在双组元推进剂中的应用

DMAZ 可作为燃料用于双组元推进剂中。DMAZ 与很多氧化剂发生化学反应<sup>[43,53]</sup>, 如四氧化二氮(N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)、红烟硝酸(IRFNA)、一氧化二氮(N<sub>2</sub>O)、过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、液氧(LOX)等传统推进剂氧化剂。

Pakdehi 等<sup>[54]</sup>通过 NASA-CEC-71 软件预估了最常见的液体氧化剂与 DMAZ 的性能, 发动机工作压力为 6.89 MPa, 结果如表 7 所示。

表 7 显示, DMAZ 具有与 MMH(288.3 s) 类似的比冲, 但具有比 MMH(2.55 × 10<sup>6</sup> N · s/m<sup>3</sup>) 更好的密度比冲。从能量的角度来看, DMAZ 可用作肼

表 7 DMAZ/氧化剂的密度比冲预估  
Tab. 7 Density specific impulse of DMAZ/oxidizer

组分	质量比	推进剂密度 $\rho_p/(g \cdot cm^{-3})$	比冲 $I_{sp}/s$	密度比冲/ $(10^6 N \cdot s \cdot m^{-3})$
DMAZ/IRFNA	2.5	1.274	272.7	3.475
DMAZ/HNO <sub>3</sub>	2.5	1.278	270.7	3.464
DMAZ/N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2.0	1.215	283.1	3.440
DMAZ/MON-10	2.0	1.216	283.3	3.445
DMAZ/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	3.5	1.283	280.8	3.602
DMAZ/LOX	1.5	1.047	305.8	3.203

燃料的替代品<sup>[55]</sup>。

Sengupta 等<sup>[56]</sup> 基于热力计算方法对 DMAZ/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的燃烧性能进行了理论性能分析研究,并对 DMAZ/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 与 MMH/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 两种推进剂组合的燃烧性能进行比较,结果如表 8 所示。该研究表明,两组推进剂的总体性能十分接近,用 DMAZ 代替 MMH 使真空比冲损失 4.8 s,降低了 1.53%。这是由于燃烧时,温度上升了 3.8%,而气体平均相对分子质量增加了 8.4%。

表 8 DMAZ/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 与 MMH/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的燃烧性能  
的理论预估

Tab. 8 Theoretical prediction of combustion performance of DMAZ/N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> and MMH/N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		
燃烧性能	DMAZ/N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	MMH/N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
质量比	2.420	2.275
真空比冲/s	308.2	313.0
燃烧室温度/K	3 328	3 398
燃气平均相对分子质量	25.07	23.12
特征速度/(m · s <sup>-1</sup> )	1 700	1 736

许可睿<sup>[57]</sup> 开展了 DMAZ/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 液体火箭发动机推力室方案设计及燃烧过程仿真研究。以 DMAZ/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 推进剂组合为研究对象,从热力计算、推力室设计方案、数值仿真 3 个方面对该推进剂组合的燃烧过程进行合理的理论解释及定量分析。对 DMAZ/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 和 MMH/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 两种推进剂的燃烧性能进行比较分析发现,DMAZ/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的比冲比 MMH/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 略小,密度比冲比后者略大,燃烧时温度比后者要高。

Kokan 等<sup>[58-59]</sup> 结合了量子力学和 MD 计算方法,包括用于改善在 MD 中使用的力场模型系数的方法,确定了 DMAZ 的热物理性质。基于 RL-10A-4 液体火箭发动机,模拟计算了采用 DMAZ/LOX 的液体推进剂对运载火箭和月球着陆器系统水平的影响。发动机性能理论预估见表 9。表 9 中: $p$  为腔室压力; $\rho_o$  为氧化剂密度; $\rho_f$  为燃料密度; $\rho_b$  为体积

密度。

表 9 DMAZ/LOX 与 MMH/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的发动机性能  
的理论预估

Tab. 9 Theoretical prediction of engine performance of DMAZ/LOX and MMH/N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		
性能	DMAZ/LOX	MMH/N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
氧化剂与燃料的质量比	1.6	1.4
膨胀比	84	84
$p/MPa$	4.21	4.21
$\rho_o/(kg \cdot m^{-3})$	1 450	1 141
$\rho_f/(kg \cdot m^{-3})$	880	1 030
$\rho_b/(kg \cdot m^{-3})$	1 231	1 095
发动机功率/W	48.3	49.7
$I_{sp}/s$	330.35	354.77

与 MMH/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 标准推进剂相比,使用 DMAZ/LOX 推进剂可减少车辆质量。DMAZ/LOX 推进剂对于未来的运载火箭和月球着陆器应用是非常有吸引力的技术<sup>[60]</sup>。

Thompson<sup>[61]</sup> 将 DMAZ、BAZ 等叠氮胺类材料代替 MMH/IRFNA 体系中的 MMH,可使密度比冲提高 1%~5%;其中,DMAZ/IRFNA 的密度比冲最高。在燃烧室压力为 13.79 MPa 下,DMAZ 和 IRFNA 可以进行自燃反应,DMAZ/IRFNA 推进剂组合的比冲可以达到 287 s,密度比冲达  $3.75 \times 10^6 N \cdot s/m^3$ ;而在相同条件下,MMH/IRFNA 推进剂组合的比冲为 284 s,密度比冲为  $3.61 \times 10^6 N \cdot s/m^3$ ,比 DMAZ/IRFNA 要略低。Thompson 并没有对 DMAZ 与其他氧化剂的自燃反应进行比较研究,也没有对燃烧过程进行详细的分析,尚不能明确 DMAZ 的自燃反应具体过程。

在研究 DMAZ/IRFNA 的点火延迟中发现<sup>[62-63]</sup>,胍类的点火延迟时间为 3~10 ms,DMAZ 的点火延迟时间为 6 ms。DMAZ/IRFNA 推进剂组合能够达到混胍/IRFNA 的点火延迟要求,不过达不到 MMH/IRFNA 点火延迟标准。

后来,研究者们等又将 DMAZ 燃料作为 MMH

的无癌替代物用于气体发生系统中的液体或凝胶燃料组分,供 NASA、美国陆军和空军使用<sup>[64-65]</sup>。之前,NASA 系统使用  $\text{N}_2\text{O}_4$  和 MMH 作为反应控制系统;美国陆军和空军系统使用 IRFNA 和 MMH 作为反应控制系统。组分包含质量分数 1.0%~90.0% 的固体添加剂、10.0%~98.5% 的 DMAZ 和 0.5%~10.0% 的胶凝剂。胶凝剂可以是二氧化硅、黏土、碳或任何聚合物胶凝剂。固体添加剂可包括硝酸胺盐、季铵盐或三氨基三硝基苯。DMAZ 的使用提高了燃料的密度和能量,缩短了点火延迟时间。通常,叠氮胺化合物的点火延迟时间为 20~30 ms,而此配方的点火延迟时间的测试结果为 6 ms。

Mellor<sup>[18]</sup> 针对 DMAZ 与  $\text{N}_2\text{O}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$  3 种氧化剂的反应进行比较,在研究中发现:DMAZ/ $\text{N}_2\text{O}$  推进剂组合是 3 种组合中最理想的绿色推进剂,但是比冲要比 DMAZ/ $\text{N}_2\text{O}_4$  低;DMAZ/ $\text{H}_2\text{O}_2$  不能进行自燃反应,需要点火。

基于上述内容可知,DMAZ 作为双组元推进剂燃料有很大的发展前景,但是面临点火性能的问题。缩短点火延迟的方法主要有添加剂复配法、催化剂法等<sup>[66-68]</sup>。

Chen 等<sup>[62]</sup> 研究发现,配方中加入少量的路易斯碱,特别是四甲基乙二胺(TMEDA)、叔丁基二胺、叔三胺或四胺化合物<sup>[69-70]</sup> 等长链胺类可以进一步缩短 DMAZ 的点火延迟时间。TMEDA 和 DMAZ 的混合物比纯 TMEDA 和纯 DMAZ 的点火延迟时间更短,该混合物的点火延迟几乎不依赖于压力,受液相反应控制。添加 TMEDA 可使点火延迟时间减少 3 倍(由 17 ms 减少至 5 ms)<sup>[71]</sup>。

此外,钴基有机金属化合物、锰基有机金属化合物、无机硝酸盐等会显著改善 DMAZ 的点火性能<sup>[66]</sup>。例如,添加有钴基有机金属化合物的 DMAZ/ $\text{H}_2\text{O}_2$  的点火延迟时间小于 16 ms<sup>[30]</sup>。而 DMAZ/IRFNA 中添加一些无机硝酸盐( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、 $\text{KNO}_3$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{AgNO}_3$ 、 $\text{LiNO}_3$  等)<sup>[72-74]</sup>,尤其是加入  $\text{LiNO}_3$ ,可明显改善 DMAZ 的点火性能。DMAZ/IRFNA 中添加质量分数 0.1%、0.3%、0.5% 的  $\text{LiNO}_3$ ,减少了 DMAZ/IRFNA 点火延迟时间,分别从 88 ms 变为 18、14 ms 和 8 ms。

## 4 结论与展望

概述了 DMAZ 的性能及制备方法,探讨了其在单组元液体推进剂、双组元自燃液体推进剂等领域的应用。DMAZ 具有无毒、密度大、生成焓高等优

点,非常有希望替代肼类燃料。但是由于点火延迟问题,尚未有见公开应用的报道。应当加快以下几方面的研究:

1)继续强化含 DMAZ 配方的应用研究,保持密度和能量的同时,通过引入新型添加剂或催化剂,解决含 DMAZ 配方的点火延迟问题,推动 DMAZ 在液体推进剂中的应用。

2)开发 DMAZ 合成新工艺,解决目前几种工艺存在的收率低、安全风险高、工艺复杂的问题,提供足量产品以满足应用研究的需求。

## 参 考 文 献

[1] THOMAS A E, CHAMBREAU S D, REDEKER N D, et al. Thermal decomposition and hypergolic reaction of a dicyanoborohydride ionic liquid [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2020, 124 (5): 864-874.

[2] BHOSALE V K, KULKARNI S G, KULKARNI P S. Ionic liquid and biofuel blend: a low-cost and high performance hypergolic fuel for propulsion application [J]. ChemistrySelect, 2016, 1 (9): 1921-1925.

[3] LUCAS M, BROTON S J, SPRENGER J A P, et al. Oxidation of a levitated 1-butyl-3-methylimidazolium dicyanoborate droplet by nitrogen dioxide[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2019, 123 (4): 780-795.

[4] 李慧,刘俊,庄杰,等. 活性炭-微波-Fenton 联用技术处理偏二甲肼废水[J]. 火炸药学报, 2020, 43 (1): 96-101.

LI H, LIU J, ZHUANG J, et al. Treatment of unsymmetrical dimethylhydrazine wastewater by using activated carbon-microwave-Fenton technology[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43 (1): 96-101.

[5] 夏本立,刘渊,王焯军,等. MBR 处理偏二甲肼废水效果的影响因素[J]. 火炸药学报, 2011, 34 (1): 73-76.

XIA B L, LIU Y, WANG X J, et al. Influencing factors of treating UDMH wastewater by MBR process[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34 (1): 73-76.

[6] 张浪浪,刘祥莹,王焯军,等. 氧气与气-液两相偏二甲肼作用的氧化产物及其反应机理[J]. 火炸药学报, 2017, 40 (5): 88-92.

ZHANG L L, LIU X X, WANG X J, et al. Qxidation products and reaction mechanism of  $\text{O}_2$  and gas-liquid two phase UDMH [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40 (5): 88-92.

[7] 徐泽龙,陈斐,黄凌志,等. 气相色谱-质谱法测定偏二甲肼长期贮存的氧化产物[J]. 火炸药学报, 2018, 41

- (5): 523-530.
- XU Z L, CHEN F, HUANG L Z, et al. Determination of oxidation products generated in the long-term storage of unsymmetrical dimethylhydrazine by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(5): 523-530.
- [8] FAREGHI-ALAMDARI R, GHORBANI-ZAMANI F, ZEKRI N. Synthesis and hypergolic activity evaluation of some new ammonium-imidazolium based ionic liquids [J]. RSC Advances, 2016, 6(31): 26386-26391.
- [9] 贺芳, 方涛, 李亚裕, 等. 新型绿色液体推进剂研究进展[J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 54-57.
- HE F, FANG T, LI Y Y, et al. Development of green liquid propellants [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(4): 54-57.
- [10] 张正斌. 三叠氮胺化合物的性质及研究现状[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2011, 9(4): 45-48.
- ZHANG Z B. Properties and research situation of tri-azido amine compounds [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2011, 9(4): 45-48.
- [11] LEE L D. Chemical and physical property data dimethyl-2-azidoethylamine; WSTF-IR-0139 [R]. NASA, 2000.
- [12] KOKAN T, OLDS J R. An experimental and analytical study of high-energy-density propellants for liquid rocket engines [C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Tucson, AZ, US; AIAA, 2005: AIAA-4471.
- [13] SENGUPTA D. High performance, low toxicity hypergolic fuel; US 8685186 B2 [P]. 2014-04-01.
- [14] CHEN C C, MCQUAID M J. Mechanisms and kinetics for the thermal decomposition of 2-azido-*N,N*-dimethylethanamine (DMAZ) [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2012, 116(14): 3561-3576.
- [15] THOMPSON D M. Amine azides used as monopropellants; US 6299654 B1 [P]. 2001-10-09.
- [16] RARATA G, ROKICKA K, SURMACZ P. Hydrogen peroxide as a high energy compound optimal for propulsive applications [J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2016, 13(3): 778-790.
- [17] COGUILL S L. Synthesis of highly loaded gelled propellants[C]//AIChE Annual Meeting. San Fransico, CA, US, 2003: 10-21.
- [18] MELLOR B. A preliminary technical review of DMAZ: a low-toxicity hypergolic fuel [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Green Propellants for Space Propulsion. Cagliari, Sardinia, IT, 2004: ESA SP-557.
- [19] MCQUAID M J, MCNESBY K L, RICE B M, et al. Density functional theory characterization of the structure and gas-phase, mid-infrared absorption spectrum of 2-azido-*N,N*-dimethylethanamine (DMAZ) [J]. Journal of Molecular Structure: THEOCHEM, 2002, 587(1/2/3): 199-218.
- [20] MCQUAID M J, RICE B M. Computational chemistry-based enthalpy-of-formation, enthalpy-of-vaporization, and enthalpy-of-sublimation predictions for azide-functionalized compounds: ARL-TR-3770 [R]. Adelphi, MD, US; Army Research Laboratory, 2006.
- [21] MCQUAID M J. Amine azide propellant; US 6962633 B1 [P]. 2005-11-08.
- [22] 谢慧, 王焯军, 慕晓刚. 3 种典型叠氮胺类化合物的生成焓计算[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2017, 15(5): 63-66.
- XIE H, WANG X J, MU X G. Calculation for enthalpies of formation of three typical amine azide compounds [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2017, 15(5): 63-66.
- [23] SENGUPTA D, RAMAN S. Theoretical investigation of some high-performance novel amine azide propellants [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2007, 32(4): 338-347.
- [24] KOKAN T. Characterizing high-energy-density propellants for space propulsion application [D]. Atlanta, GA, US; Georgia Institute of Technology, 2007.
- [25] XIE H, MU X G, ZHANG Y, et al. Theory investigation progress of DMAZ [C]//AIP Conference Proceedings. Hangzhou, 2017.
- [26] REDDY G, SONG J, MECCHI M S, et al. Genotoxicity assessment of two hypergolic energetic propellant compounds [J]. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2010, 700(1/2): 26-31.
- [27] PAKDEHI S G, REZAEI S, MOTAMEDOSHARIATI H, et al. Sensitivity of dimethyl amino ethyl azide (DMAZ) as a non-carcinogenic and high performance fuel to some external stimuli [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 29: 277-282.
- [28] HUANG J, WANG X J, LI Y, et al. A green high-energy liquid fuel; DMAZ [C]//International Conference on Manufacturing Construction and Energy Engineering. Hong Kong, 2016.
- [29] PAKDEHI S G, NIKNAM M. Shelf life prediction of a novel liquid fuel, 2-dimethylaminoethyl azide (DMAZ) [J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2017, 14(3): 675-687.
- [30] HALLIT R E A. Hypergolic azide fuels with hydrogen peroxide; US 6949152 B2 [P]. 2005-09-27.
- [31] 常伟林, 池俊杰, 刘建艇, 等. DMAZ 合成研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2016, 14(4): 84-86.



- CHANG W L, CHI J J, LIU J T, et al. Synthesis research of DMAZ [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2016, 14(4): 84-86.
- [32] 王建伟,常伟林,池俊杰,等. 叠氮胺类燃料合成研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2011, 9(3):1-4.
- WANG J W, CHANG W L, CHI J J, et al. Research progress on synthesis of azido-amine fuels[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2011, 9(3): 1-4.
- [33] SCHIEMENZ P, ENGELHARD H. Trimethoxyphenyl derivatives. I. Synthesis of amines via mixed anhydrides [J]. Chemische Berichte, 1959, 92: 857-862.
- [34] BENALIL A, CARBONI B, VAULTIER M. Synthesis of 1,2-aminoazides. Conversion to unsymmetrical vicinal diamines by catalytic hydrogenation or reductive alkylation with dichloroboranes. [J]. Tetrahedron, 1991, 47(38): 8177-8194.
- [35] 池俊杰,王建伟,王文浩,等. *N,N*-二甲基叠氮乙基胺合成研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2010, 8(4): 39-41.
- CHI J J, WANG J W, WANG W H, et al. Study on synthesis of 2-azido-*N,N*-dimethylethanamine [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2010, 8(4): 39-41.
- [36] 孙甜甜,厉刚. 水介质中 *N,N*-二甲基-2-叠氮乙胺盐酸盐的合成反应动力学[J]. 含能材料, 2013, 21(1): 49-52.
- SUN T T, LI G. Reaction kinetics of synthesizing 2-azido-*N,N* dimethylethyl amine hydrochloride in aqueous solution[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(1): 49-52.
- [37] 孙聪明,孙甜甜,凌明明,等. 水介质中 DMAZ 的合成 [C]//中国化学会. 中国化学会第五届全国化学推进剂学术会议论文集. 大连, 2011: 114-118.
- [38] 孙甜甜. 叠氮含能燃料的合成及物性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- SUN T T. Synthesis and properties of azido-containing energetic fuels [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [39] ARONSON J. The synthesis and characterization of energetic materials from sodium azide [D]. Atlanta, GA, US: Georgia Institute of Technology, 2004: 139-144.
- [40] PAKDEHI S G, BABAE S, AZIZI H R. Kinetic study and optimization of dehydration of dimethyl amino ethyl azide (DMAZ) using response surface methodology[J]. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2017, 90(12): 1325-1332.
- [41] RAHIMI E, PAKDEHI S G, SHAFIEI K. Effect of the Co-SiO<sub>2</sub> mesoporous layer coating step on the performance of liquid fuel dimethyl amino ethyl azide dehydration[J]. Chemical Engineering Technology, 2019, 42(5): 996-1001.
- [42] SHAHRAM G P, HOSSEIN R. Sub-atmospheric distillation for water (1) + dimethyl amino ethyl azide (2) mixture[J]. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, 2016, 35(2): 107-111.
- [43] GHANBARI S, VAFERI B. Experimental and theoretical investigation of water removal from DMAZ liquid fuel by an adsorption process[J]. Acta Astronautica, 2015, 112:19-28.
- [44] AZIZI H R, PAKDEHI S G, BABAE S. Thermodynamic study and optimization a nano-zeolite for dehydration liquid fuel (DMAZ) using taguchi L16 orthogonal array [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43: 2465-2472.
- [45] NOORPOOR Z, PAKDEHI S G, RASHIDI A. High capacity and energy-efficient dehydration of liquid fuel 2-dimethyl amino ethyl azide (DMAZ) over chromium terephthalic (MIL-101) nanoadsorbent [J]. Adsorption, 2017, 23: 743-752.
- [46] PAKDEHI S G, REZAEI F. Adsorption of liquid fuel dimethyl amino ethyl azide from dilute aqueous solution on activated carbon prepared from walnut shell [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(57): 27726-27740.
- [47] PAKDEHI S G, VAFERI B. A study on adsorptive removal of DMAZ from aqueous solutions by ZSM-5, NaY zeolites, and activated carbon: kinetic and isotherm [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(39): 18286-18292.
- [48] FOURCADE F, YAHIAI S, ELANDALOUSSI K, et al. Relevance of photocatalysis prior to biological treatment of organic pollutants: selection criteria [J]. Chemical Engineering and Technology, 2012, 35(2): 238-246.
- [49] SHAH A D, DAI N, MITCH W A. Application of ultraviolet, ozone, and advanced oxidation treatments to washwaters to destroy nitrosamines, nitramines, amines, and aldehydes formed during amine-based carbon capture[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 47(6): 2799-2808.
- [50] MATA A M T, LIGNEUL A, LOURENÇO ND, et al. Advanced oxidation for aromatic amine mineralization after aerobic granular sludge treatment of an azo dye containing wastewater [J]. Desalination and Water Treatment, 2017, 91(2): 168-174.
- [51] PAKDEHI S G, SHAVEISI Y. Photocatalytic degrada-

- tion of dimethyl aminoethyl azide in water via  $\text{TiO}_2$ /light expanded clay aggregate catalyst [J]. *Chemical Engineering and Technology*, 2019, 42(12): 2631-2640.
- [52] PAKDEHI S G, FARSHADPOUR V. Kinetic study on catalytic combustion of DMAZ over  $\text{Ir}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  [J]. *Combustion Science and Technology*, 2012, 184(19): 1318-1329.
- [53] SAKSENA P, TADIGADAPA S, YETTER R A. Design, fabrication and analysis of stagnation flow micro-reactors used to study hypergolic reactions [J]. *Lab on a Chip*, 2015, 15(10): 2248-2257.
- [54] PAKDEHI S G, AJDARI S, HASHEMI A, et al. Performance evaluation of liquid fuel 2-dimethyl amino ethyl azide (DMAZ) with liquid oxidizers [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2015, 33(1): 17-23.
- [55] 程永喜, 方涛, 贺芳, 等. DMAZ 推进剂的研究进展 [C]//中国化学会. 中国化学会第三届全国化学推进剂学术会议论文集. 北京, 2007: 59-64.
- [56] SENGUPTA D, RAMAN S. Theoretical investigation of some high-performance novel amine azide propellants [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2007, 32(4): 338-347.
- [57] 许可睿. DMAZ/NTO 液体火箭发动机推力室方案设计 & 燃烧过程仿真研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- XU K R. Design and combustion simulation of liquid rocket thrust chamber with bipropellant of DMAZ/NTO [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [58] KOKAN T S, OLDS J R, SEITZMAN J M, et al. Characterizing high-energy-density propellants for space propulsion applications [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(7/8): 967-986.
- [59] KOKAN T S, OLDS J R, SEITZMAN J M, et al. Characterizing high-energy-density propellants for space propulsion applications [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2008, 22(4): 727-732.
- [60] MEYERS C J, KOSOWSKI B M. Dimethylamino ethylazide: a replacement of hydrazine derivatives in hypergolic fuel applications [C]//34th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, DE, 2003.
- [61] THOMPSON D M. Tertiary amine azides in hypergolic liquid or gel fuels propellant system: 6013143 [P]. 2000-01-11.
- [62] CHEN C C, MCQUAID M. A thermochemical kinetic-based study of ignition delays for 2-azidoethanamine-red fuming nitric acid systems: 2-azido-N-methylethanamine (MMAZ) vs. 2-azido-N,N-dimethylethanamine (DMAZ): ARL-TR-6787 [R]. US: Army Research Laboratory, 2014.
- [63] ZHANG F, ZHANG L D, LAW C K. Density functional theory study of the reactions of 2-azido-N,N-dimethylethanamine with nitric acid and nitrogen dioxide [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(1): 237-248.
- [64] THOMPSON D M. Tertiary amine azides in liquid or gel fuels in gas generator systems: US 6210504 B1 [P]. 2001-04-03.
- [65] DOBBINS T A, WILEY D B. Hypergolic hydrocarbon fuels: US 8894782 B2 [P]. 2014-11-25.
- [66] 池俊杰, 李晓峰, 郑永金, 等. 叠氮胺燃料点火催化剂的研究进展 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2014, 12(2): 50-53.
- CHI J J, LI X F, ZHENG Y J, et al. Research progress of ignition catalyst for azido-amine fuel [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2014, 12(2): 50-53.
- [67] 池俊杰, 常伟林, 夏宇, 等. 缩短叠氮胺燃料作为双组元推进剂点火延迟的研究进展 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2012, 10(1): 44-47, 78.
- CHI J J, CHANG W L, XIA Y, et al. Research progress in shortening ignition delay of azido-amine fuels used for bipropellants [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2012, 10(1): 44-47, 78.
- [68] 潘欣欣, 黄雪峰, 李盛姬, 等. 十二氢十二硼酸双四乙基铵的点火与燃烧特性 [J]. *火炸药学报*, 2019, 42(6): 614-620.
- PAN X X, HUANG X F, LI S J, et al. Ignition and combustion characteristics of tetraethyl ammonium dodecahydrideborates [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(6): 614-620.
- [69] STEVENSON W H III, FELTON L D, SLOCUM-WANG Z. Hypergolic liquid or gel fuel mixtures: US 8435364 B2 [P]. 2013-05-07.
- [70] PAKDEHI S G, SHIRZADI B. Specific impulse and ignition delay time assessment for DMAZ with liquid oxidizers for an upper stage rocket engine [J]. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2017, 36(6): 171-176.
- [71] WANG S Q, THYNELL S T. Experimental investigation of pressure effect on ignition delay of monomethylhydrazine, 1,1-dimethylhydrazine, tetramethylethylenediamine and 2-dimethylaminoethylazide with nitric acid [C]//8th U. S. National Combustion Meeting. Park City, UT, US, 2013.
- [72] HOLLINGSHEAD J M, LITZINGER M, KIAOULIAS D, et al. Combustion of a TMEDA/WFNA hypergolic in a bipropellant rocket engine: AIAA 2019-4155 [R]. Indianapolis, IN, US: AIAA, 2019.

参 考 文 献

[1] 封雪松,冯晓军,赵娟,等. 铝粉含量和粒度对 HMX 基炸药空爆性能的影响[J]. 爆破器材,2018,47(4): 10-15.  
FENG X S, FENG X J, ZHAO J, et al. Effect of content and particle size of aluminum powder on the air blast property of HMX-based explosive [J]. Explosive Materials, 2018, 47(4): 10-15.

[2] ZHANG S A, ZHANG L G. Effect of non-vacuum storage condition on minimum explosible concentration of aluminum dust [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2019, 10(3): 219-222.  
张世安, 张路刚. 非真空存储条件对铝粉粉尘爆炸下限浓度的影响[J]. 测试科学与仪器, 2019, 10(3): 219-222.

[3] 陈晓坤, 张自军, 王秋红, 等. 20 L 近球形容容器中微米级铝粉的爆炸特性[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 1130-1136.  
CHEN X K, ZHANG Z J, WANG Q H, et al. Explosion characteristics of micro-sized aluminum dust in 20 L spherical vessel [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(5): 1130-1136.

[4] 李政阳, 安振涛, 李金明, 等. 铝粉粒径对销毁某未爆弹药影响的试验研究[J]. 爆破器材, 2017, 46(5): 29-32, 37.  
LI Z Y, AN Z T, LI J M, et al. Experimental study on the effect of particle size of aluminum powder on destroying some unexploded ordnance [J]. Explosive Materials, 2017, 46(5): 29-32, 37.

[5] 任新联, 王辉, 徐司雨, 等. 铝粉粒度对 RDX 基含铝炸药水中爆炸近场特性的影响[J]. 爆破器材, 2015, 44(6): 29-33.  
REN X L, WANG H, XU S Y, et al. The Effect of aluminum particle size on the characteristic of RDX based

aluminized explosives underwater close-filed explosion [J]. Explosive Materials, 2015, 44(6): 29-33.

[6] 林柏泉, 梅晓凝, 王可, 等. 基于 20 L 球形爆炸装置的微米级铝粉爆炸特性实验[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(7): 661-667.  
LIN B Q, MEI X N, WANG K, et al. Explosion characteristics of micro-aluminum powders in 20 L spherical vessels [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(7): 661-667.

[7] 方伟, 赵省向, 张奇, 等. 微/纳米铝粉粉尘爆炸特性研究[J]. 火工品, 2021(2): 32-36.  
FANG W, ZHAO S X, ZHANG Q, et al. Study on the explosive characteristics of micro/nano-aluminum dust [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2021(2): 32-36.

[8] 王毅, 李凤生, 姜炜, 等. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 纳米复合铝热剂的制备及其反应特性研究[J]. 火工品, 2008(4): 11-14.  
WANG Y, LI F S, JIANG W, et al. Synthesis of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al nanocomposite and research on its thermite reaction [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(4): 11-14.

[9] CHENG J L, HNG H H, LEE Y W, et al. Kinetic study of thermal- and impact-initiated reactions in Al-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanothermite [J]. Combustion and Flame, 2010, 157(12): 2241-2249.

[10] THAKUR P, SHARMA V, THKUR N. Study of energy release in Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al nano-thermite with graphene as an additional fuel [J]. Physica B: Condensed Matter, 2021, 610: 412803.

[11] 陈海燕, 姚庆国, 张延松, 等. 微米级铝粉最低着火温度和爆炸特性试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(11): 96-102.  
CHEN H Y, YAO Q G, ZHANG Y S, et al. Experimental study on minimum ignition temperature and explosion characteristics of micron-sized aluminum powder [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(11): 96-102.

(上接第 10 页)

[73] PAKDEHI S G, SHIRZADI B. Effect of some inorganic nitrate salts on the ignition delay time of DMAZ-IRFNA and DMAZ-WFNA bi-propellants [J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2018, 15(1): 162-174.

[74] PAKDEHI S G, SHIRZADI B. The effect of some amines on ignition delay time of dimethyl amino ethyl azide (DMAZ) and white fuming nitric acid (WFNA) [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 43(2): 162-169.