

金属燃料技术研究进展

王金云¹, 王孟军^{1,2}, 杨在林², 林文水³, 周晖杰⁴

1. 河北省双介质动力技术重点实验室, 河北邯郸;
2. 哈尔滨工程大学航建学院, 黑龙江哈尔滨;
3. 厦门大学信息学院, 福建厦门;
4. 宁波大学科学技术学院, 浙江宁波

【摘要】金属燃料作为替代传统不可再生能源的新型燃料, 未来极具发展前景。文章对国内外金属燃料技术研究进展进行综述, 对几种典型金属燃料能量性能进行比较分析, 对微纳米金属铝基燃料燃烧机理研究进行阐述, 综述了国内外水反应金属燃料发动机技术最新研究进展, 回顾了氧反应纳米铁粉金属燃料发动机技术研究现状, 可为未来金属燃料发动机技术工程应用提供参考。

【关键词】金属燃料技术; 金属燃料发动机; 纳米金属燃料; 燃烧机理; 研究进展

【基金项目】河北省科技厅重大科研支撑项目(16211013D), 邯郸市科技局重大基金项目(1511103015)

Research Progress of Metal Fuel Technology

Jinyun Wang¹, Mengjun Wang^{1, 2}, Zailin Yang², Wenshui Lin³, Huijie Zhou⁴

¹ Hebei Key Laboratory of dual medium power technology, Handan, Hebei;

² College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang;

³ School of informatics, Xiamen University, Xiamen, Fujian;

⁴ College of Science and Technology, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang

【Abstract】 Metal fuel has a bright future because it can replace the traditional non renewable energy as a new fuel. In this paper, the research progress of metal fuel technology at home and abroad was summarized. The energy performance of several typical metal fuels were compared and analyzed, and the combustion mechanism of micro-nano metal aluminium based fuel was expounded. In addition, the latest research progress of water-reactive metal fuel engine technology was summarized at home and abroad, and the research status of oxygen-reactive nano iron powder metal fuel engine technology was reviewed. It can provide reference for the future application of metal fuel engine technology and engineering.

【Keywords】 Metal fuel technology; Metal fuel engine; Nano metal fuel; Combustion mechanism; Research progress

1 引言

随着当今世界能源短缺和环境污染问题的日益严重, 世界各国正在努力研究绿色环保、可循环利用的新能源。金属燃料(如铝、镁、铁、硼、铍、锂等)是替代传统燃料的新能源之一, 可显著增加水陆交通运输装置动力系统的能量和密度, 大幅度提高水下操作平台的工作效率。这种新型金属燃料的能量密度远高于煤炭、石油、天然气及其它石化燃料, 并且在燃烧过程中不释放硫氧化物、氮氧化物及其

它有害气体, 极具发展前景。铝镁基金属燃料作为不可再生能源的替代品, 在一定条件(高温和高压)下与水发生剧烈反应(气态水作为氧化剂), 释放出大量的热能, 能量密度(以铝水反应金属燃料为例)是燃料油的4-6倍, 且无废气污染, 可弥补当前能源短缺的不足, 具有广阔的应用前景^[1-5]。

纳米金属燃料具有高燃烧热值、高比能量、高燃烧速率、燃烧产物无废气污染等诸多优点, 未来可取代煤炭、石油、天然气等石化不可再生能源,

广泛应用于水下航行体、水面船舶、空间飞行器、深空探测器等能源动力系统, 以及深海工作站、水下钻井平台、空间工作站及边远山区的发电系统, 是一种极具发展前景的新型燃料, 近年来成为研究的热点。鉴于此, 本文就金属燃料相关技术最新研究成果进行综述, 为推动我国新能源科技创新提供参考。

2 金属燃料技术

2.1 金属燃料技术应用

金属燃料由于其无污染、高比能量、节能环保等优势, 广泛用于军、民两用各个领域。金属燃料电池以高能量密度的 Al、Mg、Zn 等合金作为燃料, 直接将金属中蕴藏的化学能转变成电能, 通过直接补充或更换金属燃料以持续提供动力, 对解决目前全球石油资源短缺和城市环境污染问题, 具有极其重要的经济效益和社会效益。金属燃料作为能源载体, 可以解决 100MW 以上的大规模电力储能问题^[6]。

在军用方面, 上世纪 70 年代, 前苏联就首次研究镁基燃料的水反应发动机技术, 装备于“暴风”超空泡鱼雷, 使得其航速革命性地提高, 已突破 200 kn, 至今是世界上巡航速度最快的鱼雷。90 年代, 美国研发了基于金属 Li/SF₆ 的金属燃料热动力鱼雷武器, 使其航程与航速提高了一倍。

近年来, 美国田纳西州橡树岭国家实验室的研究人员戴夫·比奇开展了纳米铁粉金属燃料技术研究^[1,3]。研究发现, 将铁、铝以及硼等金属物质制成纳米级燃料, 其性质会变得异常活跃, 且点火温度低, 能够释放出巨大的能量。如果对汽车发动机进行改造, 使用一满箱的金属粉末燃料的汽车, 行驶距离将是普通燃油的 3 倍。

金属燃料由于其特殊的化学性能, 将广泛用于各种运载装置的能源动力系统。金属燃料发动机主

要以活性金属(如 Al、Mg、Fe、B 等)为燃料, 水或空气为氧化剂, 采用特殊的含能材料和制备工艺, 在一定条件下发生剧烈的反应, 将金属燃料的化学能转换为航行体的动能。一般金属燃料发动机包括水反应和氧反应两种, 水反应金属燃料发动机适用于水下兵器和水下作业平台; 氧反应金属燃料发动机适用于航空、航天领域, 可取代常规固体火箭推进剂。

水反应金属燃料发动机以活性金属为燃料, 水为氧化剂, 在燃烧室发生剧烈的化学反应, 所产生的巨大热能可作为航行体的推进动力。超空泡航行体在水下高速航行时, 减速扩压装置可以将高速海水具备的动压转换为高静压, 直接注入燃烧室内与金属燃料燃烧, 因此也称为水冲压发动机。

铝冰发动机 (ALICE-SRM)^[7] 作为水反应金属燃料的另一种形式, 可用于火星登陆、深空探测、太空探险等活动。未来智能化^[8]、无人化武器充斥陆海空天, 特别是无人水下武器应用将改变未来作战样式, 金属燃料作为未来无人作战武器的新型高能动力, 极具研究价值。

2.2 几种金属燃料能量性能比较 (这里指可与水或氧反应的几种活性金属)

纳米金属铝粉具有高燃烧热值、高反应活性、存储安全性, 可作为水下航行体的高能动力。表 1 为水反应金属燃料及氧化物特性, 通过理论计算可知, 铝基金属燃料的能量密度高达 $40.91\text{MJ}\times 10^3\cdot\text{m}^{-3}$, 而镁粉燃料的能量密度只有 $23.21\text{MJ}\times 10^3\cdot\text{m}^{-3}$, 铝基燃料具有明显的优势。水反应金属燃料中 Be 的质量和体积燃烧热值最高, 分别为 $36.03\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $66.67\times 10^3\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, 但其燃烧产物 BeO 具有很大的毒性, 限制了其应用; 金属 Li 与水容易启动, 但其单位体积能量密度较低; 金属 B 能量密度较高,

表 1 水反应金属燃料及氧化物的特性

Metal fuel						Metallic oxide		
名称	密度 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	熔点/K	沸点 /K	质量燃烧热值/ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	体积燃烧热值/ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$	名称	熔点/K	沸点/K
Al	2.70	933	2767	15.15	40.91×10^3	Al ₂ O ₃	2315	3250-3280
Mg	1.74	923	1366	13.34	23.21×10^3	MgO	3098	3850
B	2.34	2450	3931	18.81	44.02×10^3	B ₂ O ₃	723	2320
Be	1.85	1560	2744	36.03	66.67×10^3	BeO	2720	3000-4170
Li	0.53	454	1620	28.61	15.16×10^3	Li ₂ O	1843	2836

但持续燃烧性能较弱, 耗氧量高、价格昂贵; 金属 Mg 粉与水反应启动容易, 但体积能量密度较低; 金属 Al 粉具有较高的燃烧热值, 是普通固体火箭推进剂 3~4 倍, 而且燃料贮存稳定, 燃烧产物无毒性, 安全可靠, 可作为水下推进剂的首选燃料, 特别是近年来随着纳米粉末制备技术的日趋成熟, 纳米铝粉金属燃料是最佳选择。

2.3 金属燃料燃烧机理研究

金属燃料发动机技术属于一门综合性学科, 涉及到纳米金属燃料表面处理、金属燃料推进剂配方、制备、燃烧室优化设计、典型环境下可靠点火(包括地面试车台点火、水下典型环境下可靠点火等)、供水系统优化设计、金属燃料燃烧(包括金属燃料燃烧机理研究、推进剂稳态燃烧、燃速控制技术)等多种技术。尤其是金属燃料颗粒燃烧属于复杂的化学反应、多相流动、传热传质等过程。化学反应在燃烧过程中发挥着极其重要的作用, 它对控制可靠着火、火焰传播、熄火、可燃极限、燃烧稳定性、污染物排放等现象具有重要影响。通常认为微米铝粉点火遵循扩散控制燃烧, 而纳米铝粉则遵循化学动力学控制燃烧。为了更好地研究纳米铝颗粒燃烧过程中复杂的化学反应, 基于燃烧动力学理论, 研究其燃烧反应机理、燃烧反应速度及其影响因素。

为探索金属燃料燃烧机理, 研究人员在不同试验环境下建立了各种数学模型, 为进一步探索金属燃料发动机稳态燃烧奠定了理论基础。一般认为, 纳米铝颗粒的氧化遵循扩散氧化机理(DOM)^[9,10]、熔体分散机理(MDM), 其中扩散氧化适用于缓慢加热速率条件, 铝和氧通过氧化壳层相互扩散; 熔体分散机理适用于较高的加热速率条件, 芯核铝熔化引起壳层破裂, 芯核铝分散成较小的铝簇发生氧化。深入研究微/纳米铝粉点火燃烧机理、影响因素及调节点火延迟时间方法对于提高金属燃料发动机燃烧效率具有十分重要的意义。

近年来, 研究人员对微纳米铝颗粒、硼颗粒及硼铝合金燃烧过程进行建模、仿真, 深入研究金属颗粒点火和动力学燃烧特性。如 Buckmaster 和 Jackson^[11]通过建立亚微米铝粉燃烧模型来研究其基本燃烧特性。Sun^[12]对纳米铝粉在 CO₂ 中的点火、燃烧特性、反应机理进行了数值仿真, 研究了燃烧室初始温度对气相和液相的纳米铝粉燃烧性能的影响。

Glorian^[13]研究了铝颗粒气相表面热化学和动

力学燃烧特性, 基于定量的化学计算, 分析了铝表面 Al/H/C/O/N 反应, 所得的热力学和动力学数据有助于模拟铝颗粒燃烧中的表面反应。进一步地, Glorian^[14]等人根据气相和颗粒表面动力学机理对单粒铝颗粒燃烧进行数值模拟, 研究了非均相反应在铝燃烧中的作用。

Afzalabadi 等人^[15]针对铝硼尘颗粒在具有空间离散热源的非均匀静态反应介质中的混合燃烧, 建立了火焰传播速度的热模型, 研究了铝硼混合粉尘云中不同比例硼粉的燃烧速度和最小点火能量随粉尘浓度和粒径的变化规律。

Han 等人^[16]采用欧拉-拉格朗日两种方法, 对铝粉团氧化燃烧过程进行了数值模拟, 提出了一个包含详细铝燃烧现象(熔化、非均匀表面反应、氧化铝壳生长、燃烧热分布等)的单铝燃烧模型, 并将其应用于三维可压缩 CFD 中。

针对微米级铝粉云在空间离散源静态反应介质中的燃烧问题, 伊朗科学技术大学机械工程学院燃烧研究实验室 Bidabadi 等人^[17]通过建立了一个改进的数学模型, 用以估算不同氧化剂浓度下火焰前缘速度。Bidabadi 等人^[18]进一步地研究了微米级铝粉云在空气中的离散燃烧的三维模拟, 考虑了热辐射和热传导的影响。

美国乔治亚理工大学航空航天工程学院的 Sundaram 与 Yang^[19]对 80nm 的铝粉颗粒与水在压强为 1~10MPa 条件下混合燃烧, 进行了一系列理论研究, 重点研究了颗粒的夹带和团聚效应对其燃速的影响及对压强的依赖性。进一步地, Sundaram^[20]等人系统性地研究了铝颗粒在不同氧化阶段的特性, 根据各阶段的时间尺度, 辨识出各阶段的关键部分, 建立了微/纳米铝粉点火和燃烧的通用理论(如图 1 所示, 纳米铝粉燃烧受热传导、热辐射、反应热等多种效应)。Sundaram^[21]等人综述了纳米铝颗粒燃烧研究的最新进展, 研究了 Knudsen 数对颗粒传热传质性能的影响, 确定了颗粒燃烧的关键物理化学过程, 阐明了颗粒尺寸对铝颗粒火焰温度的影响。

Corcoran 等学者^[22]在实验研究的基础上分析湍流效应对铝颗粒燃烧性能的影响, 研究发现, 流动模式的变化与火焰和外部氧化剂混合的变化程度有关。Gallier 等人^[23]基于 Navier-Stokes 方程直接模拟 100 μm 铝液滴在空气中的燃烧过程。通过考虑对单

个液滴的直接模拟来揭示铝粒子的不稳定燃烧。

Levitas 研究者^[24]提出了一种熔体分散新机理, 其理论认为, 起初 Al 纳米颗粒被氧化壳所包覆, 铝核的快速熔化产生了一个较大的内部压缩压力 (1~7GPa), 氧化铝壳内有拉伸环向应力导致了壳的破裂, 卸荷波传播至 Al 熔核中心, 产生了同样等级的拉力压, 从而将铝粒子分散成细小的铝团簇, 原理图如图 2 所示。

王金云等人^[25-27]针对高金属含量 (铝粉含量超过 80%) 纳米铝基金属燃料推进剂点火燃烧过程中出现爆燃、甚至爆炸问题 (如图 3 所示), 在理论分析和实验研究的基础上, 建立长椭球和扁椭球颗粒燃烧模型, 研究不同颗粒纵横比、雷诺数下的颗粒燃烧速率、尺寸变化率、表面积比率、Sherwood 数等变化规律, 研究椭球形颗粒对纳米铝基金属燃料推进剂燃烧稳定性的影响。

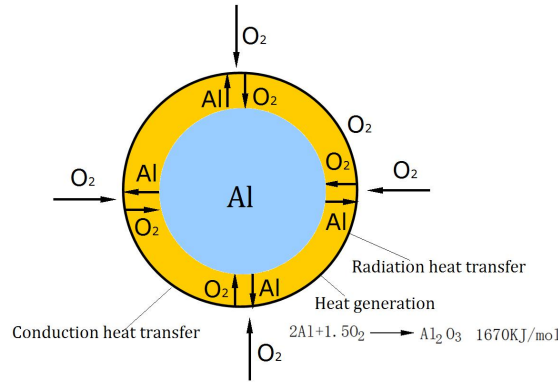


图 1 纳米铝颗粒在氧气中燃烧的关键物理化学过程

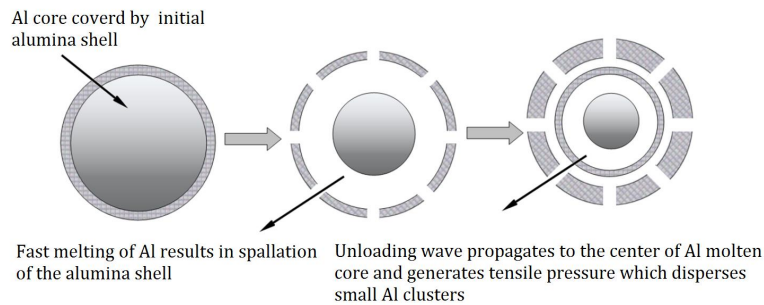


图 2 纳米 Al 颗粒的熔体分散机理

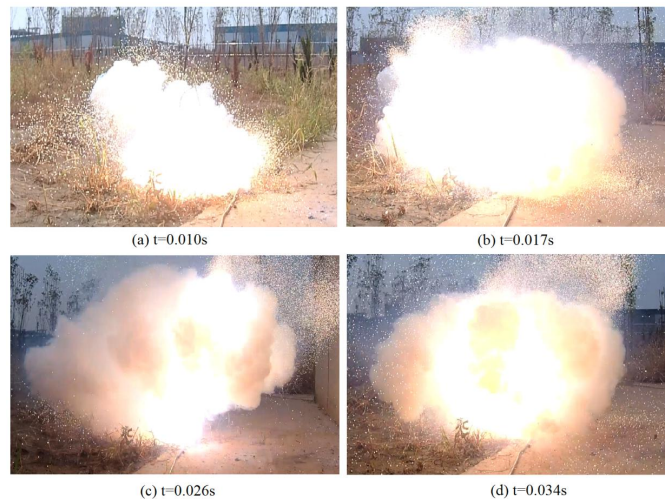


图 3 纳米铝基金属燃料推进剂在空气环境中的燃烧实验 (50nm)

综上所述, 在金属铝颗粒燃烧机理研究方面, 研究人员做了大量细致的工作, 通过建立多种理论模型, 探索铝粒子燃烧机理, 提出了熔体分散理论, 确定不同粒径和压力下的铝颗粒燃烧机理, 估算不同氧化剂浓度下火焰前缘速度, 分析湍流效应对铝颗粒燃烧性能的影响, 基于 Navier-Stokes 方程直接模拟铝液滴在空气中的燃烧过程等。现有大量研究成果表明, 铝颗粒在不同实验条件下, 其燃烧性能差异性很大, 在特定的实验环境下, 具有一定的规律, 所建立的颗粒燃烧理论在一定程度上可以解释金属颗粒化学反应过程。

3 水反应金属燃料发动机技术研究进展

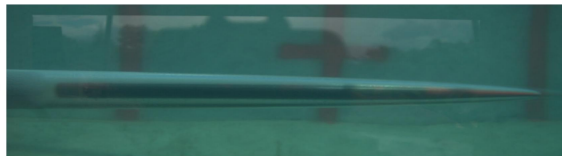
3.1 国内研究进展

据报道, 2000 年 8 月 12 日, 俄罗斯北方舰队所



(a) 超空泡射弹原理图

属“库尔斯克”号核潜艇突然沉没在约 108 m 深的北冰洋巴伦支某海域海底, 从此有关俄罗斯超空泡“暴风”鱼雷相关信息才被世人知晓, 俄军鱼雷动力系统正是采用镁基水反应金属燃料发动机技术。由此, 引起了我国高等院校、科研院所研究人员对金属燃料发动机技术的极大兴趣, 并开展了广泛地研究, 如国防科学技术大学、西北工业大学、哈尔滨工程大学、航天四院、北京理工大学、西安交通大学、浙江大学等在水反应金属燃料发动机原理分析、热力学仿真计算、金属燃料推进剂配方研究与制备技术、发动机燃烧室设计、发动机地面点火试验等, 取得了阶段性成果。哈尔滨工程大学与河北省双介质动力技术重点实验室联合研制的 80mm 铝基金属燃料发动机超空泡射弹, 速度突破 286kn (如图 4 所示)。



(b) 水下超空泡射弹实验

图 4 超空泡射弹

我国对水冲压发动机技术研究起步相对较晚, 一直到 2000 年后才进入实质性研究阶段, 主要侧重于水反应金属燃料发动机的工作原理探索与理论论证、推进剂性能热力学计算、发动机性能分析、金属燃料推进剂制备与性能分析、金属燃料燃烧特性分析与实验研究、发动机系统实验等方面研究。

在水反应金属燃料发动机原理探索方面, 郑邯勇^[28]对 Al/H₂O 反应系统原理进行了阐述, 缪万波等人^[29]基于最小自由能法, 对铝金属燃料湍流式水冲压发动机不同工况进行了理论计算, 确立了发动机比冲、水燃比、燃烧室压强、温度之间的依赖关系。李是良等人^[30]、刘康等人^[31]回顾了水冲压发动机用金属燃料的研究进展, 对金属水反应燃料的工作原理、关键技术进行论述。

国防科学技术大学胡凡等人^[32]在考虑发动机两相流损失的情况下, 分别对铝、镁基水反应金属燃料的比冲性能进行了计算, 对金属粒子燃烧时间进行估算, 确定了燃烧室长度的设计准则。此外, 胡凡等人^[33]建立了发动机一维两相多组分反应流计算

模型及镁水化学反应动力学模型, 并对发动机一维流场进行了数值模拟。另外, 胡凡等人^[34]针对四种水反应金属燃料发动机构型进行了实验研究, 通过对燃烧室压强、燃烧效率和喷射效率等性能参数分析表明, 发动机工作过程对其构型具有较大的依赖性。

Yang 等人^[35]从理论上分析了镁基水冲压发动机的热力学性能。韩超等人^[36]针对镁基水反应金属燃料发动机, 研究一次进水角度对二次进水发动机比冲性能的影响规律, 建立了发动机补燃室两相流反应模型, 并进行了数值模拟和地面直连式实验。结果表明, 一次进水角度在 40°左右时, 二次进水水冲压发动机比冲性能达到最优。

李是良^[37]开展了高金属含量镁基水反应金属燃料一次燃烧性能及其调节方法。基于理论分析、数值模拟和试验研究, 对镁基水反应金属燃料的凝聚相热分解性能、静态及动态燃烧性能进行测试, 分析了推进剂配方参数对镁基燃料凝聚相热分解性能、一次燃烧特性及燃烧波结构的影响规律。

黄利亚等人^[38]采用垂直进水的水冲压发动机地面直连试验技术, 消除了进水冲量对轴向推力的影响, 解决了发动机试车过程中流量不稳定的问题。文献^[39]中, 黄利亚等人针对两次进水的水冲压发动机, 提出了试验总水燃比及一、二次水燃比选择方法, 在维持一次水燃比基本不变的情况下, 开展了不同总水燃比的水冲压发动机试验。此外, 黄利亚^[40]针对镁基水反应金属燃料发动机燃烧问题, 基于理论分析、数值模拟、试验验证的基础之上, 研究镁颗粒在水蒸气环境中着火与燃烧机理, 剖析发动机内部燃烧过程以及燃烧组织形式。

刘巍^[41]采用理论分析、数值模拟与直连式试验相结合的方法, 对固体燃料水冲压发动机燃烧组织技术进行了深入探讨。朱千稳等人^[42]针对水反应金属 Mg 粉燃料发动机, 通过数值仿真与实验验证的方法, 研究了不同喷嘴雾化锥角对发动机比冲性能的影响。周星^[43]分析了镁基水反应金属燃料配方与其能量性能的关系, 探讨了镁基水反应金属燃料的反应特性。Yang 等人^[44]对水反应金属燃料发动机热力学性能进行理论计算, 王宁飞等人^[45]对金属铝粉燃烧性能研究进展进行了综述。

韩超等人^[46]探索 70% 的镁基高金属含量水冲压发动机的稳态燃烧机理, 开展了镁粉在水蒸气环境下的稳态燃烧试验, 结果表明, 燃烧室压强 2.0 MPa 时, 燃料稳态燃烧的燃面温度约为 900.1℃, 气相平衡火焰温度约为 1214.9℃, 燃烧火焰明亮并紧贴燃面, 没有颗粒燃烧形成的火星或轨迹。

北京理工大学 Zou 等人^[47]研究了镁水金属燃料推进剂制备及反应特性, Zou 等人^[48]对铝镁合金推进剂制备及特性进行研究。黄海涛等人^[49,50]针对特定的镁铝高金属含量推进剂配方体系, 研究了固化参数 R 值、模压力、预固化时间、保压时间对药柱力学性能的影响。

北京理工大学的 Liu^[51]等人在实验研究基础上, 分析了固体推进剂中铝粉燃烧特性, 基于各种实验技术手段如淬火、动态测量、高速摄像机 CCD 等研究铝粒子燃烧特性和初始颗粒团聚尺寸分布情况。

王金云等人^[52]针对高金属含量 (80% 以上) 水反应纳米铝基金属燃料发动机优化设计问题, 通过建立发动机喷管两相流控制模型, 基于龙格-库塔-基尔法求解微分方程组, 进行两相流数值模拟仿真,

在球形颗粒假设模型下, 研究颗粒在燃烧室和喷管内的燃烧和流动特性, 分析不同凝相含量、不同颗粒粒径对发动机比冲损失的影响, 基于实验的基础上, 进一步对理论结果进行验证。

铝冰发动机是低温固体推进剂和包覆纳米金属燃料结合的产物^[7], 其燃烧产物无污染, 铝冰固体推进剂比其它推进剂更安全、不易发生意外点火和爆炸及因静电而带来的危险可被忽略不计^[53], 有望被用于深空探测。哈尔滨工程大学刘平安等人对铝冰发动机内流场数值模拟^[7]、燃烧室压强计算方法^[54]、两相内弹道计算模型^[55]进行深入研究。

综上所述, 国内在水反应金属燃料发动机技术研究成果较为显著, 主要集中在水冲压发动机理论分析、水冲压发动机系统设计、流场模拟仿真、发动机进水系统性能实验分析、金属燃料推进剂制备及燃烧性能研究、推进剂稳态燃烧机理研究、铝冰发动机性能研究等, 为开展高金属含量发动机研究提供借鉴经验。

3.2 国外研究进展

早在 2008 年美国国家航天局 NASA“凤凰号”火星探测器在火星上发现了固态水的存在, 2019 年意大利科学家宣称在火星上发现了液态水湖, 这为铝水/冰金属燃料发动机的研究提出了新的契机。金属燃料与固态水作为推进剂可作为未来火星探测、太空作业、运载装置的能源动力。

目前, 国外金属燃料发动机技术, 除已知的俄罗斯“暴风”鱼雷采用镁基燃料外 (如图 5 所示), 其它国家尚未见到相关的报道, 从公开的资料来看, 大多处于金属燃料燃烧机理分析和发动机原理样机试验阶段。例如“暴风”鱼雷动力装置以镁粉为燃料, 引入外界的海水为氧化剂, 相比于常规固体火箭推进剂, 不用额外携带氧化剂, 最大限度地节省了存储空间, 可以大量自带燃料, 因而具有较高的能量密度与航速。美国宾夕法尼亚大学应用研究实验室^[56-58](ARL) 基于高压载气给料方式研究了 Al/H₂O 和 Mg/H₂O 体系性能, 成功开展了发动机原理样机试验。

Risha 等人^[59]研究了混合火箭发动机中的纳米铝基和硼基固体燃料特性, 通过实验的方法确定了各种含纳米颗粒端羟基聚丁二烯 (HTPB) 固体燃料配方的发动机推力和燃烧特性。研究了 19 种固体燃烧配方, 其中 17 种配方中包含了 13% 添加剂, 另外

一种分别包含了 6.5% 与 5.65% 硼金属粉末, 纳米铝粉颗粒与 HTPB 黏合剂及其它固体燃料混合压制, 在长粒中心穿孔 (LGCP) 混合火箭发动机燃烧室中

与氧气充分燃烧。实验结果表明, 纳米铝粉颗粒由于其较短的点火时间 (~ 4 ns) 和燃烧时间 (~ 50 ns) 以及较高的热能, 可显著提高发动机性能。



(a) 鱼雷头部空泡器



(b) 鱼雷尾部发动机

图 5 俄罗斯“风暴”鱼雷

Kalpaki 等人^[60]基于计算流体动力学 (CFD) 方法建立了一种改进的固体火箭冲压发动机燃烧室中的硼颗粒燃烧模型, 在模型中充分考虑了硼颗粒表面气相反应和熔化、固化、蒸发和沸腾等相变过程, 通过实验对 $3\mu\text{m}$ 、 $34.5\mu\text{m}$ 、 $44.2\mu\text{m}$ 三种不同尺寸颗粒的燃烧结果进行验证, 结果表明, 建立的改进型模型与实验结果很好地吻合, 可为未来固体火箭冲压发动机燃烧室设计提供理论指导。

King^[61]建立了一种预测固体火箭发动机铝颗粒跟踪流管中铝颗粒尺寸、氧化帽尺寸、形状、燃烧时间的数学模型, 在先前计算结果基础上, 应用假定的火焰结构和准稳定模型预测瞬时的铝颗粒尺寸、氧化物含量等, 以评估铝粒子的消耗量和氧化物的生成量。结果表明, 实验结果与模型预测值之间具有较好的一致性。

Elbasuney^[62]等人研究了不同含量的高氯酸钾 (KP) 与高氯酸铵 (AP) 氧化剂与金属燃料配比对改性双基推进剂 (MDB) 性能的影响, 基于小尺寸弹道估计测试发动机, 模拟真实全尺寸发动机工况, 对发动机燃速和特征排气速度进行了估计。研究表明, KP 能有效提高推进剂燃速, AP 可有效提高发动机特征排气速度, 金属铝粉可有效增加燃烧室温度, 改善推进剂热传导性能, 提高发动机比冲。

Gnanaprakash^[63]等人对纳米铝基复合推进剂夹层燃烧机理进行研究, 在 $1\sim 12\text{MPa}$ 压强范围内, 通过改变 AP 粒度和碳氢化合物黏合剂与纳米铝粉颗

粒混合结构, 验证推进剂燃烧性能。将 45nm 铝颗粒分别与 $5\mu\text{m}$ 与 $45\mu\text{m}$ AP 颗粒混合, 对三种不同厚度的夹层推进剂 (薄层 $100\sim 170\mu\text{m}$, 中间层 $200\sim 280\mu\text{m}$, 厚层 $370\sim 480\mu\text{m}$) 进行燃烧实验; 通过高速高倍率成像系统对燃烧过程进行监测; 对推进剂燃速, 表面轮廓特征进行了测试分析。

美国桑迪亚国家实验室 Chen^[64]等人利用数字在线全息摄影术 (DIH) 和成像高温计研究固体推进剂羽流中铝颗粒的燃烧。对高氯酸铵 (AP) 固体火箭推进剂燃烧过程中铝颗粒的三维位置、尺寸和速度进行了实验定量分析。在环境压强为 83kPa 情况下, 对 $15\mu\text{m}\sim 900\mu\text{m}$ 的铝颗粒粒径进行统计。

综上所述, 国外有关水反应金属燃料发动机技术研究主要集中在金属颗粒的燃烧特性研究, 如硼、铝、镁等, 以铝基金属燃料推进剂研究居多, 主要集中在铝颗粒燃烧机理、燃烧过程中的尺寸变化、铝颗粒的消耗量和氧化铝的生成量、氧化剂特性对推进剂燃烧性能的影响等。不同配方推进剂的化学性能差异性很大, 颗粒粒径分布、氧化剂浓度、燃烧室温度、压强对推进剂稳态燃烧具有非常明显的影响。

国内外学者试图从金属燃料燃烧机理上分析其燃烧过程, 由于化学成份的不同, 燃料燃烧过程变得异常复杂, 其中包含了多相流燃烧、湍流燃烧、非稳态燃烧、相变等多个过程。就目前的研究情况来看, 研究人员通过多种观测、测量手段, 探索金属颗粒的燃烧特性如燃烧速率、颗粒运动轨迹、尺

寸变化以及团聚、破碎等现象。由于金属推进剂燃烧过程的复杂性和不可预测性, 目前还无法建立一个统一的理论模型来解释所有金属燃料燃烧过程中的各种现象。

4 氧反应纳米铁基金属燃料发动机技术研究进展

纳米铁粉燃料在水上具有天然优势, 可作为空间飞行器的能源动力。从现有的资料显示, 金属纳米铁粉成为当前的研究热点, 主要体现在其燃烧特性与机理研究。

纳米金属铁粉燃料^[65]由于活性强、点火温度低、燃烧热值高、反应产物无污染, 可作为未来水上交通的能源动力系统, 也可广泛用于汽车、空间飞行器的推进装置, 以及边远山区的能源供电系统。纳米铁粉其突出优点在于燃料可安全存储无危险, 其反应产物无废气排放, 铁氧化物通过 H₂ 可还原重复再利用, 未来可替代现有煤碳、石油、天然气等不可再生石化燃料发电或作为汽车、船舶、航天的能源动力, 是一种极具实际应用价值和前景的新型燃料, 近年来倍受关注。

表 2 纳米铁粉金属燃料与其他燃料燃烧性能比较

名称	分子量	密度 /g·cm ⁻³	熔点 /K	沸点 /K	金属燃料				金属氧化物		
					水反应		氧反应		名称	熔点 /K	沸点 /K
					质量燃烧 热值 /MJ·kg ⁻¹	体积燃烧 热值/MJ·L ⁻¹	质量燃烧 热值 /MJ·kg ⁻¹	体积燃烧 热值 /MJ·L ⁻¹			
Fe	55.84	7.86	1811	3273	0.902	7.091	7.397	58.14	Fe ₂ O ₃	1839	—
Al	26.98	2.70	933	2767	15.15	40.91	31.054	83.85	Al ₂ O ₃	2315	3250
Mg	24.30	1.74	923	1366	14.81	25.77	24.761	43.08	MgO	3098	3850
Li	6.94	0.53	454	1620	28.61	15.16	42.998	22.79	Li ₂ O	1843	2836
Be	9.01	1.85	1560	2744	36.03	66.67	62.700	116.00	BeO	2720	3580
B	10.81	2.34	2450	3931	18.81	44.02	267.06	624.94	B ₂ O ₃	723	2320

表 2 给出了纳米铁粉金属燃料与其它几种金属燃料的水/氧反应燃烧性能比较, 计算结果表明, 铁粉与氧气反应的燃烧热值高达 58.14 MJ/L, 纳米 Al 粉在水下具有很大优势, 虽然氧反应能量密度较纳米铁粉高, 但造价昂贵, 点火温度 (650℃左右) 也高, 其它金属前文已对比过。相比而言, 纳米铁粉点火温度低 (250~280℃)、燃烧速度快、氧化物可还原、体积能量密度高, 可作为航天工程的能源动力燃料。

美国研究人员 Beach 等人^[1,3,66,67]提出一种设想, 即利用纳米铁粉作为汽车的燃料, 未来的汽车将告别燃油时代, 特别是在现代社会人类追求宜居、绿色节能、低碳环保的生活理念前提下, 这种设想特别适合当今人类社会需要。Beach 研究发现, 50 nm 粉末具有相当高的活性, 颗粒在 250℃便可点燃^[66], 温度可达到 800℃。此外, 燃烧产物在 425℃通过氢气, 氧化铁颗粒也可还原成铁。当氢和氧反应产生水时, 纳米燃料会再次燃烧。纳米铁粉作为

汽车燃料具有广阔的应用前景, 但其燃速控制技术、金属颗粒尺寸优化处理技术、废料收集技术、燃料输送等关键技术尚未解决, 金属燃料发动机系统设计有待优化。

Beach 等人的研究从理论上论证了纳米铁粉作为汽车燃料的可行性, 他们的研究工作主要集中在纳米铁粉燃料的燃烧特性分析^[67], Beach 等人通过实验研究发现, 50 nm 的铁粉颗粒可在相对较低的燃烧温度下 (1000~1200K), 500 ms 内快速燃尽, 燃烧产物包含了 Fe(III)混合物, 铁氧化物可在一个大气压, 673K~773K 的温度范围内很容易被还原为 Fe, 可重复利用。

最近, Bergthorson 等人^[68]提出直接在空气中燃烧金属粉末可以获得较高的能量密度, 金属燃料燃烧所产生的高能热量能直接作为清洁能源, 用于 Rankine 和 Stirling 外燃机(ECEs)、热电池等。研究者对 Fe、Al、B/Al、Zr 等几种金属燃料燃烧火焰与

甲烷的燃烧火焰进行了比较(如图6所示), 结果表明, 颗粒的燃烧速度非常高, 通过燃气分子从热反应区上流扩散到未燃区实现了自持燃烧。铁粉由于具有可回收和可重复利用的优势, 可作为金属-空气燃料发动机的首选者。

铁粉颗粒是替代化石能源的很有发展潜力的金属燃料, Schiemann 等人^[69]在分析铁粉颗粒热化学特性及其氧化物和固体颗粒燃烧规律的基础之上, 建立了铁粉颗粒燃烧数学模型, 并且首次应用到商业 CFD 软件中, 以工业级的喷雾焙烧炉为燃烧室, 用铁粉替代了常规化石燃料, 对燃烧室中的铁颗粒相和气相的温度场进行了模拟仿真。

Julien 等人^[70]基于改进型燃烧室不同的氧化环境下, 研究了甲烷与铁粉混合燃料的火焰结构和粒子燃烧特性, 重点研究了颗粒燃烧模型对不同氧化

环境下火焰结构和传播速度的影响。Wen 等人^[71]通过实验的方法研究了铁纳米颗粒的热氧化及其对化学循环燃烧的影响。结果表明, DSC 记录的热释放在 $1.67\sim 2.92 \text{ kJ g}^{-1}$ 范围内, 铁纳米颗粒活化能大约在 $0.9\sim 1.9 \text{ eV}$ 。文献^[72]研究了含硼($\sim 80 \text{ nm}$)和铁($\sim 25 \text{ nm}$) 颗粒的纳米燃料燃烧特性, 结果表明, 铁粉燃烧过程中液相与固相颗粒并存, 在燃烧最后阶段, 有些颗粒形成较大的团聚状。

Mandilas 等人^[73]对理想和真实发动机条件下铁纳米颗粒氧化燃烧特性展开研究, 着重研究了具有不同形貌特征和 $25\text{-}85\text{nm}$ 粒径的 Fe 粉颗粒, 通过热重分析和定制的冲击管、定容器和压燃式(CI) 发动机配置来研究其氧化特性。结果表明, 尽管研究工作中存在各种各样的技术挑战, Fe 纳米粒子在略微改进的 CI 发动机中的燃烧是可行的。

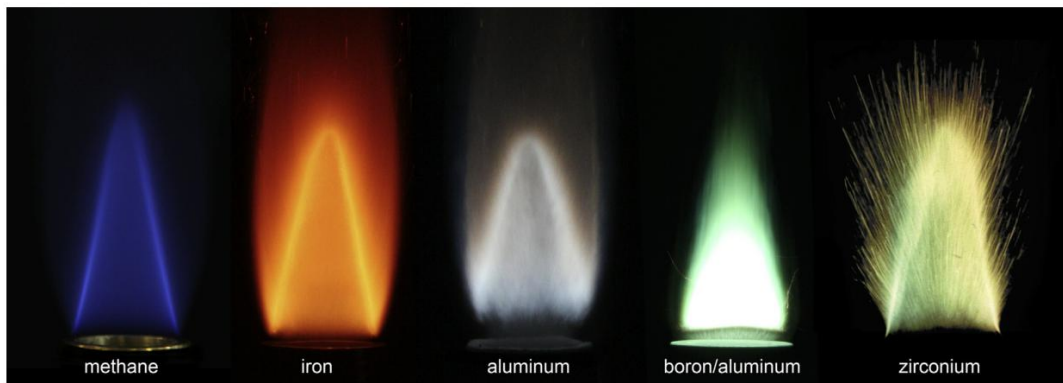


图6 各种金属燃料与空气的稳定火焰

此外, Mehta 等人^[74] 基于实验研究的基础上, 对含有 Al、Fe、B 纳米颗粒柴油基单缸压燃(CI) 发动机的燃烧特性、发动机性能和排放参数开展研究。结果表明, 燃料的着火延迟时间缩短, 火焰维持时间延长, 团聚点火时间增加。

杨丽等人^[75]运用热重分析方法对微纳米铁粉金属燃料的着火和燃烧特性进行研究。何丹丹等人^[76]对粒径为 50nm , 100nm , 500nm 和 $20 \mu\text{m}$ 铁粉进行比表面积实验(BET 法)、燃烧热值实验和热分析实验, 分别获取其表面微观结构、燃烧热值和失重曲线, 并分析了颗粒比表面积、燃烧热值对粒径的依赖关系。高文静等人^[77]采用普适积分法、微分法对 50 nm 和 500 nm Fe 粉在不同升温速率下的动力学参数进行拟合求解。

王金云等人^[65]对氧反应纳米铁基金属燃料发动

机喷管两相流特性进行研究, 建立纳米铁基金属燃料发动机喷管两相流控制方程, 对纳米铁基燃料颗粒两相流动进行数值模拟, 对发动机两相流损失进行评估, 研究颗粒在燃烧室和喷管内的燃烧和流动特性, 深入研究发动机比冲性能的影响因素。最后, 通过纳米铁基金属燃料发动机燃烧实验和推力测试实验, 验证理论模型的合理性。

王金云等人^[78]考虑非球形颗粒因素的金属燃料发动机喷管两相流特性研究, 特别地以球形、椭球形、立方等三种颗粒模型为研究对象, 充分考虑不同形状、不同攻角下的颗粒阻力系数、颗粒努塞数, 建立非球形颗粒喷管两相流控制模型, 分别对三种颗粒形状下的发动机比冲损失进行评估, 包括不同攻角下的颗粒温度滞后和速度滞后模拟。最后, 通过实验的方法, 进一步验证理论模型的合理性。

综上所述,国内外关于金属 Fe 粉燃料技术文献很有限,主要集中在 Fe 粉燃烧特性方面,国外如 Beach 等人、Julien 等人、Wen 等人、Mandilas 等人的研究工作,国内研究成果主要集中在浙江大学杨丽等人、上海理工大学何丹丹等人、高文静等人、河北双介质动力技术重点实验室王金云等人的工作。目前在纳米 Fe 粉金属燃料发动机技术、推进剂配方与制备技术、喷管两相流特性分析方面所见的报道不多。纳米 Fe 粉由于其特殊的优势,可用于未来双介质航行体空间高速推进系统,尤其是高金属含量的纳米铁粉金属燃料发动机,具有更高的能量密度和比冲性能,其颗粒稳态燃烧技术及发动机喷管两相流损失控制对开展发动机优化设计和提高发动机性能具有极其重要意义。

5 结束语

本文对金属燃料技术研究最新成果进行了综述,从能量的角度对几种活性金属进行比较,对水反应金属燃料(以铝、镁为主)、氧反应纳米金属燃料(以铁粉为主)发动机技术研究进展进行综述,对其关键技术研究进行论述。作为未来替代不可再生能源的新型燃料—纳米金属燃料具有绝对优势,未来水下高速航行体推进将以纳米铝基燃料为主要发展方向,空中飞行器推进技术将以纳米铁基燃料为主,纳米金属燃料将成为未来发展趋势。未来一种双介质金属燃料发动机技术将进入科学研究领域,该技术使航行体既可在水下超空泡高速航行,又可水上超音速高速推进,对国家航空航天、水下武器装备技术的发展将产生巨大的推动作用。本文的研究成果将为新一代发动机技术发展提供参考。

致谢

非常感谢河北省双介质动力技术实验室提供资金及实验设施帮助,同时也感谢哈尔滨工程大学、厦门大学、宁波大学老师的热情帮助。

参考文献

- [1] 李有观. 金属粉末: 另类零碳燃料[J]. 自然与科技, 2011, 01: 28-31.
- [2] 张炜, 张为华, 周星, 等. 镁基水反应金属燃料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013, 1-13.
- [3] 杰克·史帝芬. 金属燃料[J]. 资源与人居环境, 2011, 04: 40-41.
- [4] Li S, Lin Z, Wang T, et al. The effects of aluminum size on the combustion characteristics of high energy propellants with higher burning rate[C] // Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006.
- [5] Chong F, Shufen L. Experimental research of the effects of superfine aluminum powders on the combustion characteristics of NEPE propellants[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2002, 27(1): 34-38.
- [6] 唐有根. 金属燃料电池新技术[J]. 功能材料信息, 2012, 02(9): 21-25.
- [7] 刘平安, 王良, 王璐, 王革. 铝冰发动机内流场的数值计算[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(04): 425-431.
- [8] 王金云, 杨在林, 王孟军, 等. 美军无人水下潜航器技术发展综述[J]. 飞航导弹, 2015(11): 54-58.
- [9] Ohkura Y, Rao PM, Zheng X. Flash ignition of Al nanoparticles: mechanism and applications [J]. Combustion & Flame, 2011, 158(12): 2544-2548.
- [10] Rai A, Park K, Zhou L, Zachariah MR. Understanding the mechanism of aluminum nanoparticle oxidation [J]. Combustion Theory and Modelling, 2006, 10(5): 843-859.
- [11] Buckmaster J, Jackson TL. Modelling the combustion of a sub-micron aluminium particle [J]. Combustion Theory and Modelling, 2014, 18(2): 242-260.
- [12] Sun Y, Wang Q, Wu Y, et al. Numerical simulation of the combustion of nano-aluminum in carbon dioxide [J]. Acta Astronautica, 2017, 139: 428-434.
- [13] Glorian J, Catoire L, Gallier S, et al. Gas-surface thermochemistry and kinetics for aluminum particle combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 2439-2446.
- [14] Glorian J, Gallier S, Catoire L. On the role of heterogeneous reactions in aluminum combustion[J]. Combustion and Flame, 2016, 168: 378-392.
- [15] Afzalabadi A, Poorfar AK, Bidabadi, et al. Study on hybrid combustion of aero- suspensions of boron-aluminum powders in a quiescent reaction

- medium[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: 645–651.
- [16] Han DH, Shin JS, Sung HG, A detailed flame structure and burning velocity analysis of aluminum dust cloud combustion using the Eulerian-Lagrangian method[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36: 2299–2307.
- [17] Bidabadi M, Poorfar AK, Wang S, et al, A comparative study of different burning time models for the combustion of aluminum dust particles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 105: 474–482.
- [18] Bidabadi M, Bozorg MV, Bordbar V. A three-dimensional simulation of discrete combustion of randomly dispersed micron-aluminum particle dust cloud and applying genetic algorithm to obtain the flame front[J]. *Energy*, 2017, 140: 804–817.
- [19] Sundaram DS, Yang V. Effects of entrainment and agglomeration of particles on combustion of nano-aluminum and water mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161: 2215–2217.
- [20] Sundaram DS, Yanga V, Zarko VE. Combustion of nano aluminum particles (Review)[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, 51: 173–196.
- [21] Sundaram DS, Puri P, Yang V. A general theory of ignition and combustion of nano and micron-sized aluminum particles[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 169: 94–109.
- [22] Corcoran AL, Hoffmann VK, Dreizin EL. Aluminum particle combustion in turbulent flames[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160: 718–724.
- [23] Gallier S, Sibe F, Orlandi O. Combustion response of an aluminum droplet burning in air [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 1949–1956.
- [24] Levitas V I. Burn time of aluminum nanoparticles: Strong effect of the heating rate and melt-dispersion mechanism[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(2): 543–546.
- [25] Wang WJ, Yang ZL. Theoretical study on combustion of non-spherical particles in nano aluminized propellant in air[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6: 065064.
- [26] Wang WJ, Yang ZL. Experimental study on the effect of non-spherical particles on steady combustion in nano-aluminized propellant in air[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6: 115054.
- [27] Wang WJ, Yang ZL, Wang MJ. Effect of non-spherical particles on burning behaviors during aluminum combustion[J]. *Particuology*, 2019, doi.org/10.1016/j.partic.2019.11.004.
- [28] 郑邯勇, 铝水推进系统的现状与发展前景[J]. *舰船科学技术*, 2003, 25(5): 24–25.
- [29] 缪万波, 夏智勋, 郭健, 等. 金属水反应冲压发动机理论性能计算与分析[J]. *推进技术*, 2005, 26(06): 563–566.
- [30] 李是良, 张炜, 朱慧, 等. 水冲压发动机用金属燃料的研究进展[J]. *火炸药学报*, 2006, 29(06): 69–73.
- [31] 刘康, 罗平, 熊灿, 等. 冲压发动机用水反应金属燃料的研究进展[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(10): 18–21.
- [32] 胡凡, 张为华, 夏智勋, 等. 水反应金属燃料发动机比冲性能与燃烧室长度设计理论研究[J]. *固体火箭技术*, 2007, 30(1): 12–16.
- [33] 胡凡. 镁基燃料水冲压发动机理论分析与试验研究[D]. 国防科学技术大学博士论文, 2008.
- [34] 胡凡, 张为华, 江振宇. 金属燃料/水冲压发动机构型试验[J]. *推进技术*, 2012, 1(33): 125–130.
- [35] Yang Y, He M. Theoretical investigation of thermodynamic performance for a ramjet based on a magnesium-water reaction[J]. *Engineering for the Maritime Environment*, 2009, 224: 61–72.
- [36] 韩超, 夏智勋, 胡建新, 等. 一次进水角度对水冲压发动机比冲性能影响研究[J]. *固体火箭技术*, 2009, 32(5): 496–499.
- [37] 李是良. 水冲压发动机用镁基水反应金属燃料一次燃烧性能研究[D]. 国防科学技术大学博士论文, 2009, 11.
- [38] 黄利亚, 夏智勋, 胡建新. 水冲压发动机地面直连试验技术研究[J]. *推进技术*. 2009, 30(6): 722–726.
- [39] 黄利亚, 夏智勋, 张为华, 等. 水冲压发动机试验水燃比选择方法[J]. *航空学报*, 2010, 31(9):

- 1740–1745.
- [40] 黄利亚. 镁基水冲压发动机内部燃烧过程与燃烧组织方法研究[D]. 国防科学技术大学博士论文, 2010, 10.
- [41] 刘巍, 固体燃料冲压发动机燃烧组织技术研究[D]. 国防科学技术大学博士论文, 2010.
- [42] 朱千稳, 刘冰, 夏智勋, 等. 喷嘴特性对水冲压发动机性能的影响[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(6): 10–13.
- [43] 周星. 镁基水反应金属燃料与水反应特性研究[D]. 国防科学技术大学博士论文, 2010. 10
- [44] Yang Y, He M. Theoretical investigation on water/metal fuel ramjet motor- thermodynamic cycle and thermodynamic calculation[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(5): 1129–1138.
- [45] 王宁飞, 苏万兴, 李军伟, 等. 固体火箭发动机中铝粉燃烧研究概述[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(1): 61–66.
- [46] 韩超, 夏智勋, 胡建新, 等. 水反应金属燃料在水蒸气环境下的稳态燃烧特性[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(1): 75–78.
- [47] Zou MS, Yang RJ, Guo XY, et al. The preparation of Mg-based hydro-reactive materials and their reactive properties in seawater[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(11): 6478–6483.
- [48] Zou MS, Guo XY, Huang HT, et al. Preparation and characterization of hydro-reactive Mg-Al mechanical alloy materials for hydrogen production in seawater[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 219: 60–64.
- [49] 黄海涛, 邹美帅, 郭晓燕, 等. 高固体含量水反应金属燃料推进剂的力学性能[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(9): 901–905.
- [50] 黄海涛, 邹美帅, 郭晓燕, 等. 高固体含量水反应金属燃料推进剂力学性能试验研究(II) [J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(7): 757–762.
- [51] Liu Z, Li S, Liu M, et al. Experimental investigation of the combustion products in an aluminised solid propellant[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 133: 136–144.
- [52] Wang WJ, Yang ZL, Wang MJ. Investigation of nozzle two-phase flow characteristics for nanometer aluminum powder combustion in a metal fuel motor[J]. *Powder Technology*, 2018, 339: 446–458.
- [53] 王革, 何登军, 刘平安. 铝冰固体推进剂燃速特性研究[J]. 固体火箭技术, 2016, 39 (03): 358–363.
- [54] 刘平安, 王良, 王璐. 固体火箭发动机零维两相燃烧室压强计算方法研究[J]. 推进技术, 2018, 39(02): 317–325.
- [55] 刘平安, 王良. 铝冰发动机两相内弹道计算[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39 (08): 13–1327.
- [56] Miller T, Herr J. Green rocket propulsion by reaction of Al and Mg powders and water [C] // *Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference & Exhibit*. 2013.
- [57] Miller TF, Walter JL, Kiely DH. A next-generation AUV energy system based on aluminum-seawater combustion[C]// *Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*. 2002.
- [58] Miller TF. A high-pressure, continuous-operation cyclone separator using a water-generated flow restriction [J]. *Powder Technology*, 2002, 122(1):61–68.
- [59] Risha GA, Evans BJ, Boyer E, et al. Nano-sized aluminum and boron-based solid-fuel characterization in a hybrid rocket engine [C]. *AIAA 2003–4593*.
- [60] Kalpakli B, Acar EB, Ulas A. Improved combustion model of boron particles for ducted rocket combustion chambers [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 179: 267–279.
- [61] King MK. Aluminum combustion in a solid rocket motor environment [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2107–2114.
- [62] Elbasuney S, Fahd A, Mostafa HE. Combustion characteristics of extruded double base propellant based on ammonium perchlorate/aluminum binary mixture[J]. *Fuel* 2017, 208: 296–304.
- [63] Gnanaprakash K, Chakravarth SR, Sarathi R. Combustion mechanism of composite solid propellant sandwiches containing nano-aluminium[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 182: 64–75.

- [64] Chen Y, Guildenbecher DR, Hoffmeister KNG, et al. Study of aluminum particle combustion in solid propellant plumes using digital in-line holography and imaging pyrometry [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 182: 225–237.
- [65] Wang WJ, Yang ZL, Wang MJ. Numerical and experimental studies on nozzle two-phase flow characteristics of nanometer-scale iron powder metal fuel motor [J]. *Advanced Powder Technology*, 2018, 29: 2753–2764.
- [66] Beach DB, Sumpter BG. Running on iron: metal nanoparticles show promise as future fuels [J]. *Oak Ridge National Laboratory Review*, 2006, 39: 26.
- [67] Sumpter BG, Beach DB, Labinov SD, et al. Solid-state combustion of metallic nanoparticles: new possibilities for an alternative energy carrier[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2007, 129(1): 29–32.
- [68] Bergthorson JM, Goroshin S, Soo M J, et al. Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power[J]. *Applied Energy*, 2015, 160: 368–382.
- [69] Schiemann M, Fischer P, Bergthorson J, Iron particles as carbon-neutral fuel in spray roasting reactors[J]. *Digital proceedings of the 8th European Combustion Meeting*, 2017, 4: 487–492.
- [70] Julien P, Whiteley S, Goroshin S, et al. Flame structure and particle-combustion regimes in premixed methane-iron-air suspensions[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(2): 2431–2438.
- [71] Wen D, Song P, Zhang K, et al. Thermal oxidation of iron nanoparticles and its implication for chemical-looping combustion[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2011, 86(3): 375–380.
- [72] Gan Y, Lim YS, Qiao L. Combustion of nanofluid fuels with the addition of boron and iron particles at dilute and dense concentrations[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(4): 1732–1740.
- [73] Mandilas C, Karagiannakis G, Konstandopoulos AG, et al. Study of oxidation and combustion characteristics of iron nanoparticles under idealized and engine-like conditions [J]. *Energy Fuels*, 2016, 30: 4318–4330.
- [74] Mehta RN, Chakraborty M, Parikh PA. Nanofuels: Combustion, engine performance and emissions[J]. *Fuel*, 2014, 120: 91–97.
- [75] 杨丽, 朱燕群, 王智化, 等. 微纳米金属铁粉的燃烧特性试验研究[J]. *浙江大学学报*, 2010, 44(08): 1562–1566.
- [76] 何丹丹, 金晶, 路遥, 等. 纳米铁粉燃烧特性研究[J]. *上海理工大学学报*, 2012, 34(01): 88–92.
- [77] 高文静, 金晶, 曾武勇. 纳米铁粉的燃烧动力学模型研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 33(13): 9808–9812.
- [78] Wang WJ, Yang ZL. Effect of non-spherical particles on nozzle two-phase flow loss in nano-iron powder metal fuel motor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 91: 372–381.

收稿日期: 2020年4月14日

出刊日期: 2020年5月25日

引用本文: 王金云, 王孟军, 杨在林, 林文水, 周晖杰. 金属燃料技术研究进展[J]. *国际材料科学通报*, 2020, 2(1): 6-18.

DOI: 10.12208/j.ijms.20200002

检索信息: 中国知网、万方数据、Google Scholar

版权声明: ©2020 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS