

核能航空发动机技术进展

Technical Progress on Nuclear Power Aero Engine

■ 李小平/中国航发 张志伟 王奉明/中国航发研究院

2018年3月，俄罗斯总统普京在其年度国情咨文中表示，俄罗斯近期已成功试射了一枚配备核动力装置的巡航导弹，可以实现近乎无限巡航，再次引起了人们对核能航空发动机研究的关注。

核能航空发动机利用核燃料释放出的巨大热量对发动机工质进行加热，以获得大量高温工质。这些高温工质从发动机内高速排出产生反作用推力，或驱动动力涡轮带动螺旋桨工作产生拉力。航空器装配核能发动机后，续航时间可长达数周甚至数月，其活动范围大大增加，具有极佳的经济性。

早在20世纪40年代，美国和苏联两个超级大国就已开始对核能航空发动机进行相关探索和研究，为两国在核动力从理论、概念到方案、验证都奠定了深厚的基础。在历经了20世纪五六十年代的研制热潮与1970—2000年的研制冷落期，由于核防护、质量、冷却及对安全性的担忧等问题，核能航空发动机均止步于研制阶段，最终没有像核动力潜艇和核动力航空母舰一样被广泛应用。直到20世纪末和21世纪初，随着核反应堆技术的进步，又开始有了一些让人对核动力投入航空应用充满期待的消息。

美国核能航空发动机发展历程

飞机用核能航空发动机

美国早在20世纪40年代的曼



图1 NB-36H核动力飞机

哈顿计划中，就已提出使用核能作为航空发动机的动力源的想法。1946年，霍普金斯大学应用物理实验室着手进行核动力航空推进技术理论研究，各大航空动力公司分别开展了飞机和导弹用核能技术应用研究。

1946—1951年，美国空军实施了“飞机核能推进”（Nuclear Energy for the Propulsion of Aircraft, NEPA）计划，研究采用核能作为动力的远程战略轰炸机的可行性。NEPA计划结束之后，美国核能委员会与美国空军又联合实施了“飞机核推进”

（Aircraft Nuclear Propulsion, ANP）计划，目的在于研究开发全尺寸飞机用核反应器和动力系统。ANP计划下的核能航空发动机技术研究工作主要由美国GE公司和普惠公司开展。该计划持续了10年，因多种原因于1961年终止。

GE公司提出了“直接循环式航空推进喷气发动机”概念——发动机吸入的空气经压气机压缩后，与核反应器直接接触传热，经涡轮热功转换后喷入大气，因此也称为“开式循环”。据此，GE公司在J47型喷气发动机基础上改进研制了X-39型

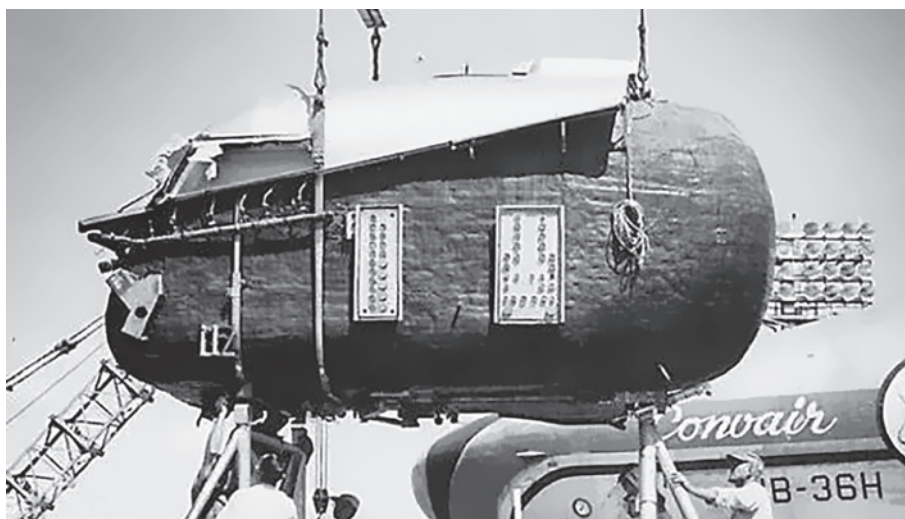


图2 在NB-36H上安装核反应堆

核能涡喷发动机，并在B-36H战略轰炸机基础上改进研制了NB-36H型核动力飞机（如图1所示），其使用的核反应堆原型重15.9 t（如图2所示）。从1955年9月开始至1956年秋季，NB-36H共进行了47次飞行。普惠公司则提出了“间接循环式航空推进喷气发动机”概念。与“直接循环式”不同的是，其使用的核反应器有两个回路，由高密度流体介质进行内循环，在一回路与二回路间换热，发动机吸入空气经压气

机加压后与二回路换热器进行热交换，因此也称为“闭式循环”。

1998年，核反应堆触发式同分异构反应的发现和触发式异构体热交换器的发明，为核能航空发动机的研制和应用开拓了新的天地。

2003年，美国空军在量子核反应研究成果的基础上，开始研究一种采用核能/普通涡扇发动机组合动力的高空长航时无人机。美国空军论证分析了将“全球鹰”无人机动力由常规的涡扇发动机改为核能/

化学能混合涡扇发动机的技术方案（如图3所示）。常规涡扇发动机只在“全球鹰”起飞、爬升、下降和着陆时提供动力，当达到大约14000m（45000ft）的巡航高度时，即转换为核能涡扇发动机驱动。采用核能/化学能涡扇发动机后，“全球鹰”能在空中持续续航一周到几个月的时间。新型核动力无人机除执行侦察任务外，还可装备空地导弹，用于对地攻击。

此外，美国洛克希德-马丁公司一直在秘密研发一种能改变游戏规则紧凑型核聚变反应堆，命名为“用于等离子约束的封装磁场”（如图4所示），并于2014年申请了专利，这种反应堆有可能安装在战斗机上。2018年，该公司又成功申请了与紧凑的聚变反应堆相匹配的其他专利。从媒体报道判断，这些技术可能在不远的将来就能投入生产。

导弹用核能航空发动机

1957年，美国国防部实施了“冥王计划”（Project Pluto），希望研制出一款能“永远飞行”的“超声速低空核动力巡航导弹”（Supersonic Low Altitude Missile，SLAM）。其动



图3 加装量子核反应堆的改进型“全球鹰”无人机



图4 洛克希德-马丁公司的小型核聚变装置



图5 SLAM核动力巡航导弹



图6 AGM-86远程巡航导弹

力装置是一个核动力冲压发动机(如图5所示),与常规冲压发动机的本质区别是,核动力冲压发动机没有燃烧室,而是通过核反应堆产生的热量加热进入发动机的空气。SLAM的核反应堆没有采取屏蔽措施,在核反应堆里加热的空气都具有放射性,因此SLAM没有进行飞行试验就宣告下马。

21世纪初,美国空军研究实验室(AFRL)以钆178量子核反应堆为核心研制出一种涡轮/冲压组合发动机,改装在现役AGM-86远程巡航导弹(如图6所示)上进行试验。通过钆178量子核反应堆的裂变反应释放出的热量,来替代传统弹用涡轮/冲压发动机的燃烧室加热过程,产生推力。该技术相当于把普通涡轮/冲压组合发动机的燃烧室用钆178量子核反应堆替代。这种新型核能发动机可以赋予导弹 Ma_3 左右的高速,射程也可以从740km提升至8200km。

联核动力飞行的研究工作始于20世纪50年代中期,结束于20世纪60年代末期。苏联研究的核能航空发动机主要采用直接循环,核反应堆的尺寸、质量以及屏蔽问题也是其研究过程中遇到的主要技术障碍。1962

年,苏联图波列夫设计局在图-95远程轰炸机的基础上发展的核动力战略轰炸机图-119(如图7所示)开始进行试飞测试。图-119由4台核能涡桨发动机驱动,飞机翼展130m,可搭载1000名乘客,机载重量为

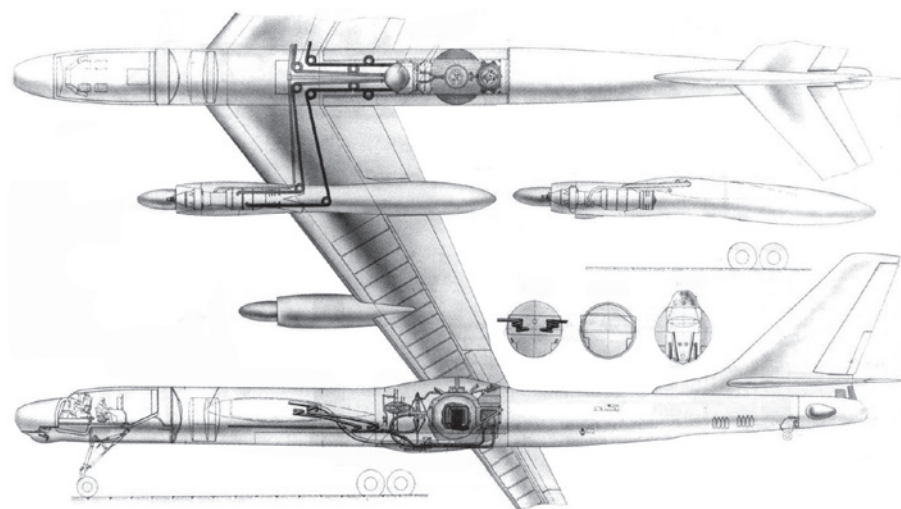


图7 苏联的核动力飞机图-119

苏联/俄罗斯核能航空发动机发展历程

飞机用核能航空发动机

在基于核裂变反应航空发动机的研制方面,苏联并不输于美国。苏

100 t, 飞行时速为1000km/h, 其核能发动机总功率超过50万kW, 总重达80 t, 核反应堆有5层防护层, 冷却剂为液态铅。该型飞机从莫斯科飞到海参崴, 只需要70 ~ 75g核燃料, 这些核燃料的体积只有一个核桃那么大, 如果用当时的TY-104喷气式客机来飞这段距离, 大约需要消耗150t燃油。在此期间, 图-119共投入试验飞行60架次。1969年, 苏联取消了核能航空发动机计划。

弹用核能航空发动机

与美国的SLAM相比, 俄罗斯此次公开的核动力巡航导弹尺寸与其传统大型巡航导弹相当, 而从公开资料推测, 其飞行速度可能为高亚声速类型。从俄罗斯新型核动力巡航导弹的描述和各种类型核能航空发动机技术发展的水平和成熟度来看, 俄罗斯最有可能掌握的应该是核冲压火箭发动机和量子核反应发动机两种技术。这两种发动机都可以基于现有的液体冲压火箭发动机和涡轮/冲压组合发动机改装研发, 技术成熟度高, 而且尺寸均可以安装在射程2000km级别的巡航导弹上。

核能航空发动机分类及技术特点

在核能航空发动机的发展历程中出现了两种类型的发动机, 一种是依靠核裂变产生动力的核能航空发动机, 于20世纪五六十年代开始研究, 但由于核防护、质量及冷却等技术问题和政治因素, 止步于研制阶段; 另一种是依靠量子核反应堆产生动力的核能航空发动机, 美俄等国目前正在开展相关技术研究。

核裂变反应航空发动机

核裂变反应航空发动机的能量

来源是重元素(如铀)核裂变产生的热量, 这种核能航空发动机有直接循环和间接循环两类。

美国和苏联都曾研制过直接循环的核裂变反应航空发动机。其原理是由核反应器替代航空涡轮喷气发动机的燃烧室部件功能, 压缩空气直接通过核反应器进行热交换, 热交换后的高温高压气体推动涡轮做功, 并带动前面的压气机, 最后从尾喷管高速喷出。直接循环的核裂变反应航空发动机可以在常规航空发动机的基础上改进而成, 较容易实现, 但它有两个致命的缺点: 一是核反应堆体积较大, 无法作为发动机的一部分安装在发动机内部, 因而能量损失较大, 效果不太理想; 二是发动机工质(空气)直接经过反应堆, 受到核辐射污染, 排出的气体会造成环境辐射污染。GE公司的最终试验测试证实: 核动力航空喷气推进切实可行, 开式循环工程优化后有较多优势。但开式循环必须附带燃油燃烧室, 在飞机起飞和着陆过程中, 在核反应器未启动时须用燃油燃烧室提供运行推力, 运行控制及核反应器的反应时间都存在负面影响。

美国普惠公司和苏联均研制过间接循环的核裂变反应航空发动机。发动机涡轮部件一般由核反应堆加热自带的循环工质驱动, 这些循环工质主要是非常稠密的流体, 如液态金属(汞、铅等)或高压水, 这些流体在一个封闭的系统内循环使用。从目前的资料看, 间接循环的核裂变反应航空发动机基本上以涡轮浆发动机的形式为主。间接循环的核裂变反应航空发动机能量效率较高, 但内部结构比较复杂, 需要携

带循环工质, 因而其体积更庞大, 而且内部循环工质一旦泄漏会带来灾难性后果。通过多年研究, 目前采用高压水作为循环工质的技术比较成熟。从长航时飞行考虑, 闭式循环更具潜质, 但需要更多的研发技术工作支持。

量子核反应航空发动机

量子核反应航空发动机的动力来源是一种名为触发式同分异构反应的新型核反应, 以铪178这种新的放射性核物质来制造量子核反应堆。

量子核反应堆的工作原理是由太阳能电池或安装在发动机上的发电机为小型X射线机供电, 产生的X射线对铪178进行轰击, 触发铪原子核内的能级降低。这种能级的变化将伴随比X射线强60倍的 γ 射线爆发。 γ 射线加热热交换器的芯部, 对内部流动的空气进行加热, 起到常规航空发动机燃烧室的作用, 实现与燃烧燃料得到膨胀燃气相同的功能。量子核反应堆还有一个突出优点, 即关闭X射线机后, γ 射线的输出会立即大幅降低, 因此控制起来十分方便。此外, 与铀、钚等重元素相比, 铪178辐射更小, 反应中只产生 γ 射线辐射, 因而所需要的屏蔽较少, 即使发生事故, 对环境的影响也比核裂变反应堆要小得多。铪178的半衰期只有31年, 而其他用作核反应堆燃料的元素(铀、钚等)半衰期却长达数千年。因此, 量子核反应堆作为航空动力装置系统不但更稳定更安全, 还可以大大减小防护装置的质量。从核能航空发动机半个多世纪的发展历程来看, 量子核反应航空发动机更加适合航空推进, 应该是未来发展的重点。

核能航空发动机关键技术 新型核反应堆研究及应用技术

高温气冷堆研究及应用技术 高温气冷堆是目前公认的新型核裂变反应堆，具有安全性能好、热效率高以及系统简单等优势。但为了适应核能航空发动机应用的需要，高温气冷堆在结构紧凑、长寿命、轻量化防护和提高出口温度等方面尚需进一步发展。

量子核反应堆研究及应用技术 包括同质异能素铪 178 的低价制取技术、能量激发技术以及能量控制技术。

核能航空发动机总体设计与部件技术

总体结构与匹配技术 包括核能航空发动机的总体结构设计、反应堆与核能航空发动机的匹配技术以及核能航空发动机与载体（导弹、飞机）的匹配技术等。

长寿命、高可靠、低流动损失换热器技术 主要体现在管路材料选取、集管结构设计、流动低阻力设计等方面。换热器管路材料必须耐高温、抗氧化且具有良好的蠕变特性。集管结构设计应进行优化，以使工作应力低于许用值。流路设计要实现流动分离少、损失低。

工作模式转换的控制技术 若采用混合模态工作方案，在常规动力与核动力相互转换的过程中，要求发动机工作稳定而可靠，需要综合考虑压气机、燃烧室、涡轮、核反应堆系统以及换热器系统的特性。为保证常规动力与核动力的平稳转换，要求具备成熟、完善的控制技术。

核屏蔽与抗撞击保护技术 安全问题一直是核能利用的焦点问题，须

重点开展核屏蔽材料技术，而核反应堆系统的撞击保护技术也集中于材料的选取和结构设计上。

多电技术 在未来的核能航空发动机上采用多电技术，如主动磁浮轴承、内置式高速起动/发电机技术等，可以取消齿轮传动、功率提取轴以及传统润滑系统，使得零件数减少，减轻发动机质量，降低复杂性，提高维修性和可靠性。

应用前景分析

战略轰炸机/大型运输机的动力

目前，核动力战略轰炸机/大型运输机具有超强的驱动力，航程不受限制，无须空中加油，具有无可比拟的军事战略优势。

高空长航时无人机的动力

高空长航时无人机需要滞空时间长，而核能航空发动机由于核燃料的特殊性，可保证飞机的滞空时间。由于是无人机，核辐射屏蔽防护也可以弱化，从而使发动机的推重比或飞机的功重比提高，自身质量问题得到缓解。

大型地效飞行器的动力

地效飞行器始终贴着水面飞行，有飞机的高速度，却无高空坠毁的危险。其次，地效飞行器的有效载重大，一般可搭载相当于自重 20%~30% 的物资，短程时甚至可达 40%。而且其造价更低，还无须建设机场或港口。飞行起来既无气流的影响，也无波浪的颠簸，非常平稳舒适。因此，地效飞行器在运输、反潜、登陆作战及执行特殊任务等方面具有广阔的应用前景。如果地效飞行器采用核动力，将成为长距离、大载重量运输及攻击武器的有效平台。

超声速巡航导弹的动力

核动力超声速巡航导弹能够高空高超声速飞行，高度 30000m 以上，飞行马赫数 (Ma) 3.5 以上，利用核动力长时间持续工作的优势，实施超远距离战略打击。该导弹可用火箭助推器起飞，达到工作高度和速度后，转为核冲压动力巡航，将具有很强的突防能力和较高的生存能力，目前的防空武器无法对其进行防范，可对敌方防护严密的纵深重点目标进行战略打击，进一步提高空军的战略威慑能力。由于是导弹，核辐射屏蔽防护也可以弱化，从而使发动机的推重比大幅提高。

结束语

核能航空发动机一直受到世界航空强国的重视，从核裂变反应堆到量子核反应堆，经历了战略轰炸机、大型运输机、超声速巡航导弹、碟形空天飞机、无人机等多种不同用途的装备探索和试验研究。20 世纪五六十年代，基于常规核裂变反应的核能航空发动机，由于动辄几十吨的质量和屏蔽装置，确实极大地限制了其发展和应用。进入 21 世纪以后，随着量子核反应等新的核反应方式的发现以及新的战场环境对长航时无人机和远程巡航导弹的需求，世界各国对核能航空发动机的研究兴趣又被逐渐点燃，技术的进步给核能航空发动机的研究带来了新的契机。然而，目前新型核能航空发动机的研究仍处于起步阶段，只有较好地解决了核反应堆小型化和核辐射屏蔽这两个最为关键的问题，并且能对核污染进行有效控制，核能航空发动机才能真正走向实用化。 **航空动力**

(李小平，中国航发，工程师，主要从事航空发动机项目管理。)