

超燃冲压发动机——

高超声速飞行器的极速“密码”

■ 王奕阳 杨东霖

据外媒报道,俄罗斯军队在2025年9月举行的“西部-2025”联合战略演习期间,从巴伦支海成功试射一枚“锆石”高超声速导弹。导弹飞行速度超过7倍声速,从发射到命中目标用时极短,留给对手防御系统的反应时间仅有短短十几秒。

速度是决定飞行器能否突破防空系统拦截,顺利完成作战任务的关键。以“锆石”为代表的高超声速导弹7倍声速的突防速度背后,是超燃冲压发动机提供的巨大推力。超燃冲压发动机被视为高超声速飞行的最佳动力装置,在消耗同等质量推进剂的条件下,能够产生4倍于普通火箭发动机的推力,具有无可比拟的推进能力和战略价值。

极速动力之源

超燃冲压发动机,全称超声速燃烧冲压式发动机,是一种允许燃料在超声速气流中燃烧,从而产生动能推力的冲压式发动机。与涡轮发动机相比,超燃冲压发动机巧妙地利用飞行器在高速飞行时迎面气流的冲压效应,使气流在进入发动机后被自然压缩,省去了传统涡轮发动机复杂的压气机涡轮部件。当飞行器的速度达到5倍声速以上时,这种“压缩”效应极其明显,从而为超声速燃烧提供必需的高温高压气流。

超燃冲压发动机主要由3大部件构成:进气道、燃烧室和尾喷管。进气道对高超声速气流进行适度的减速增压,使其达到适合燃烧的状态;燃烧室内燃料与气流充分混合并燃烧,将化学能转化为热能。燃烧后的高温高压气体在尾喷管内进一步膨胀加速,并从喷口向后喷出,形成巨大推力。



发射瞬间的“锆石”高超声速导弹(俄国防部视频截图)。小图为“锆石”高超声速导弹搭载的超燃冲压发动机。



X-43超声速飞行试验机。

超燃冲压发动机能够支持飞行器进行高超声速飞行,相比之下,普通发动机存在推力极限,飞行器速度被限制在3倍声速左右。例如,20世纪60年代美苏开发的S-71“黑鸟”和米格-25战斗机,最大飞行速度均不超过3马赫。

究其原因,飞行器速度越快,需要发动机的推力越大,当飞行器速度超过3倍声速时,涡轮发动机已不能满足需求。相比之下,亚燃冲压发动机能够提供足够推力,适用于超声速飞行器。

当飞行器速度需要进一步增加到5倍声速以上,甚至达到7倍声速时,亚燃冲压发动机复杂的内部结构,使其无法克服高温、“热障”等难题。超燃冲压发动机通过允许气流在燃烧室内保持超声速状态进行燃烧,能有效克服这些问题,使得飞行器以更高速度飞行成为可能。

多国竞相研发

超燃冲压发动机的突出优势在于结构简单、重量轻、推力大等,尤其推重比达20以上,这意味着发动机性能极优,能够为飞行器提供更高的机动性和更强的加速能力,对实现快速打击、高空侦察和快速进入空间等军事任务具有革命性

意义。近年来,各军事大国纷纷投入超燃冲压发动机的研究,争夺这一技术制高点。

美国在超燃冲压发动机领域的研究起步较早,并取得一定成果。美国航空航天局旗下德莱顿飞行研究中心开发的极声速飞行试验机X-43,曾创下9.6倍声速的速度纪录。在美国空军研究实验室的支持下,美国洛克达因等公司研发的大推力超燃冲压发动机完成为期12个月的地面试验,验证了发动机在不同超声速条件下的性能。

俄罗斯在超燃冲压发动机应用方面走在前列。目前,“锆石”高超声速导弹已投入实战部署。这种吸气式高超声速巡航导弹从护卫舰、巡洋舰和潜艇上发射,最大射程1000千米,战斗部重达400千克,能以超过5倍声速的飞行速度突破防空系统拦截,主要打击大型舰艇集群和陆上高价值目标等。

近年来,日本在超燃冲压发动机领域取得一些进展。2022年7月,日本宇宙航空研究开发机构成功发射一枚小型火箭进行超燃冲压发动机飞行测试,标志着日本在高超声速武器研究领域迈出重要一步。

澳大利亚在超燃冲压发动机技术方面也取得重要进展。该国一家公司完成氢动力超燃冲压发动机测试,发动机功

率是涡轮发动机的数倍。

多国围绕超燃冲压发动机的研发态势,凸显出这种发动机在国防与航空航天领域的重要价值。在这场竞争中,谁先掌握这项技术并投入使用,谁将可能在以高超声速武器为主导的未来战争中占据主动权。

技术挑战较大

虽然超燃冲压发动机前景广阔,但其从实验室走向成熟应用仍面临着一系列技术挑战。

首要挑战在于超声速燃烧的组织与控制。超燃冲压发动机的燃料必须在以毫秒计的时间内完成喷射、蒸发、掺混、点火和燃烧等过程,其难度被形容为“在龙卷风中点燃一根火柴并保持稳定燃烧”。为此,需要对燃料的喷射方式、喷注器设计、与空气的掺混比例等一系列相关因素和条件进行极致优化。

其次是热管理问题突出。超燃冲压发动机在工作时承受极高的热负荷。当飞行速度达到6倍声速时,气流温度达1400摄氏度,发动机内部气流总温达2700摄氏度以上。这意味着发动机材料必须能够承受极端高温,同时还需高效的主动冷却系统。通常,燃料也被用作冷却剂,在进入燃烧室前先流经发动机的发热部件对其进行冷却。这就要求燃料不仅具有良好的燃烧性能,还要具有优异的吸热能力。如何设计高效的冷却系统,平衡冷却需求与燃料消耗量,避免热量过度堆积,是一个复杂的系统工程难题。

最后,机体与发动机的一体化设计是一大难点。在高超声速飞行条件下,飞行器的前体形状影响进入发动机气道的气流品质,后体形状关系到发动机喷管燃气的膨胀效率。因此,发动机与飞行器必须进行高度一体化设计,这涉及气动力、结构、燃料供应和冷却系统等多个方面,技术复杂度极高。

超燃冲压发动机技术是掌控临近空间和赢得快速打击优势的核心关键技术,其发展水平关乎国防安全和战略优势,而其成熟应用将深刻改变未来战场形态和空天运输模式。这场围绕“更高速度”的角逐,一直在路上。

前沿技术

超声波装置集水效率高



超声波集水装置模型。

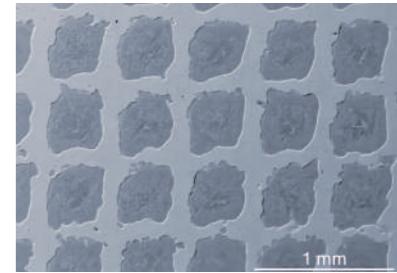
近日,美国麻省理工学院研究人员推出一种超声波集水装置,可提高大气水提取效率。

从空气中提取水分,是一种在干旱地区获取清洁饮用水的新技术。以往的这种技术多使用高性能吸附材料,如水凝胶等,捕获空气中的水蒸气,再借助太阳能加热,使水蒸发后再冷凝收集,这一过程耗时较长,集水效率较低。

麻省理工学院的研究团队提出一种新方法:利用超声波振动实现水分的快速脱附。他们开发出一种制动装置,将吸饱水分的吸湿材料放置在该装置上,装置以高频振动将水分子从吸湿材料中“摇”出。这种方法只需几分钟就能完成水分回收,而传统的加热方法往往需要几十分钟甚至更久。

该装置由小型太阳能电池供电,电池兼作传感器,在吸湿材料吸饱水分后自动触发装置进行提取。这样一天之内就能多次循环进行“吸水-脱水”制水过程。

新型复合材料耐高温性好



新型金属复合材料的显微图像。

受钢筋混凝土结构的启发,多伦多大学的研究团队开发出一种轻型高强度金属复合材料,其耐高温特性突出,有望成为航空航天等高端制造领域的新材料。

新型金属复合材料的微观结构,借鉴了钢筋混凝土结构设计。它以钛合金细杆作为“钢筋”,并用3D打印技术制作成型;采用微铸造工艺将铝、硅、镁合金填充至“钢筋”骨架之间,并混入氧化铝微粒和硅纳米颗粒,这种设计使金属复合材料兼具高强度与耐热性。

实验数据显示,在室温条件下,这种金属复合材料的强度是普通铝基复合材料的4至7倍,在高温条件下仍保持较高强度。其性能表现接近中等强度钢材的水平,但密度仅有钢材的1/3,达到了“减重量不减强度”的设计目标。新型金属复合材料的这种特性使其适用于航空发动机、火箭推进系统等对重量敏感且需经受高温的部件的制造。

双阳离子电池续航力强



研究人员与双阳离子电池模型。

爱尔兰利默里克大学的科学家研发出世界首款双阳离子电池,通过锂钠离子协同工作,使电池容量和稳定性得到大幅提升。

该电池采用锂/钠双阳离子电解质和锗纳米线活性材料,利用双阳离子合金化机制使锂离子在电解质中充当“容量增强剂”,为钠离子提供超强动力,同时保持长期稳定性。该电池容量较现有钠离子电池提高一倍,同时减少了对锗等高成本材料的依赖。在完成1000次以上稳定的充放电后,电池容量仍保持80%以上。

这种新型电池适用于单兵便携式电子设备、电动汽车和无人机系统等,在提高续航的同时降低对供应链的依赖,增强持续作战能力与后勤保障韧性,为构建安全、低成本、可持续的战场储能体系提供新方向。

(沐宸)



导弹也玩“客串”

■ 西 南

上面这张照片中,一艘无人艇上配備固定式发射装置,搭载两枚AIM-9“响尾蛇”系列红外制导空空导弹。这种空空导弹出现在无人艇上,着实吸引了不少关注。

AIM-9空空导弹是20世纪50年代美国研制的一型近距红外制导空空导弹,绰号“响尾蛇”,也是世界上产量最大、实战应用最广的空空导弹之一。照片上的这两枚导弹是AIM-9“响尾蛇”的出口型号AIM-9P空空导弹,曾多次出现在近年来的地区冲突中。在弹药告急的情况下,这种空空导弹常常“客串”舰空导弹使用。

战术导弹在设计之初,都有明确的专属作战用途。不同作战用途的导弹,技战术指标差别很大,但在某些情况下,

仍然可以“客串”一把其他角色。

有不少导弹都曾玩过“客串”。以色列“长钉”-NL05反坦克导弹可以“客串”远程精确炮弹,美国“标准-6”防空导弹可以“客串”超声速反舰导弹和对陆攻击导弹。一般来说,在紧急情况下导弹“客串”可以解决燃眉之急,甚至起到扭转战局的作用。不过,导弹“客串”需要一定的条件。作战人员必须对所使用导弹的性能有充分了解,才能实现灵活应用。另外,导弹发射平台改变后,还需要解决发射环境、制导系统适配等问题。

导弹“客串”出场时,发射环境和交战环境都发生了改变,有些会直接影响导弹性能的发挥。例如,空空导弹原本从高速稳定飞行的战机上发

射,如今变成在摇摆起伏、充满盐雾腐蚀的海面低速平台上发射,这对导弹的发射装置、初始姿态调整等提出新的挑战。发射后的空空导弹需要在海面杂波背景下追踪低空飞行的目标,这对导弹的导引头和抗干扰能力也提出新的要求。

近年来,导弹“客串”成为地区冲突中交战双方的普遍做法。其背后不仅是发射平台的改变,还是现代战争走向融合、低成本和分布式趋势的体现。未来,可能会有更多导弹走上“客串”之路。

图文兵戈



激光无线输电技术为无人机输电(示意图)。