

高技术前沿

与烈焰共舞——

更快速度带来更大挑战

超声速飞行,会让空气发出刺耳的“尖叫”。高超声速飞行更是惊人,其速度最低门槛是5马赫,即5倍声速。然而,速度飙升的同时,带来了“热障”的困扰。

当飞行器破空疾驰时,剧烈的摩擦和挤压,将巨大的动能转化成了灼人的热能,这就是“气动加热”。普通金属在炉火中会变软,熔化甚至烧毁。在飞行器上,这种升温带来的后果更加致命:材料强度崩溃、结构扭曲变形、内部精密仪器被烤成废铁……俄罗斯“先锋”导弹某次试射过程中,因局部热应力超出材料疲劳极限,导致热防护层出现烧蚀损伤,影响了导弹结构的完整性。

高超声速飞行时,飞行器表面温度会飙升到1000~2000℃。更严峻的是,任务往往需要高超声速飞行器在这种极端高温环境下坚持数分钟甚至数小时,热量的累积效应考验着材料和结构的耐久极限。

超声速飞行产生的热量,主要来自空气与机身的摩擦。高超声速飞行则不同。当高超声速飞行器破开空气时,气流与飞行器表面不断纠缠,产生了3大塑造热流的关键现象:激波、边界层分离和湍流。它们如同3位手法各异的“火焰雕塑师”,共同决定了热量在飞行器身上的分布图案和灼烧强度。

当高超声速飞行器尖锐的前缘迎面撞上气流时,仿佛撞上了一堵无形的“高压气墙”,这就是激波。穿过这道激波,空气的温度、压强和密度直线飙升,将热流如高压水枪般射向飞行器表面。

在某些区域,紧贴飞行器表面的低速气流层会从表面“剥离”开来,这就是边界层分离。这种剥离会完全打乱原本相对规整的热流分布,在某些地方形成意想不到的“高热孤岛”,极易引发局部过热烧蚀。

湍流更是让热流变得难以预测。它的特性极其敏感,飞行器表面一丝微小的粗糙起伏或是几何形状的微小改变,都可能让它“性情大变”,让热流预测如同雾里看花。

高超声速飞行产生的高温是全方位的,几乎覆盖了整个飞行器表面。长时间炙烤会导致飞行器整体结构软化变形,材料性能迅速退化,甚至连其内部的电子设备也会受高温影响而失灵。此时,单一部位的“耐热垫”彻底失效。随着高超声速飞行器速度极限的一再突破,一场从飞行器的整体构型、热防护系统到内部热管理的全面“防火革命”已经刻不容缓。

与气流纠缠——

多重解困需要多领域协同

在高超声速的极端熔炉里,气动加热、材料性能与结构力学这三者并非各自为战,而是深度纠缠、互为因果,形成了一个危险的“死亡三角”闭环:气动加

据外媒报道,近日,法国首次公开了新型超声速核导弹ASMPA-R的清晰图像,其下一代高超声速导弹已在研制中。下一代高超声速导弹计划采用超燃冲压发动机,预计2035年列装。

不仅仅是法国,美国、俄罗斯、英国、韩国、印度等多个国家,都在持续推进各自的高超声速飞行器研制计划。

在人类科技发展的历程中,高超声速飞行器被很多国家视为未来科技竞争新的制高点。

不过,飞行器突破极限时,也伴随着堪称“火焰炼狱”般的终极挑战。想象一下,当飞行器以超声速在大气层边缘

或内部狂飙突进时,因高速气流引起机体表面温度急剧升高会产生一系列不利现象,科学家们称之为“热障”。在今年的中国科协年会上,有关专家围绕这道在高超声速时代演变得强度、广度和复杂性都呈几何级飙升的“新热障”进行了深入探讨。

这种“新热障”,既是横亘在高超声速飞行器发展前路的“拦路虎”,也让科学家和工程师们不断寻求新对策,释放出高超声速飞行器的更多潜能。

本期,就让我们拨开“热障”的迷雾,回顾与展望这场人类智慧与无形烈焰的巅峰对决。

高超声速飞行器如何突破“新热障”

■陈健 李金龙 本报特约记者 张照星



热将飞行器表面烤得通红,材料在烈焰中强度下降、刚度减弱,甚至发生烧蚀或微观结构劣化。于是结构开始变形、扭曲,或产生不稳定的振动。结构的变形又反过来改变了其周围的气流形态,从而再次影响气动加热的分布和强度,形成新的热流冲击。美国HTV-2“猎鹰”高超声速飞行器第二次试飞失败,就是因为高热流致使飞行器翼前缘多层碳布被烧毁,影响了气动性能,最终导致飞行器失控。

这种危险的相互作用,在具体材料层面体现更为惊人。比如陶瓷基复合材料,在持续高温下,其内部的微观结构会悄然变化,性能逐渐衰退。同时,气动加热带来的巨大热应力会在材料内部不断累积。当这股应力超过材料的承受极限时,微小的裂纹便会产生。这些裂纹如同堤坝上的蚁穴,不仅削弱了材料本身的强度,还成为高温气体向内侵袭的通道,进一步破坏热防护效果,危及整体结构安全。

又如金属基复合材料,高温下,金属基体会像黄油般软化,增强纤维或颗粒的性能也可能变化,再加上气动加热本

身的不均匀性,会导致结构产生极其复杂的三维变形,给飞行器的结构设计师和热防护工程师带来噩梦般的难题。

因此,要解开“新热障”的死结,绝非单一学科的独角戏。它需要气动热力学、材料科学、结构力学等领域的顶尖大脑深度融合,协同作战。一方面,要通过先进的计算机模拟,在虚拟世界中精确再现气流、材料、结构三者间的复杂“死亡探戈”;另一方面,还要在真实的地面试验设备中,将材料和结构投入模拟高超环境的烈焰熔炉进行严酷考验,才能为未来飞行器的设计提供理论基石和试验铁证。

与热障博弈——

多措并举解决热流之困

面对“新热障”,传统的被动防御,如航天飞机上使用的隔热瓦片,或者发动机叶片表面的热障涂层,渐渐显得力不从心。在应对高超声速新热障问题

上,中国、美国、俄罗斯等国均通过材料创新、主动与被动防护技术结合、系统集成优化等措施,不断提出自己的解决方案。目前,主要分为两条路径。

第一条路是主动出击。主动热防护的精髓在于“主动”二字,它不需要硬扛烈焰,而是巧妙地调节能量的输入或输出,降低流向飞行器表面的“火蛇”。一种方法是借鉴生命的循环系统,让冷却介质在飞行器外壳或关键结构的内部管道中循环流动。冷却介质在流经高温区域时,像人体血液循环带走代谢热量一样,带走气动加热产生的热量。另一种方法是部署强大的“热量海绵”。利用热沉材料自身巨大的热容量,在短时间内将大量热量储存起来,延缓表面温度的急剧攀升。给飞行器关键部位装上这种“热量海绵”,就能为其他防护措施赢得宝贵的响应时间。英国“佩刀”发动机提供了一种主动冷却的创新方案。其通过高效预冷却器,能在0.05秒内将吸入的1000℃空气降至140℃。英国2016年公布了基于“佩刀”发动机技术的高超声速飞机概念。

第二条路是被动防御。被动防御的核心在于充分利用材料本身的性能。科学家们对材料的探索从未止步:陶瓷基复合材料以其卓越的耐高温性能一直是主力军。科研人员不断优化其配方和制备工艺,致力于提升其抵抗高温氧化和抵御冷热剧变的能力。碳-碳复合材料以其轻质高强的特性,在超高温温度区表现出色,科学家们希望赋予其更强的抗氧化能力。美国X-51A高超声速飞行器采用了碳-碳复合材料+超高温陶瓷涂层,在高超声速条件下能保持结构完整。

目前,智能热防护材料是材料科学的前沿研究热点。它们的设计目标是根据外界热流或温度的实时变化,自动调整自身的关键热物理性能——比如在温度骤升时减少热量向内部传递,或者把更多热量以红外辐射形式散发出去,实现动态的、自适应的热防护效果。

单纯做到完美的热防护,并非科研人员的最终目的,他们希望热防护结构不仅能挡住烈焰,还要身兼数职,如承受载荷、透射电磁波甚至隐身等。这便需要科研人员精心设计材料的微观结构和巧妙布局功能层,从而提升飞行器的整体性能。今年11月,国防科技大学研究团队在《自然·通讯》刊文称,他们成功研发出一种基于超表面的多功能复合材料。该材料可以在1000℃的高温下,吸收从2GHz到12GHz的超宽带雷达波。

随着对“新热障”本质认识的不断深化,飞行器热防护系统的设计理念也正在经历一场深刻的范式革命——从“头痛医头、脚痛医脚”的单一性能优先,转向了全局统筹、多学科协同的系统优化设计。这是一个漫长而曲折的过程,未来仍需“上下求索”的持续创新。

图①:2025年9月3日,纪念中国人民抗日战争暨世界反法西斯战争胜利80周年大会在北京隆重举行。这是高超声速导弹方队接受检阅。

图②:韩国新型高超声速空对地导弹。

图③:印度BM-04高超声速弹道导弹。

资料图片 供图:高超

热点追踪

11月初,我国第42次南极考察队搭乘“雪龙2”号起航,甲板上的“雪豹”特种载具、全地形车整装待发。这些驰骋冰原的“战车”,都属于极地特种载具。它们将在极地冰、雪、海等复杂场景中,完成运输、科考、救援等各类任务。

极地环境的残酷,远超我们的想象。零下几十摄氏度的低温会让普通机油凝固、轮胎变脆、电池失效,甚至金属都会收缩变形;冰面看似平坦,实则暗藏裂隙,有的深达数百米,一旦陷入就是灭顶之灾;强风暴能在数小时内掩埋车辆,车辆一旦出现故障就极其危险;还有一点非常重要,极地生态脆弱,传统装备排放燃油破坏环境,这又给技术加上了“环保”的限制。

极地特种载具的发展,就是一部“与极端环境对抗”的进化史。美国1939年研制的“南极雪地巡洋舰”一到南极就陷进雪地,只能以倒车行进的形式勉强“移动”了148公里。直到二战期间,苏联为寒冷战场环境研发的NKL系列雪地摩托才让极地探险迎来突破;苏联航空工程师跨界设计,把航空发动机的低温启动技术移植过来,解决了极寒条件下车辆“打不着火”的难题。历经多项技术改造,极地载具才最终实现从“能启动”到“能实用”的转型。

随着科考需求升级,极地特种载具需要走得更远。20世纪中期,苏联造出世界第一艘核动力破冰船“列宁”号。动力系统的跃升解决了极地航远的续航困境,让北极航线从“季节性航道”变成“常年通道”。

从早期由国外进口极地装备,到如今自主设计研发,我国用20多年的时间实现了跨越式发展。“雪豹”等自主建造的极地载具在冰天雪地里驰骋,这背后,是极寒材料、传动系统、可靠性设计的全面突破。

如今,极地特种载具正在迈向“更智能、更环保、更精准”的新阶段。极地冰裂隙的探测曾是致命难题,现在无人机搭载激光雷达,能低空飞行绘制高精度冰面地图,让危险无所遁形;传统燃油载具的排放会破坏脆弱生态,太阳能+锂电池的组合,利用极昼充电实现“零碳”巡航;科考不再需要队员带着设备奔波,模块化载具快速变身移动实验室,无人车自主规避障碍、采集样本,甚至组成

极地载具的进化之路

■吴启隆 肖磊

“无人小分队”协同作业,把数据实时传回科研中心。各国的发展路线也呈现鲜明特色:俄罗斯靠核动力破冰船解决北极航道的通行问题,北欧轻便灵活的小型雪地载具适配短途作业……这些差异本质上都是技术对不同需求的精准回应。

极地特种载具的进化史,是人类用技术对抗自然的艰难历程,也是人类认知自然、敬畏自然的过程。每一次技术突破,都不是为了“征服”极地,而是为了更温和、更深入地了解地球冰封的秘密。



12月5日,“雪龙2”号(前)在为“雪龙”号破冰引航(无人机照片)。 新华社发

普通集装箱“变身”导弹发射平台

■宋爱民

趣问·新知

近年,在珠海航展、阿布扎比国际防务展、欧洲防务展等多个国际防务会展中,集装箱式导弹引发国际社会的关注。传统导弹系统往往需要专用发射车和庞大保障设备,而集装箱式导弹则将导弹及其发射控制系统高度集成并封装进标准集装箱内。

普通集装箱要想“变身”为导弹发射平台,一共需要几步进行改造呢?

首先,普通集装箱通常并不具备长期储存精密武器的条件,要通过改装使其具备密闭隔绝、恒温恒湿的能力。为此,工程师常以宽温域特种橡胶作为核心密封材料,将集装箱变为接近密封的压力容器。集装箱内充满了惰性气体,防止导弹金属部件氧化。主动控制系统的使用,则能在外部环境温湿度变化时,将箱内温湿度保持在理想范围。

满足储存条件只是第一步,实现箱内热发射才是关键。标准货运集装箱只需考虑运输中承受的颠簸,而导弹点火发射时产生的高温高压燃气冲击,足以瞬间摧毁普通箱体。为此,集装箱式导弹需要“钢筋铁骨”与“耐烧铠甲”。由陶瓷基复合材料组成的最内层箱体,通过自身可控烧蚀带走大量热量;高性能陶瓷纤维隔热层阻隔尾焰热量传递;高强度合金钢骨架在保证箱体强度的同时实现轻量化……如此形成的抗烧蚀与结构强化材料体系,让集装箱化身“铜墙铁壁”。

导弹尾焰管理是实现箱内热发射的又一挑战。如果对导弹热发射时产生的高温、高速燃气流处理不当,会损坏发射装置甚至引发爆炸。目前常用的燃气流排出方式主要有公共排导和同心筒式两种。以美国Mk70有效载荷运输系统为例,其由Mk41垂直发射系统改造拓展而来,发射时,导弹燃气流先进入公共低压室,然后再排向大气。同心筒式则是将燃气流从内外筒之间的环形通道排出,例如英国“海狼”垂直发射装置,可实现燃气排导系统与发射箱一体化设计。

不过,这种高度隐蔽的发射平台也受限于其物理形态。标准集装箱的尺寸相对固定,这从根本上制约了其火力上限。要想在有限的空间内提升打击能力,只能在导弹的小型化、模块化和装载密度上寻求突破,而这与导弹的射程、威力等关键性能存在设计矛盾。

当前,这种“藏剑于匣”的武器设计理念正被逐步拓展应用,集装箱内或将集成火箭炮、攻击无人集群等其他武器装备。



俄罗斯某型集装箱反舰导弹系统。 资料图片

新看点

亚洲玉米螟,俗称玉米钻心虫,其幼虫在取食时,需要在坚硬的玉米茎秆内反复钻蛀。在此过程中,它的头部就显得特别“铁”,能在持续冲击与摩擦下保持完好。这一奇妙的生物特性为科学团队打开了材料创新思路。

近日,受到“铁头”的启发,中国农业科学院深圳农业基因组研究所研究团队联合大连理工大学,研制出一种超强耐冲击水凝胶。相关研究成果已发表于《先进材料》。

研究团队介绍,他们深入解析亚洲玉米螟头壳内层表皮的蛋白组成,发现这种“铁头”的特性源于其独特的多层级微观结构。这种由简单分子构建的层状结构,如同高效的“能量耗散系统”,可以将局部承受的集中冲击力迅速分散化

解,从而保护生物体自身。

由此,研究团队开始尝试在实验室中“复刻”这种具有优异抗冲击性能的仿生材料。他们巧妙地引导水凝胶等材料在微观层面形成高度有序的层状结构,最终成功研制出一种超强耐冲击的仿生水凝胶。

经测试,这种仿生水凝胶的抗冲击韧性可达23534焦耳/平方米,相当于让1吨重的石块从2.4米高的地方垂直落下,砸在1平方米地面上所产生的撞击能量。与传统水凝胶性能相比,仿生水

凝胶的抗冲击韧性提升幅度高达1000倍以上。

为验证这一材料的实际防护效果,研究人员将新型水凝胶安装在植保无人机的防撞支架上,在模拟果园环境的复杂通道中进行碰撞测试。结果显示,配备了仿生水凝胶的无人机在多次碰撞后仅出现短暂晃动,随即恢复稳定飞行,机体完好无损。相比之下,未安装该材料的无人机在碰撞后受损严重。

这项研究在多个领域都有广阔的应用前景。在智能农机领域,仿生水凝胶可

我国科学家研制出超强耐冲击水凝胶——

向昆虫学“铁头功”

■宣传杨 杨泽南