

编者按

发动机是交通、能源等关键领域的核心设备,是衡量国家综合国力和科技实力的关键指标。面对先进发动机研制的一

系列核心技术难题,国家自然科学基金委员会于2014年启动国家自然科学基金重大研究计划“面向发动机的湍流燃

烧基础研究”,组织我国科研工作者开展了一系列创新性研究,为实现我国发动机自主研发提供了强有力的科技支撑。

让火焰在湍流中奔腾

——记国家自然科学基金重大研究计划“面向发动机的湍流燃烧基础研究”

■本报记者 甘晓

湍流和燃烧是我们日常生活中常见的现象,在科学领域却是名副其实的世界难题。这些未解的科学难题制约了发动机性能的进一步提升。

“关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的。”发动机被誉为“工业皇冠上的明珠”,基础科学问题则好比镶嵌在这颗“明珠”中的“宝石”。面向国家对发动机的重大需求,中国科学家回到基础科学问题中,寻找自主创新的突破方向。

自2014年底以来,在国家自然科学基金重大研究计划“面向发动机的湍流燃烧基础研究”(以下简称重大研究计划)的支持下,我国科研工作者聚焦发动机湍流燃烧的基础性难题,为发动机可控燃烧技术发展奠定了坚实的理论基础。

2025年初,重大研究计划完成结束评估。重大研究计划指导专家组成员、清华大学教授姚强告诉《中国科学报》:“10年来,我国科学家围绕燃烧反应动力学和湍流燃烧学开展攻关,在理论和方法的源头创新上取得了重要突破。”

在专家们看来,这些基础科学方面的突破,有望推动形成先进发动机设计研制的“中国方案”。

攀登新的学术高峰

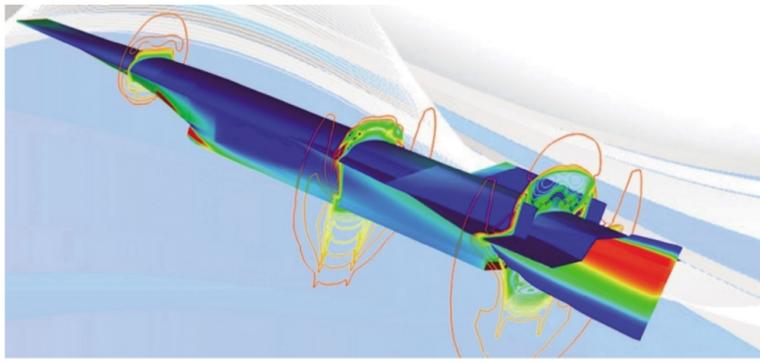
发动机是交通、能源等领域的核心设备,其研制技术难度极大。从原理上看,发动机的运行始于燃烧,燃烧把燃料与氧化剂反应的化学能转换成热能,热能又以膨胀的形式作用于活塞、涡轮等运动部件,从而转换成机械能。因此,作为发动机正常运行的基本条件,燃烧的关键作用不言而喻。

据了解,对于发动机而言,燃烧还需具备一些特殊条件。发动机中的燃烧要在体积有限的燃烧室内进行,而要在如此小的空间和极短的时间内产生巨大的热量,就需要向燃烧室内吹入大量空气。

这些高速进入燃烧室的空气具有典型的强湍流流动特征。与平滑、有序流动的“层流”不同,湍流中的流体不沿着固定路径移动,而是形成各种大小不同的旋涡结构,这些结构不断分裂、合并,使得流体内部发生强烈的动量、热量及物质交换。

在“湍流”的帮助下,燃烧室中的燃料和氧化剂充分混合,确保燃料和氧气之间接触面积最大化,化学反应尽可能充分,从而提高燃烧效率。

我国空气动力学专家认为,这个过程的核心



具有完全自主知识产权的超燃冲压发动机设计与评估软件。

科研团队供图

心基础科学问题背后便是湍流和化学反应的耦合机理。而由于对湍流和化学反应动力学这两个领域的基础科学问题都缺乏深入、系统的研究,该领域的发展受到了限制。

2005年前后,我国知名空气动力学专家、中国工程院院士乐嘉陵带领科研团队开展了一系列发动机研制的实验。他们曾率先尝试用数值计算的方法进行设计。当时,数值计算发展方兴未艾,处于科学前沿,是较为先进的方法。探索过程中,他们发现,仍然有许多机理问题没有解决。

这两大领域中的问题也是全世界的同行们都想攀登的学术高峰。当时,乐嘉陵年届古稀,当选中国工程院院士已有近10年时间,但面对新的学术高峰,毫不犹豫地选择迎难而上。

乐嘉陵曾在钱学森先生指导下工作,深受其基础研究思想的影响。他和科研团队一致认为,对基础研究的强调,从老一辈科学家开始就代代传承,已成为大家一贯的做法。

因此,科学家们相信,解决实际问题应当从更深层次的基础理论出发。从2010年起,他们开始酝酿,以资助基础研究主渠道的国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)作为牵引,推动领域内基础研究水平的提高。

2015年1月,重大研究计划正式立项,年近八旬的乐嘉陵担任指导专家组成员,中国工程院院士甘晓华“接棒”担任指导组组长。

在专家们看来,只有不断打磨代表着基础研究的“宝石”,才能让发动机这颗工业“明珠”熠熠生辉。

以应用为导向

经过多年沉淀与凝练,重大研究计划确定了三个核心科学问题,包括宽范围燃烧反应动力学、受限空间内复杂湍流和燃烧的相互作用,以及极端条件下燃烧及燃烧稳定性。

指导专家组在重大研究计划启动前就进行了详尽的策划,对领域内最需要突破的核心技术进行了可行性论证,吸收了国内许多高水平专家的意见,最终凝练成相关的科学问题。

据了解,三个核心科学问题之间有着“渐进”逻辑。第一个问题专注研究燃料化学反应本身,是最基础的范畴。“在重大研究计划实施之前,领域内尚未系统地开展过化学反应动力学研究。”姚强表示。

第二个问题进入工程范畴。科学家们将基础理论应用到发动机的各类燃烧室中,着眼于真实情况下发动机的燃烧规律,包括如何点火、如何把火焰联起来等。第三个问题则聚焦一些苛刻条件下的燃烧特性。

姚强指出:“在这些问题的研究中,指导专家组十分强调应用导向,要求研究成果面向发动机的应用。”据《中国科学报》记者了解,在重大研究计划实施初期,甘晓华曾在应用方的角度作了一次报告,展示了应用中面临的挑战,为后续指南设置和立项取舍设立了原则。

与此同时,重大研究计划紧密对接工程实际需求。针对国家相关专项需求,指导专家组多次召开航空发动机燃烧专题技术研讨会,并布置专项研究任务。

解决发动机湍流燃烧共性基础科学问题

如今,在宽工况范围及参数突变的极端环境下实现可控燃烧,已成为先进发动机研制的核心技术难题,这方面的突破将推动我国发动机技术迈向更高水平。然而,由于对极端压力、温度和流速等复杂工况下湍流燃烧基本规律的认知尚不充分,阻碍了发动机性能的进一步提升。

在国家自然科学基金重大研究计划“面向发动机的湍流燃烧基础研究”的支持下,我国科研工作者面向发动机湍流燃烧共性基础科学问题,在燃烧反应微观机制、湍流-燃烧作用规律和极端条件稳燃机理方面取得一系列理论创新。

在宽范围燃烧反应动力学方面,精确的速率系数是构建复杂反应体系燃烧动力学模型的基础。科研团队针对大分子燃料反应速率系数计算精度和耗时匹配难题,提出了分层理论(O-NIOM)和能量分块方法,建立了我国自主开发的全量子力学反应力场计算平台。

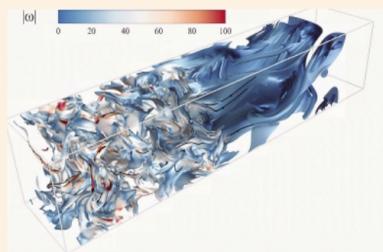
研究发现,燃烧活泼中间体主导链分支过程并影响燃烧性能。针对瞬态中间体定量测量难题,科研团队发展了高灵敏度光电质谱测量方法结合超声分子束取样技术,成功探测到火焰中超活泼中间体,如自由基、过氧化物等。这项研究破解了短寿命燃烧中间体定量难题,为低温氧化理论提供了直接的实验证据。

针对我国航空基础燃烧数据库的不完善问题,相关科研团队集成国内基础燃烧平台优势,构建了“宽范围航空燃烧性能宏/微观基础表征参数”数据库,形成了适用于国产航空煤油的宽范围化学反应动力学机理与数据库。

该数据库的建立使相关研究所需的数据从单个离散的数据点发展到1343个数据集,大于30000个数据点,为我国航空模型燃料动力学模型开发提供了验证数据。

同时,科研团队建立了燃烧反应网络的全路径预测模型,实现了发动机改性燃料燃烧反应网络的分子层级调控。

在受限空间内复杂湍流和燃烧的相互作用方面,针对湍与火焰结构定量表征,科研团队开发了



湍流火焰中的湍涡结构演化。

科研团队供图

湍流场方法定量表征湍流中湍与火焰的相互作用,首次实现湍流场中定量表征连续演化的湍流结构,为发动机湍流燃烧模式的定量识别奠定了理论和方法基础。

围绕湍流与火焰相互作用机制,科研团队建立了宽压力范围、可控湍流下,各向同性湍流火焰传播速度统一标准,揭示了火焰多级加速、火焰胞状结构生长/分裂对火焰传播速度的增强机制。该研究在湍流火焰传播速度方面取得了重要的理论进展,为湍流燃烧建模提供了可靠的数据资源。

研究还发展了化学反应和湍流协同控制的组分小尺度混合模型,基于空间分区自适应的雾化、蒸发、湍流混合和燃烧模型,显著改进了发动机湍流燃烧仿真预测精度。

在极端条件下燃烧及燃烧稳定性方面,科研团队发展了多种先进检测技术,实现了极端条件下相关燃烧室高重频同步非接触式测量,为发动机高压燃烧过程的高重频可视化奠定了基础。

针对超燃条件下点火和熄火难题,科研团队开展了数值模拟和实验测量研究,揭示了火焰可燃极限的影响机制,形成了多种类型的等离子体助燃方法,拓宽了先进航空发动机的稳定燃烧边界。

此外,科研团队还改进了碳氢复合燃料,降低了煤油的自燃温度和着火延迟,实现了可靠的火焰驻定和稳定燃烧。

打造完全自主的发动机先进数值仿真与测量体系

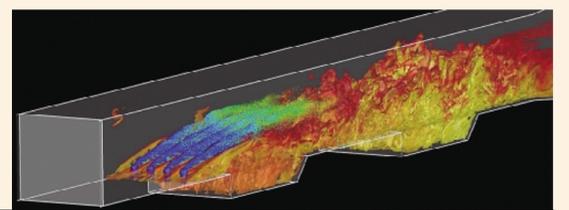
在先进发动机研发过程中,试验测量与数值仿真对于缩短研发周期、降低研发成本具有至关重要的意义。

试验测量是先进发动机研发过程中不可或缺的一环,是最终验证发动机性能、可靠性和安全性的重要手段,特别是在结构强度、振动特性、寿命评估等方面,必须通过严格的实物试验以确保发动机符合设计要求和相关标准。此外,在发动机研制阶段,通过获取发动机实际运行中的高质量数据,研究人员可以理解为发动机运行过程中发生的复杂物理现象背后的深层机理提供第一手资料,一方面为模型校验提供数据,另一方面为物理完善与模型优化提供依据。

数值仿真技术作为一种先进的计算机模拟手段,能够对发动机内部复杂的物理过程进行高精度的数值模拟,以获得详尽的内部流动、燃烧、传热等信息,帮助设计人员在初期发现潜在问题并进行优化,提高设计的“一次通过率”。同时,数值仿真可以模拟发动机在多种极端工况下的性能表现,为故障诊断和安全评估提供有力支持,提升发动机的可靠性和安全性。

美国国家航空航天局(NASA)在最新公布的《计算流体力学(CFD)2030年远景规划》中,将航空发动机燃烧流场高保真、高效模拟列为四个CFD应用方面具有重大挑战性和亟待解决问题之一。数值仿真技术终将促成发动机设计模式的转变,从依赖实物试验的“试验设计”到以计算机模拟为主的“预测设计”,将“以虚辅实、以虚补实、以虚证实、以虚代实”的作用贯穿燃烧室设计、试验、制造、服务保障等产品研发和发展的全生命周期。

在国家自然科学基金重大研究计划“面向发动机的湍流燃烧基础研究”的支持下,我国科研工作者搭建了燃烧反应数据共享平台,打造完全自主的发动机先进



航空煤油两相超声速湍流燃烧高保真数值模拟。

科研团队供图

数值仿真与试验测量体系,为我国发动机自主研发提供了坚实的支撑。

在数据共享平台与仿真、测试技术方面,科研团队建成了我国首个公益性公共技术平台——燃烧动力学平台CDS,包含9196个组分热力学数据、33033个基元反应动力学数据、1931个组分输运数据、73种燃料点火特性、25种燃料层流火焰速度、14种燃料燃烧组分浓度和35种燃料高温热物性。

此外,科研团队建立了独特的基础燃烧实验设计及模型优化平台OptEx,实现了基础燃烧实验数据库及未来可行实验域信息含量的高效评估,进而建立高信息含量正交实验数据库,与人工智能技术相融合,为快速发展并优化发动机燃料宽工况下的高预测性燃烧动力学模型奠定了基础。

科研团队研制了具有自主知识产权、工程可用的航空发动机燃烧室数值模拟软件GTCC,计算规模达到10亿网格/百万核,通过多型工程尺度全环燃烧室的验证考核,燃烧效率和总压恢复系数预测误差小于1%,燃烧室出口温度分布预测误差小于10%。

科研团队开发了具有自主知识产权、通过亿级网格/数十万核考核的超燃冲压发动机设计与评估软件系统AHL3D。

这一软件系统具备超燃冲压发动机设计、计算、分析和评估能力。

同时,科研团队突破了基于真实航空发动机燃烧室结构的单/多头部试验件10kHz高重频同步测量技术,以及0.8MPa条件下燃烧多物理场的粒子图像测速(PIV)和平面激光诱导荧光(PLIF)同步测试技术。

在支撑我国发动机自主研发重大需求方面,科研团队基于相关基础研究,构建了“柴油机油高充量密度-低温燃烧理论”,提出燃烧路径控制思想和可变热力学循环技术,改善了高性能柴油机瞬态特性,解决了低排放与高热效率的矛盾。

科研团队还开发了等离子体助燃方法和点熄火预测模型,应用于下一代航空发动机高温燃烧室的研制,极大拓宽了稳定工作边界,点火极限拓展达25%。

超音速条件湍流燃烧相关理论的建立,则解决了超燃冲压发动机高速流动下点火和长时间稳燃等关键问题,支撑了我国超燃冲压发动机在工程实用化研制中处于国际领先地位。

此外,科研团队还提出了无内柱燃烧室、阵列式小孔进气等原创方法,解决了连续爆轰发动机起爆难、控制难、稳定难的问题,有效支撑了连续爆轰发动机的工程转化应用。