

氢气微混扩散燃烧技术发展

Development of Hydrogen Micro-Mixing Diffusion Combustion Technology

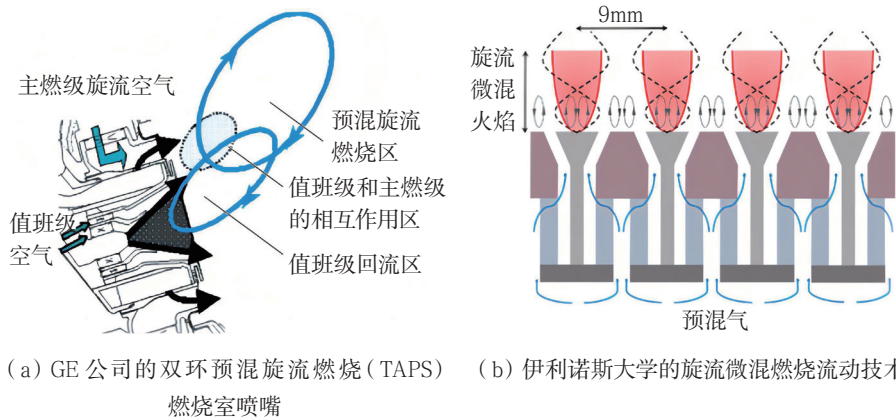
莫姐 刘一雄 / 中国航发沈阳发动机研究所 林宇震 韩啸 / 北京航空航天大学

“双碳”目标下，氢燃料因零碳排放和燃烧热值高的特点，成为航空发动机和地面燃气轮机领域最具应用潜力的燃料，而氢气微混扩散燃烧技术则是其实现广泛应用的关键之一。

目前，温室气体排放导致的气候变化问题已经引起了全球广泛关注。在各种碳排放来源中，航空业占据了2.5%，被认为是一个重要的碳排放行业。如果不采取控制措施，到2050年，全球25%的碳排放将来自航空业。减少航空和地面燃机的碳排放量是实现碳中和目标的主要途径之一，而碳排放与燃油消耗直接相关。因此，开展高效率推进技术、绿色新能源燃料和先进飞机气动构型等关键技术的研发变得迫在眉睫。为了真正实现航空业的净零碳排放，航空业已经进行了大量的燃料电池和混合电推进装置的研究，但由于电池能量密度的限制，目前这些技术大多只适用于中短途飞机，无法实现远距离飞行。相比之下，氢燃料燃气涡轮发动机具有较高的减排潜力和优势，在航空业和地面燃气轮机的低碳发展中有着巨大的潜力。

氢气微混燃烧技术概述

氢气是一种无碳燃料，且热值是航空煤油的3倍，并具有宽适燃范围的特点，可在与空气混合不充分的条件下燃烧，显著拓宽发动机稳定工作范围，利用该优势也可降低污染物排放。然而，氢气因密度低，在高速空气射流中很难与主流进行充分



(a) GE公司的双环预混旋流燃烧(TAPS)燃烧室喷嘴 (b) 伊利诺斯大学的旋流微混燃烧流动技术

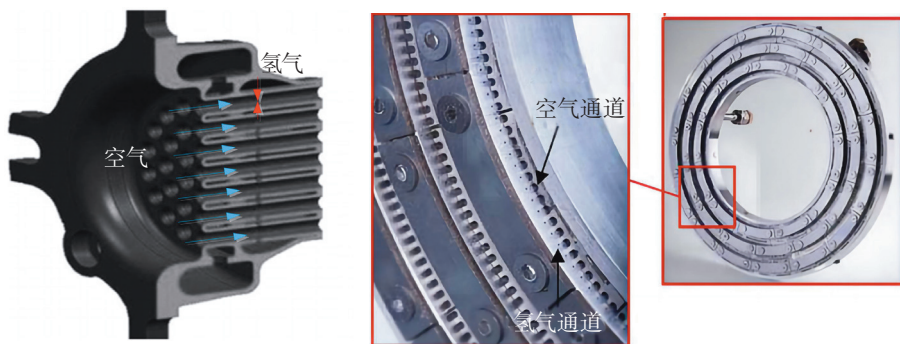
图1 传统燃烧室和微混燃烧室原理对比

的掺混，并且传统尺寸的燃烧室头部结构也难以实现氢气与主流的充分掺混，容易存在局部氢气浓度集中带来的高温热点问题，从而生成大量的氮氧化物。同时，氢气燃烧火焰温度高，空气中的氮气易发生氧化反应，也将促进氮氧化物的生成。这是因为，影响氮氧化物的核心变量是反应区温度，而氢气与空气的掺混质量又决定了反应区温度。

突破氢燃烧技术瓶颈是氢燃料燃气涡轮发动机发展的重要环节。现有研究广泛将大规模火焰细化为众多细小火焰，可以显著提高氢气与空气的掺混率，从而有效增强混合均匀性，进一步降低氮氧化物排放，如图1所示。在结构形式上，用阵列排布的微型混合通道代替传统旋流混合通道，这种微型混合通道

一般尺寸小于10mm，混合形式包括采用射流与横流的交互混合技术、旋流微混合策略、在通道内部实现同向流动混合、利用小“杯”结构引导径向及轴向入流形成旋流混合、通过多孔介质的交互作用以及螺纹回路的设计。这种微混结构所形成的微小火焰团，既实现了氢气和空气的充分掺混，又可缩短燃气停留时间，故进一步减少了氮氧化物的生成。

微混燃烧技术涵盖了微混预混燃烧与微混扩散燃烧两大类，如图2所示。在微混预混燃烧过程中，氢气与空气在微型通道内实现预先混合，随后通过统一的喷嘴共同喷射出来。这种预混燃烧方式的运用，能够显著降低氢气燃烧过程中氮氧化物的排放量。事实上，当产生的



(a) GE公司的多管微混预混喷射器

(b) 亚琛应用科技大学的微扩散喷射器

图2 微混预混喷射器和微扩散喷射器

热量相同时，采用氢气预混燃烧技术，氮氧化物的生成量可降至航空煤油燃烧产生的1/20。然而，氢气燃烧速度快，高于混合气的流动速度时会发生回火，若燃烧室进口参数高，还容易发生自燃。且氢气燃烧释热较为集中，燃烧过程中常发生热声不稳定性问题，而强烈的热声振荡可能对燃烧室结构造成损伤，这不仅影响发动机的正常运行，还可能缩短其使用寿命。微混扩散燃烧技术通过使氢气和空气各自高速流过专用的射流通道，并在微混

单元的出口区域边混合边燃烧来实现。与预混燃烧相比，扩散燃烧的优势在于能有效防止氢气燃烧过程中的回火现象，从而显著提升燃烧稳定性。尽管如此，这种燃烧策略可能会带来较预混燃烧更高的氮氧化物排放水平，这是一个需要关注和优化的问题，因此降低氮氧化物排放是突破氢气微混扩散燃烧技术的关键。

典型的微混扩散燃烧技术

典型的微混扩散燃烧技术以德国亚

琛应用科技大学为代表，自20世纪90年代开始，至今已有30多年的研究经验，并已将微混扩散燃烧室发展到第六代（见图3），已经完成了氢气微混扩散燃烧从原理实验到工程应用的历程，在污染物排放抑制中取得了较大的成效。我国在氢燃烧领域的研究处于仿真机理研究和原理实验阶段，且大多数基于预混燃烧模式，在微混扩散燃烧方面，中国航发沈阳发动机研究所与北京航空航天大学研究团队提出了一种蜂巢微混扩散燃烧结构。

第一代微混扩散燃烧室

第一代微混扩散燃烧室头部结构是将多个空气喷射管道聚集在一个喷嘴内部，氢气在喷嘴内部垂直于空气流动，最后与空气同向喷射。第一代微混扩散燃烧室的主要问题是结构复杂且局部氢气喷孔处存在高温热点。

第二代微混扩散燃烧室

第二代微混扩散燃烧室可形成反向扩散火焰，实现富油燃烧—贫

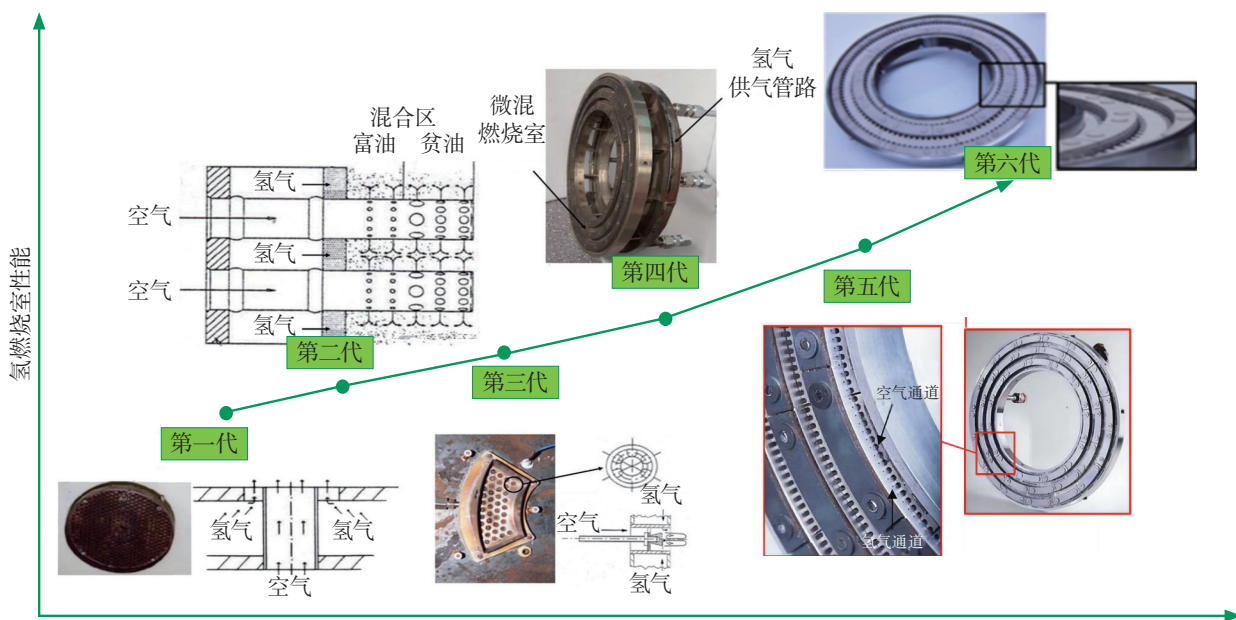


图3 亚琛应用科技大学微混扩散燃烧技术发展



油燃烧的两步燃烧，以保证火焰稳定，但氢气易在供气通道内分布不均匀，导致喷孔出口出现不规则的氢气层。第二代微混燃烧室在辅助动力装置（APU）GTCP 36-300上进行了集成验证，虽然氮氧化物排放显著降低，但该技术对头部结构的一体化完整性要求较高，且工艺和装配过程复杂，因此，燃烧室无法长久应用。第二代微混燃烧室在实际应用推广方面存在一定的局限性。

第三代微混扩散燃烧室

第三代微混扩散燃烧室为了降低氮氧化物排放并缓解壁面热辐射问题，将氢气以高速垂直方向喷射于来流空气中，整个燃烧室由多个单管燃烧室组成，而每个单管又由6个轴向空气孔和6个径向氢气孔组成，形成了基于钝体扰流的微混扩散燃烧，并在KHD T216环管燃烧室中得到了应用和验证。

第四代微混扩散燃烧室

第四代微混扩散结构研究与第三代同步进行，在第二代的基础上进行了简化，改为垂直喷射。整个燃烧室头部由6个喷注环组成，其上分布1600个氢气小孔。在GTCP 36-300的工作环境下，氮氧化物排放低于10ppm，但存在轻微的热声不稳定和喷注环热应力问题。第四代微混扩散燃烧室虽然在工艺和装配上仍有一定的难度，但具有较好的低排放潜力。

第五代微混扩散燃烧室

在第四代基础上，亚琛应用科技大学进一步做了优化设计，通过设计并应用多个微型的空气通道，结合精细的氢气微喷嘴，能够有效地降低在纯氢燃烧过程中氮氧化物的生成，形成了第五代微混扩散燃

烧室。其工作原理是，高速横向喷射的氢气与空气混合，在下游区域形成了稳定的内回流区和外回流区，这两个回流区之间的剪切层为火焰的稳定驻留提供了理想的环境。

微通道的作用一是提高空气流速，其穿透能力增强可绕过火焰进入外回流区，从而对壁面进行冷却；二是外回流区气流可以将相邻火焰隔开，防止大尺度火焰形成而增加氮氧化物排放。为了保证合适的回流区尺寸，在稳定火焰的同时，减少火焰与火焰的相互干扰，亚琛应用科技大学确定了最优空气流通阻塞比。同时，为了实现低排放燃烧，确定了氢气射流穿透深度的临界值，以保证火焰停留在剪切层内，并建立了低排放优化设计流程。

研究过程中，亚琛应用科技大学识别了微混扩散燃烧室的主要关键参数为孔间距、空气堵塞比和氢气孔径等。为适应不同的功率需求，可对氢气孔径、孔间距和喷注环进行适应性改变。例如，为增加热功率，可增加氢气孔径，从而孔数降低，优点是火焰尺度大、燃烧效率高、工艺性好，缺点是氮氧化物排放会不同程度地增加。冯克（Funke）在大气环境下试验研究了功率密度达 15MW/m^3 时的氮氧化物排放，在燃烧室进口空气温度为560K、设计点当量比为0.4的条件下，测取了火焰稳定性、火焰驻留特点和氮氧化物排放。结果表明，当能量密度增加时，火焰会发生移动现象，氮氧化物排放也增加；在整机环境下总压损失小于3%；通过增加火焰数量，减小火焰尺度，可进一步降低氮氧化物排放。

第六代微混扩散燃烧室

第六代微混扩散燃烧室与第五

代的结构形式基本相同，仅根据使用需求进行适应性改进。亚琛应用科技大学开展了掺氢燃烧技术研究，发现当氢气的孔径增加到0.84mm时，在GTCP 36-300整机全工况环境下，纯氢和掺氢比例为90%时测得的氮氧化物排放低于10ppm，并且未发生热声不稳定问题。自2014年以来，亚琛应用科技大学与川崎重工（KHI）合作，在2MW工业燃气轮机上应用并逐步实现商业化推广。在高压工况下，氮氧化物排放低于35ppm。

在欧盟的ENABLEH2项目的资助下，英国克兰菲尔德大学基于亚琛应用科技大学第五代微混扩散燃烧室构型开展了大量的改进和优化研究工作，系统地获得了多个关键参数对燃烧室性能和排放的影响规律，发现空气微通道形状和射流火焰之间相互作用会影响氮氧化物的排放水平。目前，该学校已经搭建了进气压力约达1515kPa（15atm）的氢燃烧试验平台，正在开展氢燃烧试验研究工作。

蜂巢微混扩散燃烧结构

中国航发沈阳发动机研究所与北京航空航天大学研究团队提出了一种基于蜂巢仿生的微混扩散燃烧室，在微混扩散单元的设计中，嵌入微型钝体，以扰动主流空气，从而实现氢气与空气的快速均匀混合，如图4所示。建立联合仿真优化平台，即Workbench和UG软件，构建了蜂巢微扩散单元和燃烧室出口温度分布优化设计的多流程耦合设计方法，获得了关键参数对流动燃烧过程影响规律（见图5）。同时，开展了阵列微管燃烧原理实验，发现所设计的方案氮氧化物排放较低，

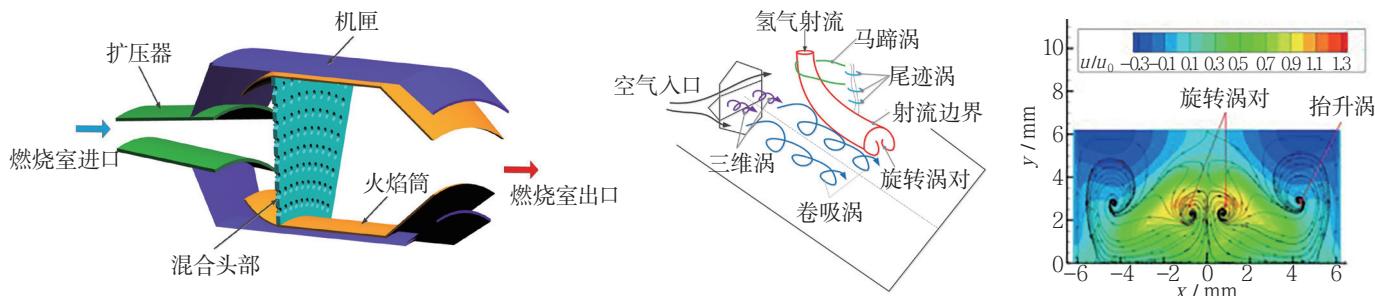


图4 蜂巢微混扩散燃烧结构和原理

且无热声稳定性问题，并已完成基于氢气微混扩散燃烧室的微发整机平台的集成验证，排放低、无燃烧振荡问题。

微混扩散燃烧面临的技术挑战

亚琛应用科技大学的横向射流扩散方案的核心设计理念是保持火焰驻留在剪切层内，通过有效控制氮气在高温区域的停留时间，使其降低至毫秒级别，能够显著减少氮氧化物的生成量。然而，这需要对氢气的射流穿透深度进行精确控制，此方面的研究工作尚未深入。

此外，为了解决回火问题，氢气孔径和空气通道尺寸一般较小，使得射流速度较高，随之带来的一个问题是发动机工况突变时，射流速度与火焰传播速度难以平衡，火焰容易脱火至容易被吹熄，导致发

动机熄火。另外，由于微混扩散燃烧室有大量的微混通道，使得管路布局复杂，增大了加工难度。

最后，热声不稳定问题仍是微混扩散燃烧需要关注的一个重要问题，当前的微混扩散燃烧大多基于原理试验研究，微混扩散在发动机和燃气轮机整机复杂环境下的热声稳定性问题仍需进一步研究和验证。

微混扩散燃烧未来发展趋势和应用前景

通过对微混燃烧技术挑战的细致分析，可以看到未来微混燃烧结构的设计是朝着更紧凑的方向发展。这样的设计可以增加燃料与空气的喷射速度，有效地避免回火现象的发生，减少燃气在高温区域的驻留时间，并显著提高混合气体的均匀性。在目前微通道混合技术的基础上，未来的技术发展将着重于进一步强

化旋流和扰流效应，以优化掺混过程。除此之外，结合分级燃烧技术也是一个可行的发展方向，通过分阶段精确控制氢气和空气的流量，调节混合区域的当量比和燃烧温度，这样的方法不仅有助于增强燃烧的稳定性，还能有效降低氮氧化物的排放。

在新能源推进系统领域，氢燃料无论是以气态还是液态形式存在，均是达成零碳排放目标的最具前景的候选能源之一，一直被视为是临近空间推进系统的首选燃料之一，也是推进系统热管理的重要介质。在全速域飞行范围内，氢燃料可提供极宽的燃烧稳定性，将使空中作战能力提高到多维度全方位的水平，提高发动机的性能和效率，在未来的空天作战中起到无可替代的作用。

结束语

突破氢燃烧技术是航空发动机和燃气轮机实现脱碳的关键，是“双碳”战略必不可少的一环，因此应深化氢气燃料科学的基础研究和工程实践，为实现零碳排放和低氮氧化物排放的氢能源动力系统的发展，构筑坚实的科技支撑。

航空动力

(莫妲，中国航发沈阳发动机研究所，高级工程师，主要从事航空发动机总体性能、先进燃烧技术研究)

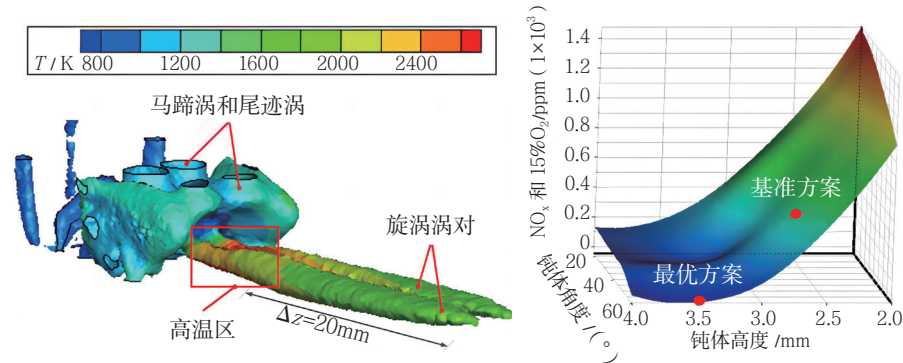


图5 蜂巢微混扩散燃烧三维流动和优化设计