

连续爆震发动机在民用航空领域的应用探讨*

Application Prospect of Continuous Detonation Engine in Civil Aviation

■ 闫锋 魏皓然 / 中国民用航空飞行学院

被视为高超声速飞行器理想动力的连续爆震发动机具有结构简单、热效率高等诸多优点，这使其不仅在军用和航天领域备受关注，在民用航空领域也具有广阔的应用前景。

燃烧的形式可以分为爆燃和爆震。前者是通常意义上的燃烧，过程中已经发生氧化还原反应的分子释放出能量，使临近的反应物达到足够的能量，从而持续引起化学反应；而后者在现实中最为常见的就是爆炸，其化学反应是通过爆震波来传播的，爆震波是一种由前导激波与波后化学反应放热耦合形成的一种超声速燃烧波^[1]。爆震的传播速度达到了千米每秒的量级，而爆燃的传播速度仅为米每秒的量级。目前，绝大多数发动机，无论是活塞式发动机、燃气涡轮发动机还是火箭发动机，都采用爆燃的形式，将燃料的化学能转化为内能。以涡扇发动机为例，其燃烧室中所发生的爆燃反应，由于火焰传播的速度只有米每秒的量级，因此，航空发动机对于进入燃烧室的来流有着很严苛的要求，并且为了保证燃烧室火焰的稳定，燃烧室也需要经过精细而复杂的结构设计。

连续爆震发动机概述

爆震发动机是一种采用爆震代替爆燃的发动机，可分为驻定爆震发动机、脉冲爆震发动机和连续爆震发动机。1960年，沃伊采霍夫斯基

(Voitsekhovskii)等最早提出了驻定旋转爆震的概念，此后美国密歇根大学的亚当森(Adamson)和尼克尔斯(Nicholls)等分析了旋转爆震发动机用于火箭推进的可行性。之后的数十年中，爆震发动机并未得到多少关注，直至近些年来，驻定和脉冲爆震发动机引起了研究热潮，但由于各自原理上的缺陷，目前已不再是关注的热点^[2]。而连续爆震发动机不仅可以搭配吸气式发动机，也可以搭配火箭发动机，甚至可以

实现变循环工作，则被认为是相当具有潜力的发动机。

连续爆震发动机的基本原理是：将爆震波限定在燃烧室内，而燃烧产物则排出做功。爆震燃烧较为接近等容燃烧，相比于采用等压燃烧，爆震发动机的熵增更小，拥有更高的热效率^[3]。此外，连续爆震发动机对来流条件的要求非常低，当来流速度为100~2000 m/s时，均可产生稳定的爆震波，从而可以大大简化结构，减轻质量^[4]。

目前，连续爆震发动机的燃烧室通常设计成环形，也有设计成圆筒形的^[5]，与航空发动机中常见的短环形燃烧室有相似之处，如图1所示。当充分掺混的燃料和氧化剂进入燃烧室后，就会在爆震波的作用下燃烧。爆震波在燃烧室内沿圆周方向传播，不会离开燃烧室，因此，连续爆震发动机也称作旋转爆震发动机(RDE)，爆震波的传播方向始终与来流方向和排气方向垂直，如图2所示。图中蓝色的区域是未反应的燃料和氧化剂，黄色部分是已燃烧产物。在爆震波沿周向传播时，已经反应的区域重新开始加注燃料。

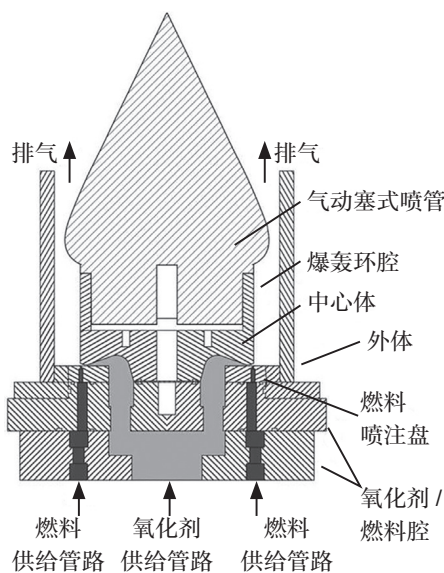


图1 连续爆震发动机的剖面图

*基金项目：民航局教育人才类项目(02520029)；中国民用航空飞行学院科研项目(J2014-31、J2018-57和Q2015-057)；中国民航飞行学院研究生课程建设项目(XKJ2019-2)

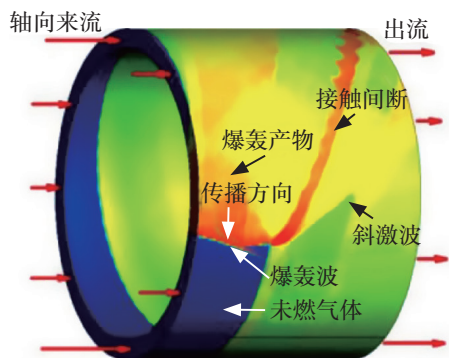


图2 爆震波在燃烧室内的传播

反应的产物从燃烧室的后部排出。

由此可见，连续爆震发动机在一定程度上可以视作一种新型燃烧室，目前多将其应用于火箭、冲压和涡喷发动机上。由于连续爆震发动机与现有的火箭发动机结构上有很大的相似之处，可以高效地将现有的火箭发动机技术移植到连续爆震发动机上，提高发动机的比冲和推力；同样，将连续爆震发动机应用于吸气式发动机的研究也在进行中，国防科技大学进行过将连续爆震发动机用于冲压发动机的测试；此外，美国进行过将连续爆震发动机用于涡喷发动机的测试，也取得了一定程度上的成功^[1]。

连续爆震发动机在亚声速客机的应用展望

相比于军用飞机和航天器，亚声速民机对于经济性、安全性和环保性更加重视。长期以来，民用发动机的改进都更着重于增加可靠性和降低油耗，而连续爆震发动机有熵增较小、热效率和比冲高的特点，在民航领域也具有相当的应用前景。

民航发动机提高经济性的措施主要包括增加压气机的压缩比、加大涵道比和提高涡轮前温度等。其

中，对传统的涡扇发动机而言，涵道比增加到10:1左右已是极限，采用齿轮传动技术的涡扇发动机的涵道比可以增加至15:1以上，但也不能无限制增大；在增加压缩比方面，目前罗罗公司最新的“超扇”（UltraFan）发动机已达到了70:1的压缩比，但高压压缩比也对压气机的设计带来了很大的挑战；至于涡轮前温度，也已经达到了目前材料科学所能承受的极限。

采用连续爆震发动机，或者在保持现有的结构下采用连续爆震的方式，如图3所示，可以大幅提升发动机的性能。因为连续爆震发动机有着自压缩的特点，发动机可以在较低的增压比下产生更大的有效功，

减小了压气机的负载，相应地减少了压气机的级数，进而降低对涡轮做功能力的要求^[2]；同时，连续爆震还有更高的热效率。除了性能以外，连续爆震发动机还有着更低的NO_x排放^[3]，对环境更友好。此外，传统的燃烧室需要减小空气来流速度，并对火焰进行稳定，防止高速气流将燃烧室内的火焰吹灭，这使得燃烧室的结构相比于连续爆震燃烧室而言复杂了不少。一般来说，在机械设计中，越简单的结构可靠性越高，在采用了连续爆震燃烧室后，燃烧室乃至整个核心机的结构可以简化，提高了发动机的可靠性。

连续爆震发动机在未来

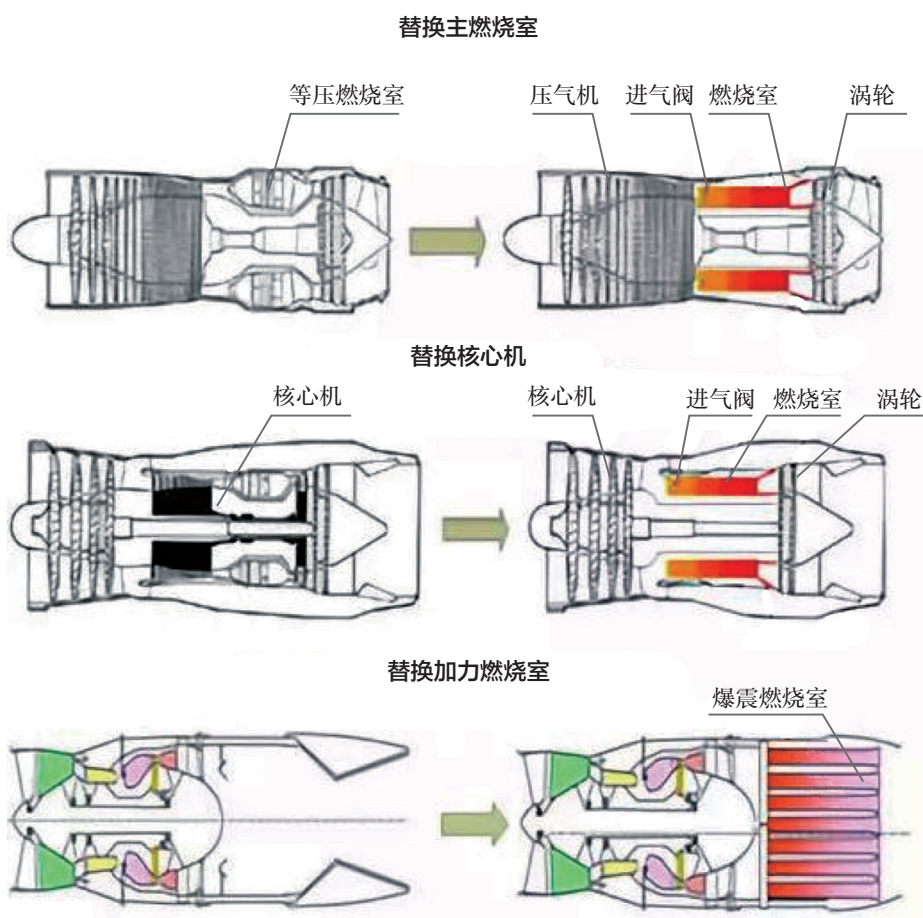


图3 连续旋转爆震发动机的应用

超声速客机的应用前景

高速飞行的飞机需要采用较小涵道比的发动机以降低阻力，因此，对于需要维持长时间超声速飞行的客机而言，采用涡喷发动机比涡扇发动机更合理，“协和”号和图-144超声速客机都采用了大推力的涡喷发动机。然而，涡喷发动机的热效率，尤其是在低速飞行时的热效率很低。以“协和”号飞机为例，由于超声速飞行时的噪声问题，被禁止在陆地上空以超声速飞行，仅在大西洋上空才能进行超声速飞行，而其在陆地上空亚声速飞行时耗油率很高，大约是同时代的波音747的两倍^[7]。如何满足超声速和亚声速状态对于动力的不同需求，是决定目前新一代超声速客机研制成功与否的关键之一。

以GE公司为Aerion公司的AS2超声速客机研发的Affinity涡扇发动机为例，这型发动机采用了类似于CFM56的核心机，低压转子则经过了重新设计，由两级风扇和两级涡轮组成，以便更好地适应超声速飞行。Affinity发动机的设计巡航速度为 $Ma1.4$ ，甚至比“协和”号的 $Ma1.7$ 还低^[7]，这是对不同需求妥协的产物——采用 $Ma1.4$ 的巡航速度可以在速度与航程之间取得平衡，并且AS2飞机也不是完全为超声速巡航而设计的，兼顾了亚声速飞行的需求，因此，Affinity发动机采用了对于超声速飞行而言非常大的涵道比(3:1)。

化解这一矛盾的另一种解决方案是采用变循环发动机，如采用可以在涡扇模式和冲压模式中切换的发动机，可以较好地平衡超声速与亚声速飞行对于动力需求的矛盾。但是，传统结构的发动机要实现涡扇/

冲压或涡扇/涡喷模式变循环是很复杂的。例如，SR-71侦察机便装备了J58涡喷/冲压变循环发动机，这台发动机可以在涡喷模式与冲压模式之间切换，但需要结构精密的进气道的配合；而GE公司为YF-23战斗机研发的YF120发动机，采用了复杂的机械结构在涡喷/涡扇模式之间转换。这些变循环发动机并不能满足民航飞机对经济性和可靠性的需求，而连续爆震发动机则为这一思路提供了更好的解决方案。

如前所述，连续爆震发动机具有结构简单且对来流速度要求很低的特点。根据仿真计算，当来流速度小于一定值时，爆轰转变为爆燃，退化为传统燃烧室；而当来流速度大于100m/s时，则可以产生稳定的爆轰波。若以连续爆震发动机为基础研制变循环发动机的话，可以大幅降低机械结构的复杂程度。以J58发动机作为对比，J58发动机实现冲压发动机模式的前提是，SR-71侦察机的进气道通过激波对来流气流进行了预压缩。一般来说，亚燃冲压发动机都需要搭配精心设计的进气道，通过激波进行压缩；而连续爆震发动机从原理上看，并不需要对来流进行复杂的处理，因此可以省去结构复杂的进气道。变循环发动机可以采用类似于J58发动机的方式，利用加力燃烧室形成筒状的连续爆震发动机，也可以像GE公司为F-35战斗机研发的自适应变循环发动机一样采用三涵道构型，将外涵道做成环状的连续爆震发动机。

若采用连续爆震发动机为基础研制变循环发动机来装备超声速客机或公务机的话，发动机可以在较大涵道比的涡扇发动机和冲压发动机之间切换，分别适应亚声速飞行

和超声速飞行的需求。

结束语

连续旋转爆震发动机是目前航空航天领域研究的热点之一，虽然其技术还远未成熟，但已经显示出很高的实用价值，目前的研究和应用研究主要集中于军事和航天领域，但连续旋转爆震发动机在民航领域也具有广阔的前景，相信在不远的将来，这项技术可以大幅提升民航飞行的安全性、经济性和快捷性。

航空动力

(闫锋，中国民用航空飞行学院，副教授，主要从事航空发动机性能工程与可靠性研究)

参考文献

- [1] 王健平,张树杰,姚松柏.连续爆震发动机的研究进展[J].宇航总体技术,2019(2).
- [2] 王健平,周蕊,武丹.连续旋转爆震发动机的研究进展[J].实验流体力学,2015(8).
- [3] 王健平,石天一,王宇辉,等.连续爆震发动机的实验研究[C].第十四届全国激波与激波管学术会议,2013.
- [4] 邵业涛,刘勤,王健平.旋转爆震实现任意速度入流的连续爆震发动机[C].中国力学学会学术大会,2009.
- [5] 王健平,姚松柏.连续爆震发动机原理与技术[M].北京:科学出版社,2017.
- [6] 王宇辉,何修杰.旋转爆震发动机的研究进展[J].南京航空航天大学学报,2017(6).
- [7] Norris G. Aerion closed in on supersonic AS2 program launch. Aviation Week Network[EB/OL]. (2018-7-3)[2021-9-2].<https://aviationweek.com/business-aviation/aerion-closes-supersonic-as2-program-launch>.