

旋转爆震发动机研制新进展

New Development Progress of Rotating Detonation Engine

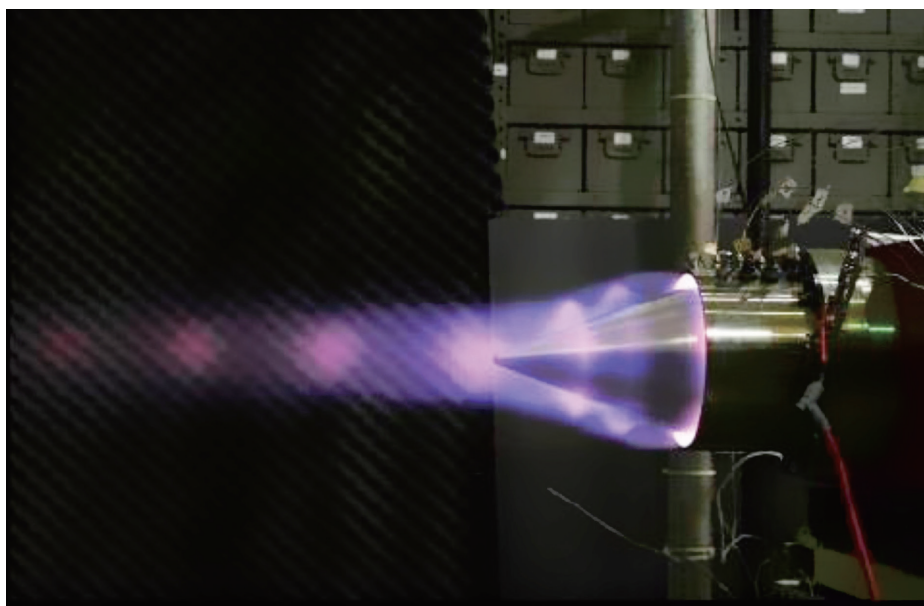
■ 秦亚欣 / 中国航发研究院

2022年4月，美国加利福尼亚州海军空战中心武器部对一种由旋转爆震发动机提供动力的新型战术导弹进行了测试，这表明旋转爆震技术已从概念向型号应用转化。

旋转爆震发动机（RDE）采用环形燃烧室，推进剂从燃烧室的封闭端喷入，产生一个或多个爆震波在燃烧室头部旋转传播，燃烧产物从另一端高速排出，从而产生推力^[1]。爆震燃烧过程接近定容燃烧且能够实现自增压，因此具有较高的循环效率，被认为是最有可能替代等压循环而成为下一代发动机的热力循环方式。旋转爆震发动机在航天领域可以在火箭和冲压两种模态下工作，在航空领域可以与涡轮发动机组合形成旋转爆震涡轮发动机，具有燃烧速度快、自增压、自维持、结构简单和效率高等优势。自20世纪60年代苏联学者提出旋转爆震发动机的概念以来，受到了很多国家的重视，美国、俄罗斯、欧洲、中国等国家和地区都开展了相关的关键技术与试验验证^[2-3]。

美国：从机理研究到工程应用已世界领先

美国自2010年开始，在空军科学研究办公室（AFOSR）、海军研究办公室（ONR）、国防预先研究计划局（DARPA）和能源部（DOE）的资助下，空军研究实验室（AFRL）、海军研究实验室（NRL）、航空喷气-洛克达因（Aerojet Rocketdyne）公司、国家能源部技术实验室（NETL）、得



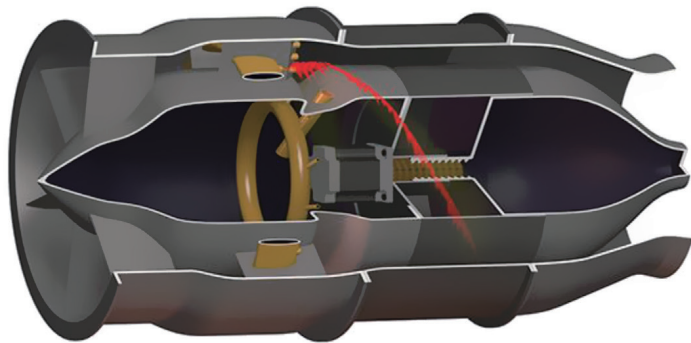
旋转爆震发动机试验测试

克萨斯大学阿灵顿分校和辛辛那提大学等研究机构都相继开展了旋转爆震发动机的理论、数值以及偏工程应用的试验研究工作，已经开始采用旋转爆震燃烧室替代主燃烧室的测试。

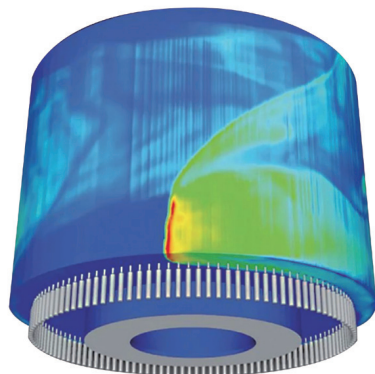
AFRL测试了将旋转爆震燃烧室集成到T-63燃气涡轮发动机的原理样机，试验发现旋转爆震燃烧比传统等压燃烧降低了 NO_x 排放，提高了燃烧热效率，展示了旋转爆震涡轮发动机的应用前景。

2020年年初，DARPA授予雷神技术公司100万美元用于研究以旋转

爆震发动机为动力的巡航导弹。几个月后，由AFRL主导的支持经济可承受任务的先进涡轮发动机技术（ATTAM）计划中，首次将旋转爆震发动机列为优先发展方向并拥有最高优先级。同时，AFRL授予普惠公司、GE公司各2.5亿美元，授予航空喷气-洛克达因公司2000万美元开展旋转爆震发动机的开发、验证和转化的关键技术研究，预计2026年完成。此外，雷神技术公司于2022年3月获得了AFRL一份地面演示验证项目合同，用于开发旋转爆震发动机，项目将由雷神技术公司



旋转爆震发动机内部结构示意图



旋转爆震燃烧数值模拟

下属的普惠公司、雷神导弹与防务公司和雷神技术研究中心共同执行。这份合同将遵循普惠公司鳄鱼工厂（GatorWorks）的快速开发原则，美国空军现在提出的是较为紧迫的现实要求，客观上也加速了普惠公司的工作进程。

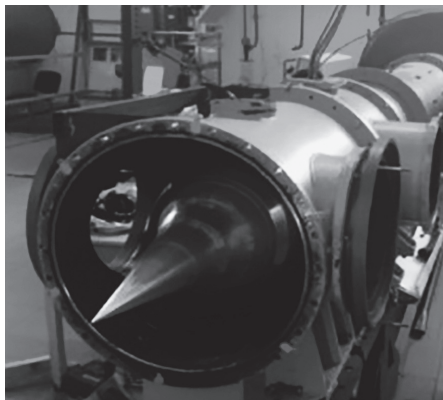
美国国防部（DoD）在2021年3月发布的一份简报称，一型直径约30cm的液体燃料旋转爆震冲压喷气发动机在2020年成功测试，并且为另一型直径约48cm的旋转爆震发动机测试打下基础。根据高性能计算现代化计划（HPCMP）支持的2022财年项目清单，在过去3年里，AFRL增加了4个先进旋转爆震发动机技术开发项目：一是可在隐身战斗机弹舱内携带的、速度为马赫数（ Ma ）3的空地导弹，采用液体燃料旋转爆震冲压发动机；二是采用固体燃料增压燃烧发动机的空空导弹；三是可替代涡轮发动机加力燃烧段的旋转爆震发动机系统；四是自由喷射测试项目。

与此同时，密歇根大学、普渡大学、亚拉巴马大学、辛辛那提大学等高校主要围绕旋转爆震机理问题开展理论分析、数值模拟和试验研究，主要包括燃料喷注与混合、

爆震波起爆、燃烧室内爆震波传播模态、爆震波自持传播机理、燃烧室内压力对上游的影响。总的来看，美国高校和科研机构分工明确、合作充分，在旋转爆震机理研究和工程化应用方面世界领先。

俄罗斯：全尺寸旋转爆震火箭发动机成功试验

2014年，在俄罗斯先期研究基金会支持下，由俄罗斯科学院西伯利亚分院、拉夫连季耶夫流体力学研究所和莫斯科航空学院共同组建了爆震液体火箭发动机实验室。2016年7—9月，该实验室在世界上首次成功对一台全尺寸的液氧/煤油旋转爆



俄罗斯旋转爆震冲压发动机

震火箭发动机进行了试验，获得了频率约20kHz的可稳定传播的旋转爆震波（大致为8000r/s的传播速度），并产生稳定推力。试验发现，相对于相同推力量级的常规火箭发动机，旋转爆震火箭发动机的推力提高了10%，比冲提高了10%~15%。结果充分验证了将爆震燃烧应用于火箭发动机的性能优势。

据俄罗斯卫星网、俄新社等多家媒体报道，俄罗斯战略导弹部队于2016年10月25日在俄奥伦堡州成功试射了Yu-71高超声速飞行器，最终抵达位于俄远东勘察加半岛的库拉靶场，实现了高超声速飞行，速度为5km/s（约 Ma 15），就该飞行器目前的飞行速度来看，很可能是以爆震发动机为动力。

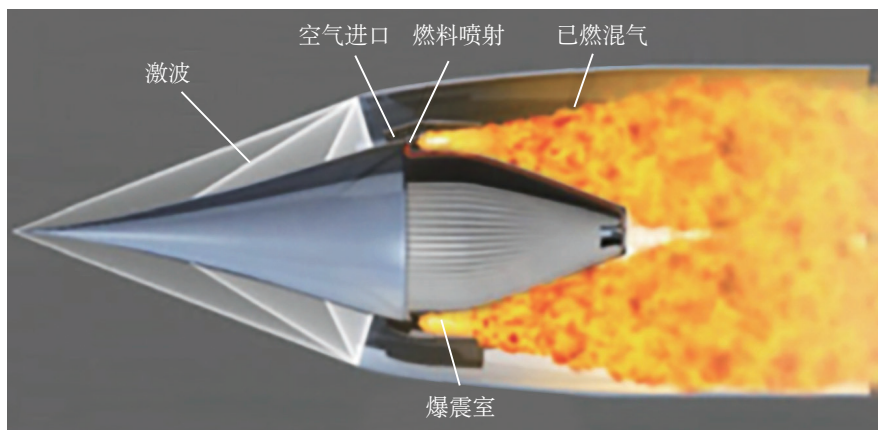
2017年俄罗斯科学院开展了旋转爆震冲压发动机风洞试验，自由来流的速度为 Ma 4~8，采用氢燃料的旋转爆震冲压发动机（直径为0.31m，长度为1.05m），最大比冲为3600m/s。

法国：基于冲压旋转爆震发动机的超声速导弹将列装

法国一方面与俄罗斯开展国际合作，



旋转爆震发动机试验台



MBDA公司旋转爆震冲压发动机

一方面自己独立研制，将旋转爆震发动机研究列入了法国国家科技研究中心的未来推进技术项目中。用高频压力频谱分析方法作为研究手段，证实了氢气/氧气，煤油/氧气、煤油/空气等多种燃料/氧化剂组合，在长度为100mm、内径为50mm的旋转爆震发动机中可以实现旋转爆震波的点火起爆和稳定传播，在以煤油/氧气组合的旋转爆震发动机上获得了2750N的推力。另外，还进行了发动机推力矢量调节能力、复合材料热防护等试验。2011年6月21日，MBDA公司公布基于旋转爆震发动机的“英仙座”超声速导弹系统概念，指出新型的冲压旋转爆震发动机大大提升了超声速导弹的性能。基于冲压旋转爆震发动机的“英仙座”超声速导弹预计于2030年列装。

波兰：验证了爆震涡轮发动机的可行性

波兰华沙工业大学对旋转爆震火箭发动机开展了广泛的试验研究。在不同尺寸燃烧室、不同燃料、不同氧化剂、不同来流总压和不同背压条件下开展试验，得到了长时间稳

定传播的旋转爆震波，在内直径为140mm、外直径为150mm的甲烷/氧气旋转爆震火箭式发动机燃烧室内获得了平均250~300N的推力，并计划研制火箭式的旋转爆震发动机，并将其应用到欧洲小卫星计划的卫星动力系统中。

在工程应用方面，波兰与日本、新加坡通过国际合作开展了旋转爆震研究，将传统的涡轴发动机GTD-350的等压燃烧室替换为旋转爆震燃烧室，验证了爆震涡轮发动机的可行性。

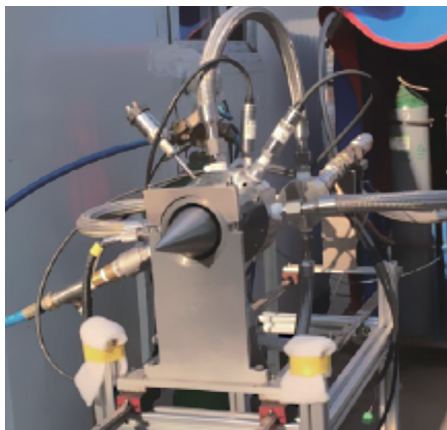
中国：研究成果急需向工程应用转化

中国航天科工三院31所、中国航天动力所等科研院所开展了大量爆震基础理论及旋转爆震发动机应用研究，北京大学、清华大学、国防科技大学、南京理工大学、西北工业大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学等高校进行了大量爆震燃烧基础研究，并对旋转爆震发动机的工作过程、爆震燃烧触发、爆震波稳定传播等基础技术形成了系统性的认识，诸多关键技术取得实质性进展，包括旋转爆震波起爆

与维持、旋转爆震波与来流的相互作用、液态碳氢燃料旋转爆震燃烧组织等，为突破旋转爆震涡轮发动机关键技术及工程化应用奠定了基础^[4]。

中国航天科工三院31所开展了火箭式旋转爆震试验，研究了液态碳氢燃料与空气的旋转爆震燃烧特性，探讨了爆震波的传播模式、爆震波的稳定性和压力回传等问题。在旋转爆震冲压发动机方面，31所开展了基于液态碳氢燃料的旋转爆震冲压发动机部件匹配研究，成功实现了旋转爆震燃烧组织，验证了旋转爆震冲压发动机原理的可行性。在旋转爆震涡轮发动机方面，开展了基于旋转爆震燃烧的涡轮发动机方案论证，包括主燃烧室替代方案以及加力燃烧室方案等。

北京大学开展了数值仿真和试验研究^[5]，对旋转爆震波的三维结构进行了数值仿真，利用粒子跟踪法对旋转爆震发动机的热力学性能进行了二维和三维分析，较为准确地确认了旋转爆震发动机的性能优势。此外，还对无中心柱的旋转爆震燃烧室开展了氢氧旋转爆震试验，实现了多个爆震波头的稳定传播，发



清华大学旋转爆震发动机试验台

现了旋转爆震传播过程中的低频振荡现象。

清华大学自主设计了新型旋转爆震冲压发动机，已于2022年1月完成了首飞试验。通过飞行试验获得了真实飞行条件下，工作环境参数变化对旋转爆震燃烧运行特性的影响，证实了旋转爆震燃烧技术的可行性，为这项技术走向工程化和产品化提供了重要的试验数据。清华大学还开展了双流道多环腔旋转爆震涡轮发动机的系统方案，提出了有效抑制反压回传的隔离段方案，实现了涡轮机械与旋转爆震燃烧室的兼容。

国防科技大学自主设计了多种不同类型的旋转爆震发动机，深入分析了旋转爆震波的稳定性，通过两级收缩热射流管，采用氢氧热射流切向喷射起爆方式，实现了旋转爆震波稳定起爆，分析了热射流的填充过程及起爆能量对旋转爆震波建立过程的影响。针对无中心柱的旋转爆震燃烧室开展了试验研究，获得了旋转爆震波的详细结构及传播模式。2017年，开展了自由射流旋转爆震冲压发动机的试验研究，采用的燃烧室外径为120mm、内径

为80mm、长度为660mm，燃料比冲为2510m/s。

南京理工大学针对环形和圆盘形两种主要燃烧室构型，开展了大量旋转爆震燃烧试验和数值研究工作，多种燃料均实现了旋转爆震燃烧；开展了旋转爆震燃烧室与涡轮导向器组合试验研究，探索了主燃烧室应用旋转爆震的可行性。

旋转爆震发动机发展思考

旋转爆震发动机相比传统涡轮发动机具有热循环效率高、结构简单、耗油率低等优势，使其在战斗机、无人机、高速飞机等领域有着广泛的应用前景，有可能成为本世纪新型动力装置：近期可作为无人驾驶飞机、靶机、引诱飞机、靶弹的动力装置；中期可作为高超声速飞机动力装置；远期可作为战略飞机、航天飞机组合动力装置。

旋转爆震发动机涉及的物理化学过程十分复杂，现阶段需要充分利用高校和研究所优势资源，开展高速高效喷注系统、稳定起爆与爆震波传播控制和旋转爆震燃烧组织研究，试验研究与理论研究同步进行，注重理论和试验数据的积累，进一步搞清楚旋转爆震燃烧机理。

总的来看，我国旋转爆震研究与世界同时起步，各个高校发挥其理论分析和基础研究的优势，在爆震机理研究方面开展了大量的基础研究，部分研究领域处于世界领先地位。由于缺乏统筹规划和目标牵引，再加上试验条件和测试方法的限制，参数性和指标性的研究成果较少，距离工程化应用还有一定的距离。根据飞机对高效率、高性能发动机的需求，从旋转爆震发动机

工程应用背景出发，采用产学研相结合的方式，协同技术攻关，快速提升旋转爆震燃烧技术成熟度水平，并注重技术成果转化，以涡轮发动机为基础，开展旋转爆震燃烧室与涡轮发动机的匹配验证工作，最终完成旋转爆震发动机产品研制工作，实现航空发动机自主创新和跨越发展。

结束语

为了满足动力装置更好的经济性和更优的性能需求，需要寻求新的循环或燃烧方式才能给传统涡轮发动机的性能带来新的突破。旋转爆震发动机相比于传统涡轮发动机具有循环率高、推力大、耗油率低、工作范围广、结构简单等优势，是未来航空动力重要的发展方向。

航空动力

(秦亚欣，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机战略与规划研究)

参考文献

- [1] 秦亚欣. 脉冲爆震发动机和旋转爆震发动机发展研究[J]. 航空动力, 2018(5): 7-11.
- [2] 李连波, 陈雄, 周省长, 等. 旋转爆震发动机与涡轮机的集成[J]. 科学与工程与技术, 2022, 20(26): 10551-10556.
- [3] 魏万里, 翁春生, 武郁文, 等. 涡轮导向器对旋转爆震波传播特性影响的实验研究[J]. 物理学报, 2020, 69(6): 168-171.
- [4] 冯子轩, 王爱峰, 姚轩宇. 爆震发动机研究进展[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2018, 31(4): 46-52.
- [5] 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, 29(4): 12-25.