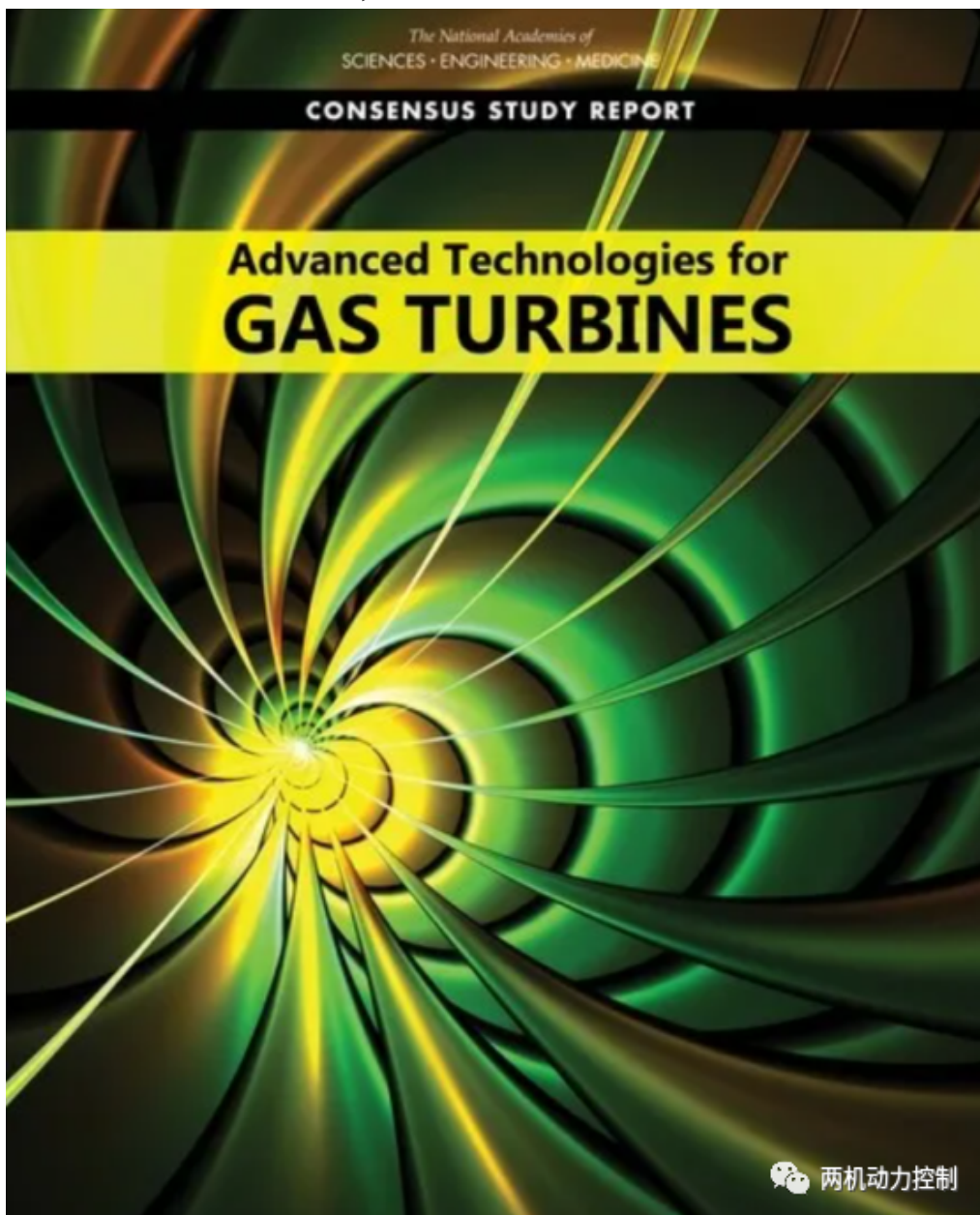


【行业观察】美国国家科学院公布的未来燃气轮机技术的优先研究领域

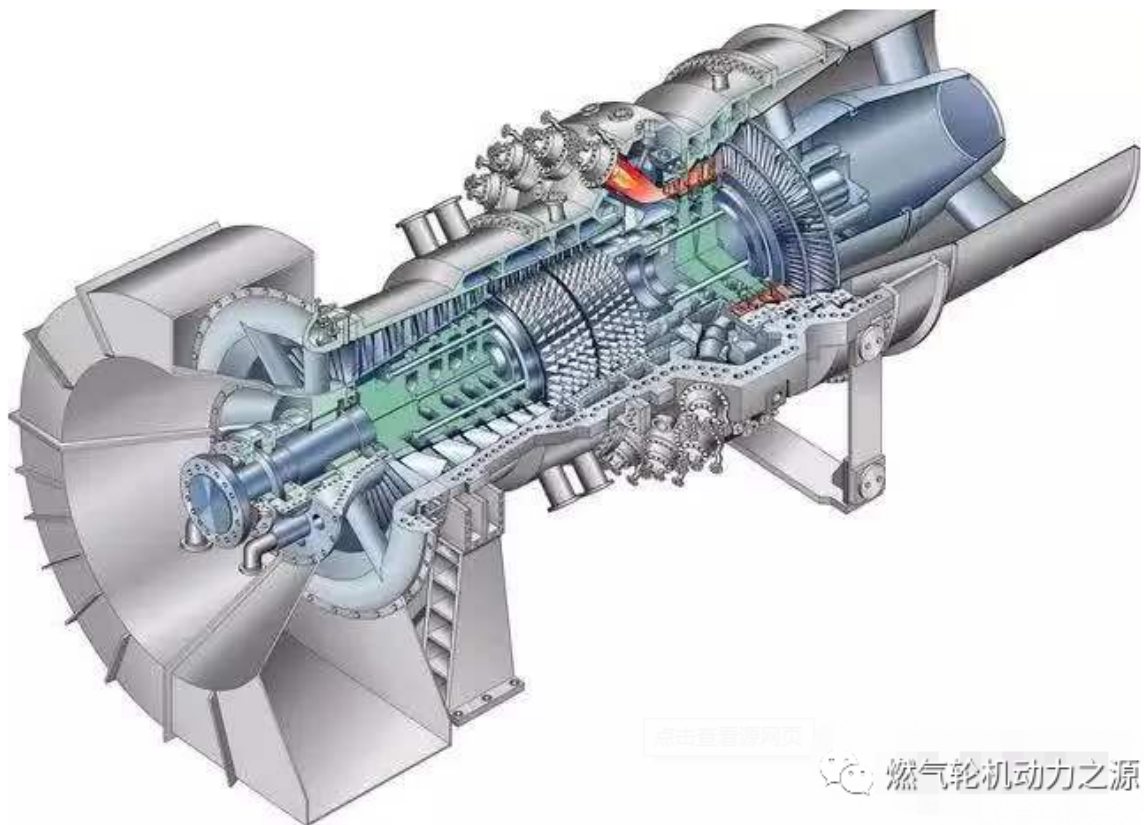
转发自：两机动力控制 2020年11月7日

导读：近期，美国国家科学院发布了受美国能源部委托完成的《先进燃气轮机技术》报告。该报告预测了到2030年燃气轮机产品和技术可能实现的发展状况，阐述了燃气轮机在发电、航空及石油天然气工业三个方面的应用，通过分析影响燃气轮机这些应用的全球领导地位、市场趋势和技术趋势，评估和预测了2030年全球燃气轮机发展格局，并在此基础上梳理出了相应的研究目标及相关的研究领域，给出了推荐的高优先级研究主题。



从全球市场发展趋势看，**预计到2030年及以后，燃气轮机的产值将会大幅增长**。对燃气轮机技术未来具有重要意义的主要全球市场趋势，包括对世界人口增长、能源安全、减少碳排放和客户概况等情况的综合评估。例如，随着城市化进程的加快，全球人口正在增长，从2015年的74亿增长到2040年预计的92亿。预计人口增长的90%以上将发生在非洲（48%）和亚洲（43%），因此，这些地区的国家对可靠的电力、能源供应和航空运输的需求将不断增加。

预计航空业未来也将强劲增长。在未来的20年里，印度的航空运输量预计将每年增长7%，中国和非洲的航空运输量预计将每年增长6%。这大约是北美和欧洲预计增长的两倍。鉴于预计的人口增长、个人和国家提高生活水平的动力以及国家缺乏传统的电力和能源基础设施，满足发展中国家的电力需求将是困难的。与发达国家相比，互联的输配电网的普及程度将降低。如果新的燃气轮机能够满足这些不断变化的市场的需求，那么它们将具有更大的竞争力。



点击查看更多内容

燃气轮机动力之源

能源安全除了人口变化外，能源安全的方法还将推动发电资产的多样化，以及发电资产的建设。液化天然气正在发展成为一种很像汽油应用广泛的商品，预计到2030年全球液化天然气贸易将翻一番。恶劣的天气和某些地区大型基础设施缺乏资金，也往往会促使人们需要更小的电网和更小、更可靠的燃气轮机，以满足电网可靠性方面日益增长的需求，并抵消许多可再生能源不可预测的可得性。另外，各国政府和国际组织等制定的低碳政策和标准，以及最终客户的偏好，都将大大减少温室气体排放，以应对全球变暖。这种低碳和可持续发展的趋势将激励人们用可再生能源取代传统的燃气轮机发电系统，它还将鼓励使用燃气轮机替代以煤或石油产品为燃料的发电设施。



燃气轮机技术环境的主要全球技术趋势则必须考虑廉价、大规模的计算能力、高度自治的系统、增材制造、人工智能和网络安全等方面因素。在全球范围内，发电量自1990年以来翻了一番多，在未来20年内，发电量可能增长50%以上。全球对天然气的

需求未来20年，石油和天然气可能会增长20%，其中中国占增长的三分之一。在航空领域，基本上所有大型商用和军用飞机都由燃气轮机推进系统提供动力。

在截至2017年的20年间，全球商业航空公司的乘客数量几乎增长了两倍，在未来20年内，预计将生产超过40000架新飞机。**鉴于上述趋势，在未来几十年内，无论是在国内还是全球，燃气轮机行业都将继续在发电、飞机推进动力和石油天然气行业中发挥至关重要的作用。**燃气轮机的运行效率、功率密度、可靠性和安全性都得到了很好的保证。在一种可能的情况下，过剩的太阳能或风能可以用来制造氢气，作为一种重要的能量储存机制，而氢气又可以在燃气轮机中燃烧来发电。燃气轮机为整个价值链上的石油和天然气行业提供动力。考虑到燃气轮机已被证明的效率、功率密度、可靠性和安全性，航空市场对燃气轮机表现出强烈的偏好。因此，在可预见的未来，燃气轮机将可能继续主导不断增长的航空市场。总的来说，**预计到2032年，全球燃气轮机年产值将从目前的约900亿美元增长到1100亿美元，其中航空燃气轮机约占总市场的85%。**

基于上述全球燃气轮机的市场需求和技术发展环境分析，在**性能改进、技术风险和应用范围**等三个维度进行分析研究，其中燃气轮机应该特别关注的性能改进参数如下：

- ▶效率-全额定负载-部分负载（跨越运行范围）
- ▶生命周期成本-设计和开发时间和成本-制造时间和成本-可靠性、可用性，可维护性
- ▶燃料灵活性•二氧化碳排放量
- ▶与可再生能源和未来电网的兼容性（仅用于发电和油气应用）

通过深入研究燃气轮机的性能改进、技术风险和应用范围等三个维度，可以给出燃气轮机在三个应用领域的研究目标：

01

发电燃气轮机应用领域的研究目标如下

- ▶ **提升效率。**将燃气轮机联合循环效率提高到70%，单循环效率提高到50%以上。
- ▶ **提高与可再生能源的兼容性。**减少燃气轮机的启动时间，提高燃气轮机在简单和联合循环中高效运行的能力，满足灵活的电力需求，以及与其他可再生能源和储能系统集成运行的要求。
- ▶ **减少二氧化碳排放。**尽可能将二氧化碳排放量减少到接近零的水平，同时仍然满足氮氧化物（NO_x）的排放标准。
- ▶ **提高燃料多样性与灵活性。**除使用传统燃料外，使发电用燃气轮机运行时能够使用高比例（高达100%）氢气或和其他各种成分的可再生气体燃料。
- ▶ **降低电力成本。**降低发电燃气轮机的电力平均成本，以确保这些成本在长期内与太阳能和风能系统的成本保持持续的竞争力。

02

航空燃气轮机应用领域的研究目标如下

开发先进技术，提高热效率，使所有飞机，包括窄体和宽体飞机的燃油燃烧比当今最好的涡扇发动机减少25%，同时降低军用飞机的燃油燃烧。

03

石油天然气工业燃气轮机应用领域的研究目标如下

- **提高燃料灵活性。**使天然气管道压气站（及其他石油和天然气应用）的燃气轮机能够与高比例（高达100%）氢气和其他各种成分的再生气体燃料混合运行。
- **基于状态的操作和维护。**发展基于状态的操作和维护能力，在不降低可用性或可靠性的情况下，将天然气管道压气站的不间断运行时间延长至3年或更长时间。
- **灵活的电力需求和效率。**为管道压气站（以及其他石油和天然气应用）设计燃气轮机，该压气站能够处理大负荷波动并在部分负荷下运行，其效率超过使用电动机驱动压缩机的压气站的效率。

为实现上述三个应用领域的研究目标，分析确定了10个优先研究领域，包括燃烧、结构材料和涂层、燃气轮机增材制造、热管理、高保真综合仿真和验证实验、非常规热力学循环、系统集成、基于状态的操作和维护、数字孪生及其支持基础设施、燃气轮机在燃气管道中的应用等。下面就分别就每个研究领域及其包含的研究主题进行解读和分析。

04

燃气轮机优先研究领域解读和分析

► 燃烧

开拓低排放燃烧系统所需的基础理论或知识，可以使该低排放燃烧系统可在高效循环所需的高压、高温环境中工作，包括恒压和增压燃烧系统；以及具有 unlimited 燃气轮机瞬态响应或转速（即在一系列功率设置范围内可接受地运行的能力）的运行特性，在一系列燃料成分范围内具有可接受的性能。

燃烧室对燃烧排放有重要影响，控制可使用的替代燃料（如低碳燃料）的范围，并对燃气轮机的运行极限有重要影响。早期的燃气轮机燃烧研究和开发侧重于燃料喷射技术，这种技术将产生稳定的火焰，而不会爆炸，确保完全燃烧，产生可接受的有害排放水平。

在过去20年中，氮氧化物（NO_x）排放限制的增加导致了燃烧设计方法的根本转变，越来越多地推动燃烧系统朝着预混合设计方向发展，并相应地改变了政府和工业界的重大研发方向。这导致了对火焰稳定性、排放、湍流燃烧和燃烧化学的重要研究。最近，对提高燃气轮机技术效率的更大兴趣推动了研究和开发。此外，人们对类似于定容燃烧的循环越来越感兴趣，例如脉冲爆震或旋转爆震发动机。这推动了爆轰极限、爆轰波动力学以及从爆燃（燃烧以亚音速传播）到爆轰（燃烧以超音速传播）的转变。最后，对燃气轮机系统脱碳和开发碳捕获系统的兴趣激发了人们对替代燃料（如氢和生物燃料）和氧燃料燃烧的兴趣。

针对本研究领域主要包括三个优先研究主题：

(1) 基本燃烧特性研究

主要研究控制宏观系统排放的基本燃烧特性，恒压和增压燃烧室的操作特性。

燃气轮机燃烧室设计人员感兴趣的燃烧相关特性包括：火焰稳定性：边缘火焰速度和极限边界条件、火焰速度和爆炸极限。

- **燃烧不稳定性：**强制火焰响应、反应自由剪切流对干扰的接受性和湍流火焰速度。
- **火焰位置：**火焰传播和自燃状态下的湍流火焰速度等。
- **排放：**高压动力学。
- **爆炸强度：**影响爆炸强度和速度的因素。

燃烧系统必须满足氮氧化物（NO_x）、一氧化碳（CO）和颗粒物排放规范，同时能够实现足够的负荷调节和可操作性

（即，通过避免关键限制现象，如回火、漏气、爆震极限、自燃和燃烧不稳等）。由于各种基本原因，燃烧室在排放、调低和可操作性之间有着内在的权衡，并且它们通常是为窄燃料成分规范。需要进行研究，以便更好地了解有关压力和温度下的基本燃烧特性和流体力学（例如湍流火焰速度和火焰对流动干扰的响应），以及开发对燃料成分不太敏感的燃烧模式。此外，这些问题中的许多涉及到燃烧和流体力学之间的耦合（例如，存在燃烧时涡流或横向射流的不稳定性等）。

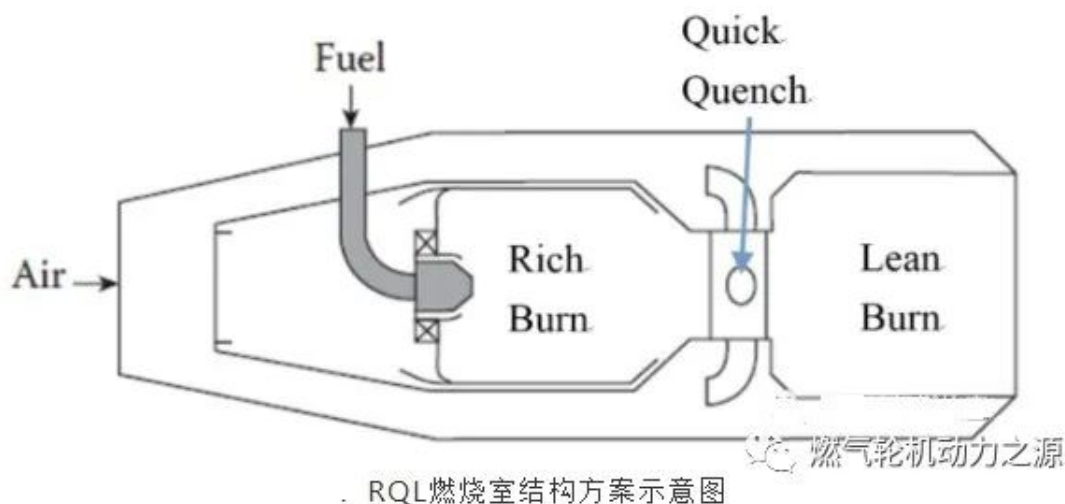
虽然围绕这一性质的一般问题的研究在燃烧界是司空见惯的，但在燃气轮机的相关边界条件下几乎没有充足的实践或数据，因为相关设施的维护和运行成本高昂，而且需要专门的人员来管理运行安全问题。例如，与一些提高效率的技术相关联的更高的温度和压力正在将燃烧物理推入通过自燃产生燃料消耗的燃烧状态。相比之下，燃料消耗和热量释放通常通过在较低压力和温度下运行的设施中的火焰传播发生。同样，由于在这些条件下遇到非常高的雷诺数，在期望的条件下进行大规模的计算变得越来越成本高昂。

这一研究主题的成果可以通过让设计师更好地了解影响关键设计决策的关键燃烧过程，例如火焰的位置、极限行为和排放，来加速正在进行的开发。准确预测这些行为而不是在测试期间测量它们的能力将减少不确定性，并使设计师能够更大胆地探索新的设计，而不是依赖具有已知试验结果和行为的衍生品。到2030年，本研究主题可以提高在感兴趣的条件下预测这些特性的相关知识的能力，为设计师提供燃烧特性的先验知识将显著降低风险，并使他们能够在设计阶段评估设计的有效性。本研究主题的技术风险是中等的，因为所需的实验是复杂和困难的，而且现有的研究基础设施很少。所需的数据并不存在，因为这些数据的获

取成本很高，而且只有相对较少的实验室具备执行这些数据的高压能力。第一原理计算同样非常昂贵。

(2) 在高温高压下减少有害排放的燃烧概念研究

过去通常的作法是在燃气轮机入口温度低于 $1500^{\circ}\text{C}/2800^{\circ}\text{F}$ 的情况下，通过燃料和空气的预混合降低了燃气轮机中的氮氧化物水平。然而最近，一些飞机发动机主设备制造商（OEM）采用了分级燃烧方案，如富燃、急冷、稀燃（RQL）。在这两种情况下，材料和冷却技术的进步导致涡轮进口温度升高，在此期间，即使有完美的预混合，也会产生大量的氮氧化物。此外，带有PGC的燃气轮机可能使用非混合燃烧概念和高局部温度，然后在爆炸后膨胀波中进行潜在的快速冷却或淬火。这种方法可能导致较高水平的氮氧化物、微粒、一氧化碳和未燃烧的碳氢化合物。当使用高涡轮进口温度和/或PGC系统时，需要新的燃烧模式来实现低氮氧化物排放。 NO_x 生成量与 NO_x 生成速率和燃烧室停留时间成正比。



因此，可以通过开发燃烧室来减少氮氧化物的产生，该燃烧室将氮氧化物的生成速率降至最低，和/或在保持足够的调节和操作特性的同时减少停留时间。例如，理论工作已经证明，与通常用于高效率地面燃气轮机的传统干燥、低氮氧化物燃烧室方法相

比，分布式燃料喷射可以将氮氧化物排放量减少一个数量级，只有当来自分布式燃料喷射的混合相对于反应迅速发生时。否则，与传统方法相比，分布式燃油喷射实际上会增加NO_x排放。需要研究开发出性能接近理论极限的可行系统。这一研究主题可以通过开发低排放燃烧的新模式来加速正在进行的研究。目前的设计基本上是旧设计的衍生物，技术集中在定制的预混料和最近的燃料轴向分段。新的研究可以集中在通过开发当前设计的高级衍生产品和根本上的新方法来进行扩展当前能力的方法上。

本研究主题可在2030年前将相关技术从技术成熟度TRL 1提升到TRL 6。如果没有额外的研究，设计界很可能会把重点放在当前设计的衍生产品上，而排除新的燃烧设计。发展燃烧概念，在高效循环中排放可接受水平的有害排放物。燃烧室可以在更高的温度和压力下工作，这将提高燃气轮机的效率。对于采用恒压燃烧热力学循环（如传统燃气轮机采用的布雷顿循环）或压力增益燃烧（PGC）热力学循环的燃气轮机来说，这是正确的。

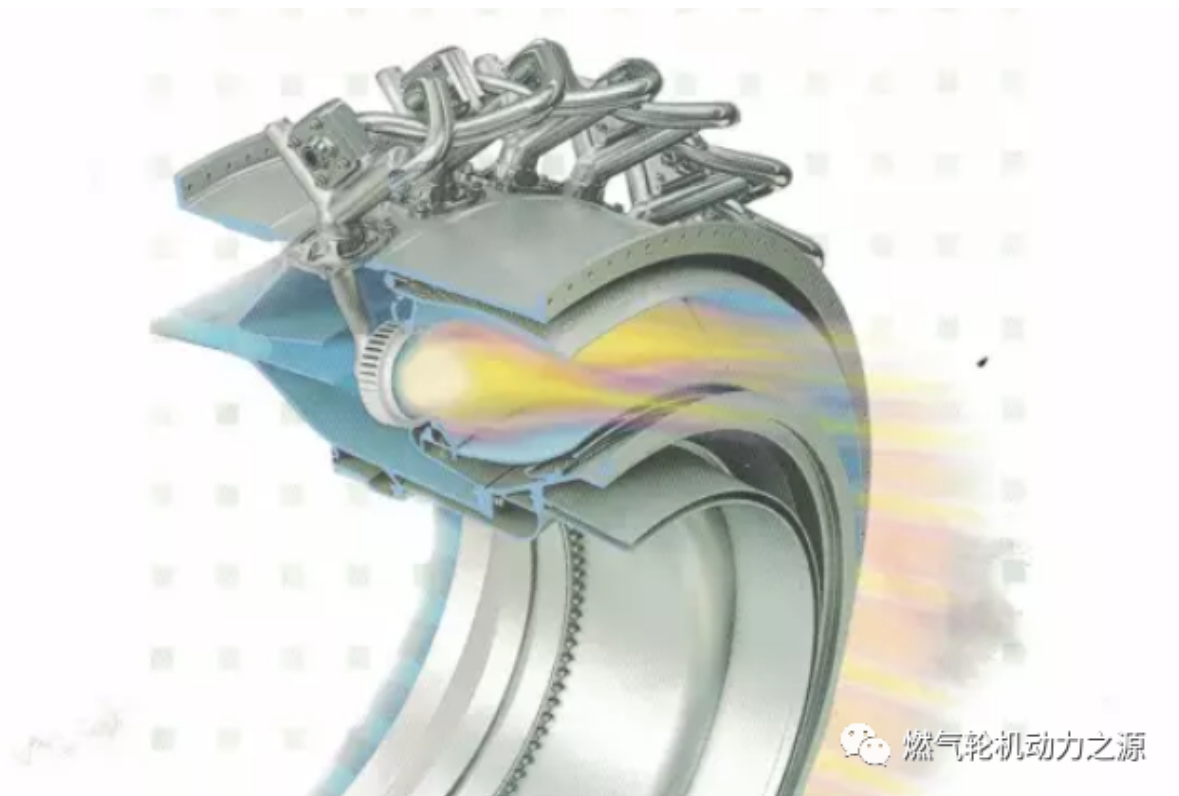
不幸的是，氮氧化物的生成速率随温度呈指数增长，并且也随压力增加而增加。此外，降低NO_x排放的潜在策略可能会增加CO或颗粒物排放。这是一个相对较新的挑战，因为早期燃气轮机设计中的条件使得通过确定的空气和燃料混合，在不增加氮氧化物的情况下提高效率成为可能。因此，解决这一挑战的工作很少。这一挑战对于燃气轮机应用也是独一无二的，因为在这些高温高压下，基本上没有其他燃烧技术平台。

本研究主题具有中等技术风险，因为在低NO_x燃烧系统方面的历史经验表明，在燃气轮机的可操作性、耐久性和排放方面存在重大的现场问题。尽管如此，理论工作已经证明，相对于目前单点燃油喷射的燃烧室，数量级的减少是可能的，因此朝着这些

限制的进展是可以实现的。此外，这些概念可以逐步部署，从少到多，实现氮氧化物排放的连续减少。PGC增加了技术风险，因为这些系统涉及到组件上的冲击载荷，引起了对必须连续运行数年而无需更换的组件的寿命和磨损的关注。这些技术将在诸如导弹或火箭等不需要很长寿命或检查间隔很长时间的应用中得到早期采用。这些应用的经验将为发电、航空和石油天然气应用的适当性提供重要的见解。本研究主题适用于具有氮氧化物限制的市场中涡轮进口温度高于1500°C/2800°F的所有燃气轮机应用。根据世界地理区域的不同，这些氮氧化物限制对发电、航空和油气应用的影响也不同。例如，发电通常受到最严格的监管。氮氧化物的限制在美国和欧盟是最严格的，而在其他地区则不那么严格。

(3) 燃烧室运行和性能限制研究

主要发展更好地理解 and 预测限制整体燃气轮机瞬态响应（例如，快速改变负荷以支持间歇性可再生能源）的燃烧操作极限、降低功率和适应可变燃料成分的能力。最近几十年的经验表明，关键的限制现象以意想不到的方式出现，造成损害、延误，并限制了燃气轮机可使用的燃料范围。由于需要平衡排放、调低、燃料灵活性和操作限制，在设计阶段进行了艰难的权衡，意外事件经常发生。例如，燃烧不稳定性是开发用于发电和航空的新型燃气轮机的最高风险之一，因为燃烧不稳定性通常在开发过程的后期甚至在交付给客户之后才会出现。提高预测燃烧不稳定性发生的能力将降低燃气轮机的总体开发风险。



燃烧系统对燃气轮机和联合循环电站的运行极限有着重要的影响，因为燃烧系统的主要极限现象有：燃烧不稳定、回火和自燃等。在压力增益系统中，它们还强烈影响热效率和性能的限制。这些都是非定常或瞬态现象，涉及火焰熄灭、火焰稳定性、非定常流动中的火焰动力学以及反应流的流体动力学稳定性。这些现象在燃气轮机燃烧界历来都有大量的研究，因为它们引起了重大的现场问题。尽管如此，预测这些现象的能力仍然不够成熟，以至于在现场或测试期间仍然会经常发生意想不到的行为。此外，解决这些现象至关重要，因为相关的运行极限强烈影响整个燃气轮机的运行极限和寿命。类似地，PGC系统，如旋转爆震发动机，已经在许多设施被证明是一个可行的概念，但这些系统的性能通常远远低于理论水平。

这一研究主题可以通过在瞬态响应和运行条件等方面扩大操作范围来加速正在进行的研究。特别是，如果能够开发出基本上不太容易出现关键限制现象或对操作条件、设计或燃料成分的微

小变化敏感的燃烧模式，将大大降低风险和成本。本研究课题可在2030年前将相关技术从技术成熟度TRL 2提升到TRL 7。

总之，基于燃气轮机的更广泛的需求，燃烧理论和技术的研究将成为未来燃气轮机技术发展和创新的最关键和核心的关注点。在不同应用场景和边界条件下，如何使燃烧更充分和获得更高效率，如对各种不同燃料（油、气及多相流等）燃烧机理现象的基础研究以及相应工程应用研究创新都提出了新课题和新挑战。

► 结构材料和涂层

该领域主要研究开发陶瓷基复合材料（Ceramics Matrix Composites, CMC）生产所需的技术，先进的计算模型，和先进的金属材料和组件技术，以提高燃气轮机的效率，降低其开发时间和生命周期成本。

从燃气轮机的开发使用开始，先进材料的研发就显得至关重要。第二次世界大战期间，由于热气流道材料的限制，早期喷气发动机的性能改进受到了严重的限制。英国格洛斯特（Gloster）飞机的动力来自于1941年首次实现飞行的惠特尔喷气发动机，它的优势在于使用镍基合金涡轮叶片，这种叶片可以采取不冷却设计方案。另一方面，德国著名的梅塞施密特Me262发动机由Junkers Jumo喷气发动机提供动力，由于无法获得镍基合金，因此只能使用钢合金材料的叶片，需要采取复杂而昂贵的空心叶片设计方案，内部冷却。为了提高燃气轮机的热气流道温度和热效率，高温结构材料、涂层和制造工艺的发展取得了重大进展。早期的燃气轮机发动机的热效率约为30%，而目前的燃气轮机发动机的热效率约为50%- 55%。

为实现更高的热效率和燃料燃烧目标，需要先进的高温技术来提高热气流道的温度。该研究领域包括三个研究主题：

- 陶瓷基复合材料（CMC）性能和经济性
- 基于物理基础的寿命预测模型
- 先进高温合金及部件设计

这三个研究主题的范围包括静态和旋转零组件。这些和相关主题的进展将大大提高燃气轮机的效率和耐久性。

01

陶瓷基复合材料（CMC）性能和经济性研究

要开发以低于当前成本制造的高质量碳化硅（SiC）纤维的加工方法，支持广泛应用于燃气轮机内的热气流道应用的陶瓷基复合材料（CMC）部件制造。

陶瓷基复合材料（CMC）材料在提高燃气轮机性能和效率方面发挥了关键作用。燃气轮机在运行中采用布雷顿循环。高热效率的一个关键参数是高循环压力比，进而驱动高涡轮流道温度。涡轮流道温度通常高于部件材料的耐热极限，需要冷却空气通过内部和外部流道冷却的组合来冷却部件。

最小化所需的冷却流量可以提高循环的整体效率。因此，**需要开发具有更能耐受高温的先进材料，如CMCs**。总的来说，高质量CMC的应用优点包括：由于较高的工作温度和降低的冷却空气要求，提高了燃气轮机的效率，以及更有效的燃烧，从而减少了二氧化碳排放量。可使航空应用中的燃料燃烧减少了高达2%，很少有其他技术具有如此大的燃料燃烧减少能力。此外，CMCs的材料密度是当今镍基高温合金的三分之一，能够使涡轮部件重量减少50%以上。

SiC纤维当前的极高成本以及导致复合材料的制造工艺成本较高的现状，严重阻碍了其作为超高温CMC（适用于1500°C/2700°F及以上的表面温度）组件在燃气轮机中的广泛应用。所以，为解决此问题就包括了研究优化的CMC制造过程，过程建模和有效提高生产率。目前，碳化硅纤维由数量很少的供应商制造，而且每个供应商都有独特的工艺和化学成分，这就需要优化化学成分、材料性能和成本。

CMC的发展和成熟投资活动已经持续了30多年，在过去10年中，通用电气公司的自有投资超过15亿美元。由于对纤维制造能力进行了大量投资，这一领域重新引起了人们的兴趣。鉴于这种情况，必须解决目前生产碳化硅纤维的工艺局限性，并利用以较低成本提供更高性能的高质量纤维。这些先进的高质量羧甲基纤维素纤维将使热气流道的温度更高，尤其是对于燃烧室衬套和涡轮模块内的旋转和静态部件。较高的工作温度将减少必须从推力转移的冷却空气量，并使燃料燃烧得更彻底。预期的好处包括燃料燃烧和二氧化碳减少2%，燃气轮机效率提高10%，推力提高（用于航空应用）和电力成本降低（用于发电应用）。

该研究主题应聚焦于以下研究内容：

- 利用低成本和高效益的聚合物加工路线开发出最佳的碳化硅纤维，该纤维具有优异的强度保持率、模量和抗蠕变性能，其关键特性为：化学计量比或碳硅比，保护晶界，残余氧含量低，无杂质相等。SiC纤维经过两个涂层步骤，使用化学气相沉积等工艺在集束中的每个长丝上涂覆薄涂层。

- 开展陶瓷基复合材料部件制造过程控制、统计监测、数字化和自动化相关的生产质量一致性和能力改进。目前，由于陶瓷基复合材料部件生产工艺过程复杂及对复合材料制备过程机理

的全面深入了解不足等因素，使复合材料部件的质量一致性和稳定性较差，严重影响了复合材料部件的经济成本和生产能力。

•通过对陶瓷基复合材料部件设计、原材料、制造等全寿命周期过程的全面系统集成优化，使复合部件的耐温能力在目前最高水平上再增加 $170^{\circ}\text{C}/300^{\circ}\text{F}$ ，从而使CMCs比当今的镍基材料提高 $450^{\circ}\text{C}/800^{\circ}\text{F}$ 。预计这项研究将在2030年前，可以把技术成熟度从TRL 3提高到TRL 6或更高。本研究具有中等技术风险，因为目前具有适当材料专业知识的工程人员和制造资源有限，无法支持更高质量碳化硅的生产，碳化硅纤维制造商使用的独特加工系统导致碳化硅纤维特性的变化。目前的碳化硅纤维制造能力很大一部分致力于满足支持当前应用的生产量，这可能限制了制造工艺潜在改进的设施的可用性。另外，缺乏包括中试生产线在内的专用研究设施，也可能阻碍了对关键纤维工艺变量的工艺优化研究。

02

基于物理基础的寿命预测模型研究

燃气轮机的热端部件在工作时，会不可避免地经历各种极端条件的考验，包括暴露在多轴高温应力和腐蚀性环境中。为了最大限度地提高热效率，这些部件服役的设计温度往往被推向材料的最大耐受极限（如对金属材料，在熔点附近温度），包括镍基单晶高温合金和先进的热障涂层系统。随着工作温度的升高，驱动更高的热效率也同时加速了环境破坏。此外，这些损伤模式在速率和机理上是多样的，包括高温氧化、热腐蚀（沉积物引起的高温腐蚀）、颗粒侵蚀、热障涂层的剥落和热障涂层系统的环境沉积物钙镁铝硅酸盐（ $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ，CMAS）降解等。

对于大型发电燃气轮机来说，与这些环境破坏模式相关的生命周期成本的增加每年可以以数以百万美元来衡量。在航空发动机中，高压涡轮叶片的故障可能导致发动机的非计划拆卸、航空公司服务的潜在中断，以及在最坏情况下造成空中停车等飞行安全风险。在发电或油气应用中使用的燃气轮机发生故障时，也会产生类似的费用。显然，如果能够可靠地预测在给定的热端部件应用中哪些损伤模式将被激活，以及它们的进展速度，将能够有效地开发和优化抵抗这些损伤模式的先进材料，以及实现先进的数字孪生基础设施，这就需要建立基于物理基础的寿命预测模型，解决热端涡轮材料的环境退化问题。该模型必须能够在极端涡轮工作温度下长期保持CMC机械性能的前提下，处理以下损伤模式：

- 金属结构材料和涂层的热腐蚀和氧化
- 熔盐引起的高温应力腐蚀开裂
- 热腐蚀、氧化、水分引起的降解、钙镁铝硅酸盐（CMAS）引起的热障涂层和环境障碍涂层的降解和侵蚀



不带热障涂层叶片



带热障涂层叶片

燃气轮机动力之源

基于物理基础的寿命预测模型将通过可靠和准确预测现场性能的实验室测试进行验证。这一研究主题对于实现和保持未来先进燃气轮机在其使用寿命内的热效率目标至关重要。但是目前缺乏相关的研究。对于诸如CMCs这样的材料，在1500°C/2700°F及以上温度几乎肯定会加剧热腐蚀和以上列出的其他损坏模式的耦合作用，从而使部件寿命不足，又会使带有CMC的部件的燃气轮机维修间隔相对于镍基高温合金部件减少一个数量级。随着CMC部件在燃气轮机使用中积累更多的时间，很可能会出现其他降级模式，从而造成当前无法预见的耐久性挑战。因此，从这个意义上说也需要深入了解CMCs材料失效或退化模式或机制，并予以定量化描述纳入寿命预测模型。

此研究主题的成果可以使未来抗损伤材料设计成为可能，同时在保证材料在最高温度极限运行来提高涡轮机的热效率的前提下，并通过向运营商提供准确的燃气轮机何时需要停止使用进行维护的信息，潜在地消除计划外的燃气轮机停机时间或延长燃气轮机运行时间，大大降低成本。本研究课题可在2030年前将相关技术成熟度从TRL 3提升到TRL 6。这一研究主题具有中等技术风险，因为对CMCs材料的各种环境退化或失效模式的物理机制的基本了解已经取得重大进展，了解这些环境退化或破坏的演变机制为建立物理模型打下了重要的基础。最大的一个风险是在较高的涡轮工作温度下CMCs材料出现未知的退化或失效模式。

03

探索 and 开发先进的高温合金和部件设计的新理念或方法

镍基高温合金在燃气轮机中的应用已有50多年的历史。在这段时间的大部分时间里，先进的高温合金技术发展主要集中在定向凝固铸造技术、涡轮叶片镍基高温合金化学成分开发优化、盘（转子）用粉末冶金高温合金。如CMSX-4、RenéN5和PWA

1484等单晶合金涡轮叶片常由定向凝固铸造，Waspaloy、IN718和U720等高温合金部件常采用锻造加工路径生产。

目前，根据目前的燃气轮机设计方案，成熟的燃气轮机的主热气流道中的大多数部件都是由合金制成的，而且近20年实践表明，企图提高耐更高温度的研究和开发已经达到了递减的回报，这类合金的使用已基本达到了其工作温度极限。随着燃气轮机不断提出的对更高效率、减轻重量和减少排放的新要求，提高主热气流道温度已成为必须的途径，对热端部件材料的使用温度极限要求也随之提高。尤其是随着燃气轮机的部件不断采用具有更高耐温能力的CMCs材料，随之也水涨船高也提升了整个燃气轮机热端金属部件（这些部件包括盘、轴、壳体、密封件和轴承等）的使用温度要求。所以，为应对已有合金材料已达使用温度极限的挑战，需要探索 and 开发先进的高温合金、部件设计的新理念或方法。

该研究主题主要开发新的合金概念，如高熵合金、高温钛合金、钴基高温合金和难熔合金、金属间化合物强化铌基或钼基难熔合金。例如，新的基于耐火材料的高熵合金含有多个耐火元素，在1100°C/2000°F以上的温度下表现出异常高的强度，但对这类材料的研究仍处在技术成熟度TRL 1。新的制造技术，如增材制造，可能可以用于制造其独特的微观结构，以解决先前发现的耐火合金性能缺陷。由于钴基合金具有很高的熔点，它们也有可能超过当前镍基合金的温度下使用。提高低温合金的性能，例如钛、镁和铝合金，也有利于改进燃气轮机风扇和压气机部件的设计，这些材料在高温下的强度密度比超过了目前最先进的高温复合材料的性能。其中一个比较诱人的目标和巨大挑战就是利用增材制造方法生产燃气轮机单晶高温合金涡轮叶片，这无疑会极大地降低目前单晶高温合金涡轮叶片的高制造成本！

鉴于目前的材料开发方法主要是经验驱动的，利用第一原理计算、基于物理的模型和人工智能方法建立新材料的计算能力，开发加工模型和集成计算材料工程工具，利用材料基因方法，将使工程师能够加速设计新材料和提升材料技术成熟度，并针对材料的特定应用进行优化，其速度比目前可能的要快得多，同时提高产品产量和降低采购成本。

此外，还需要探索新的先进的金属部件设计。如，由单晶轮缘/多晶孔概念组成的混合性能涡轮盘，带有钢孔和高温合金轮缘的混合圆盘等。

本主题的研究内容可以在2030年前将相关技术成熟度从TRL 1提升到TRL 9。在2030年之前，将适用于混合性能盘的技术成熟度将从当前的TRL3提升到TRL9，技术风险很低。使这项技术成功所需的基本制造工艺是众所周知的。对于与高熵合金相关的技术，还需要做很多基础性的工作，预测到2030年这项技术成熟度将从TRL 1向TRL 4发展更为现实。这方面的工作面临中等技术风险。

► 燃气轮机增材制造

在过去的30年里，增材制造业发生了巨大的变化，而且变化的速度还在继续增加。增材制造于1987年在3D系统的立体光刻技术中出现，该技术使用激光固化对紫外线敏感的液体聚合物薄层。SLA-1成为世界上第一个商用增材制造系统，1988年，Asahi Denka Kogyo, Ltd. 公司推出了第一种用于立体光刻机的环氧树脂。选择性激光烧结在1992年开始使用，利用激光产生的热量来熔化粉末材料。1997年，AeroMet开发了一种称为激光增材制造的工艺，该工艺使用高功率激光焊接粉末钛合金，随后，

Optomec迅速将其基于美国Sandia国家实验室开发的技术制造金属零件的激光粉末成形系统商业化。

Extrude Hone（现在是ExOne）于1999年推出了另一种增材制造工艺，该工艺采用了麻省理工学院的3D喷墨打印技术，用于制造金属零件。2001年，Generis GmbH将采用喷墨打印技术熔砂生产金属铸件砂芯和模具的系统商业化。到2006年，直接金属激光熔炼已经发展到包括不锈钢和钴铬材料。2009年，美国材料试验协会（ASTM）国际增材制造技术委员会（F42）发布了行业标准术语。2011年，美国材料测试学会国际委员会和国际标准化组织技术委员会宣布了一项关于增材制造的合作协议。2012年，通用电气（GE）航空公司收购了Morris Technologies和Rapid Quality Manufacturing，后者是航空应用增材制造领域的先驱。基于新设计的可能性，结合几乎等同于变形合金的机械性能，直接金属加工技术已经获得了极大的兴趣和发展。金属基增材制造的应用涉及广泛的行业，包括医疗、工业、航空航天、珠宝，甚至砂型铸造模具。



增材制造提供了通往以前无法进入的设计空间的途径，推动了一套新的响应式设计工具的开发，这些工具与制造模拟相结合，以最大限度地发挥增材制造的优势。这种新的面向制造过程的设计的数字工件可以在数字线程基础设施中捕获，该数字线程基础设施允许跨数字基础设施共享信息，以提高产品设计和制造过程的性能。与燃气轮机特别相关的增材制造面临的挑战包括成功管理潜在的破坏性工艺诱发现象的能力，如增加的变形和开裂、制造缺陷（如未熔合以及气体孔隙率等），以及由于不同的体积和表面结构质量而导致的较低的机械性能。这将需要掌握这些制造过程的复杂物理机理，包括高温和快速变化的温度梯度、

复杂的熔池流体流动现象、广泛变化的凝固形态以及冷却过程中的残余应力等。

增材制造已形成全球技术趋势，这一研究领域将为增材制造涡轮部件开发专用的设计和制造方法。对新的、冷却的部件，新的高温合金的集成设计，以及用于定制性能的微观结构形态的控制，都存在着巨大的技术机遇和挑战，因为它们必须在燃气轮机的极端条件下实施并最终合格。增材制造应用于燃气轮机的主要优点是减轻重量、减少零件数量、获得新的设计空间和缩短开发时间。

该研究领域包括三个研究主题：

- 集成设计和增材制造
- 高温结构材料增材制造
- 传感器集成、机器学习和过程分析

将基于模型的燃气轮机材料（已在使用的材料及正在开发的先进材料）、工艺和制造机械的定义与设计工具、车间的设备结合起来，以加速设计并提高零部件的成品率，同时提高性能的一致性和稳定性。

01

集成设计与增材制造

与传统的制造方法不同，对增材制造来说，逐步逐层构建零件的原理和过程，可以轻松实现更多创新性的几何结构和设计选择，从而降低了成本和重量，提高了生产效率，并且已经开始对燃气轮机的设计和制造模式开始产生革命性的影响。典型的一个表现就是，增材制造直接挑战了传统机械硬件开发周期的顺序和速度。如对于燃气轮机这样非常复杂的机械系统，在许多情况

下，增材制造可以通过将复杂程度更高的零件合并到使用传统工艺无法制造的相对数量较少的零件来制造。增材制造还提供了一种独特的能力，通过使原型硬件设计的制造、测试、修改和再制造比目前可能更快、更便宜，从而大大降低生产复杂开发零件的成本和周期。为系统地、充分地实现增材制造的这些优势，需要开展集成设计与增材制造主题研究。

该主题主要开发先进的材料、工艺、机械模型集成方法，成本和计算机辅助设计（CAD）软件形成一个完整的数字工程框架，以适应燃气轮机设计的要求。总结、扩展增材设计辅助工具和加强设计实践，从而降低全寿命周期成本，主要体现在如下几个方面：

- **通过使用创造性和复杂的几何结构或称作为拓扑来优化设计。**先进的设计辅助工具将使开发基于系统设计方法的新部件具有更为复杂的形状或几何图形，这些几何结构在传统制造中可能根本不可能实现，同时，保证性能和材料使用（重量）最小化，而不受先前工业限制和利用传统制造技术进行后处理的限制。例如，这些几何结构可以优化冷却空气的使用，将改善热量排放和零件之间间隙的控制，从而提高燃机效率。
- **能够设计新的、更高性能的高温材料以及分级的化学和微观结构，**在设计中定制微观结构，允许特定位置的设计实现多种材料或微观结构，从而减轻重量并提供最佳的应力分布，以提高耐久性和使用寿命。
- **失真控制。**先进的设计工具可以预测快速凝固和热排放等产生的变形效应，从而指导构件建造过程中支撑结构的尺寸和位置。这些工具还将为几何补偿提供指导，这可以显著减少演示尺寸控制所需的构建迭代次数。由于极其严格的尺寸公差要求，这对燃气轮机设计特别重要。

- **降低在现有应用中使用新材料或在新应用中使用现有材料的风险。**将材料和工艺的数字定义与数字设计协议相结合，将有助于更有效地探索设计空间和早期验证零部件性能。

- **提升数字化能力。**优化Computer Aided Design (CAD) 构建文件将提高将文件加载到制造机器的效率，减少构建过程中的延迟，因为信息是按层构建方法管理的，可以随时管理零部件在制造时的残余应力，通过提高文件的可传输性，使远程制造和捕获无损评估结果成为可能，并可以为每个构建零部件提供身份及性能识别的数字“指纹”。

本主题的研究成果将大大提高燃气轮机零部件的设计能力，减少从设计到制造过程中的不确定性，从而实现高保真度、特定位置的高性能设计，减少返工。基于模型的工程工具的进步对于充分利用增材制造提供的设计优势至关重要。预计到2030年的相关技术成熟度可以从TRL 4提升到TRL 6。本主题具有中等技术风险。每一个增材过程都对设计界提出了独特的挑战和限制，如激光粉末床的快速凝固、烧结粉末的去除、电子束过程的区热控制以及粘结剂喷射，以及增材加工过程中的尺寸控制和致密化都对零件的设计者提出了挑战。

02

高温结构材料增材制造

目前用于增材制造应用中的结构材料种类相对较少，如合金Inconel 718和Ti-6Al-4V等。使用这些结构材料的零部件设计主要都是用传统的制造方法加工的。增材制造方法中可用的局域加工条件的高度可裁剪性特点将使增材制造能够定制结构材料成分。通过降低开裂现象和消除有害的残余应力，可以对合金成分

进行改性优化，以获得更高的屈服强度等性能。此外，新的结构材料成分优化将受益于旨在大量生产更高温度和更高质量粉末的粉末加工技术的进步，从而使材料微结构的精确剪裁至少具有与原来传统制造方法同等的重量，同时使性能最大化。

为实现燃气轮机行业使用的新型增材制造高温结构材料的开发，需要赖于增材制造设备的进步，才能加工出比目前使用的耐火材料更多的高温结构材料。为快速识别设计的新材料成分，需要更多的计算和表征工具的耦合。这些工具将支持关键现象的建模，并确定哪些加工和成分修改的组合可以减轻裂纹形成的驱动力。多个传统能源以及新型能源，如飞秒或皮秒激光，将需要以一种更加有管理的方式提供能量，以加快零件成型速度和控制变形等缺陷。

本研究主题将利用增材制造的技术趋势，开发新的、低成本的高温结构材料粉末，开发新的增材制造方法和模型，使定向凝固或单晶成分的生长和修复将成为燃气轮及设计和制造最诱人的和渴望的目标和挑战。除了，粉末、制造方法，还需要开发快速鉴定和认证的方法，以便以经济有效的方式生产具有更高温度限制和耐久性的部件。

该研究主题的成果将使新的耐受更高温度的结构材料成分以及控制微观结构的新方法成为可能。其次，这些能力还可以发展用于生产柱状颗粒或单晶组件，这将对燃气轮机行业产生重大影响，使冷却气流的设计更加高效，同时为传统加工的单晶组件提供潜在的修复途径。此外，将会促进材料和工艺的快速认证和鉴定方法的发展，将使增材制造的应用范围更加广泛。预计在2030年前将相关技术成熟度从TRL 3提升到TRL 6。

实际上，增材制造是将材料加工成有用工程零部件的一种极其复杂的方法。一些增材制造工艺正在燃气轮机工业中使用或探索，包括粉末床熔合（使用电子束或激光加热源）和定向能沉积等。典型的金属增材制造工艺可能需要考虑超过150个参数。一些参数可能不会对产品的质量有重大影响，有些则可能取决于其他变量，仍然有许多变量需要在非常复杂和动态的处理环境中进行表征和解释。

为了在现场纠正缺陷，需要立即分析关键参数的过程反馈（即在当前构建层内）。每种方法的完整的、基于物理的模型的建立或许都需要数年的时间，即使模型开发出来，它们也很可能过于复杂，无法集成为过程控制系统的一部分。要克服这一问题，就需要发展以物理知识为基础、通过机器学习增强的模型，这些模型可以“训练”来监控和自主控制，以实时纠正增材制造过程的偏差。因此，该过程的数字化表示对于改进增材制造过程以及及时发现潜在的在役问题至关重要。将基于物理的合成、加工、微观结构和机械行为模型与过程信号的人工智能分析和决策集成到制造基础设施中，以增强过程控制和保证燃气轮机部件质量。基于物理的过程模型和人工智能系统将需要与工厂操作技术集成，以便对制造过程进行实时、智能控制和即时反馈。这将需要对材料状态进行原位传感，并在制造过程中采用自主方法实时识别和修复缺陷。制造过程的数字记录将需要自动放置在数字线程基础设施中，以便在零部件生命周期中进一步工程化使用。

这一研究主题可以通过提高制造产品质量、产品产量，减少性能分布分散度以及使增材制造过程的鉴定更加快速而有效。同时帮助科学家寻求建立和改进基于物理的制造过程模型。另外，因为对零部件的制造最终状态有一个完整的数字记录，将有可能

在系统的整个生命周期中快速识别紧急性能问题和潜在的故障根源。预计2030年前将相关技术成熟度从TRL 4提升到TRL 7。现在已经有许多单独的工具可供使用，并开始集成。随着基于物理的模型、原位传感和人工智能的进一步发展，这将是一项不断发展的技术，并集成到过程控制系统中。本主题具有中等技术风险，最大挑战是难以开发有用的基于物理的模型和相关的现场传感器集成方法。

► 热管理技术

热管理的总体目标就是开发先进的冷却技术和策略，能够快速且廉价地融入燃气轮机，并使涡轮进口温度更高，循环压力比更高，燃烧室和涡轮冷却气体流量更低，从而在满足燃气轮机寿命要求的同时最大程度地提高热力循环效率。

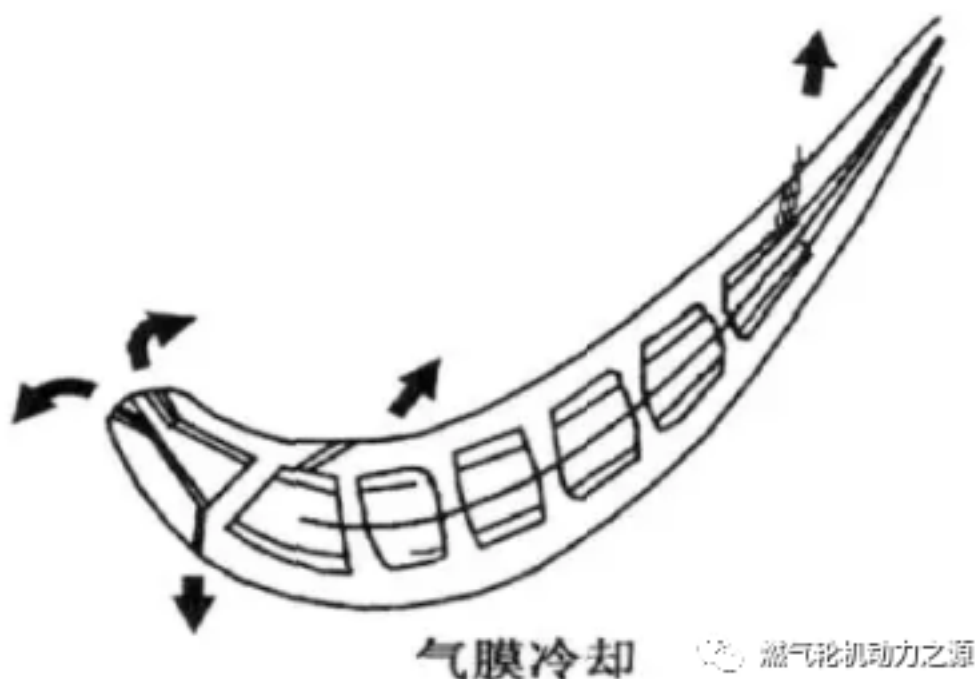
鉴于减少二氧化碳排放的重要性，通过提高燃气轮机效率来减少燃料使用量仍然是燃气轮机行业的高度关注点。燃气轮机的热效率，也就是燃料燃烧，与涡轮进口温度直接相关。为了提高燃气轮机的热效率，通常采用两种不同的方法：

- (1) 在保持相同冷却流量要求的同时提高涡轮进口温度；**
- (2) 在降低冷却流量水平的同时保持相同的涡轮进口温度。**

除非热管理方案提高整体冷却效率，否则这两种方法都可能降低涡轮部件寿命。在恒定的涡轮进口温度下提高整体冷却效率可降低涡轮部件金属温度并提高部件寿命。或者，在提高涡轮进口温度的同时提高整体冷却效率可以使涡轮金属部件保持恒定的温度，从而延长涡轮部件的寿命。随着时间的推移，涡轮进口温度与推进气膜冷却产生的整体冷却效率水平保持良好的跟踪关

系，提高冷却效率可降低叶片温度。燃气轮机热端的冷却包括燃烧室和涡轮模块的冷却，从燃气轮机研究和开发的一开始就被设想出来。

然而，直到20世纪60年代，叶片冷却才实际应用于燃气轮机中。叶片冷却是在进入燃烧室之前从压气机中抽出一部分空气，然后将抽出的空气送入位于燃烧室和涡轮模块中的部件中，以冷却这些部件。20世纪60年代，叶片冷却技术使商用航空发动机起飞时涡轮进口温度从 $900^{\circ}\text{C}/1650^{\circ}\text{F}$ 提高到 $1000^{\circ}\text{C}/1850^{\circ}\text{F}$ 。随后高温涡轮材料、涂层和冷却技术的发展使商用航空发动机起飞时涡轮进口温度从20世纪60年代的 $1000^{\circ}\text{C}/1850^{\circ}\text{F}$ 提高到90年代的 $1400^{\circ}\text{C}/2550^{\circ}\text{F}$ 。现代燃气轮机得益于数十年对高温合金、先进涂层和改进冷却技术的大量有效研究。将最先进的镍基高温合金与更先进的冷却技术（如微通道冷却（也称为双壁叶片））的应用相结合，使得涡轮进口温度不断升高。



同时，热效率的提高可以通过增加循环压力比来实现，在今天的燃气轮机中，循环压力比在40-60之间。随着循环压力比的增加，从压气机中抽出的用于冷却燃烧室和涡轮模块的空气温度

也会升高，这也将成为有效冷却燃烧室和涡轮硬件的一个限制因素，因此开发能够提高冷却介质温度的热管理技术对于满足热端部件耐久性要求是必不可少的。

然而，由于制造工艺技术的限制，目前的冷却策略存在一定的局限性。例如，在铸造后的涡轮叶片上的气膜冷却孔的形状受到激光打孔和电火花打孔工艺的限制。过去的研究也发现了一些我们缺乏基本物理理解的关键课题，从而限制了燃气轮机设计能力的提高。例如，有一个这样的主题就是全共轭传热分析，其中一个单一的模型检查涉及流体和固体在一个特定的系统中的传热。由于现有的模型无法准确地捕捉到冷却膜流与主气流路之间复杂的三维热能交换，使得燃烧室和涡轮冷却结构的优化受到限制，同时还需要进一步了解从外部运行环境进入燃气轮机的含颗粒流的影响。

该研究领域包括三个研究主题：

- 新型冷却方式
- 全共轭传热模型
- 基本物理和含颗粒流动建模

新型冷却方式研究

该主题研究的目的是通过研发和创新冷却技术和策略，以提高涡轮部件效率。开发创新冷却策略的研究需要解决涡轮部件所经历的高温和高机械应力，以及特定的材料特性和制造方法。涡轮部件气动性能和耐久性的要求增加了燃烧室壁以及叶片和叶片冷却的几何复杂性。由于循环压力比的增加，从压气机出口抽出用于冷却燃烧室和涡轮部件的空气温度高于前几代燃气轮机。因此，必须采用新型冷却方式和策略来解决这个问题。

用于发电、推进和油气应用的涡轮叶片通常采用熔模铸造方法制造。这个过程需要几个步骤，首先将蜡倒入叶片形状的金属模具中。每一个蜡状物凝固后，将其从模具中取出，反复浸入陶瓷浆料中，形成陶瓷涂层，然后去蜡和硬化陶瓷。实际的叶片是通过将熔化的金属倒入熔化的蜡留下的中空空间而形成的。在生产这一阶段，每个叶片内的内部空气冷却通道也通过将陶瓷芯插入蜡模中而形成。

叶片进一步加工后，在叶片的外壁上设计气膜冷却孔，这些孔通向供应冷却剂的内部通道。一旦制造出冷却孔，在叶片的外表面涂上一层热障涂层，以提高耐腐蚀性和抗氧化性。燃烧室壁通常由相对薄的高温金属片构成，采用双壁结构，外表面喷涂热障涂层。用于燃烧室壁的冷却策略与用于叶片的冷却策略相似。涡轮和燃烧室模块的研究通常分为内部冷却（叶片内部或燃烧室内衬双壁之间的表面）或外部冷却（暴露于热气体通道的表面）。内部冷却策略可以通过使用高紊流和大表面积来获得高的对流换热系数。先进的叶片和叶片内部冷却策略往往受到陶瓷芯模具设计或零件铸造能力的限制。另一种潜在的内部冷却策略是在涡轮叶片表面放置微通道，使冷却更接近叶片表面。

随着增材制造技术的进步，完全重新设计冷却策略是可行的，包括更复杂的通道。气膜冷却孔的最新制造方法采用激光打孔或电火花打孔制造，这是在铸造涡轮叶片上完成的工艺。增材制造方法可实现复杂的气膜冷却孔形状，这些形状与内部冷却气体供应通道可以更好地集成。更复杂的气膜冷却孔形状可以提高燃烧室和涡轮部件上的气膜保护质量。

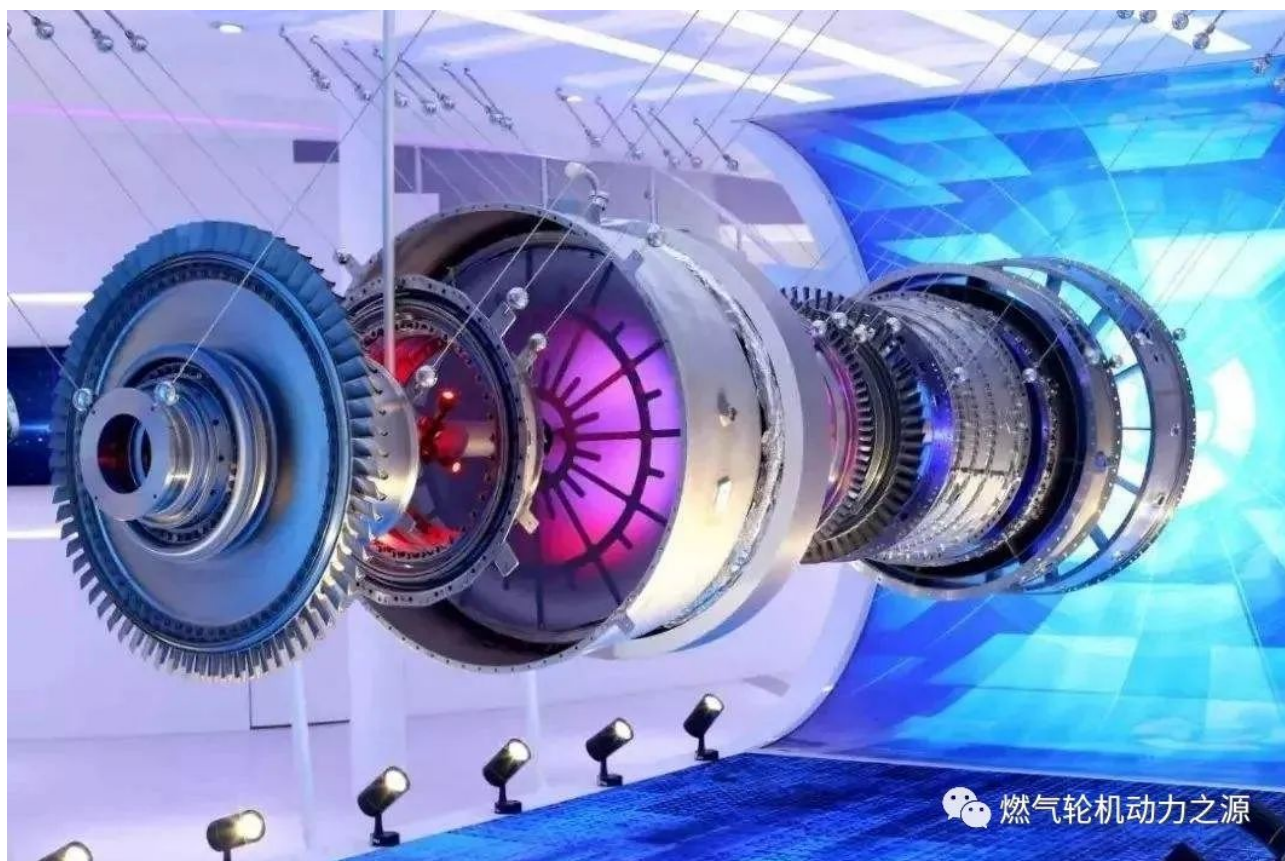
本研究主题可加速新型冷却方式和策略的持续研究，使涡轮进口温度更高，从而在满足生命周期成本要求的同时提高热效

率。本主题针对新型高温材料和增材制造方法在先进冷却创新方面的发展提出了新的迫切需求。过去涡轮进口温度升高的例子表明了冷却策略创新的影响，特别是气膜冷却。随着增材制造技术和高温材料创新在新型冷却方式和策略中的大规模采用，预计热力循环性能将出现颠覆性提高。该主题预计在2030年将相关的创新冷却技术成熟度从TRL 1提高到TRL 6。该主题的具有中高技术风险，完全取决于增材制造技术能力的发展和应用。该主题适用于发电、航空、油气等领域。减少所有三种应用的燃料消耗是一个重要目标，特别是对于发电和航空。提高石油和燃气轮机在部分负荷下运行时的效率也被确定为优先事项。

全共轭传热模型研究

该主题研究目的是开发先进的全共轭传热技术，以实现燃烧室和涡轮部件冷却配置的优化设计，从而使冷却空气流量最小化，提高涡轮进口温度，并可以达到更高的循环压力比。

传导传热是固体传热的主要形式，对流传热是液体传热的主要形式。一个全共轭传热模型分析了一个特定系统中固体和液体的传热。经过验证的全共轭传热技术使燃烧室和涡轮冷却结构的优化取得了进展。全共轭技术比通常使用的松散耦合的共轭分析过程（包括分离和顺序执行的低保真度子模型）更精确地捕获冷却膜流、主气流路、内部流和固体成分之间复杂的三维热能交换。全共轭技术的应用将提高燃气轮机的热力效率，同时满足其寿命要求，不确定性较小。如果在工业界、学术界和政府利益相关者的支持下，通过规范几何和流动条件下的协调实验获得的传热数据对这些全共轭传热技术进行验证，将对工程设计过程产生更大的影响。



燃烧室和涡轮模块的最新冷却策略包括但不限于气膜冷却孔的紧密排列阵列，其产生低温膜，该低温膜将底层金属和保护性热障涂层与主要高温燃烧产物隔离，并且增大了孔内冷却气流与周围金属之间的对流换热速率。低温膜流动与周围流体的快速混合是一个复杂的三维过程，它高度依赖于冷却孔阵列的几何特征、内部冷却流动动量、质量以及外部流动动量和湍流脉动水平。此外，与富含燃料的热流气体快速混合的壁面膜流促进了膜内的二次化学反应，降低了膜冷却的预期效益，与上述有关的复杂物理机制目前还不清楚。用于预测热端金属部件温度的热计算模型通常使用松散耦合的共轭传热方法。对于涡轮叶片，捕获内部流体流、外部流体流以及金属和热障涂层系统之间的传热过程的子模型分别按顺序执行，直到这些模型接口处的温度收敛到相同的值。外部叶片表面的气热子模型使用经验驱动的低保真度和先进的高保真度工具的组合来捕捉薄膜混合和绝缘、传热增强的影响。这些子模型通常用控制实验的结果进行验证，在控制实验

期间，通常单独测量上述效应。然而，对于包含紧密排列的冷却孔阵列的冷却策略，冷却膜相互作用，固体传导路径变得更加三维，外部流体流动与叶片固体之间的能量交换变得更加复杂。利用全共轭传热模型技术可以更好地捕捉这些复杂的气热相互作用。

对于具有复杂冷却结构的燃烧室和涡轮模块，**全共轭传热建模技术可以通过减少与在松耦合共轭分析过程中通常使用的简化气热子模型相关联的建模误差来提高金属部件温度预测的精度。**提高预测精度将提高热端部件寿命预测的精度和耐久性，减少燃烧室和涡轮冷却气流，并使涡轮进口温度更高，从而在满足寿命要求的同时提高热力学效率。该课题具有中等技术风险，其成果取决于从典型燃烧室和涡轮冷却结构以及流动条件的完全共轭传热实验中获得的综合数据集的生成，这些数据集可由燃气轮机工业、学术界的技术专家访问，以及政府和利用这些公开数据集验证全共轭传热模型。该主题适用于发电、航空、油气等燃气轮机在全负荷和部分负荷下的应用。

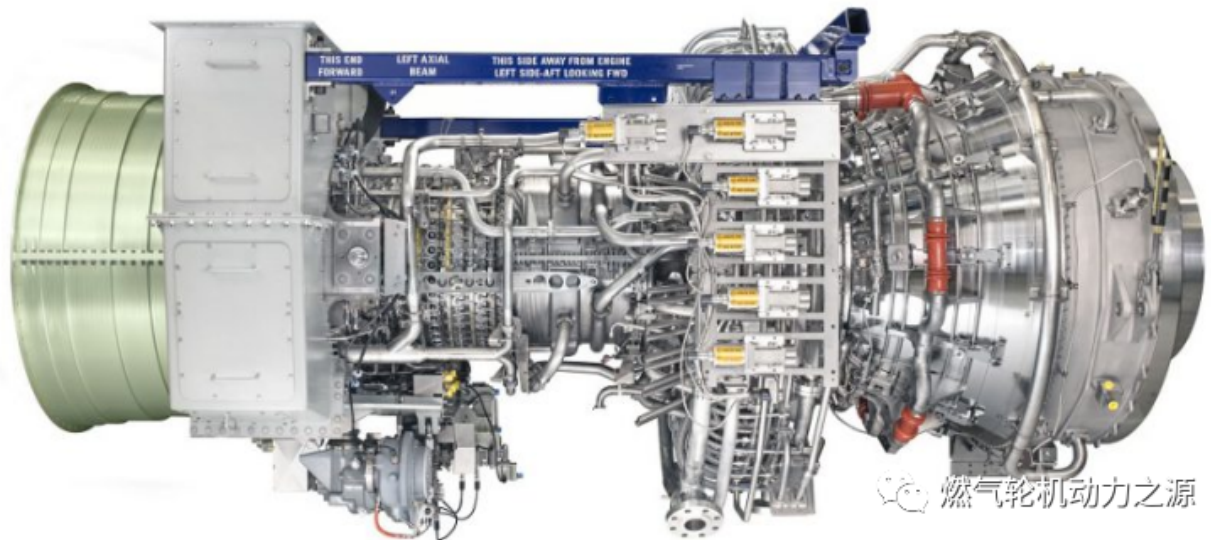
基本物理与颗粒流模拟研究

随着全球飞行业务越来越多地穿越发展中国家，发电和油气涡轮机不断地安装和运行在广泛的环境中，小颗粒进入燃气涡轮机的威胁越来越大。对于发电，可降低燃气轮机性能的污染物包括上游部件的铁锈和周围环境中未经过滤的微粒。对于飞机而言，感兴趣的污染物包括火山灰、悬浮在大气中或在起飞和降落过程中摄入的细沙粒，以及燃煤电厂等工业污染物。与用于飞机推进的燃气轮机不同，用于发电和油气应用的燃气轮机可以使用过滤器去除许多较大的颗粒（ $>10\mu\text{m}$ ），但较小的颗粒仍保留在主气流中。

空气质量差对每个燃气轮机模块的性能影响不同。在压气机模块中，腐蚀是一个问题：风扇吸入的环境颗粒随后会影响压气机叶片，一旦到达高压压气机段，排出的空气冷却热端部件，颗粒足够小，可与二次冷却流一起携带，二次冷却流的温度要高得多，导致颗粒沉积。颗粒沉积会堵塞内部通道和冷却孔。在主气流路中，颗粒可能沉积在叶片外表面上，这增加了它们的粗糙度。粗糙的涡轮叶片会增加空气动力损失，并可能导致叶片上的早期边界层过渡，从而导致热流气体沿叶片的外部传热。颗粒在热端部件中的沉积位置和方式在很大程度上取决于其尺寸、成分、温度、内部冷却几何结构和引入方法。

由于在可控的实验环境中几乎不可能模拟所有相关条件，因此对燃气轮机内颗粒的输运和沉积机理还没有很好的了解。在涡轮模块中，来自高速冷却介质的摩擦阻力可以使颗粒保持在悬浮状态，颗粒跟踪流动。然而，考虑到粒子的质量和动量，粒子不一定沿着流线通过转弯或各种冷却特征。总之，沙粒或大气颗粒物等颗粒物的浓度和行为会显著降低燃气轮机的性能，并经常导致停机，特别是对于飞机和石油和天然气工业。与这些环境相关的基本物理尚未被很好地理解，需要对相关环境条件进行高保真模拟和实验验证的综合研究，这些环境条件包括与粒子摄入相关的简单到复杂现象。

在燃气轮机的燃烧室和涡轮热端模块内，如果颗粒停留时间足够长，则颗粒温度会迅速上升。这会导致颗粒粘附在组件表面，从而引发严重事件的连锁反应。当颗粒附着在表面上时，金属部件温度通常会因内部通道堵塞而降低冷却气体流量或增加壁面与冷却空气之间的热阻而升高。金属部件温度越高，则粘附在壁上的颗粒温度越高，从而增加更多颗粒粘附在表面的可能性。冷却后，熔融颗粒的存在也可能导致部件保护涂层剥落。



建模这个问题的复杂性需要一个集成的方法，使用高保真数值模拟和实验验证。需要定义测试用例，从简单的基本台架模拟到更复杂的涡轮增压等情况，以评估如何更好地理解影响涡轮运行的各种机制。该主题可以通过确定导致涡轮部件耐久性降低的主要机制来进行研究。该主题通过提供一个基于物理学的对高压涡轮中颗粒输运和沉积的理解，可用于驱动概念性、颗粒容限性涡轮冷却设计，并提高在颗粒流中涡轮部件行为预测的质量。

目前，在理解涡轮部件上颗粒沉积的驱动机制方面基本处于空白状态，基本的测试用例不存在，导致无法执行集成的、系统的实验，从而能够验证低保真度和高保真度的粒子输运和沉积模型，而这些模型与颗粒负载流中的涡轮运行相关。到2030年，可以开发基于物理的模型来驱动各种先进的、粒子容忍的涡轮设计，需要在颗粒输运和沉积研究以及颗粒容限涡轮设计概念方面取得重大突破。此研究主题具有很高的技术风险，因为由于复杂的交互作用，模型可能需要根据每个案例的具体情况进行调整。在高压和高温下完全复制燃气轮机条件的足够的测试用例是困难的。本研究课题适用于航空、发电、石油和天然气应用，通过更好地了解含颗粒流对涡轮运行的影响，从而改进涡轮冷却设计以及所需的提升模型。