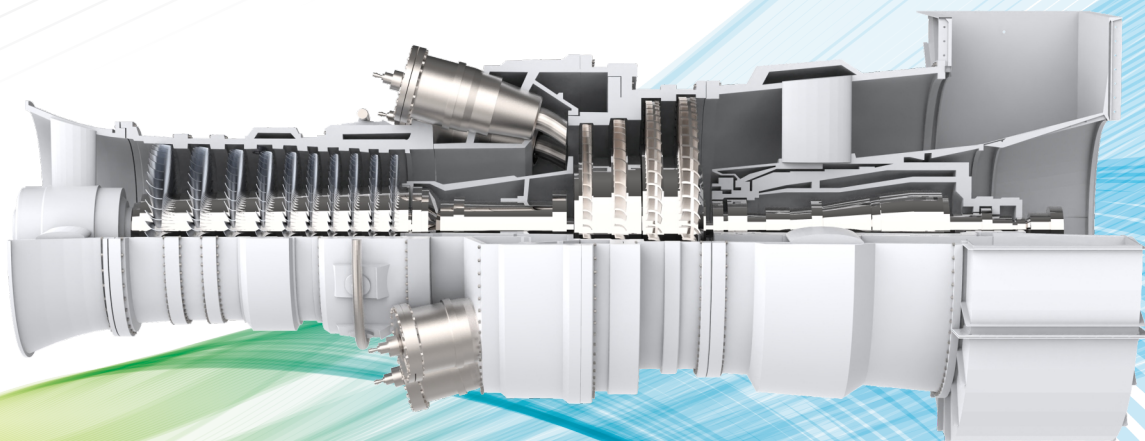


燃气轮机氢能发电 全球技术发展蓝皮书

GAS TURBINE HYDROGEN POWER GENERATION
BLUE BOOK ON GLOBAL TECHNOLOGY DEVELOPMENT



通往零碳道路的燃气轮机

前言

氢能是一种来源丰富、有广泛应用前景的绿色清洁能源，能够帮助可再生能源大规模消纳，实现电网大规模调峰和跨季节、跨地域储能。氢（氨）燃气轮机作为未来新型电力系统的主要设备，将在未来能源系统中发挥重要作用，是实现碳中和的主要技术路径之一，欧美日等国家已经开展了广泛的示范运行，在国内也引起了能源行业的高度关注。

燃氢燃气轮机技术、燃气轮机氢能发电技术（P2G2P）在全球范围内方兴未艾。本报告在深入研究全球氢能燃烧技术发展现状的基础上，全面梳理了国外主要燃气轮机厂商最新的技术发展成果，总结了国内燃气轮机厂商的燃氢技术进展以及各主要能源企业的示范项目运行情况。

本报告得到了全球能源互联网发展合作组织、中国产业发展促进会氢能分会、国家电投中央研究院碳中和中心、中国科学院力学研究所、清华大学、中国石油天然气集团公司、中海石油气电集团有限责任公司、有研工程技术研究院、华天航空动力有限公司、北京市煤气热力工程设计研究院的指导与支持。

以下单位对本报告作出了贡献。



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织



中国产业发展促进会氢能分会
Hydrogen Energy Industry Promotion Association



清华大学
Tsinghua University



中国石油



中海石油气电集团有限责任公司



有研工研院



HUATIAN
Aeropower
华天航空动力



北京市煤气热力工程设计院有限公司
BEIJING GAS AND HEATING ENGINEERING DESIGN INSTITUTE



■ 氢与能源转型

过度使用化石能源引发的气候变化是人类面临的最大危机。大幅减少化石能源消耗和温室气体排放，控制温升是人类面临的紧迫任务。在人类活动相关的碳排放中，能源活动碳排放占比90%以上，实现能源清洁低碳转型是破解气候环境危机、促进可持续发展的必然要求。

2020年9月，习近平总书记在第75届联合国大会上发表重要讲话，提出中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性绿色革命，本质是推动经济社会全面高质量、可持续发展。

实现全社会碳中和以及能源清洁转型是绿氢产业发展的最大动力。氢在使用过程中零碳排放，可以帮助化工、冶金、航空等难以直接用电的终端用能领域进行全面脱碳，在实现能源转型和碳中和方面将发挥重要作用。但氢只有在源头上实现零碳，方能满足能源转型和低碳发展的需要。当前，全球氢产量的97%来自于化石能源制氢，在生产环节仍然会产生碳排放，无法依靠化石能源制氢实现脱碳。未来，绿氢是氢能产业的必然选择。

绿氢是联结清洁能源和部分终端用能领域的关键纽带。随着能源系统清洁转型的不断深入，供暖、交通等能源消费领域电能替代进程逐渐加快，而航空、航海、工业高品质热、化工、冶金等领域难以直接应用电能实现脱碳。通过清洁电力制备绿氢，可以间接实现这些领域的电气化。氢在清洁能源和难以直接用电的终端用能领域之间发挥关键的纽带作用。

■ 氢与电的关系

绿氢的生产来自于绿电，二者的根本都是可再生能源。大规模开发的可再生能源替代化石能源，无论是转化为绿电还是绿氢，都是能源生产清洁化的体现。绿氢的大规模开发利用，取决于可再生能源发电技术的进步和成本下降。成熟的绿氢制备体系需要建立在经济、高效的可再生能源发电体系基础之上。同时，绿氢也为促进可再生能源大规模开发利用提供有力支撑。氢及其衍生的合成燃料、原材料借助成熟的工业仓储、物流体系进行存储，有望解决新能源季节性的大幅波动给电力系统带来的“长周期”型灵活调节资源稀缺问题。绿氢与清洁能源发电和谐共生，有力支持可再生能源的发展。

绿氢的应用相当于绿电的延伸，间接提高终端电气化水平。氢的应用广泛，包括航空、航海、化工、冶金等难以实现电气化的领域。在这些领域使用绿氢替代化石能源，相当于间接电能替代，提高终端对清洁电能的总体需求，降低用能侧的碳排放强度，实现能源消费电气化。

绿氢与绿电可相互转化，易于耦合建立多能源品种的零碳能源供应体系。绿氢来自于电解水，也可以通过燃料电池或燃氢燃气轮机进行发电，相比其他能源，氢能更容易实现与电能的双向转化。氢是具有实体的物质，大规模存储相对方便，生产与消费之间不必严格的实时平衡；电是能量形式，传递和使用过程能耗低、效率高。电氢耦合可以充分发挥二者的优势互补作用，显著提高能源系统的灵活性，促进可再生能源消纳，满足终端多种能源需求。

■ 燃氢燃气轮机对于构建新型电力系统的作用

利用绿氢的燃氢燃气轮机对新型电力系统的构建将发挥重要作用，是实现碳达峰、碳中和的重要技术手段。

绿氢可以显著增强电力系统的运行灵活性。风光为主的波动性新能源装机占比大幅增加后，源荷双侧不确定性显著增强，将带来不断增长的日内、月度、季节性灵活性需求，特别是若月度电量分布与负荷需求不匹配，将存在季节性电量平衡难题，一般的储能技术无法解决。根据不同技术路线，电制氢技术可以提供秒级至分钟级时间尺度的灵活性；此外，氢及其衍生的合成燃料除终端直接用能外，富余部分进行长期存储，在电力系统出现缺口时通过燃料电池或燃气轮机等发电设备重新转化为电，相比直接储电更易实现大规模长期储能。2060年中国制氢用电量预计将占全社会用电量的20%，其中蕴含着巨大的灵活性潜力。

绿氢可以借助燃氢燃气轮机技术提升电力系统的供应保障能力。风光电源的置信容量低，最小出力与实际容量差距大。随着风光装机占比的不断提升，电量效益明显，但容量效益较弱，特别是极端天气影响风险加大的情况下，系统供电保障能力面临重大挑战。氢能可将电能以物质形态储存下来，具有储存时间长、能量密度大、电氢转换方便的优势，能够在系统供应紧张的情况下，通过在供应侧利用燃氢燃气轮机输出电能，在负荷侧调节电制氢负荷，为电力供应提供保障。预计到2060年，中国燃氢燃气轮机装机容量有望突破2亿千瓦，年发电用氢超过1000万吨。

燃氢燃气轮机可为电力系统的安全性提供支撑。在风光电源与跨区直流互联不断增长的趋势下，电力系统电力电子化成为必然趋势。以电力电子装置为基础的机组惯性低、抗扰性弱，机端电压低，逐级升压接入电网后与主网的电气距离是常规机组的2~3倍，将导致电力系统频率和电压稳定面临严峻挑战，宽频振荡等新问题也将由于交流系统的电压支撑较弱、短路比不足而成为隐患。氢燃气轮机属于同步发电机，出力可控性高，具有高爬坡率，频率调节和电压支撑能力强，可以作为煤电等传统机组退出后系统安全稳定的支撑性电源。

通往零碳道路的燃气轮机

01

燃氢燃气轮机的优点

燃氢燃气轮机的优点	5
-----------------	---

02

氢能电厂的产业基础

氢气生产	6
储氢和输氢	8
氢气供应的稳定性	8
氢能电厂安装与调试 的标准与规范	8

03

氢气燃烧

前沿技术	9
氢气燃烧的挑战和研究需求	10

04

现有燃气轮机的改造

燃料灵活性	14
对电厂性能和灵活性的影响	14
对热通道部件寿命的影响	14
机组改造需求	14

05

燃氢燃气轮机的技术进展

安萨尔多	16
贝克休斯	17
通用电气	18
华天航空动力	19
曼能源	20
三菱日立	21
西门子	22
索拉透平	23

06

欧美日等国燃氢燃气轮机发展战略

美国	24
日本	24
欧洲	25
英国	25

第一章：燃氢燃气轮机的优点

燃氢燃气轮机的优点

根据国际能源署(IEA)对2度情景的预测¹，在美国，可以通过增加风能和太阳能等可再生能源(RES)的市场份额来实现发电部门的全球去碳化。然而，这些可再生能源提供的电力供应具有波动性，需要具有可靠性、经济性和可持续性的其他形式的发电电源来进行平衡。在“氢气的未来”中⁴，国际能源署描述了氢气对清洁能源转型能够做出重大贡献的潜力，包括在电力领域能够做出的重大贡献。燃氢燃气轮机的发展可以成为未来的碳中和技术，以支持国际社会实现雄心勃勃的能源和气候目标。事实上，燃氢燃气轮机将实现能源行业长期的深度减碳，同时整合更多的可再生能源。

2019年1月，燃气轮机行业郑重承诺到2030年开发出燃烧100%氢气的燃气轮机，通过克服技术挑战，确保这一转变迅速发生，全面支持全球天然气电网向可再生能源系统的转型。

燃气轮机已经在能源系统中发挥了关键的平衡作用。通过将燃气轮机的燃料能力扩展到氢气，它们的作用不仅在能源转型时期，而且在长期能源战略中也将占据主导地位：

- 基于燃气轮机的燃气蒸汽联合循环是目前最清洁的燃用化石燃料的热力循环发电形式，事实上，在相同的发电量下，与燃煤电厂相比，使用天然气为燃料发电的燃气轮机的二氧化碳排放量减少了50%；
- 可再生气体(如绿氢、沼气、合成气)与天然气混合可以进一步减少二氧化碳的排放，这可以通过直接注入天然气管网或在电厂内部来实现；
- 工业界致力于到2030年使燃气轮机完全使用可再生气体燃料，从而具备100%碳中和的燃气发电的能力。随后的目标是在联合循环配置中实现电厂的热效率达到65%以上；
- 燃气轮机具有灵活性，非常适合频繁起停，能够快速响应电网需求，使其与波动的RES互补。

2018年，超过五分之一的欧洲电力来自燃煤发电²，与此同时，全球现有大量相对新型、高效且非常灵活的燃气轮机，无论是开式循环还是联合循环，均以其总容量的有限百分比运行。

通过加快从燃煤发电向燃气发电的转变，全球可以在未来十年内，通过相对有限的努力和投资，以及适用未来发展的技术，在该行业脱碳方面迈出巨大的一步。

本质上，燃氢燃气轮机将补充风能和太阳能的间歇性，因为它们可以用作伴生电源。在风力和日光充足的情况下，可以通过利用多余的可再生能源电解水制氢，或者通过天然气重整制氢，结合采用碳捕集技术，天然气重整也是一种碳中和技术。在这种情况下，氢重整将被视为一个生产装置，可以在短时间内供应足够的氢气，并能够构建一个包括储存在内的氢能基础设施。燃气轮机具有从小型分散系统到大型集中系统的可扩展性，能够适应生产能力和本地存储。总而言之，通过电解水制氢以及燃氢燃气轮机发电，可以实现新能源电力的长周期储能与调节。

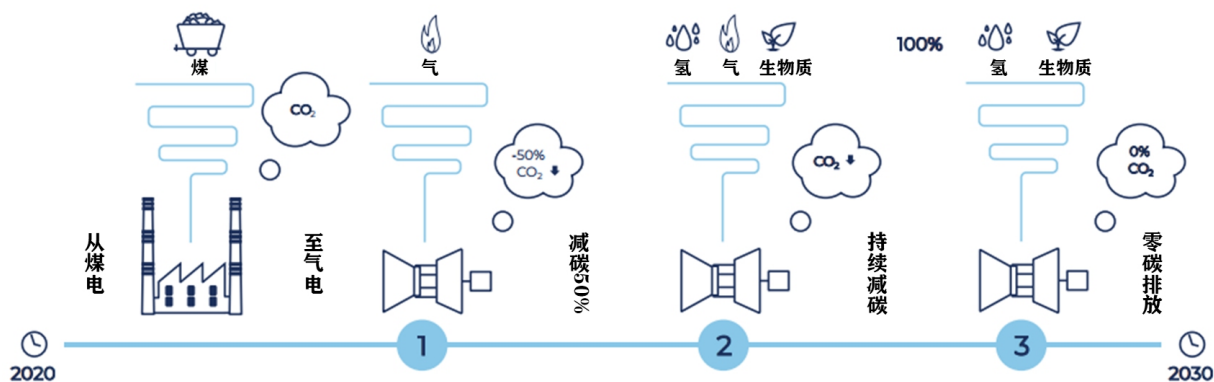


图1：燃气轮机在全球能源转型中的作用

为现有燃气轮机开发改造解决方案是推动与实施燃氢燃气轮机技术的关键因素。最初可以通过对现有燃烧室进行相对较小的改造来实现第一步，从而允许将氢气混合燃烧到最大含量（>30%，碳减少量为11%）。通过增加现场应用经验，将有助于进一步开发新型燃烧室，使氢气含量达到100%，且无需稀释剂进行排放控制。由于燃料中碳含量与体积氢含量之间存在非线性关系（如图2所示），因此必须尽快使用更高的氢含量，以最大限度地提高对碳排放量的影响程度。

甲烷/氢气混合物的碳强度

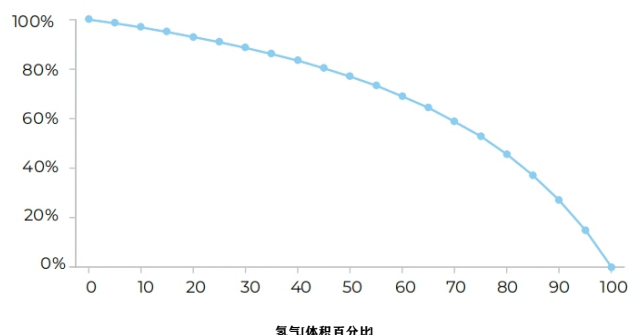


图2: 甲烷/氢气混合物中的碳含量

现有天然气基础设施的利用

燃气轮机使用基础设施完善的天然气作为燃料来源。在现有的基础设施内，氢气和天然气的混合物可以通过少量或无需任何改造进行输送，这使得整个系统可以重复使用，而无需大量费用。例如，荷兰2008年在Ameland岛³的一个试点项目中，已经向其天然气管网注入了高达20%的氢气。2019年，国家电投建设了国内首个“绿氢”掺入天然气输送应用示范项目，按10%的掺氢比例，将可再生电解水制取的“绿氢”注入管线与天然气掺混。这一概念可以复制到其他地区，开始在燃气轮机中燃烧天然气和氢气的混合物，以减少碳排放。然而，新的或改装的管道基础设施对于100%的氢气输送来说是必要的，但在制氢点燃烧氢气将是初始阶段解决该问题的一种方法。

现有燃气轮机的改造

燃氢燃气轮机的设计在一定程度上依赖于现有的燃气轮机技术。没有必要设计和制造用于氢气燃烧的全新燃气轮机。需要特别注意修改燃烧室和一些辅助部件，但大多数现有燃气轮机可以改造为部分或完全燃烧氢气。这种转换不仅可以避免巨额的资本支出，还可以节省将现有大型燃气轮机转换为燃氢工况的时间。开发和部署燃氢燃气轮机技术的另一个主要好处在于赋予现有设备新的经济增长点。事实上，全球许多国家都存在最先进的燃气轮机闲置或运行时数不足的问题，中国也存在大量的调峰机组，保持这些发电厂的利用率也将对社会和工业做出重大贡献。

100%排放达标

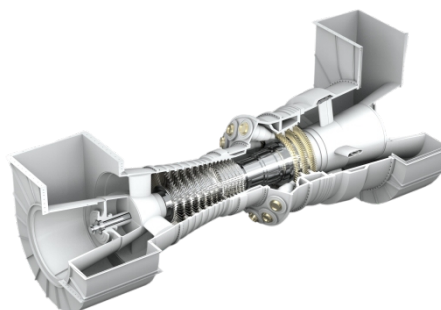
目前的燃气轮机已经可以通过扩散燃烧方式燃烧纯氢，但仍然会产生NO_x排放。因此，目前研究和开发的重点是干式低NO_x技术，该技术将大幅减少或消除NO_x排放。就热效率和输出功率而言，现有燃气轮机和燃氢燃气轮机（均采用干式低NO_x技术）之间的差异将微乎其微。

工业部门深度脱碳

供热行业是全球最大的碳排放来源之一。为了减少二氧化碳排放，可以利用热电联产（CHP）电厂中燃氢燃气轮机的余热。通过将燃氢燃气轮机与其他行业（如化工和炼油厂）耦合，实现进一步脱碳。

对氢能发展的引领

鉴于燃氢燃气轮机的特点，它可以刺激对大量低纯度氢气的商业需求，从而有助于降低氢能的生产成本，并在多个工业部门广泛应用。通过研发可以进一步降低整个氢产业链的成本。在这方面，全球燃气轮机研发的政府资助计划可以成为氢社会的关键贡献者。需要内部行动者之间的合作，以消除更广泛部署氢基解决方案的障碍。



第二章：氢能电厂的产业基础

氢能电厂的产业基础

本章评估了氢能电厂实施的先决条件，并涵盖了氢价值链中需要进一步研究和开发的关键点。介绍了当前氢气生产、储存和运输的技术路线，并强调了稳定供应的重要性，因为现场可用的氢气是将其用作发电燃料的必要先决条件。最后，这些要点都是氢能发电厂投资、安装及调试的技术经济评价要素。

氢气生产

制氢是氢能发电厂的第一个基本先决条件，这里确定了四条脱碳制氢技术路线（见图3）：

- 1 .电解水，利用可再生能源在发电中的富余电量进行，以确保脱碳；
- 2 .天然气重整，与碳捕集和封存（CCS）或碳捕集和利用（CCU）相结合，以确保脱碳；
- 3 .固体燃料气化（如煤炭），与碳捕集和封存（CCS）或碳捕集和利用（CCU）相结合，以确保脱碳；
- 4 .生物质转化，通过消化、气化或重整进行转化并升级。当与CCS结合时，能够达到碳中和，甚至是负碳的。

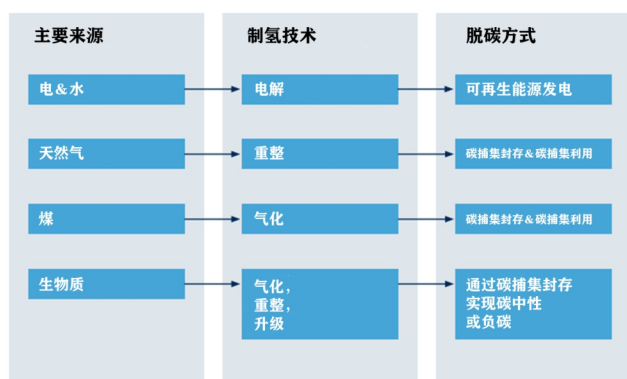


图3：制氢技术路线

考虑到运输和储存解决方案，使用氢气作为燃料的一个必要先决条件是其在现场的可用性。

电解水和碳氢化合物重整是目前主要的制氢技术之一。目前，通过电解水大量制取氢气在经济上和技术上还需要进一步提高，欧洲已经开始了示范项目的运行。与此同时，碳氢化合物重整已经在氢能基础设施中开始了规模化应用。国内，在徐州伟天化工、潞安煤矿、利源集团等焦化化工企业已经有了较多的灰氢发电应用案例。

国际能源署⁴的数据显示，全球每年的制氢量约为7000万吨，其中76%来自世界各地设施的天然气重整，其余部分几乎完全来自中国的煤气化。目前电解水技术的产量仅占全球氢气产量的2%，然而，随着可再生能源装机总量的增加，市场渗透率预计将增加。根据成本预测，预计到2030年，化石燃料将继续主导欧洲氢气生产格局，如图4所示，为了减少碳排放，还考虑了CCU/CCS系统的安装。

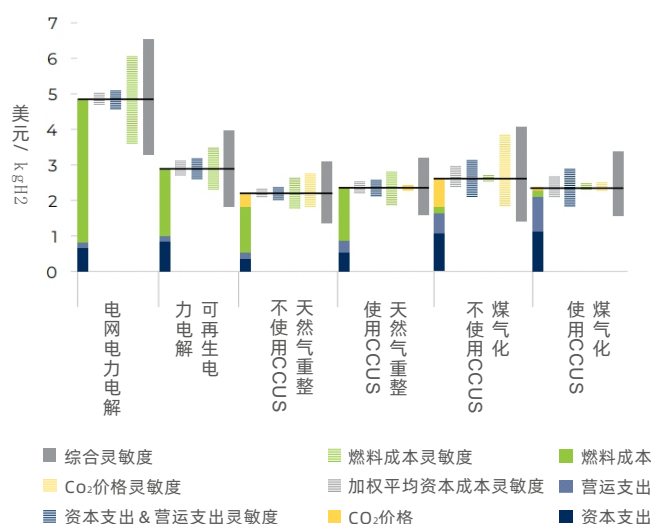


图4：2030年不同技术方案制氢的预测成本，WACC=加权平均资本成本。资料来源：IEA（2019年）

全球每年氢产量
约为7000万吨

蒸汽-甲烷重整

蒸汽甲烷重整是基于烃类燃料制氢的最常用方法⁵，这是一项成熟工艺，在高压条件下(3-25bar)下，使用温度在700°C和1000°C之间的蒸汽从高甲烷含量的燃料中生成氢气。燃料可以是天然气或提纯后的沼气，也可以是合成气、乙醇、丙烷或汽油。该反应需要催化剂，并加热以产生高温蒸汽。

另一种方法是部分氧化，即天然气中的甲烷和其他碳氢化合物与少量氧气发生反应。在亚化学当量条件下进行该反应时，产物主要含有氢气和一氧化碳，如果用空气而不是纯氧进行反应，则产物中含有氮气。

部分氧化是一个放热过程，因此会释放热量。工艺动力学比蒸汽重整快得多，并且由于设备较小，因此需要较少的空间。然而，每单位甲烷产生的氢气量低于使用相同类型燃料的蒸汽重整工艺。

电解水

氢可以通过电解水来产生，即利用电将水分解为氢和氧。目前，市场上主要有三种不同类型的水电解槽制氢技术^{6、7}。主要是其所使用了不同的电解质：碱性、质子交换膜或固体氧化物。

碱性电解槽 (AEC) 是一项成熟的技术，是目前最具商业价值的电解槽。目前最先进的工厂在60°C至90°C的电池温度下运行，典型压力在10至30bar范围内。基于较低热值的电堆效率在63%至71%之间变化，而系统效率则低10个百分点以上(51%-60%)⁷。尽管冷启动时间在1到2小时之间，AEC在达到工作温度时仍能提供较大的变负荷能力(20%到100%)和快速的响应时间(秒级)。

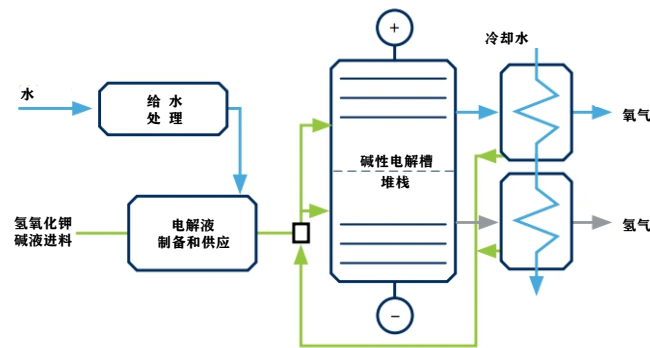


图5：碱性电解槽装置的布局⁷

质子交换膜电解槽 (PEMEC) 的工作温度为50°C至80°C(预计未来上限将增至90°C)，压力为20至50 bar。市场上产品的电堆效率在60%到68%之间变化，而整个系统的效率通常在46%到60%之间，AEC与PEMEC都是基于较低的热值。PEMEC的冷启动时间为5至10分钟，灵活负载可在0%至100%之间变化。该技术商业化的主要障碍是其高堆叠成本⁷。

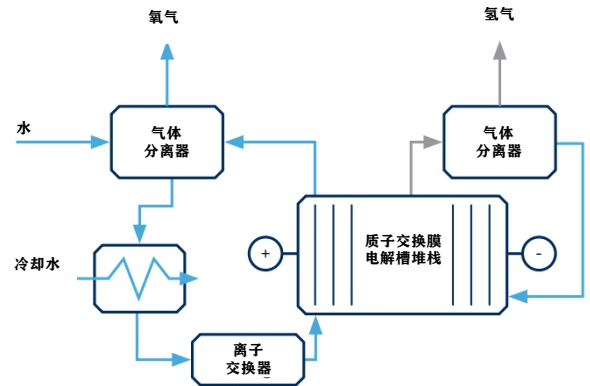


图6：PEMEC工厂布局方案⁷

固体氧化物电解槽 (SOEC) 是最新和最高效的电解槽，基于较低的热值⁷，其效率值在电堆上可达到100%，在系统水平上可达到76%-81%。该技术在更高温度(700°C至900°C)下使用蒸汽运行。SOEC不如AEC和PEMEC灵活，冷启动时间在几个小时内。最先进的SOEC在高电流密度(明显高于1 A/cm²)下，在两个电极中都会发生显著降解，降解机制已经确定，目前正在研究提高电极寿命的方法。

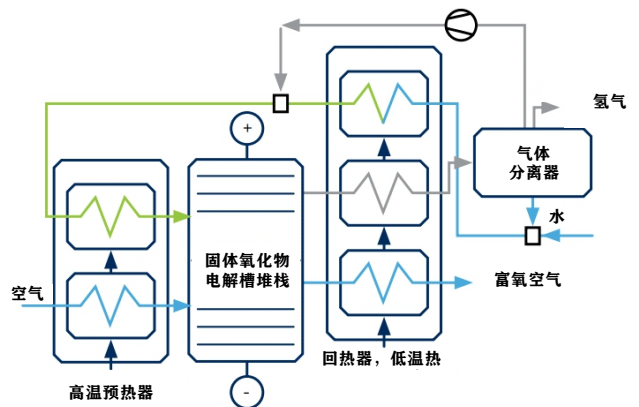


图7：SOEC电厂布置方案⁷

储氢和输氢

储存和输送对于未来能源系统中氢的部署至关重要。技术解决方案与氢的物理状态和/或其纯态或与其他分子结合密切相关。这些不同的状态描述如下：

- 通过管道输送气态压缩氢是大规模应用的有效方式⁹。然而，在现场生产和储存氢气可能是一种经济上可行的替代方案，以使用其他受到限制的可再生能源。洞穴或枯竭的油气田也可用于储存大量气态氢，具体取决于现场的地质条件。高压储存似乎是最可行的，因为在膨胀过程中可以回收一些能量。
- 液化氢----氢气在大气压下冷却到-252.87°C以下时会变成液体。为了承受如此低的温度并减少传热，液态氢的运输和储存需要使用复杂的绝热容器，从而增加了相关成本。目前的研究主要集中在提高液化过程的能效以及保温和冷却方法。
- 氨----以氨的形式储存和运输氢气是一项越来越受到重视的技术。目前正在研究降低该工艺过程的能耗⁹。
- 液体有机物储氢（LOHC）----LOHC中氢的储存概念基于两步循环：将氢（氢化）装入LOHC分子，并在运输和储存后卸载氢（脱氢）。该技术仍处于研究阶段，但可能在未来形成一种替代技术^{10、11}。目前，该技术效率低，体积大，因此不适合燃气轮机应用。

下面的图8显示了根据氢气状态考虑的氢气储存和输送方式。

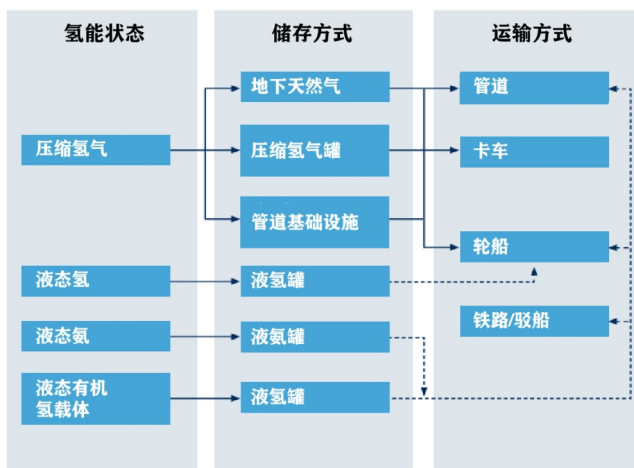


图8：根据氢状态进行氢输送和储存的方式

应用以上制氢、储氢和输送技术的工厂都已建成。然而，在考虑整个系统集成时，需要对系统动力学与可再生能源波动性影响进行深入研究。

储存和运输 对于未来能源系统中 氢的部署至关重要

氢气供应稳定性

随着波动的可再生电力份额的不断增加，生产和需求状况不匹配，需要以燃料的形式储存能源。未来，氢能发电将扮演可调度备用电源的角色，以平衡需求侧和发电侧，并稳定电网。因此，储存和储存能力是稳定燃料供应的基本要素，也是可靠和稳定的能源系统的基本要素。燃气轮机的高燃料灵活性能够适应不同比例的含氢燃料。

氢能电厂安装与调试的标准与规范

尽管氢能技术在行业（如化工和石油行业）中已广为人知，但氢能发电厂的运行仅处于试验阶段。因此，缺少氢能电厂安装和调试的规范或标准，包括生产、储存和发电。因此，挑战之一是将其他行业的现有专有技术转移和整合到氢能发电行业，如有必要，对其进行调整以适应电厂的具体情况。氢气生产与氢能发电设施配套建设可能是有益的，因为可以避免运输氢气，从而降低相关成本和损失。这还将减少总体地理足迹和环境影响，因为该技术将利用现有的电气基础设施，避免安装或修改天然气运输基础设施。

绿色制氢附加组件（即电解槽、储存和燃料混合装置）的集成非常复杂，经验有限。因此，预计第一批原型装置将需要额外的努力。HYFLEXPOWER项目是世界上首个集成利用电力制氢和燃氢发电的燃气轮机示范工程。由法国能源集团Engie（欧洲最大能源集团）、西门子天然气和发电公司，Centrax，Arttic，德国航空航天中心（DLR）和四所欧洲大学组成的联合项目团队负责实施。

第三章：氢气燃烧

氢气燃烧

本章概述了纯氢和天然气/氢混合物燃烧、用氮气或蒸汽稀释扩散火焰以及贫油预混系统的当前技术状态。此外，还总结了以往关于该方向的国际研究成果，涵盖了从可行性研究到试点项目的技术准备水平（TRL）。

本章第二部分重点介绍燃烧和控制系统应考虑的实际因素，特别是与自燃、回火、热声学 and NO_x排放相关的挑战，并描述了解决这些问题的相关研究需求。

前沿技术

■ 用氮气、水或蒸汽稀释扩散火焰

带有扩散火焰和氮气或蒸汽稀释的燃烧系统是较为先进的系统，可燃烧高达100%体积的氢气。然而，该系统有几个缺点，包括与没有稀释的系统相比，效率降低；与贫油预混合技术相比，工艺更复杂，从而导致更高的投资和运营成本。对于在联合循环或CHP配置中运行的大型燃气轮机，蒸汽稀释在减排和电厂效率方面明显优于氮气稀释。

总的来说，应首选燃料与稀释剂的预混合，因为它可以在减排方面实现更高的效率。

虽然这些系统可以燃烧不同的燃料，但在大多数情况下，电厂启动需要使用“安全”燃料（即柴油或天然气）。与使用天然气或柴油的燃气轮机相比，需要对辅助系统中的硬件进行重大改造，以满足燃料体积流量增加的要求。压气机喘振裕度问题可通过改进压气机或减少进气质量流量来解决。

■ 贫油预混系统

贫油预混燃烧室技术具有更大的潜力。然而，这项技术还不太成熟，在使用氢含量极高的燃料甚至纯氢以及燃料灵活性较高的燃料方面，技术还不够成熟。

由于采用了不同的燃烧技术，不同原始设备制造商（OEM）的燃气轮机发电机组中，贫油预混燃烧室中的最大允许氢气浓度存在显著差异。每个OEM都会仔细评估氢含量较高的燃料，并根据每个具体项目的特点，逐个评估贫油预混燃烧系统的适用性。

目前不同等级的燃气轮机允许的氢含量典型值高达30-50%（重型燃机）、50-70%（小型燃机）、20%（微型燃机）。氢气含量上限不同的原因与不同燃气轮机等级中使用的不同燃烧温度和燃烧技术有关。第5章-“燃氢燃气轮机的技术进展”中，给出了不同OEM的燃气轮机系列的参考值。

一些OEM提供的燃气轮机可以燃烧燃料中高达30-60%体积含量的氢气。然而，目前市场上还没有能够燃烧纯氢的商业化燃气轮机，这项技术还需要进一步研发，开发纯氢的燃烧系统更具挑战性，且需要应对未来氢燃料供应的潜在波动。

■ 氢气燃烧研究项目现状

之前由欧盟资助的项目侧重于将富氢合成气燃气轮机与预燃碳捕集和封存系统相结合的潜力。例如，DLR与西门子和阿尔斯通作为欧盟FP6 ENCAP项目（欧盟拨款502666）¹²的合作伙伴一起进行了广泛的氢燃烧研究

在更高的技术准备水平（欧盟FP7 H2IGCC项目中的示范），氢和氮的混合物在加的夫大学（英国）进行了检测，氢氮混合物的体积分数高达85%，其中氢的体积分数为15%。

改进后的Ansaldo Energia（意大利）贫油预混燃烧器中的氮气达到2MW和4bar，尤其是对回火、NO_x排放和热声的影响¹³。除此之外，Sesta实验室（意大利）还进行了高达83%体积的氢气和17%体积的氮气的整机燃烧试验。在同一氢气IGCC项目中，在PSI（瑞士）¹⁴进行了含氢燃料混合物（70%-30%体积氢气-氮气、85%-15%体积氢气-氮气和100%氢气）湍流火焰速度测量。

由英国工程和物理科学研究委员会资助的低TRL水平研究专注于将氢气混合到天然气管网中（EPSRC Flex-E-Plant项目，EP/K021095/1），用于加压燃烧器测试¹⁵，天然气中氢气含量高达15%；用于常压燃烧器测试¹⁶，天然气中氢气含量高达40%。其他项目已经评估了二氧化碳作为SMR-CCS系统中纯氢燃烧的稀释剂（EPSRC高级燃气轮机项目，EP/M015300/1），这验证了实现高压纯氢稀释稳定燃烧的技术可行性¹⁷。

欧盟正在进行工业试验项目，考虑将天然气与氢气混合，或使用纯氢燃气轮机。例如，位于奥地利梅拉赫的VERBUND、Graz理工大学和Sunfire之间的合作伙伴Hotflex/（欧盟H2020赠款779481），旨在将可再生能源制成的“绿氢”混合到838 MW天然气CCGT发电厂¹⁸中。欧盟H2020 EnableH2项目特别关注在航空领域使用氢气作为燃料（欧盟拨款769241）¹⁹。

欧盟以外，包括美国和日本在内的国家主导了燃氢燃气轮机的研究资助。从2005年到2015年，美国政府大约每年为美国能源部化石能源燃氢燃气轮机项目办公室提供1500万至3000万美元的研究资金，包括向通用电气（NT42643）和西门子（NT42644）以及其他行业和大学合作伙伴²⁰提供的大笔资助。比如，美国目前也在支持低TRL基础氢燃烧研究，回火的计算模型（DOE协议FE0012053）和中试规模的天然气转化为氢气用于燃气轮机（DOE协议FE0031615）。从2018年起，日本新能源和工业技术发展组织（New Energy and Industrial Technology Development Organization）开始实施一项“基础氢能战略”，资金水平接近100亿日元（约8000万欧元），用于开发燃氢燃气轮机技术、氢气供应链和燃气发电技术²¹。

氢气燃烧的挑战和研究需求

在向以氢为基础的能源系统过渡的过程中，需要使用燃料适应性强的燃气轮机，以利用氢和其他气体燃料（如天然气）的混合物。燃烧室需要适应不同比例天然气/氢气混合物。在中期内，需要开发能够燃烧氢气/天然气混合物的灵活燃料燃气轮机，其氢气含量比目前更高（参见第5章中给出的当前商用燃气轮机的氢气限值）。从长远来看，需要开发具有完全燃料灵活性（氢气和天然气以及纯氢气的任何混合物）的燃气轮机，这需要高强度研发投入的支持。

干式低排放（DLE）技术有可能使燃气轮机在0-100%氢气下以低排放灵活运行。但是需要进一步研发，存在的主要技术难点如下：

- 自燃：由于点火延迟时间较短，自燃风险较高；
- 回火：由于火焰传播速度较高或点火延迟时间较短，回火风险较高；
- 优化热声振荡水平和频率；
- NO_x排放量增加；
- 其他与燃烧相关的技术难题；
- 由于Wobbe指数较低，压降较大；
- 由于传热的增加，减少了寿命/需要更多的冷却。

需要在实际条件下进行相关研究（高压和空气预热、高燃烧室出口温度、高流量和高雷诺数）。减压水平和尺寸的学术研究可以充分满足微型燃气轮机应用的条件，但显然不能满足大型燃气轮机燃烧系统的需要。缺少相关性和定义良好的验证案例。

氢的存在大大改变了“氢混合物”相对于天然气的燃烧特性。向天然气中添加氢气往往会提高其火焰传播速度，缩短其点火延迟时间，并扩大其燃烧极限²²。这些特性对火焰锚固方面的火焰稳定性产生较大影响，还可能扩大符合排放要求的调低比（部分负载性能）。同时，提高氢的比例将改变燃烧系统的热声特性，并提高局部火焰温度，如果不采取其他措施，可能会导致燃烧室出口处的污染物排放（NO_x）增加。

■ 自燃

氢的高反应性本质上增加了预混合段的自燃风险，这需要在未来的燃烧室开发中加以解决。对于某些进气温度非常高的系统，这可能是一个特殊的挑战，例如在现代高效燃气轮机或微型燃气轮机中，由于采用了回热器，为了防止燃烧室和喷嘴过热或损坏，如果使用更多反应性燃料，燃烧室通常配备热电偶。在先进、高效的燃气轮机中，需要越来越复杂的燃烧室设计（如多喷嘴布置），因此这种保护燃烧室的方法将变得具有挑战性和昂贵。特别是当提高燃料混合物中的氢含量时，需要其他方法来检测和防止发生自燃。

■ 回火

与天然气相比，燃烧富氢燃料具有更高的火焰传播速度或更短的点火延迟时间，因此本质上会增加回火风险。对于某些进气温度非常高的系统，这可能是一个特殊的挑战。

为了防止燃烧室和其他部件因在不需要的位置（如预混合段）发生回火引发的过热或损坏，必须开发检测和避免回火的方法，并将其应用于燃气轮机。

■ 热声

与天然气火焰相比，氢火焰表现出明显不同的热声特性。这是由于较高的火焰速度、较短的点火延迟时间和不同的火焰稳定机制导致不同的火焰形状、位置和反应性。

因此，与天然气相比，使用富氢燃料运行的现代燃气轮机的燃烧动力学风险（燃烧室声学频率处或附近的自持燃烧振荡）预计会增加。这意味着不希望出现的危险现象，如燃烧不稳定性、回火和贫油熄火，不仅可能在稳定条件下发生，而且发生在瞬态运行期间将更加危险，如需要快速功率变化和/或燃料成分变化时发生（参见下面图9所示的损坏示例²³）。

为了开发富氢燃料的火焰稳定燃烧系统，需要采取各种措施来避免高压脉动。此外，氢气的湍流火焰速度取决于压力（与天然气不同），这意味着目前基于球形试验台的低TRL测试策略（例如，通过测量火焰传递函数预测整机热声）是不可能的，必须进行调整。

因此，除了深入了解有助于燃烧动力学的物理机制外，还需要实时、可靠的监测和控制系统，以提高燃烧室的效率和灵活性，并保证燃气轮机的可用性。



图9: 由于机器调谐不当导致的高频（2350 Hz）热声不稳定性造成的损坏²³。

■ 较高的火焰温度和氮氧化物排放

如果不采取其他措施，较高的氢气的绝热燃烧温度将导致NO_x排放量较高。未来可能需要在NO_x限制方面具有一定的灵活性，以便实现脱碳。这将是一个特别的挑战，满足未来更严格的NO_x限制。

通过降低燃气轮机燃烧温度，将导致效率和功率下降。

对于采用燃烧后脱硝技术（即选择性催化还原）的改造项目而言，非常困难且成本高昂。因此，减少燃烧室NO_x排放是首选途径。

■ 与燃烧相关的其他挑战

沃泊指数变化

在与相同温度下燃烧天然气相比，由于氢的体积低位热值（LHV）较低，燃烧氢时需要较大的燃料体积流量。此外，氢具有较低的沃泊指数（WI），这是指定燃烧系统中气体燃料可接受性的最常用参数。沃泊指数的意义在于，对于给定的燃料供应和燃烧室参数（温度和压力）以及给定的控制阀开度，两种成分不同但沃泊指数相同的气体将向燃烧系统提供相同的能量输入。因此，沃泊指数的变化越大，燃烧系统和相关控制所需的灵活性就越大。

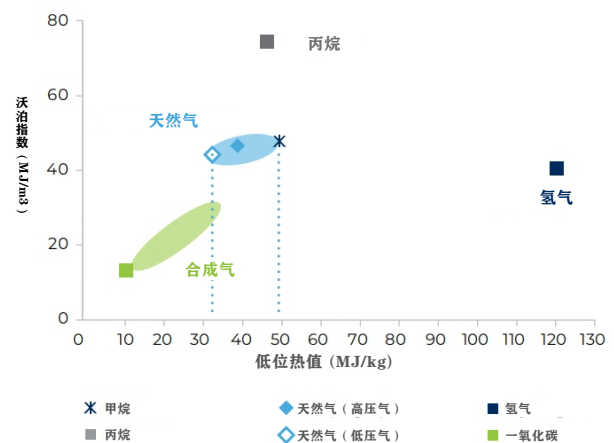


图10: 不同燃料的低位热值的指数函数²⁴

缩短使用寿命/改善热通道部件的冷却

燃烧氢气而不是天然气将增加烟气中的含水量，从而使燃气轮机热通道部件的传热更快。这将需要调整冷却，以避免部件过热。此外，由于含水量较高，更容易发生热腐蚀。因此，需要采取措施避免这些影响。

第四章：现有燃气轮机的改造

现有燃气轮机的改造

需要研究燃气轮机的系统、材料、操作和控制，以便它们安全和经济有效地过渡到含氢燃料。

考虑到燃料撬块、控制装置和燃烧系统，必须逐个评估每台机器的氢消耗量。作为一般准则，需要考虑一些划分节点，即：

- 与天然气混合的氢含量低，不需要对材料、设计、控制和保护进行任何更改。根据系统的不同，可适应0-10%（体积含量）含氢燃料。
- 中等水平的氢气与天然气混合，达到不需要对材料、设计、控制和保护进行重大改变的水平。可适应10-30%（体积含量）含氢燃料。
- 氢含量更高，需要更广泛的改装，如对燃料输送、燃烧模块、控制和保护系统进行改装，可适应30-100%（体积含量）含氢燃料。

从燃料来源的角度来看，在最佳的状态下，改装后的燃气轮机将能够在0-100%氢气/天然气混合的情况下运行。可再生能源发电制氢的随机性特点，也必然导致燃料范围的灵活性。

现有和正在进行的研究工作解决了上述一些问题，主要是在燃气轮机模型的基础上进行的。在较低的氢含量燃烧水平下，它更先进，而在高氢含量燃烧水平下，它的先进性显著降低。大学研究有助于对燃烧过程的基本理解。

氢能燃料的一般注意事项

当使用氢气作为燃料时，最重要的是考虑输送压力和温度，以避免管道和其他辅助设备发生氢脆。

当使用天然气运行的燃气轮机改为使用氢气运行时，应对现有燃料管道和燃气轮机阀门进行改造。改造可能包括采用不同密封布置的新阀门设计，以及使用新管道材料。

在石油和天然气应用中，燃料气压力和温度通常分别以50 barg和100°C的最大值输送。在这些值下，现有设备可以在没有任何问题的情况下使用氢气运行。

但是，对于优化后的CCGT中的发电应用，可以对燃料进行预热到320°C，以提高性能。

虽然不锈钢设备在50 barg和100°C时不会发生氢脆，但将温度提高到200°C左右可能会导致氢气通过材料迁移。事实上，在200°C以上的温度条件下，氢脆是一个问题，尽管316L级不锈钢被认为非常适合减少这种影响。值得注意的是，氢脆不仅与温度有关，还与影响氢气渗透的材料所承受的应力有关。

另一个需要考虑的问题是系统内不正确的氢气的吹扫。事实上，所涉及的组件越多，一些氢气留在其中的可能性就越高，在进行维护或维修时会导致爆炸风险。在此基础上，应将适当的氢气痕量测量装置视为燃气轮机使用氢气的一部分。此外，必须考虑使用二氧化碳或氮气的净化系统。

由于氢在标准大气温度下（体积分数分别为4-75%和15-59%）²⁵，在空气中的浓度范围非常广，易燃易爆，因此与甲烷或汽油相比，氢的处理成为主要的安全问题。如何解决气体扩散问题是降低风险的关键。鉴于这种气体比甲烷轻，它可能会在高空形成积聚，这在运行天然气时是不可能的。炼油厂使用专门的氢气气体检测装置。

在国际层面上，还没有颁布任何标准来规范燃气轮机中的氢气。然而，在国际标准组织技术报告ISO TR 15916:2000《氢气系统安全的基本考虑》中可以找到使用氢气的一般规则，美国能源部科学和技术信息办公室技术报告INEEL/EXT-99-00522《氢作为车用燃料的安全问题》和美国国家消防协会标准NFPA 50A《消费者现场气态氢系统》。目前已有氢气使用的安全标准及区域分类要求，这些要求将适用于使用氢气的燃气轮机辅助设施。

燃料灵活性

混合燃料（天然气/氢气）的变化率将是未来发电厂需要满足的关键要求，在可预见的未来，这些发电厂将主要由现有设施基础上的改造完成。天然气或液体燃料通常作为启动燃料是这些机组在启动时安全管理的基础，也可能是停机时安全管理的基础。首选的替代方案是在启动和正常运行时使用相同的燃料。对于氢浓度较高的情况，可以使用扩散燃烧模式启动实现这一点，一旦燃烧室内的流场足够稳定，并且当预混器中的空气速度足以防止回火时，扩散燃烧模式将转换为完全预混模式。

这些资产的运营商将寻找不因氢气生产变化而限制燃料输送（即与燃料管道中氢气浓度变化相匹配）的燃气轮机解决方案。

对于连接到输气管网的燃气轮机，不可能控制输送到电厂的燃料成分。虽然引入管网的氢气比例可能会随着时间的推移逐渐增加，但预计地方举措将导致某些地区的氢气含量增加得更快，例如，英格兰西北部拟建的HyNet²⁶项目。因此，运营商必须尝试预测其每个工厂位置可能引入氢气的量，并对预期的燃料成分范围进行必要的修改。如果以计划和协调的方式将氢气引入管网，运营商将能够安排所需的升级。目前，整个欧洲在这方面存在着重大的不确定性。

由于可再生能源发电的间歇性，氢含量的短期波动可以通过逐步将其混合到管网中或通过储存来最小化。这需要管网运营商进行监管。如果无法做到这一点，则需要燃气轮机系统中建立更快的燃料成分分析能力。

对电厂性能和灵活性的影响

迄今为止进行的研究表明，对于燃烧系统更换和高比例氢燃烧的天然气发电机组，燃气轮机的功率输出应保持相似。氢气的反应性增加和火焰传播速度加快，迫使采用新的燃烧和燃料喷射设计来进行高速氢气燃料加注。一个可能的问题是，富氢燃烧能够在多大程度上达到天然气电厂的运行水平。很可能在天然气向氢气过渡期间的某个划分节点，必须在排放、功率输出或功率输出斜率方面做出妥协。由于氢的反应性更高，当在更高的氢浓度下运行时，由于CO排放将减少，因此调节率可能会提高。

对于依赖高爬坡率（例如频率响应）的电网支持服务，可能需要对燃料混合进行一些短期调整，并需要更复杂的燃料输送控制系统。这些解决方案可能因燃机类型而异，因此适用规律可能需要一系列工程解决方案。

对热通道部件寿命的影响

氢气柔性燃烧系统的改造可能会改变热通道的温度分布。虽然微型喷射器类型（多点）喷射器可能会降低温度变化，但原始热通道部件几乎不可避免地会出现与最初设计的温度场所不同的温度分布。每种燃机类型的变化或多或少都有所不同，因此不能一概而论。

正确的假设是，每个改装解决方案都应通过缩比试验进行鉴定，并对关键燃机热通道部件进行适当的验证和风险管理。通过相似性进行验证、增加检查和分析到寿部件将是该鉴定过程的一部分。

如果NO_x控制需要稀释剂（水或蒸汽），这通常会缩短热通道部件的维护周期或导致燃气轮机降工况。

机组改造需求

资产改造的大多数客户将是大型公用事业公司、炼油厂或大型流程客户。作为任何项目要求的一部分，他们的项目要求包括风险可控和新产品鉴定。这意味着，任何氢燃料改装都将是主流燃气轮机型号购买高质量且定义明确的选项或模块，或者是对此类产品进行试点采购。由于产品开发投资成本较高，这项工作不太可能作为单个型号机组改装进行。

改造方案包括：

- 更换燃气轮机核心燃烧模块
- 仪器仪表和燃料控制系统改造
- 电厂燃料输送系统改造，包括吹扫、计量、气体成分监测、安全系统（包括机组传感器和通风系统升级）以及提供启动燃料供应的改造
- 为实现此类改造的经济性，尽可能使用现有的热通道部件设计

燃氢燃气轮机的技术进展

本章概述了目前各厂商燃气轮机可燃烧的氢含量，以及有关新设备和改装的进展。

尽管所有燃气轮机制造商已经做出了相当大的努力，以更清楚地确定现有燃气轮机产品可以承受的氢含量，会引发哪些有害影响（例如，较高的NO_x排放量，缩短热通道部件的使用寿命），以及可以采取哪些即时和长期措施来缓解这些问题，为了使燃气轮机符合高氢含量气体燃料（主要是混合到天然气中的氢）的要求，仍需进行大量工作。

为燃烧合成气（源自化石燃料或生物质气化）开发的燃气轮机产品积累了高氢含量燃料的主要经验，氢浓度范围在30%至60%体积之间，具体取决于所用原料和气化技术（剩余燃料成分主要为一氧化碳）。为了应对越来越多的氢（来自电解水）混合到天然气中，需要重新审视和调整合成气燃烧经验。因此，大多数燃气轮机原始设备制造商可以提供专门的燃气轮机产品（最初为合成气应用开发），该产品也可以使用氢气含量非常高的天然气/氢气混合物（约60%体积，在某些情况下甚至高达100%）。然而，这些燃气轮机确实需要特殊的燃烧技术（扩散燃烧器、氮气和/或蒸汽稀释、注水），以应对高反应性燃料混合物的挑战，而且大多数情况下，仍然不能保证与天然气燃气轮机相同的低NO_x排放值（25ppm）。

这些燃气轮机确实需要特殊的燃烧技术

因此，最终研发目标是实现最先进的低NO_x排放（<25ppm），燃料气混合物中含有越来越多的（绿色）氢气（来自电解水），最高可达100%。到目前为止，主要的研发工作是基于当前干式低排放（DLE）燃烧技术（无稀释和/或注水的贫油混合燃烧）的新的/改进的燃烧技术研究。通过燃气轮机OEM厂商（安萨尔多、贝克休斯、通用电气、华天航空动力、曼能源、三菱日立、西门子、索拉透平）关于DLE燃烧系统调整方面的相关报告，成功测试了使用高达20%体积氢气（甚至30%体积氢气）的燃气混合物运行的先进燃气轮机产品。在某些情况下，仍然需要降低燃气轮机的额定功率（通过降低火焰温度来实现降低额定功率）。还正在开发具有新型燃烧概念（例如微混和恒压顺序燃烧）的燃烧器，并在燃气轮机试验台上进行了试验验证。

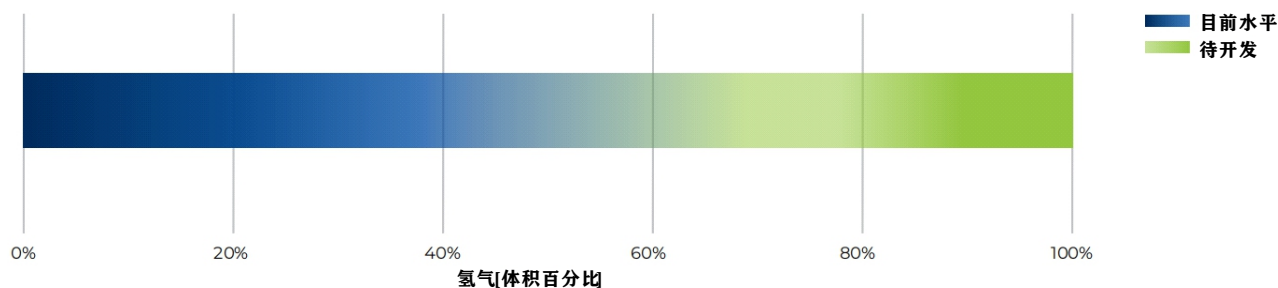


图11：现有燃气轮机产品中可接受的氢气比例



安萨尔多

安萨尔多能源公司目前其燃气轮机能够适应以下范围含氢燃料：

- GT36 H级燃机可适应0-50%氢含量的天然气混合燃料
- 天然气中的氢气体积分数为0-30%或0-45%，具体取决于各自的GT26 F级燃机额定值，AE94.3A F级燃机能够适应含氢量高达25%的天然气混合燃料

此外，还提供了以下改造解决方案：

- 对于配备贫油预混燃烧室的GE 6B/7E/9E机组，天然气中氢气含量高达35%
- 带火焰板燃烧器的燃机改造后可适应0-40%的含氢燃料（可用于现有GE、西门子和MHI、E和F级燃机）

采用回热技术的Ansaldo GT26燃机的优点在于具有额外的自由度，可平衡两个燃烧器的功率。第一个燃烧器火焰温度的变化是保持低NOx排放以及抵消燃料反应性对下游回热燃烧器^{27,28}自燃延迟时间的影响的有效参数。对现有Ansaldo GT26标准预混和回热燃烧器进行了全面的单燃烧器高压试验，其中天然气中氢气含量为15%至60%。这证实了最新的H级燃机（2011年）可以在不改变硬件和性能的情况下燃烧高达30%的氢气含量。通过进一步验证和最低限度的降工况，该限值可扩展至45%的氢气含量。



图13：GT26/GT36的布局图

Ansaldo GT36在更大程度上利用了这种额外的自由度。由于这种环管形燃机没有将两个燃烧室分开的高压涡轮，被称为恒压顺序燃烧（CPSC）。因此，当降低两个燃烧阶段之间的温度时，不会导致效率或功率损失。GT36目前可用于商业运行，氢含量高达50%。正在进行进一步验证，包括全尺寸高压试验²⁹。在硬件保持不变的情况下，氢含量高达70%的运行被证明是可行的，且无需稀释或选择性催化还原（SCR）。随着进一步优化，预计该水平将进一步提高。由于CPSC系统是一个环管型燃烧室，因此原则上可以推广应用于其他环管型燃机的改装。最近，安萨尔多能源公司（Ansaldo Energia）和埃奎诺公司（Equinor）宣布了一项关于100%氢气燃气轮机燃烧器的合作项目³⁰。

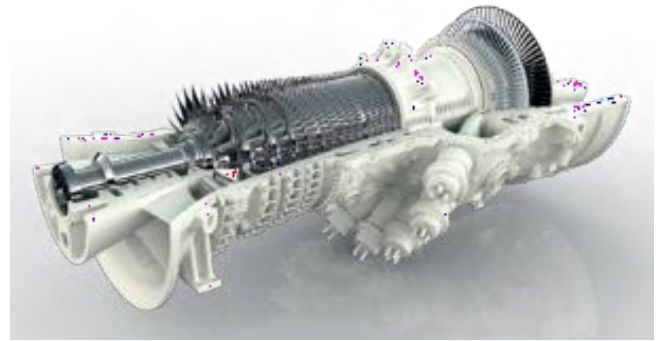


图12：AnsaldoGT36

AE94.3A在商业电厂的氢气运行方面获得了广泛的经验，在天然气中使用浓度高达25%的氢，在各种氢/天然气混合物的两个机组上累积数十万等效运行小时。

对3x 9E燃气轮机进行改造，证明其能够燃烧氢气浓度为25%，其中35%的体积通过了低于9ppm的NOx排放测试。在过去两年的商业运行中，燃烧室升级与自动调谐（自动调谐系统）相结合，证明了其在不同天然气/氢气混合物中的稳定运行。利用邻近化工厂的氢气废气进行灵活运行，可降低燃料成本，减少碳足迹。

“火焰筒燃烧室”³¹是专门开发和验证的一种商业解决方案，用于低排放和高燃料灵活性的改装，可在E和F级燃气轮机中进行商业运行，氢气比例高达40%。在燃烧试验台上，已证明氢气的混合体积高达80%。荷兰政府与多个行业/学术合作伙伴共同资助的项目正在进行中，以证明2019/2020年在燃烧装置中0-100%的氢气能力，氮氧化物排放量低于9ppm。火焰筒燃烧室已经在7台F级GE机器上投入商业运行，是对现有GE、西门子和MHI、E和F级燃机的简单改造。

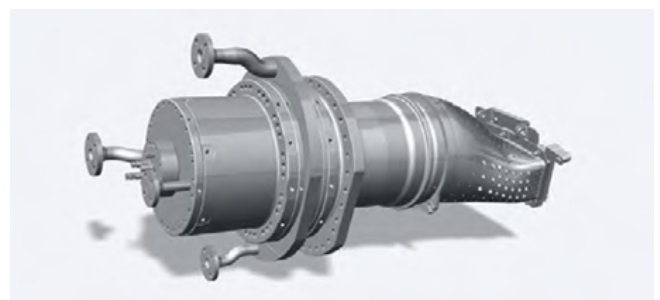


图14：通用电气、西门子和MHI燃机的火焰筒



图15：贝克休斯NovaLT

贝克休斯

贝克休斯 (Baker Hughes) 在与通用电气 (General Electric) 分离后，于2019年10月将其在BHGE的持股比例降至50%以下，以独立OEM的身份强化了其在燃气轮机市场的地位。BHGE (成立于2017年，加入GE石油天然气公司和前贝克休斯公司)，现更名为贝克休斯，在燃气轮机领域拥有广泛而深入的专业背景，利用数十年来与其他GE企业的知识共享和合作，并继承了GE重型燃气轮机产品在40 MW以下功率范围的所有权。与GE的合作由一家合资企业授予，以管理航改型生燃机 (大约功率范围为25至100 MW)，而最近推出的轻型工业燃气轮机系列 (NovaLT) 是由贝克休斯公司设计并开发的，旨在以20 MW的功率范围为目标，实现高效率、可用性、灵活性及低成本。

由于使用了不同的燃烧技术，在整个贝克休斯燃气轮机系列中，贫油预混燃烧室中的最大允许氢气浓度存在显著差异。需根据每个具体项目的特点，逐个评估其可行性。

标准和贫油预混燃烧器 (用于重型燃气轮机) 或单环形燃烧器 (SAC, 用于航改型生燃气轮机) 已经在过去被测试和用于燃烧极高的氢气浓度，注入稀释剂以减少NO_x排放。在意大利富西纳的Enel联合循环电厂，在GE10-1燃机上证明了燃烧100%氢气的能力^{32,33}。

就贫油预混燃烧室的应用而言，性能与通用电气部分报告的DLE和DLN1/DLN2燃烧器的限制一致。

关于NovaLT系列 (见图15中的NovaLT-16)，燃机配备了布置在环形燃烧室中的先导预混燃烧器，能够根据燃料组分不同，沿运行范围调节先导和预混燃烧之间的燃料分配比例。这种灵活性允许燃机燃烧高达100%的氢气，有可变的燃气混合物，有或不喷射稀释剂，因此有可变的NO_x排放水平 (在全环形钻井平台上验证；NovaLT-16正在进行工业化)。

贝克休斯 (Baker Hughes) 多年来一直致力于开发新型燃烧器技术，以实现贫油预混系统与富氢燃料的可靠应用。过去几年，在Enel实验室进行了台架试验 (见图16)，以确定最有潜力的贫油预混燃烧技术。

结果³⁴清楚地表明，最成熟的解决方案是由一组部分预混的燃烧器组成。这一概念显示出与天然气最佳可用技术 (BAT) 一致的排放，并具有很强的抗回火能力，远远高于标称运行条件，因此对于全尺寸布置设计和实验表征来说很有希望。还进行了专门的火焰保持技术研究，以更详细地关注火焰锚固机制，并界定干预范围，提供需要解决的薄弱环节，以增加解决方案的回火裕度。



图16：由贝克休斯公司进行的100%氢气燃烧试验埃奈尔实验室的实验燃烧器



通用电气

GE仍致力于通过可再生气体（包括氢气）实现能源向无碳发电的转变。这一承诺包括提供能够使用氢气的新燃气轮机，以及为现有发电厂提供改造解决方案，使其适合使用可再生燃料。

30多年来，GE一直在提供使用氢燃料运行的燃气轮机³⁵。超过75台GE燃气轮机使用含氢燃料运行，累计运行时间超过500万小时。这些装置使用的燃料氢含量范围从5%（按体积计）到100%。该经验包括各种应用范围内的重型和航改燃气轮机^{36、37、38、39}。下图总结了GE燃气轮机产品的燃氢能力。

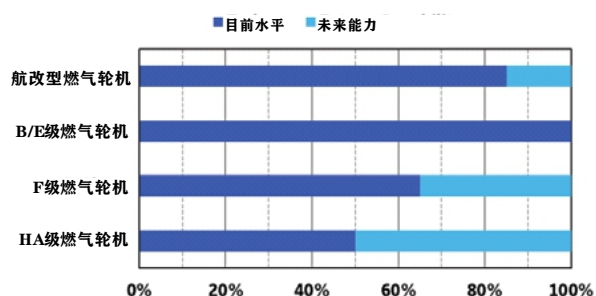


图18: GE燃气轮机燃氢运行能力（体积%）

GE为航改和重型燃气轮机提供扩散、干式低排放和干式低NOx燃烧系统，为氢气和类似的低热值燃料提供一系列解决方案。这些燃烧系统可用于新机组，以及改造机组，以提高现有燃气轮机的燃氢能力。

如图所示，随着技术项目的实施，预计未来燃氢能力会持续提高。这种改进能力的一个例子是GT13E2；燃烧试验表明，AEV燃烧器能够在不稀释的情况下使用高达60%（按体积计）的氢气/天然混合物，并且NOx排放量小于15ppm⁴⁰。

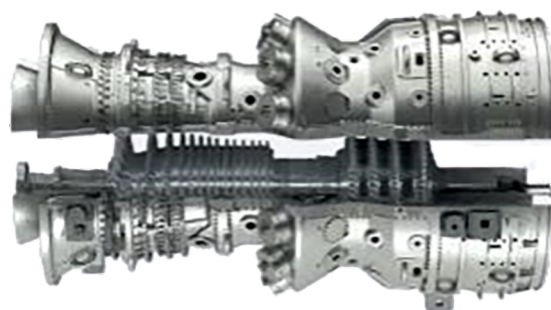


图17: GE7HA.03

GE最新的燃烧系统，DLN 2.6e包括一个高级预混器，该预混器是美国能源部高比例燃氢燃气轮机项目的一部分。与DLN 2.6+不同的是，高级预混器，利用微型管路快速运行“混合器”，可使具有更高反应性的气体燃料（即氢气）能够进行预混合燃烧。配备高级预混合器的DLN 2.6e燃烧室已证明能够燃烧氢气体积含量50%的氢气/天然气混合燃料。由于这项技术是从高氢燃料项目发展而来，因此其氢含量超过50%；已经制定了内部路线图，规划了达到100%氢气的步骤。

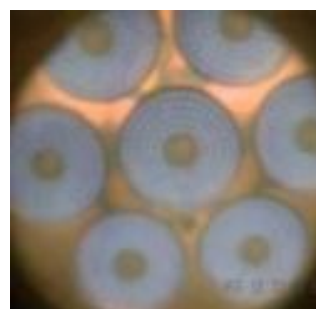


图19: 通用电气的DLN2.6e燃烧系统

使用DLN2.6e燃烧系统的经验不仅限于实验室。已在7HA和9HA燃机上实现了100%天然气的全速全负荷运行。配备该燃烧系统的首台机组已于2018年进入市场。

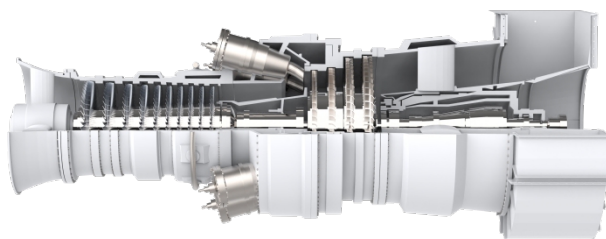


图20：华天航空动力HGT-50燃气轮机

华天航空动力

华天航空动力有限公司是一家拥有自主知识产权的航空发动机、燃气轮机、先进压缩机研发制造企业，依托国内完整的旋转设备制造产业链，形成了自主高效的整机设计、工程实现、技术创新、客户服务等体系，具备行业领先的航空动力、能源装备、工业控制等综合方案解决能力。公司凭借燃气轮机与航空发动机技术同源、产品同根的优势，实现了航空发动机燃烧技术和知识积累向燃气轮机的转移，正在开展预混燃烧方式的富氢燃料干式低排放燃烧和燃气轮机氢能发电技术研究，计划2024年完成试验验证，为氢能大规模商业化利用积累技术储备。

华天航空动力针对氢气与天然气物理和化学性质的不同，深入研究了燃气轮机氢能发电所需突破的主要关键技术，包括：

- 防回火设计技术：通过研发全新燃烧组织方式、增加燃烧动态监控系统、改造燃机控制与保护系统等方式来解决回火问题，以提高燃气轮机的运行稳定性与安全性。
- 热声震荡抑制技术：通过调整燃烧组织方式来避免热声震荡的产生，同时增加燃烧脉动监控系统以提高燃气轮机的安全性。
- 防氢脆材料技术；有效地在材料氢脆形成演化与预防控制过程中提出解决方案，对于氢燃料燃气轮机至关重要。
- 环境热障涂层技术：通过环境热障涂层在高温结构材料和恶劣环境间建立一道屏障，阻止或减小环境特别是水蒸气侵蚀对高温结构材料性能的影响，提高其高温稳定性。
- 火焰筒壁温控制技术：通过研发先进、高效冷却技术来降低火焰筒壁面温度，从而提高燃气轮机的安全性。

华天航空动力深入分析四种主要燃气轮机燃氢燃烧室设计技术（贫燃旋流预混、贫燃旋流直喷、稀释扩散、微混）的掺氢范围及优缺点，综合燃机系统集成和宽负荷调节需求，继承成熟低排放技术，采用贫燃旋流多点直喷技术方案。

该方案采用中心分级策略，主燃级氢气在主燃级出口处斜向喷射与旋流空气实现快速混合；预燃级氢气在喉道处喷入实现直喷快速混合，强化氢气快速掺混，避免自然回火，消除局部高温区，并通过数值模拟对燃烧室进行氮氧化物排放预估，预估值低于25ppm。

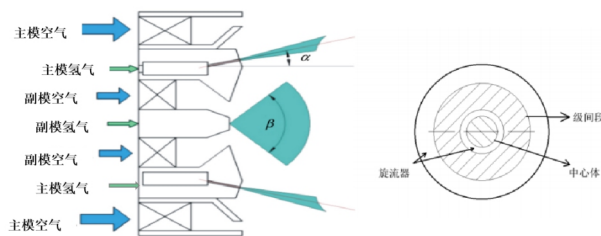


图21：贫燃旋流多点直喷技术方案示意图



曼能源

MAN Energy Solutions目前的燃气轮机产品涵盖6至12MW功率范围，有两个燃气轮机系列：THM（9-12MW）和MGT（6-9MW），包括单轴和双轴燃机，用于发电和机械驱动。

所有MAN Energy Solution燃气轮机的主要燃料是天然气，液体燃料和双燃料可选，具有良好的燃料灵活性。

THM系列燃气轮机配有标准扩散燃烧系统。该系统允许与天然气的混合物中氢气的体积含量达到60%，但当需要低NO_x排放时，需要进行排气处理。

一些THM系列燃机还配备了干式低排放燃烧系统，该系统被设计为先进环管型燃烧系统（ACC），可实现超低排放，无需注水或排气处理，还可以燃烧高达20%体积的氢气。

MGT系列燃气轮机配备了干式低排放燃烧系统ACC，该系统可燃烧高达20%体积的氢气与天然气混合物。

THM和MGT系列燃气轮机的ACC系统已在科隆的高压测试设施中进行了充分验证。测试了全部流量、压力和温度。试验过程中，燃料成分也发生了变化，并证明，当对系统进行轻微修改时，燃烧20%体积的氢气没有任何问题。

经过一些额外的改进，即使氢气体积分数达到50%，也能实现稳定和低排放的燃烧。



图22：THM 1304系列燃气轮机

THM和MGT系列燃气轮机均采用外部安装的筒型燃烧系统。THM有两个燃烧室，而MGT有六个环形布置的燃烧室。

这种结构设计有许多好处。先进、可替换的设计保证了更大的燃料灵活性，可以轻松地将其改装到现有燃机上，而无需拆解燃机其他部件。此外，在高压测试设施进行的广泛测试更容易在单个筒上完成。

自2010年以来，与斯图加特DLR合作开展了理论和实验研究，以实现在低NO_x排放的情况下达到燃烧100%氢气的目标。这些结果有助于持续的氢燃烧技术发展。

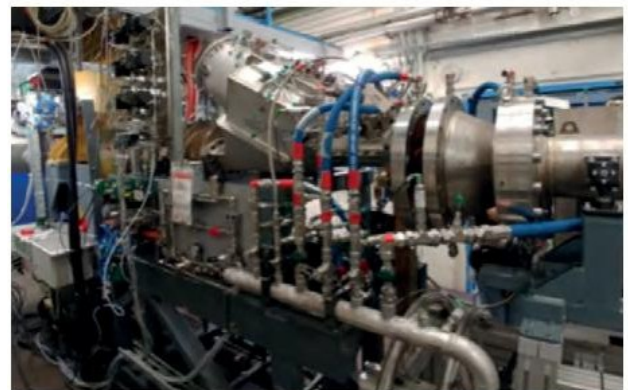


图23：MGT系列燃气轮机在科隆的高压测试设施



图24: MHPS M701J燃气轮机

三菱日立

三菱日立公司已经开发了3种类型的燃氢燃气轮机燃烧室，可用于掺氢或纯氢燃烧⁴²，图25提供了这些技术的概述。

	多喷嘴燃烧室	多集群燃烧室	扩散型燃烧室
燃烧类型	预混	预混	扩散
结构形式			
稀释剂低排放	不适用(干式)	不适用(干式)	水、蒸汽或氮气
循环效率	不注入水或蒸汽 无效率下降	不注入水或蒸汽 无效率下降	为降低NOx排放 注入水或蒸汽 效率下降
掺氢比	多达30%	多达100% (开发中)	多达100%

图25: 燃烧器类型概述

多喷嘴燃烧室

干式低NOx (DLN) 多喷嘴燃烧室是一种新型的混氢燃烧室。它基于传统的DLN燃烧室技术，旨在防止回火。从压气机供应到燃烧室内部的空气通过旋流器，形成旋流。燃料由旋流器翼部表面的小孔供应，由于旋流效应，燃料与周围空气快速混合。在天然气中掺入30%体积的氢气⁴⁴，成功地进行了燃烧试验，与天然气发电厂相比，二氧化碳排放量减少了10%。试验在J系列燃气轮机的燃烧条件下进行。

在测试了30%体积的氢气/天然气混合物燃烧后，下一步将达到100%纯氢，这可能会涉及到多集群燃烧室的开发。

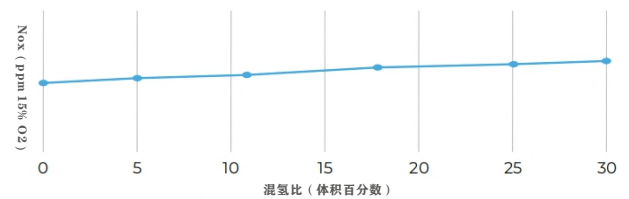


图26: NOx排放与混氢比的关系

多集群燃烧室

掺氢燃烧DLN燃烧器用于混合燃料和空气的旋流需要相对较大的空间，并增加了回火风险。因此，必须在短时间和狭窄空间内完成混合。

多集群燃烧室是一种很有前途的替代方案，它使用的喷嘴数量比DLN燃烧室的八个燃料供应喷嘴多。MHPS设计的混合系统可以分散火焰，并以更小的量和更精细的方式吹出燃料。MHPS采用的系统中，喷嘴孔更小，空气与吹入的氢气进行混合。有了这种解决方案，就可以在不使用旋流的情况下以较小的规模混合空气和氢气，这可能允许兼容高回火阻力和低NOx燃烧。在台架试验中，验证了80%掺氢比例的燃烧特性。

扩散燃烧室

随着能源公司转向氢气，MHPS拥有近50年来丰富的氢气燃烧经验，包括炼油厂、合成气和COG工厂。他们的31个发电厂网络中使用体积氢含量高达90%的燃料，并已使用扩散燃烧室运行了300多万小时。扩散燃烧室将燃料喷射到空气中。与预混合燃烧方法相比，可能会形成火焰温度较高的区域，从而增加生成的NOx量，因此需要注入蒸汽或水作为减少NOx排放的措施。另一方面，稳定燃烧范围较宽，燃料性能允许波动范围也较大。目前，MHPS正在与Vattenfall、Gasunie和Equinor合作开展Vattenfall Magnum无碳燃气发电项目，旨在到2025年将Magnum的三台440 MW CCGT中的一台转化为100%氢气。

SIEMENS
Ingenuity for life

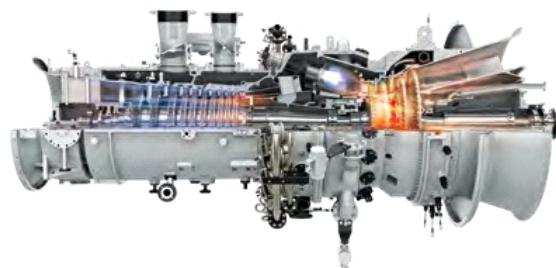


图27: Siemens SGT-600燃气轮机

西门子

西门子燃气轮机可用于石油天然气及工业发电领域，机组额定功率可达593MW。

新的西门子燃气轮机根据不同的类型具有不同水平的混氢燃烧能力：

- 航改燃气轮机，在扩散燃烧模式下燃烧100%氢气，并注水以减少NO_x排放。通过DLE技术，SGT-A65和SGT-A35的混氢燃烧可达15%。
- 基于DLE燃烧室的公用事业燃气轮机的混氢燃烧比例可达30%。
- 中型工业燃气轮机（SGT-600至SGT-800），混氢燃烧比例高达60%。
- 小型工业燃气轮机SGT-100和SGT-300的混氢燃烧比例可达30%，SGT-400的混氢燃烧比例可达10%。选择氮氧化物不受抑制的扩散技术将使混氢燃烧比例增加到65%。

由于特定安装的硬件和工厂设置可能会因年代和当地条件的不同而有所不同，因此始终需要对每个现场的现有燃气轮机中混合氢气的具体能力进行单独评估。为了达到与新设备相同的上述值，可能需要对控制系统和硬件进行升级，并可用于许多燃气轮机类型。

例如，对于西门子燃气轮机2000E和4000F，标准升级包“H2DeCarb”可用于更高的氢气含量。2000E燃气轮机升级后可以燃烧高达30%体积的氢气混合物。4000F燃气轮机升级后可以燃烧15%体积的氢气混合物。

根据实际发电机组设计，现有工业燃气轮机发电机组的燃料标准氢含量可达10%，新机组的燃料标准氢含量可达15%。在现有场地上，需要进行分析，以评估是否需要更换部件，从而提高燃料中的氢含量。

如今，所有交付的SGT-700和SGT-800以及SGT-600燃机都配备了第三代DLE燃烧系统，具有很高的氢燃烧能力，氢含量高达50-60%。

配备湿式低排放（WLE）系统的航改型燃气轮机通常具备燃烧高比例氢气的的能力。然而，西门子始终进行类似的现场评估，以澄清服务大修时间是否会受到比已保证氢气浓度更高的影响。

**配备湿式低排放
(WLE) 系统的航改型
燃气轮机通常具有燃
烧高比例氢气的的能力**

Solar Turbines

A Caterpillar Company

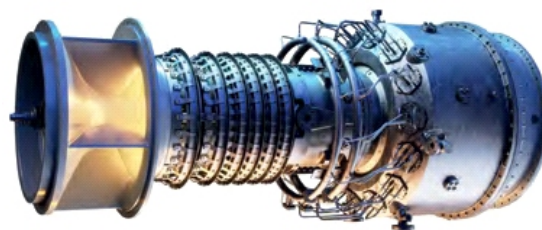


图28: Solar Turbines Titan 130燃气轮机

索拉透平

在过去十年中，索拉透平在许多应用中积累了大量富氢燃烧的经验，其中许多已经在Titan 130和Taurus 60发电机组上使用焦炉尾气（COG）。COG为钢铁生产制造焦炭的过程中产生的典型废气。COG燃料中含有55%至60%体积的氢气，25%至30%体积的甲烷，5%至10%体积的一氧化碳，以及5%至10%体积的惰性气体（氮气+二氧化碳）。

大多数应用都在中国，已经累计安装了40多个燃气轮机发电机组。Titan 130安装如图29所示。这些机组运行时几乎没有问题，累计运行时间超过140万小时。其中许多机组都经历了多次大修周期。如果出现问题，则确定根本原因是这些应用特有的燃料和空气污染物。一旦安装了适当的过滤器，这些装置就可以正常运行。



图29: Titan 130使用焦炉煤气常规燃烧室燃气轮机安装图

索拉透平的初步评估是，使用现有的SoLoNOx燃气轮机和最新的燃烧系统技术，将管道气体与5%至20%体积的氢气混合，无需进行重大修改。目前正在研究前几代SoLoNOx燃烧系统使用这些水平氢气的的能力。主要需考虑对燃烧系统和机组的影响。

与扩散火焰燃烧机组相比，使用氢气发电的SoLoNOx燃气轮机机组最近开始增加。值得注意的是，SoLoNOx在伴生天然气和未净化天然气方面的经验已经非常丰富。这些气体在火焰速度和火焰温度范围内具有相当的可比性，这些氢/天然气混合燃料中含有5%-20%体积分数的氢气。

SoLoNOx平台的直接经验目前仅限于炼油厂发电机组的应用，其中Titan 130使用的天然气混合了高达9%体积的氢气。燃烧室性能鉴定已完成，NOx排放水平15ppm，无运行问题。该装置采用100%天然气启动，并对机组进行了更新，以符合大于4%体积氢气的要求。然而，由于客户要求，9%体积氢燃料混合的运行时间很短。

高、中等沃泊指数的客户以及原料天然气的应用范围更广。这些装置对支持管道天然气运行的标准配置几乎没有修改。早期机组已运行多年，其中许多机组达到标准大修运行小时。通常，这些SoLoNOx燃机以与管道天然气运行方式大致相同的方式使用伴生气运行。如前所述，使用绝热燃烧温度较高的燃料时，NOx排放略高。与所有DLE燃气轮机一样，燃料质量和适当的燃料处理是无故障运行的先决条件。

第六章：欧美日等国燃氢燃气轮机发展战略

欧美日等国燃氢燃气轮机发展战略

本章概述了目前欧美日等国燃氢燃气轮机的发展战略，以及有关政府科研资助项目、主要OEM运行示范项目的情况。

美国，美国能源部（DOE）《氢能计划》，2020

观点：氢燃烧是氢能转化为电能的主要路径。

美国氢能规划提出，氢将广泛应用于发电场景，包括大规模发电、分布式发电、热电联产和备用电源。氢气被生产、输送和储存后，通过燃烧（燃气轮机或发动机）、以及电化学过程（燃料电池）转化为可用的能量（电、热等）。美国能源部氢能项目的主要任务就是研究、开发和验证氢转化及相关技术，并解决体制和市场障碍，最终实现氢能的多领域应用。



利用氢燃烧发电的优点包括：燃料具备灵活性，可以与其他燃料进行混合；通过与储氢装置集成实现燃料安全；能够满足大量电力需求；灵活适配可变发电负荷。氢气的燃烧方式与天然气、合成气、柴油等常见燃料相似，但氢燃烧不会产生二氧化碳，水是唯一的主要副产品。

美国工业界已在多个地区投资大型氢发电项目，例如犹他州10亿美元的先进清洁能源项目将利用燃气轮机烧氢进行发电。此外，大型数据中心运营商正在探索使用燃氢燃气轮机或氢燃料电池来提供可靠、高灵活性的备用电源。越来越多的终端用户转向了氢能方案。

近年来，世界发电行业的主要参与者均开始关注燃氢燃气轮机技术。工业界已经开发出材料和适配系统来提高可燃燃烧的氢气浓度，目前氢气在简单循环燃气轮机中的燃烧浓度可超过90%，在大型联合循环燃气轮机中的燃烧浓度高达50%，并且已逐步投入商用。

日本，日本政府第六版能源战略，2021

观点：专注氢能燃烧技术突破，以更低成本实现碳中和。

日本第六版能源战略计划中明确引入氢能，并将开展混烧、专烧示范。氢气和氨气可用于燃气轮机，以提高电力系统的灵活性，氨气还可用于燃煤电厂以减少排放，成本也低于氢。

日本政府在2014年启动了日本重振战略，拨付了500亿日元的研发经费（约25亿元人民币），设立了10多个部门联动的战略性创新研究项目，其中能源载体项目下的氨直接燃烧课题已形成许多成果。

2021年3月，课题组成功实现了70%的液氨在2MW级燃气轮机中的稳定燃烧，并能同时抑制产生氮氧化物。参与此课题的IHI公司表示，有信心在2025年之前实现氨燃气轮机商业化，并于2021年10月启动了JERA氢能发电示范项目。同时三菱重工正开发40MW级的100%氨专烧燃气轮机，计划在2025年以后实现商业化，引入发电站。这将大大有助于日本实现2050年碳中和的目标。

欧洲，欧盟《氢能路线图》，2020

观点：氢能P2G模式是稳定可再生能源系统的必备长期储能方式。

欧盟在启动氢能路线图的步骤中提出：欧盟监管机构将积极推动欧洲P2G市场的发展，制定长期储能方案，通过市场来稳定价格、应对季节性供需失衡，促使可再生能源电力系统稳健发展。

欧洲各国正在积极推进P2G试点项目的运行和建设：德国计划于2022年将一座容量为100MW的P2G发电厂接入电网。荷兰公司 Proton 和 ICI 开发了电力到氢到电力 (P2A2P) 解决方案，已在意大利萨沃纳热那亚大学实验室运行的改进型微型燃气轮机上进行了验证。自动化公司 MAS Controlling Power & Energy 开发的电网驱动/响应管理系统，包含了电力到氢到电力 (P2G2P) 解决方案，已在卡迪夫大学实验室对于不同天然气、氢气和氨混合物的燃气轮机燃烧可接受性进行了研究。

英国，英国政府《国家氢能战略》，2021

观点：氢能是新型电力系统的关键组成部分。

英国国家氢能战略明确提出：氢是一种高效清洁的能源，可以通过燃气轮机、发动机燃烧或者燃料电池化学反应来产生电、热能；氢也是重要的长期储能介质，它能够以多种方式储存、运输，实现能源跨区域、跨时间配置；此外，氢也是工业生产的重要原料。

近期燃气轮机掺氢燃烧将是英国主推的氢能发电形式，10年后会投入使用第一台100%纯氢燃烧燃气轮机。氢燃料电池则取代柴油发电机等高碳发电方式，为离网城市提供较小规模的电力供应和备用电源。预计从2030年起，氢将在英国的电网调峰和安全保供方面发挥越来越大的作用，通过大规模建设P2G项目，将氢整合至电力系统中。

为了在2030年之前实现氢在电力行业的整合，英国政府将提前十年对技术储备进行部署：攻克氢产业链中的关键技术，包括大规模储氢设备、100%燃氢燃气轮机和下一代电解槽。

■ 全球OEM厂商燃氢燃气轮机主要示范项目

企业	国家	时间	项目信息
安萨尔多	意大利	2019年	安萨尔多与Equinor公司（前身为挪威国家石油公司）共同出资进行100%的氢燃料燃气轮机燃烧室试验，以证明安萨尔多H级重型燃气轮机GT36的燃烧室完全可以用氢气进行燃烧，双方已经签署协议。
			EncapCo项目：开发用于富氢燃烧的预混燃烧器。
			DECARBIT项目：开发用于100%氢燃料的再热燃烧室。
			BigH2项目：正在研究喷油器的基本原理。
			改型燃烧器（retrofitcombustor）FlameSheet开发项目：安萨尔多称他们所研制的燃烧室能比其他OEM的超低排放（DLE）燃烧器所能燃烧的氢燃料能多10倍，并且无需昂贵的稀释剂注入。

■ 全球OEM厂商燃氢燃气轮机主要示范项目

企业	国家	时间	项目信息
西门子	德国	2020年	HYFLEXPOWER项目：是世界上首个集成利用电力制氢和燃氢发电的燃气轮机示范工程。由法国能源集团 Engie（欧洲最大能源集团）、西门子天然气和发电公司，Centrax, Arttic, 德国航空航天中心（DLR）和四所欧洲大学组成的联合项目团队负责实施。
		2020年	柏林清洁能源中心对西门子SGT-600和SGT-800的DLE燃烧室全温全压试验取得了可喜的进展，例如SGT-600的DLE燃烧室已经满负荷燃烧100%氢燃料，且在整机上进行了进一步验证，可以稳定燃烧60%的氢燃料，将来计划在巴西的热电联产电厂进一步验证。
		2021年	在智利麦哲伦地区，西门子能源携手HIF领导的几家国际公司，正在开发和建造全球首个生产气候中立合成燃料的大规模综合性商业工厂——Haru Oni项目，在钢联林茨钢铁厂安装和运行电解氢系统，作为西门子能源的Power-to-X能源转化体系的重要实践。
		2022年	西门子在瑞典氢能发电厂项目“零排放燃氢燃气轮机中心”正在将燃气轮机、可再生能源、储能和电解氢集成到未来的灵活能源系统中。这是一个部分由欧盟资助的示范工厂，旨在探索如何生产绿色氢并将其用于工业和市政的发电和储存。
MHPS 三菱日立	日本	2020年	MHPS公司是日本制造业巨头三菱重工与日立之间的合资企业，预计在未来十年内将实现燃烧100%的氢燃料的目标。公司目前还在试行一个氢能项目：到2023年将瓦腾福（Vattenfall）公司位于荷兰的1.3 GW马格南（Magnum）联合循环电站中三个机组之一转换为燃氢机组。
IHI日立		2020年	公司从美国犹他州国有山间电力公司（IPA, Intermountain Power Agency）获得了首个燃氢燃料的先进燃气轮机订单，该机组旨在过渡到可再生氢燃料，从能够燃烧30%氢气和70%天然气混合燃料过渡到100%氢燃料。
MHI三菱		2021年	日本IHI公司成功完成了世界上第一个在2000kW级燃气轮机燃烧超过70%液氢的项目，得益于应用航空发动机技术。
川崎重工		2022年	MHI将建立一个高砂氢园区，这是世界上第一个从氢生产到发电的氢相关技术验证的中心。该中心将位于MHI兵库县高砂机械厂的燃气轮机开发和制造基地，毗邻T-Point 2联合循环发电厂验证基地。目的是支持以氢气作为燃料的氢气轮机（又称氢内燃机）的商业化，该中心预计将从2025年开始投用，将实现小型和大型燃气轮机商业化，实现100%的氢燃烧。
东芝		2021年	川崎重工和德国能源公司RWE Generation SE已达成合作协议，共同推进世界首台30MW级100%氢燃料燃气轮机的发电试点研究，预计在2024年开始实机测试运行。
索拉		2015年	东芝在东京都府中市的府中事务所内启动了氢能源开发中心。计划以2025年为目标，计划把在海外利用大规模风力发电等低成本生成的氢运输到日本，构筑氢燃气轮机发电站的氢供应链，实现无需对电网做大规模整修即可低成本储藏和供给清洁电力。
GE	美国	2022年	20兆瓦的Eight Flags CHP电厂为Amelia岛提供约50%的电力，电厂使用Solar Turbines Titan 250 燃气轮机，目前正在共同测试燃气轮机掺氢燃烧。
		2021年	建立在GE先进燃气轮机发电技术和丰富运行经验基础之上，GE升级了新产品LM2500XPRESS：它具备发电效率高、排放低等诸多优势，同时运行可靠、灵活、具备燃烧氢气的的能力。
		2020年	GE获得美国俄亥俄州长岭能源码头燃氢HA级燃气轮机订单，将建立美国第一座氢气发电厂，并在十年内实现燃氢100%的能力。
		2021年	广东省能源集团旗下的惠州大亚湾石化区综合能源站正式向GE及哈电集团订购两台9HA.01 重型燃气轮机的联合循环机组。项目投产后，两台燃机将采用10%（按体积计算）的氢气掺混比例与天然气混合燃烧，成为中国内地首座天然气-氢气双燃料9HA电厂。电厂预计于2023年正式投入商业运行。
		2021年	通用电气和Cricket Valley Energy Center (CVEC)宣布，共同开发绿色氢技术路线图，并推进CVEC位于纽约州多佛平原的联合循环发电厂的一个燃氢燃气轮机（7F）示范项目，以减少碳排放。该项目计划于2022年底开始。
贝克休斯		/	GE公司还拥有数个使用高氢含量的项目：其中之一是韩国的大山精炼厂，该厂使用6B.03燃气轮机以70%氢燃料运行了20年。意大利国家电力公司(ENEL)在2010年在意大利的富西纳（Fusina）电厂则使用了一台11.4MW的GE-10燃气轮机，以97.5%的氢燃料运行。
斗山重工	韩国	2021年	在小型机中，澳大利亚领先的氢气基础设施开发商H2U与GE贝克休斯签署协议，将部署NovalT燃机为PortLincoln项目提供100%的氢气运行，打造绿色氢能发电厂。
/	俄罗斯	2021年	斗山重工公司与韩国东西发电公司（East-West Power Co., Ltd）和SK Gas公司签署了业务协议，以推进大型燃氢燃气轮机示范项目。蔚山市政府将支持建设燃氢燃气轮机业务基础设施，韩国东西发电公司将使用基于韩国技术的燃氢燃气轮机。SK Gas公司则负责建立氢气供应基础设施，斗山重工公司将负责开发和供应燃氢燃气轮机技术。
国电投	中国	2021年	俄罗斯联邦工业和贸易部副部长米哈伊尔·伊万诺夫表示，俄罗斯的首台燃氢燃气轮机的功率为65MW，预计将于2027年建成。
			国电投湖北分公司与中国联合重型燃气轮机技术有限公司（下称“中国重燃”）、荆门市高新区管委会、盈德气体集团有限公司（下称“盈德气体”）在荆门市签署《燃气轮机掺氢燃烧示范项目战略合作框架协议》。
			12月，国家电投荆门绿动电厂在运燃机，成功实现15%掺氢燃烧改造和运行，机组具备了纯天然气和天然气掺氢两种运行模式的兼容能力。这是我国首次在重型燃机商业机组上实施掺氢燃烧改造试验和科研攻关。二期2022年底开展30%掺氢燃烧。
			国家电投黄河流域氢能产业基地项目，由国家“科改示范行动”中唯一氢能企业——国家电投集团氢能科技发展有限公司投资建设，总投资100亿元，一期投资40亿元，打造国家级氢能创新平台，推进氢能在交通、供能等领域全面应用。

结论

**氢气作为未来的能源，将重新定义
燃气轮机在碳中和能源场景中的作用**

作为一种高效、成熟和通用的技术，燃气轮机可以通过限制与强电气化的未来能源系统相关的高资本成本，促进向脱碳未来的平稳过渡。在短期内，现有的资产和基础设施可以与适应的燃气轮机技术一起使用，以大幅减少发电及石油和天然气行业的碳足迹。

为了充分释放零排放燃氢燃气轮机技术在未来能源领域的潜力，制造商、终端用户和学术界之间的合作将至关重要，以将技术准备水平(TRL)提高至示范水平。特别需要开展研究和开发活动，以克服燃烧不稳定性，并进一步开发（预混）燃烧技术，以保持高达100%氢气的低NO_x排放。氢气燃烧的热物理特性的变化也需要开发热通道部件的新材料和冷却技术。

在现实环境中部署新技术将是在示范运行阶段需要克服的另一个挑战。未来的燃气轮机将必须燃烧广泛的可变氢/天然气混合物，同时运行灵活，以稳定电网频率。全球电网都需要适当的示范项目，以验证面临不同地方/区域边界条件的新系统解决方案的可行性。现有燃气轮机的改造需要根据公共管网中特定的氢气水平进行评估，考虑对燃料撬、控制和燃烧系统的改进。

与燃气轮机发电厂改造解决方案相关的资本支出必须以有利于广泛引进该技术的市场条件来满足。监管措施应确保所有技术供应商的公平竞争环境。

尾注

- 1 IEA, „Energy Technology Perspectives 2017 “, 2017.
- 2 Sandbag and Agora Energiewende, <https://sandbag.org.uk/wp-content/uploads/2019/01/The-European-PowerSector-in-2018-1.pdf>, Accessed November 4, 2019.
- 3 Durzaam Ameland, <http://www.duurzaameland.nl/projecten/#waterstof>. Accessed November 4, 2019.
- 4 IEA, „The Future of Hydrogen – Seizing today’s opportunities “, June 2019.
- 5 U.S. Department of Energy, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gasreforming>, Accessed November 4, 2019.
- 6 Danish Energy Agency, Energinet (2018), Technology Data for Renewable Fuels – February 2019 update.
- 7 A. Buttler, H. Spliethoff, 2018, Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 82, pp. 2440-2454.
- 8 M.E. Demir, I. Dincer, 2018, Cost assessment and evaluation of various hydrogen delivery scenarios, *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 43, pp. 10420 – 10430.
- 9 A. T. Wijayanata et. al., 2019, Liquid hydrogen, methylcyclohexane and ammonia as potential storage: Comparison review, *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 44, pp. 15026 – 15044.
- 10 Aakko-Saksa et. al., 2018, Liquid organic hydrogen carriers for transportation and storing of renewable energy. *Journal of Power Sources* Vol. 396, pp. 803 – 823.
- 11 Niermann et. al., 2019, Liquid Organic hydrogen Carrier (LOHC) – Assessment based on chemical and economic properties, *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 44, pp. 6631-6654.
- 12 Kraftwerk Forschung, kraftwerkforschung.info/en/hydrogen-gas-turbines/, Accessed November 4, 2019.
- 13 S. Morris, 2013, Cardiff University Progress Report July 2013, FP7 H2-IGCC Project.
- 14 P. Jansohn, Y.C. Lin, 2013, Results of turbulent flame speed for H2-rich and syngas fuel mixtures measured, FP7 H2-IGCC Project.
- 15 J. Runyon et. al., 2017, Experimental Analysis of Confinement and Swirl Effects on Premixed CH4-H2 Flame Behavior in a Pressurized Generic Swirl Burner. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, GT2017-64794.
- 16 E. Karlis et. al., 2019, H2 enrichment of CH4 blends in lean premixed gas turbine combustion: An experimental study on effects on flame shape and thermoacoustic oscillation dynamics, *Fuel*, 254: 11524.
- 17 J. Runyon et. al., 2018, Experimental and Numerical Evaluation of Pressurized, Lean Hydrogen-Air Flame Stability with Carbon Dioxide Diluent, 37th International Combustion Symposium.
- 18 K. Ross, 2019, Verbund in landmark project to run gas plant on hydrogen, *Power Engineering International*.
- 19 ENABLING cryogEnic Hydrogen based CO2 free air transport (ENABLEH2), cordis.europa.eu/project/rcn/216008/factsheet/en, Accessed November 4 2019.
- 20 R. Dennis, 2016, University Turbine Systems Research Project Review Meeting, www.netl.doe.gov/sites/default/files/event-proceedings/2016/utsr/Tuesday/Rich-Dennis-Overview.pdf, Accessed November 4 2019.
- 21 E. Ohira, 2019, Japan Policy and Activity on Hydrogen Energy, www.nedo.go.jp/content/100890039.pdf, Accessed November 4 2019.
- 22 P. Griebel, 2016, *Hydrogen Science and Engineering – Material, Processes, Systems and Technology*, Detlef Stolten, Bernd Emonts, Vol. 2, p. 1011-1032, Wiley .
- 23 C. Goy, S.R. James, S. Rea, 2005, Monitoring combustion instabilities: E.ON UK’s experience, *Lieuwen 2005*: pp. 163-175.
- 24 P. Griebel, 2018, Hydrogen in Gas Turbine Combustion Systems: Challenges and Opportunities, *TOTeM 45 „Gas Turbines for Future Energy Systems“* .
- 25 A. Keçebaş, M. Kayfeci, 2019, “Hydrogen properties” , in *Solar Hydrogen Production*.
- 26 HyNet - Hydrogen Energy and Carbon Capture, Usage and Storage, <https://hynet.co.uk/>, Accessed November 4 2019.

- 27 T. Wind, F. Güthe, K. Syed, 2014, Co-Firing of Hydrogen and Natural Gases in Lean Premixed Conventional and Reheat Burners (Alstom Gt26), Proceedings of ASME Turbo Expo 2014, GT2014-25813.
- 28 M. R. Bothien et. al., 2019, Sequential combustion in gas turbines - the key technology for burning high hydrogen contents with low emissions, ASME Turbo Expo 2019, GT2019-90798.
- 29 A. Ciani et. al., 2019, Superior fuel and operational flexibility of sequential combustion in Ansaldo Energia gas turbines, Proceedings of Global Power and Propulsion Society - Technical Conference 2019, GPPS-TC-2019-0032.
- 30 Ansaldo Energia, 2019, Press Release : "Ansaldo Energia and Equinor collaborate on validation of 100% hydrogen gas turbine combustor" .
- 31 P. J. Stuttaford et. al., 2010, Extended Turndown, Fuel Flexible Gas Turbine Combustion System, Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2010-22585.
- 32 S. Cocchi et. al., 2008, Experimental Characterization of a Hydrogen Fueled Combustor With Reduced NOx Emissions for a 10 MW Class Gas Turbine, Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2008-51271.
- 33 S. Cocchi and S. Sigali, 2010, Development of a Low NOx Hydrogen Fuelled Combustor for 10 MW Class Gas Turbines, Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2010-23348.
- 34 M. Cerutti et. al., 2014, Hydrogen Fueled Dry Low NOx Gas Turbine Combustor Conceptual Design, Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2014-26136.
- 35 J. Goldmeer, "Power to Gas: Hydrogen for Power Generation" , GEA33861, February 2019.
- 36 J. Goldmeer, and T. Rozas, 2012, "Burning a mixture of H₂ and natural gas" , Turbomachinery International.
- 37 M. Moliere, and N. Hugonnet, 2004, "Hydrogen-fueled gas turbines: experience and prospects" , Power-Gen Asia.
- 38 Daesan units burn 95 percent hydrogen fuel, Modern Power Systems, 1999, <https://www.modernpowersystems.com/features/featuredaesan-unit-burns-95-per-cent-hydrogen-fuel/>
- 39 J. Dicampli, et al., 2012, "Aeroderivative Power Generation with Coke Oven Gas" , ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2012-89601.
- 40 M. Zajadatz, et al., 2019, "Extended range of fuel capability for GT13E2 AEV burner with liquid and gaseous fuels" , ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and power, ASME, vol. 141.
- 41 W. York, W. Ziminsky, E. Yilmaz, 2013, "Development and Testing of a Low NOx Hydrogen Combustion System for Heavy-Duty Gas Turbines" , ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and power, ASME, vol. 135.
- 42 MHPS, Hydrogen Power Generation Handbook, https://www.mhps.com/catalogue/pdf/mhps_hydrogen_en.pdf, Accessed November 4 2019.
- 43 M. Nose et. al., 2018, Hydrogen-fired gas turbine targeting realization of CO₂-free society, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 55 No. 4.
- 44 Mitsubishi Hitachi Power Systems, 2018, news "MHPS Successfully Tests Large-scale High-efficiency Gas Turbine Fueled by 30% Hydrogen Mix" .



本报告编委会：

全球能源互联网发展合作组织：肖晋宇

中国产业发展促进会氢能分会：陈学谦

国家电投中央研究院碳中和中心：鲁仰辉

中科院力学研究所：赵建福

清华大学：张扬

中国石油天然气集团有限公司：朱兴珊

中海石油气电集团有限公司：秦锋

有研工程技术研究院：于庆河

华天航空动力有限公司：高鑫

北京市煤气热力工程设计院：王洪建

本报告旨在推进全球减碳与中国碳中和战略，仅作学术研究与公益宣传，请勿用作商业与投资行为。

本报告包括一些我们根据行业情况对技术未来发展状况所作出的声明、估计和预测，我们不担保这些声明、估计和预测的准确性或完整性，技术实际的发展方向有可能偏离本报告中所做出的声明、估计或预测。