

燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术研究

陈飞

(山东电力第三工程有限公司 山东 青岛 266000)

摘要: 本文研究了燃气轮机在利用氢燃料时的稀释燃烧技术。随着能源需求的增加和环境污染问题的日益突出, 氢燃料作为一种清洁能源备受关注。然而, 直接使用纯氢燃料会导致燃烧过程中的温度和压力升高, 从而增加燃气轮机内部部件的损耗, 稀释燃烧技术被引入以解决这一问题。稀释燃烧技术通过将氢燃料与惰性气体混合, 降低燃烧温度和压力, 减少了对燃气轮机部件的损耗。通过实验研究发现, 添加适量的惰性气体可以有效降低燃烧温度, 提高燃烧效率, 并减少 NO_x 等有害物质的排放。本文还分析了不同比例下氢燃料和惰性气体的混合对燃气轮机性能的影响。研究结果表明, 在适当的氢燃料和惰性气体比例下, 燃气轮机的热效率和排放性能得到了显著改善。

关键词: 燃气轮机; 含氢燃料; 稀释燃烧技术

0 引言

随着全球能源需求的不断增加和环境污染问题的日益严重, 研究和开发清洁能源技术成为当今能源行业的关键挑战。化石燃料的使用导致大量的碳排放, 加剧了全球变暖和气候变化的影响。寻找可持续、低碳的能源替代方案是当务之急。在这个背景下, 氢燃料作为一种理想的清洁能源备受关注。氢气是一种高效的能源载体, 其燃烧只产生水蒸气, 无任何有害物质的排放。相比于传统的燃料, 如煤和油, 燃氢气可以显著减少碳排放, 为实现全球碳中和目标做出重要贡献。本研究的目的是探索燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术的可行性和效益。通过混合适量的惰性气体来降低氢气燃烧过程中的温度和压力, 并减少对燃气轮机部件的损耗。分析不同比例下氢燃料和惰性气体混合对燃气轮机性能的影响, 包括热效率和排放物的产生。本研究对推动清洁能源技术的发展具有重要意义。通过开发和应用燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术, 可以实现碳排放的大幅减少, 并为可持续能源的发展做出实质性贡献。

1 氢气作为燃料的概述

1.1 氢气的特性

氢气是一种非常轻、高能量密度的元素。它的物理和化学特性使其成为一种理想的清洁能源来源。氢气具有很高的能量密度, 每克氢气的能量相当于

约 1.2MJ, 这意味着它在单位质量下可以提供比其他传统燃料更多的能量。这使得氢气成为高效的能源载体, 适用于很多应用领域, 包括交通运输、电力生成和工业生产等。其次, 氢气的燃烧性质使其成为清洁能源的理想选择。当氢气燃烧时, 唯一的产物是水蒸气, 不会产生二氧化碳、硫化物或氮氧化物等有害物质。这意味着使用氢气作为燃料可以显著减少温室气体排放和空气污染, 为环境保护做出重要贡献。氢气的轻量化特性也是其优势之一。由于氢气的原子量很小, 它具有极低的密度, 比大部分其他气体都轻^[1]。这使得氢气在存储和运输方面具有独特的优势, 可以通过压缩或液化等方式实现高效的储存和传输。

1.2 氢气作为可再生能源的角色

氢气作为一种可再生能源在可再生能源领域发挥着重要作用。氢气可以通过水电解来获取。水电解是一种利用电能将水分解成氢气和氧气的过程。这意味着当使用可再生能源, 如太阳能和风能等, 来产生电能时, 可以直接将这些电能用于水电解, 从而产生纯净的氢气。这使得氢气成为一种可再生能源的储存手段。在可再生能源不稳定或离网供电的情况下, 通过储存氢气, 可以实现持续的能源供应。氢气具有很高的储存能力。相比于其他可再生能源储存方式, 如电池储存或压缩空气储能, 氢气储存具有更高的能量密度和长期储存的能力。氢气可以通过压缩、液化或吸附等方式进行储存, 并在需要

时提供稳定的能源供应。这使得氢气成为可再生能源的理想替代品，尤其适用于需要长时间储存且高能量密度的场景，如交通运输和工业生产等。

1.3 燃气轮机在能源生产中的重要性

燃气轮机作为一种灵活、高效的能源转换设备，在能源生产中扮演着关键角色。它在电力生产和工业应用领域具有重要地位。燃气轮机在电力生产中发挥着不可替代的作用。由于其高效能和快速启动能力，燃气轮机被广泛应用于发电厂。它可以利用多种燃料，如天然气、液化石油气和煤层气等，将化学能转化为机械能，再通过发电机将其转化为电能。它被广泛用于驱动压缩机、泵浦和其他旋转设备，为工业生产提供动力。燃气轮机还可以通过余热回收技术，将废热转化为有用的热能，实现能量的综合利用，提高能源利用效率。但随着环境保护意识的增强和碳排放限制的加强，提高燃气轮机效率以减少碳排放已成为迫切需求。燃气轮机的热效率主要取决于其燃烧过程和废气的处理。通过优化燃气轮机的燃烧系统、改进燃料供应和废气处理技术，可以提高燃气轮机的效率，减少能源损失和排放^[2]。

2 燃气轮机稀释燃烧技术

2.1 燃气轮机的基本原理

燃气轮机是一种通过压缩、燃烧和膨胀过程将化学能转化为机械能的能源转换设备。其基本原理可以简要概括为以下几个步骤。首先，燃气轮机通过一个压气机（又称为压缩机）将空气吸入，然后将其压缩。在压缩过程中，空气的体积减小，同时压力和温度升高。压缩过程旨在提供燃烧所需的高压和高温条件。其次，将燃料（如天然气或液化石油气等）喷入压缩空气中，并在燃烧室内进行燃烧。燃烧产生的热能使得气体的温度和压力迅速增加。这个燃烧过程是燃气轮机的核心环节，也是将化学能转化为热能的关键步骤。再次，高温高压的燃烧产物被引导进入涡轮部分^[3]。涡轮由多个叶片组成，当燃烧产物通过时，叶片被推动，产生旋转力。涡轮的旋转驱动轴上的负载（如发电机或压缩机）进行工作。最后，经过涡轮的燃烧产物被排出燃气轮机，形成尾气。这些尾气可以用于废热回收或供其他工业过程使用。

2.2 稀释燃烧的优势和挑战

稀释燃烧技术是一种通过将燃料与惰性气体混

合，降低燃烧温度和压力的方法。它在燃气轮机等能源转换设备中具有重要的优势和挑战。在优势上，稀释燃烧技术可以有效降低燃烧温度。直接使用高浓度的燃料（如纯氢气）会导致燃烧过程中温度和压力的升高，从而增加燃气轮机内部部件的损耗。通过将燃料与惰性气体混合，稀释燃烧可以降低燃烧温度，减少对部件的热负荷，延长其寿命。其次，稀释燃烧技术可以减少 NO_x 等有害物质的排放。高温燃烧条件下，氮氧化物（ NO_x ）的产生量较大。而稀释燃烧可以降低燃烧温度，减少 NO_x 的生成。这对于环境保护和空气质量改善具有积极意义。但稀释燃烧技术也面临一些挑战。首先，火焰不稳定性是一个重要问题。稀释燃烧会导致火焰在燃烧室内的传播速度减慢，容易出现火焰失稳和燃烧不完全的情况。这可能会影响燃气轮机的性能和可靠性。其次，稀释燃烧技术对燃料的选择有一定限制。使用惰性气体稀释燃料时，需要保持合适的混合比例。最后，稀释燃烧技术在提升燃气轮机性能方面存在一定的局限性。由于燃烧过程中温度和压力的降低，稀释燃烧可能导致燃气轮机的功率输出和热效率下降。

2.3 氢气在稀释燃烧中的应用

氢气在稀释燃烧中有着广泛的潜在应用。氢气的燃烧特性使其成为一种清洁、高效的能源来源。与传统的化石燃料相比，氢气在燃烧过程中不产生二氧化碳和其他有害排放物质，因此对环境友好。氢气具有很高的热值，使其成为一种理想的燃料。每克氢气可以释放约120 ~ 142kJ的能量，是同等重量的化石燃料的两倍以上。这意味着使用氢气进行燃烧可以提供更多的能量，并且在能源消耗方面更加高效。氢气的适用性也是其在稀释燃烧中的一个重要优势。氢气可以与空气或氧气稀释以达到所需的燃烧条件。通过控制氢气和氧气的混合比例，可以调整燃烧过程中的温度、压力和火焰速度等参数，以满足不同应用领域的需求。氢气在稀释燃烧中的潜在应用包括发电、工业加热和交通运输等领域。在发电方面，氢气可以用于燃料电池发电，通过将氢气与氧气反应产生电能，同时排放的只有水蒸气。在工业加热方面，氢气可以替代传统的天然气或煤炭作为燃料，以实现更清洁高效的加热过程。在交通运输方面，氢气可以用作汽车的燃料，通过燃烧释放出的能量驱动发动机，从而减少尾气排放和环境污染。氢气在稀释燃烧中具有许多潜在应用。其

燃烧特性、高热值和适用性使其成为一种可持续发展的能源选择,对于推动环保和能源转型具有重要意义^[4]。

3 实验方法和数据收集

3.1 实验设计

燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术的实验设计需要考虑多个方面,包括燃气轮机的型号、实验条件和氢气混合比例等。第一,选择一款适合进行含氢燃料稀释燃烧实验的燃气轮机。这款燃气轮机应具备可调节燃料供给和高温燃烧室等特性,以确保对不同氢气混合比例的燃烧进行精确控制和测量。常见的燃气轮机型号包括 GE LM2500 和 Siemens SGT-800 等。第二,在实验中需要设定合适的实验条件。这些条件包括进气温度、进气压力、压缩机出口温度和压力等。通过控制这些参数,可以模拟实际运行环境下的燃烧情况,并评估氢气稀释燃烧对燃气轮机性能的影响。在确定实验条件后,需要确定氢气的混合比例。这个比例取决于所需的稀释效果和燃烧性能。通常,氢气的混合比例可以在 10% 到 50% 之间进行调节。可以通过混合氢气和天然气或燃料油,以达到所需的混合比例。同时,还需要考虑进气空气的湿度和温度等因素对氢气的稀释效果的影响。实验过程中,应使用适当的传感器和仪器来测量燃气轮机的性能参数,如燃烧室温度、压力和功率输出等。需要进行多组实验,每组实验都应该采用不同的氢气混合比例,并记录相关数据。通过分析这些数据,可以评估不同混合比例下燃气轮机的性能和排放特性,并得出结论。通过精确控制实验参数并收集相关数据,可以评估氢气稀释燃烧对燃气轮机性能的影响,并为进一步研究和开发提供参考。

3.2 数据收集和分析方法

在燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术的研究中,数据收集和分析是至关重要的环节。本实验采用了数据采集方法和数据分析法。在数据采集方法上,使用适当的传感器测量和记录关键参数,如燃烧室温度、压力、进气温度、进气压力和功率输出等。这些传感器可以包括热电偶、压力传感器、流量计等。通过与数据采集系统连接,可以实时监测和记录这些参数的变化。数据分析方法上,通过对实验期间收集的性能参数数据进行分析,可以评估燃气轮机的稳定性和性能特征。例如,可以绘制燃烧室温度和压力随时间的变化曲线,以观察不同氢气混合比

例下的燃烧特性。通过对排放测量数据进行分析,可以评估燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术对排放物质的影响。可以计算二氧化碳、氮氧化物和一氧化碳等排放物的平均排放浓度,并与使用传统燃料时的数据进行对比。

4 结果和讨论

4.1 实验结果分析

根据燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术的实验研究,以下是对实验结果的分析报告。实验过程中,使用了一台 GE LM2500 型号的燃气轮机,并将其运行于不同的氢气混合比例下。收集了关键性能参数和排放情况的数据进行分析。首先,对于燃气轮机的性能数据。观察到,在增加氢气混合比例的情况下,燃烧室温度略有上升,而压力则保持相对稳定。这表明氢气的加入增强了燃烧反应,提高了燃烧温度,但并未导致系统压力显著变化。同时,功率输出也显示出一定的增加趋势,这可能是由于氢气的高热值带来的额外能量贡献。其次,对于排放情况的分析。监测了二氧化碳、氮氧化物和一氧化碳等排放物的含量。实验结果显示,随着氢气混合比例的增加,二氧化碳排放量有所降低,这符合氢气燃烧不产生二氧化碳的环保特性。最后,氮氧化物和一氧化碳的排放也有所减少,表明氢气稀释燃烧技术对排放物质具有控制效果。总体而言,实验结果表明燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术具有潜力。通过增加氢气混合比例,可以提高燃烧室温度和功率输出,并降低二氧化碳、氮氧化物和一氧化碳等排放物的含量。这揭示了氢气在稀释燃烧中作为清洁能源的潜力,并为进一步优化燃气轮机设计和运行参数提供了实验依据。

4.2 技术可行性和性能评估

燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术可以从可行性和性能评估方面进行评估。首先,对于性能提升方面,燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术具有潜力使燃气轮机的性能得到改善。通过引入氢气作为燃料,增加了系统的热值,这有助于提高燃烧室温度、压力和功率输出等关键性能参数。高温燃烧有助于提高燃烧效率和发电效率,同时提供更高的功率输出。因此,燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术在性能提升方面具有明显优势。其次,对于排放减少方面,燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术也表现出良好的环保性能。

相比传统的化石燃料，氢气燃烧不产生二氧化碳和其他有害排放物质。实验结果显示，在含氢燃料稀释燃烧技术下，二氧化碳、氮氧化物和一氧化碳等排放物的含量有所降低^[5]。这对于减少温室气体排放、改善空气质量和保护环境具有积极意义。

4.3 指出潜在问题和改进点

在燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术的研究中，可能会出现一些潜在问题。稳定性是一个重要的问题。由于氢气具有较低的点火能力和较高的燃烧速度，其引入可能导致燃烧过程不稳定。在设计燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术时，需要考虑如何调整燃烧室结构、控制燃料供给和氧气混合比例等参数，以实现稳定的燃烧过程。未来的改进方向可以包括优化燃气轮机燃烧室的设计，采用先进的燃烧控制算法等。耐久性是另一个需要注意的问题。氢气燃烧具有较高的燃烧温度和扩散燃烧特性，这可能会对燃气轮机的耐久性产生一定的影响。在应用含氢燃料稀释燃烧技术时，需要仔细评估材料的耐高温性能和燃烧产生的氧化剂对部件的腐蚀程度。未来的改进方向可以包括选择更耐高温和耐腐蚀的材料，进行先进的涂层技术研究等。控制也是一个挑战。由于氢气具有较宽的可燃范围和快速的燃烧速度，如何精确控制燃气轮机含氢燃料稀释燃烧过程中的温度、压力和混合比例等参数是一个关键问题。未来的改进方向可以包括开发先进的控制系统和传感器技术，用于实时监测和调节燃烧过程。

5 结语

综上所述，稀释燃烧技术为燃气轮机利用氢燃料

提供了一种有效的解决方案，可以降低燃烧过程中的温度和压力，减少对部件的损耗，并改善燃烧效率和环境排放。该技术的广泛应用将有助于推动清洁能源的发展和环境保护。通过实验研究，发现燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术在性能提升和排放减少方面具有明显优势。引入氢气作为燃料可以提高燃烧室温度、压力和功率输出，在不产生二氧化碳和其他有害排放物质的情况下实现更高的能量利用效率。这表明燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术有潜力成为一种清洁、高效的能源选择。然而，也认识到该技术面临稳定性、耐久性和控制等问题。未来的研究方向应包括改进燃气轮机设计，以适应氢气燃料的特性，并提高系统的稳定性和耐久性。

参考文献：

- [1] 洪挺，张文普．贫油直喷燃烧室燃烧稳定性的数值研究[J]．中国电机工程学报，2013，33(2)：24-30.
- [2] 康振亚，郑洪涛，贾翔羽，等．微型燃气轮机燃烧室预混结构性能研究及改进[J]．燃气轮机技术，2013，26(1)：21-26.
- [3] 王福珍，刘石，贾磊，等．微型燃气轮机富氧燃烧室优化设计[J]．中国电机工程学报，2014，34(2)：300-308.
- [4] 王福珍，刘石，任晓辰，等．微燃机富氧燃烧室 NO_x 排放的数值研究[J]．华东电力，2014，42(2)：406-411.
- [5] 谢刚，艾松，陶健，等．重型燃机干低 NO_x 燃烧室设计中的关键问题[J]．东方电气评论，2014，28(2)：65-72.

作者简介：陈飞（1987.08-），男，汉族，山东潍坊人，本科，工程师，研究方向：传统电力、新能源和海水淡化 EPC 总承包。