

轴向分级燃烧燃料适用性研究

能科2102班：王宪聪 指导教师：余华贵、熊燕 论文类型：毕业设计

摘要：本文针对甲烷掺氢、氨气掺氢燃料应用轴向分级技术的可行性开展了化学反应网络模拟研究。首先，建立燃料轴向分级燃烧化学反应器网络模型，并验证了本文模型的有效性。其次，针对甲烷掺氢燃料应用轴向分级模型，模拟研究二级燃料分配比例等参数对燃烧室出口 NO_x 和CO排放的影响。最后，针对含氨燃料应用RQL，研究压力和进气温度的影响，改变关键参数，研究一级当量比、停留时间分配总停留时间、燃料中氨气掺氢比例等参数的影响，并与燃料轴向分级比较，探索含氨燃料燃烧室的设计方案。上述工作有利于后续不同燃料的轴向分级总体方案选择，为低排放燃烧室的初步设计提供基础和参考。

关键词： NO_x 排放；燃料轴向分级；氨气

1 研究背景及发展现状

燃气轮机被誉为工业皇冠上的明珠，是继蒸汽轮机、内燃机之后发展起来的新一代动力装置，具有单机功率大、能量密度高、低排放、噪声小、应用场景广泛的特点，已广泛应用于能源动力领域。燃气轮机未来的发展趋势是高功率密度、高效、低碳、低污染、燃料灵活以及长寿命、低成本、快速启停及宽负荷调节运行。

燃气轮机高效化需提升燃烧室出口温度，但高温加剧 NO_x 生成。轴向分级燃烧通过燃料/空气分级注入缓解该矛盾，其中燃料轴向分级（AFS）与RQL技术因低排放潜力成为研究重点。本文聚焦AFS与RQL对甲烷掺氢、氨/氢混合燃料的适应性，通过CRN模型量化关键参数对排放的影响。

2 含氨燃料的CRN模拟研究

2.1 压力和进气温度的影响

本小节主要研究压力和进气温度的影响，设置工况进气温度为300 K，总体停留时间26 ms，PSR停留时间3 ms，PFR1和PFR2联合停留时间为23 ms，停留时间比例为3:1， NH_3 -单级模式工况压力为2 atm。

图2.1中a图进气温度300 K，b图进气温度500 K，c图压力为2atm，d图压力15atm。从图2.1a、b图可以看出，在0 atm-25 atm压力范围内，提高进气温度200K可以使氨气燃烧的 NO_x 排放从1500ppm@15% O_2 降低至450ppm@15% O_2 以内。从图2.1b、c图可以看出在进气温度300K-800K范围内，从2 atm提高压力至15 atm可降低 NO_x 排放，在600K-800K的进气温度范围内实现40ppm@15% O_2 以内的 NO_x 排放。即氨气利用RQL燃烧方式时，提高温度和压力有利于降低 NO_x 排放。

氨气利用RQL燃烧方式时，提高温度和压力有利于降低 NO_x 排放，主要是在富燃阶段更快达到平衡阶段，已知氨气燃料在1.3的当量比燃烧平衡时 NO 在 $30 \text{ ppm}@15\%\text{O}_2$ 以内。

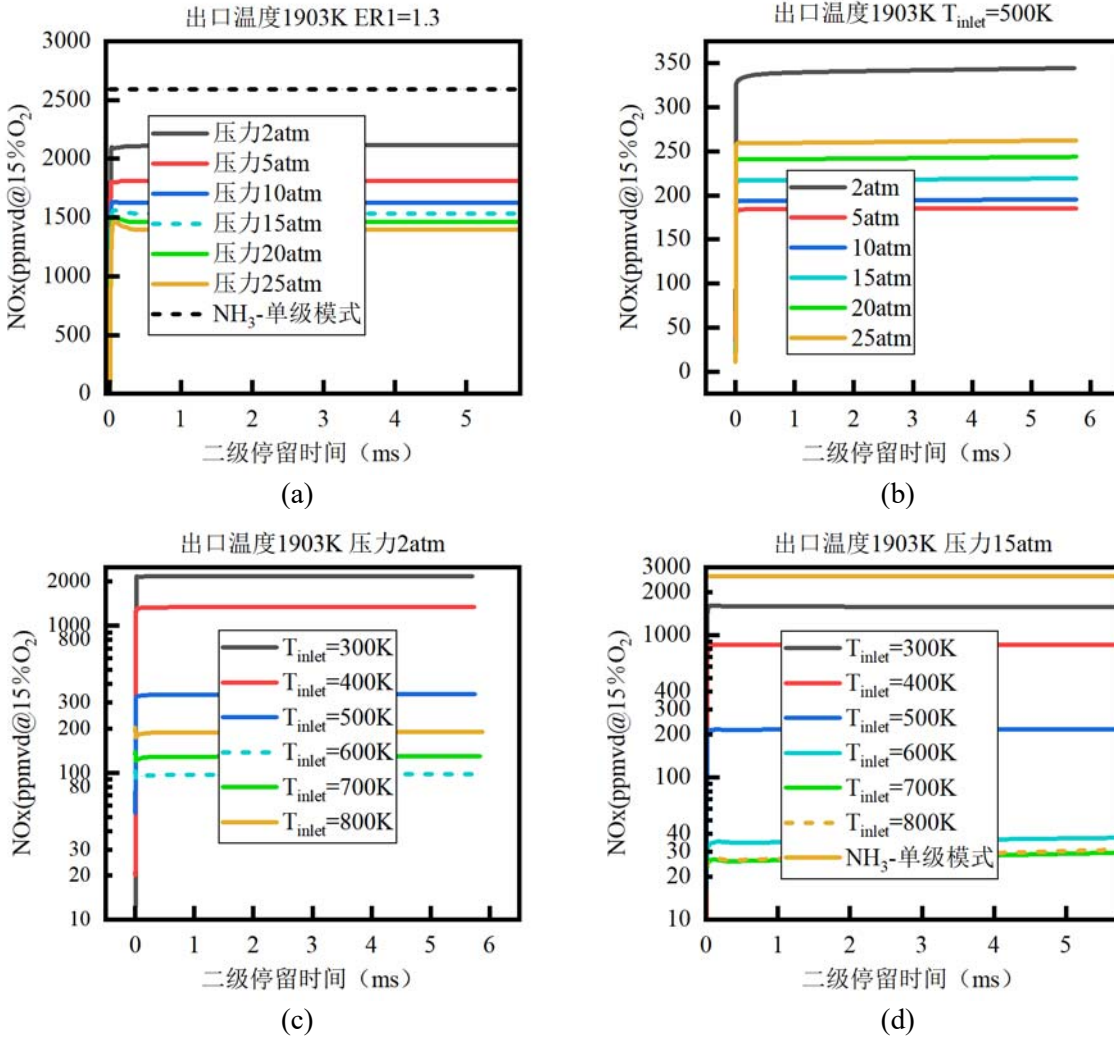


图 2.1 压力对 NO_x 的影响

2.2 一级当量比的影响

在已知较高的进气温度和压力可以降低出口 NO_x 后，采用某型F级燃机参数研究参数变化的影响，固定压力为1.85 MPa（268.4 psi），入口温度为698.7K(对应798 °F)，出口温度1728 K（氨气燃料对应当量比为0.485，对应温度2652°F），采用Glarborg机理文件。

针对氨气燃料、RQL(Rich-Quench-Lean)模型、F级燃机，在总停留时间为25 ms时，ER1=1.3时出口 NO_x 最低，此时为 $22 \text{ ppmvd}@15\%\text{O}_2$ 。此时，随一级当量比的增加，出口 NO_x 先降低后增高。

2.3 总体停留时间的影响

本小节改变总停留时间以研究其变化的影响。

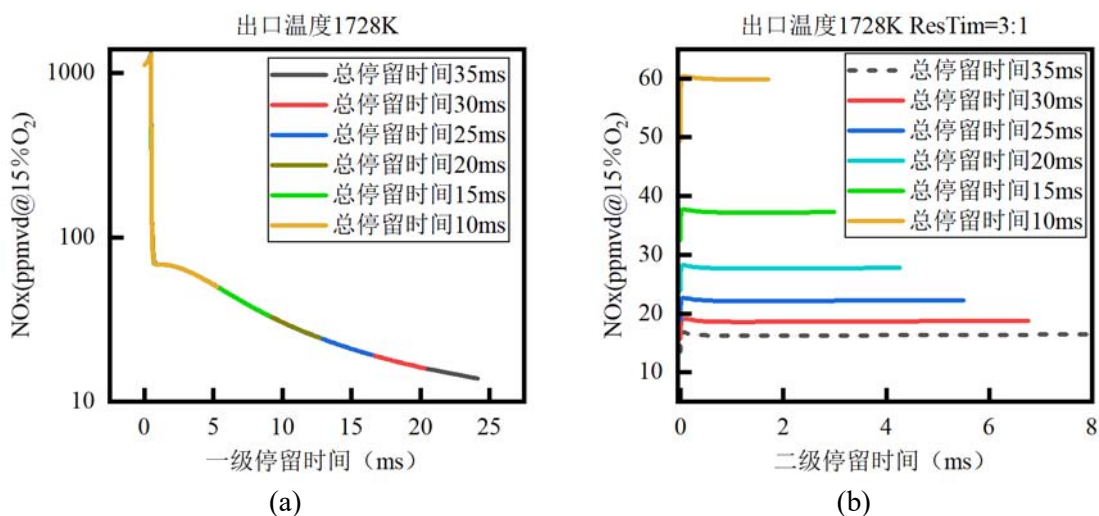


图 2.2 F 级燃机参数下、ER1=1.3 时，总停留时间的影响

从图2.2中可以看出，针对含氨燃料、RQL(Rich-Quench-Lean)模型、F级燃机，总体停留时间越长，出口NO_x越低。固定停留时间比例，延长总停留时间主要是使一级停留时间更长，使NO_x弛豫到更低的水平，相比之下二级停留时间对出口NO_x影响更小。

2.4 氨气掺氢的影响

本小节通过改变燃料中氨、氢燃料比例，研究其变化的影响。其中，出口温度1728 K（对应温度2652°F），对应氨气燃料当量比0.485、掺氢20%燃料当量比0.475、对应掺氢40%燃料当量比0.45、掺氢60%燃料当量比0.43、掺氢80%燃料当量比0.382、氢气燃料当量比0.38。

在研究掺氢影响之前，首先要确定不同掺氢比例下的最佳一级当量比，在NO_x最低的当量比下将它们进行比较，分析其NO_x排放和NH₃、H₂的燃尽情况。

从图2.3a中可以看出，随着掺氢比例的增加，最佳一级当量比在逐渐升高，对应的出口NO_x也在降低。图2.3b中实线代表氨气摩尔分数，虚线代表氢气摩尔分数。从图2.3b中可以看到NH₃降低到10⁻⁶ppm左右，而H₂降低到5ppm以下，认为氨气和氢气都已燃尽。图中可以看出氨气总是先于氢气燃尽，实际上即便是纯氨燃烧，最终也有3ppm左右的氢气，这应该是因为氨燃烧产生了许多氢气。

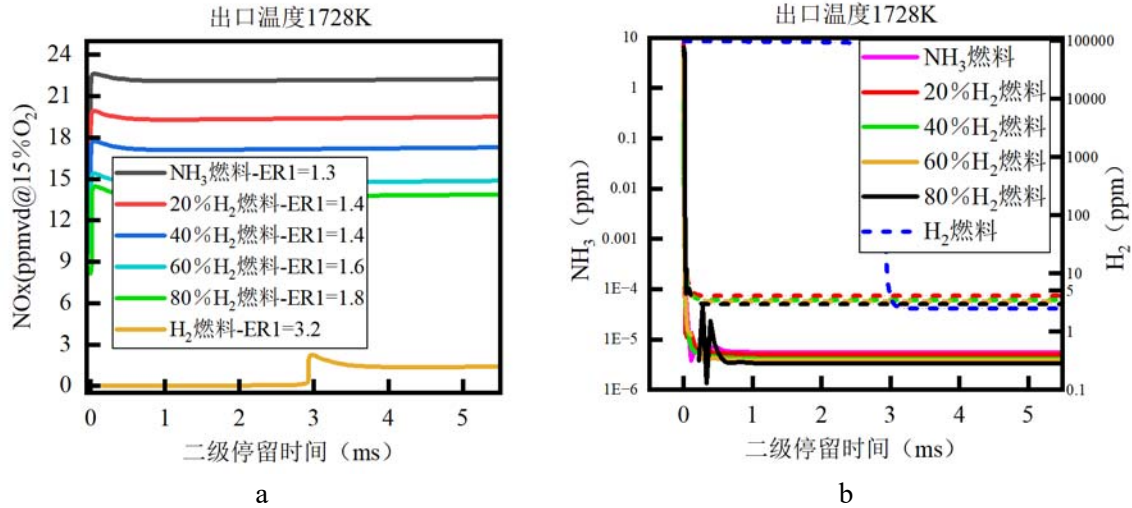


图 2.3 F 级燃机参数，不同掺氢比例燃料的出口 NO_x 比较及 NH₃、H₂ 燃尽情况

3 研究结论

在不影响燃烧效率前提下（燃料燃尽至20 ppm左右），本文对燃料轴向分级燃烧进行了模拟研究，获得的主要结论如下：

(1) 燃烧室出口温度为1975 K的燃机条件下，在二级完全掺混条件下，2:8的甲烷-氢气燃料，在25%的燃料分级比例下，可以实现25 ppm@15%O₂的NO_x排放。更高的掺氢比例需要探索新的燃料分级方式。

(2) 燃烧室出口温度为1975 K的燃机条件下，氢气燃料利用RQL(Rich-Quench-Lean)在一级当量比为2.4时，可以实现22 ppmvd@15%O₂的NO_x排放。在出口温度为1728K时，氢气燃料在一级当量比为1.9时，可以实现18 ppmvd@15%O₂的NO_x排放。。燃烧室出口温度为1975 K燃机条件下，甲烷燃料利用RQL(Rich-Quench-Lean)在一级当量比为1.7情况下，可以实现23 ppmvd@15%O₂的NO_x排放。由于一级燃烧室富氧燃烧，一级燃烧室中会含有超过10000 ppm的CO，这是含碳燃料应用富燃-贫燃燃烧室无法避免的问题。甲烷-氢气燃料在一级当量比1.2-2.4范围内，出口NO_x呈现随一级当量比增加，出口NO_x减小的趋势。

(3) 燃烧室出口温度为1728 K的条件下，氨气燃料利用RQL(Rich-Quench-Lean)在一级当量比为1.3时，可实现低于25 ppmvd@15%O₂的NO_x排放。RQL燃烧室对甲烷、氢气、氨气燃料展现了较强的燃料适应性。