

哈尔滨工业大学

# 燃烧生成物低碳清洁控制 课程报告

题目：低负荷下氨煤混燃对超临界 W 锅炉  
燃烧特性及 NO<sub>x</sub> 排放影响研究

院 (系) 能源科学与工程学院

学 科 碳中和能源技术研究所

研 究 生

学 号

开题报告日期 2025.10.30

二〇二五年十月

## 目 录

1. 课题来源及研究的背景和意义 .....	1
1.1. 课题的来源 .....	1
1.2. 课题研究的背景和意义 .....	1
2. 国内外在该方向的研究现状及分析 .....	3
2.1. 氨煤混燃技术研究现状 .....	3
2.2. 燃煤锅炉低负荷运行研究现状 .....	4
2.3. 低负荷下氨煤混燃的耦合研究现状 .....	5
2.4. 研究现状简析 .....	5
3. 主要研究内容 .....	7
3.1. 氨掺混比例对锅炉燃烧稳定性及常规污染物生成的影响研究 .....	7
3.2. 氨煤混燃条件下 NO <sub>x</sub> 的生成机理与迁移路径研究 .....	8
3.3. 基于空气分级技术的 NO <sub>x</sub> 排放控制策略优化研究 .....	8
4. 研究方案及进度安排，预期达到的目标和取得的研究成果 .....	9
4.1. 研究方案 .....	9
4.1.1. 锅炉氨煤混燃基础模型的建立与验证 .....	9
4.1.2. 氨掺混比例对燃烧及 NO <sub>x</sub> 生成机理的影响研究 .....	10
4.1.3. 基于空气分级技术的 NO <sub>x</sub> 控制优化策略研究 .....	10
4.2. 预期达到的目标和取得的研究成果 .....	10
4.3. 进度安排 .....	11
5. 为完成课题已具备和所需的条件和经费 .....	12
6. 预计研究过程中可能遇到的困难和问题，以及解决的措施 .....	12
7. 主要参考文献 .....	12

## 1. 课题来源及研究的背景和意义

### 1.1. 课题的来源

该课题为虚构的自拟课题。现在跟着博士师兄做的是一个流程成熟的燃煤锅炉低氮改造项目，去了几次实验熟悉 PDA 等技能，具体内容说等上半学期课结束了再上手，所以想着虚构课题。

虚构的研究锅炉为 600MW 超临界 W 火焰锅炉，假设存在一个项目，需要对该锅炉在低负荷下氨煤混燃的燃烧特性及 NO<sub>x</sub> 排放影响进行研究。参考了课题组以前的师兄及他人的成果以初步了解该锅炉的部分特性<sup>[1]</sup>。

### 1.2. 课题研究的背景和意义

能源安全与低碳转型是我国经济社会可持续发展的战略基石。中国“富煤、贫油、少气”的资源情形，给中国带来了巨大的减排压力，使其在全球能源格局和减排工作中需要扮演关键角色。根据能源研究院发布的《世界能源统计年鉴 2025》，2024 年中国煤炭产量占全球总产量的 51.7%，消费量占全球的 55.8%，均位居世界第一<sup>[2]</sup>。在我国的电力供给结构中，煤炭长期以来占据主导地位。如图 1-1 所示，尽管近年来清洁能源发电量快速增长，但煤电在总发电量中的占比依然显著，凸显了能源结构转型的艰巨性与紧迫性。发电是煤炭消耗最主要的途径，这也决定了我国在推进“双碳”目标过程中，必须统筹兼顾能源供给安全与系统低碳转型。为应对全球气候变化并落实“双碳”战略目标，我国正加速推动能源体系的清洁低碳转型。国家层面相继出台《加快构建新型电力系统行动方案》等一系列纲领性文件，明确了新型电力系统的建设路径。在此背景下，煤电的角色正发生根本性转变，从传统的电力供应主体，转向以“兜底保障”和“灵活调节”为核心功能的关键支撑<sup>[4]</sup>。

在能源结构转型方面，我国政府承诺力争 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。随着“双碳”目标的深入推进，构建以新能源为主体的新型电力系统已成为必然选择。然而，风电、光伏等可再生能源的大规模并网因其固有的间歇性与波动性，给电网的稳定运行带来巨大挑战，导致火电机组需要频繁参与深度调峰，会有较长时间处于低负荷运行状态。在这一背景下，如何保障低负荷下火电的灵活性与清洁性，是实现能源结构平稳过渡的关键。

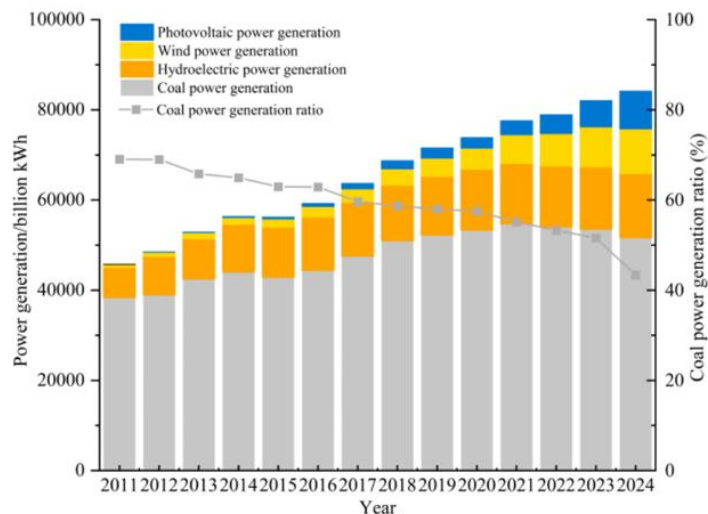


图 1-1 中国的能源发电与煤电比例，来自文献[3]

同时，作为目前电力供应的主体，煤电的低碳化改造也是兑现这一承诺的重中之重。单纯依靠提高可再生能源占比而大幅关停煤电机组，将危及电网稳定<sup>[6]</sup>。因此，寻找一种适用于现有燃煤锅炉的即时、高效低碳燃料替代技术迫在眉睫。在供求平衡方面，电网峰谷差持续加大，燃煤机组低负荷运行已成为常态，但此时往往伴随着燃烧不稳定、效率下降及污染物控制困难等一系列问题。

氢能作为零碳能源载体，是理想的清洁燃料，但其储存与运输成本极高，安全性挑战大。氨（ $\text{NH}_3$ ）作为一种富氢载体，同样不含碳，燃烧不产生  $\text{CO}_2$ ，同时其储运技术相对更加成熟、成本低廉，由可再生能源制备的绿氨更是被誉为“未来的无碳燃料”。将氨与煤在锅炉中混合燃烧，有望在维持电网灵活性的同时，直接、大幅度地降低碳排放，是煤电实现深度降碳极具潜力的技术路径。然而，氨煤混燃技术，特别是在低负荷条件下的应用，面临着复杂的科学与工程挑战。首先，氨的燃烧特性与煤粉存在显著差异，其火焰传播速度慢、着火温度高，可能对低负荷下锅炉的燃烧稳定性与效率产生负面影响。其次，氨本身含有固定氮元素，其混燃过程中的氮氧化物（ $\text{NO}_x$ ）生成与还原机理极为复杂，在低负荷、低炉温条件下，如何控制总  $\text{NO}_x$  排放以避免“减碳增氮”的风险，是决定该技术可行性的核心问题<sup>[7]</sup>。

超临界 W 火焰锅炉因其燃用低挥发分煤种时着火稳定、燃烧效率高的特点在我国广泛应用，但其炉内空气动力场和燃烧过程本身就较为复杂<sup>[8]</sup>。引入氨气后，在低负荷下其流动、传热、燃烧及污染物生成特性将发生何种变化，目前尚缺乏系统性的认知。实物试验研究成本高昂且测量困难，而数值模拟技术具有成本低、周期短、能获取全炉膛详细信息等独特优势，是进行前期机理探

索和参数优化的有效工具。

综合上述分析，在能源结构清洁低碳转型和电力系统灵活性要求日益提高的背景下，发展低负荷氨煤混燃技术具有重要的战略意义。本研究旨在通过数值模拟手段，深入探究低负荷下超临界 W 锅炉内氨煤混燃的燃烧特性与  $\text{NO}_x$  排放规律，揭示其内在影响机理，为后续项目组的实物试验研究提供关键的理论依据与优化方向，推动氨煤混燃技术在我国燃煤电站低碳、灵活、清洁运行中的科学应用。

## 2. 国内外在该方向的研究现状及分析

### 2.1. 氨煤混燃技术研究现状

氨气作为一种高效的零碳氢载体，因其易于液化储运、安全性高及燃烧无碳排放近年来受到全球广泛关注，其作为替代燃料在燃煤锅炉中的应用已成为能源领域的研究热点。国内外研究机构已围绕氨煤混燃技术在电站锅炉中的应用可行性、燃烧特性及污染物排放等方面开展了大量的试验研究与数值模拟工作。

在燃烧特性方面，氨气的掺混会对煤粉的着火、燃烧稳定性及燃尽过程产生显著影响。Nagatani 等<sup>[9]</sup>在 10 MW 燃煤锅炉中的试验表明，当氨气从煤粉燃烧器中心管道注入时，会导致煤粉着火延迟和火焰偏移。Tamura 等<sup>[10]</sup>在 1.2 MW 试验炉中发现，氨气的注入方式是关键因素：当氨气与煤粉预混从燃烧器注入时，飞灰含碳量变化不大；但当氨气从侧壁或燃烧器中心枪单独注入时，飞灰含碳量反而降低。Ishihara 等<sup>[11]</sup>对 1000 MW 锅炉的零维模拟表明，提高掺氨比会抑制焦炭颗粒的燃烧并推迟其燃尽位置。Zhang 等<sup>[12]</sup>对 8.5 MW 锅炉的三维数值模拟则发现，飞灰含碳量随掺氨比呈非单调变化，在掺氨比为 10% 时最低，而后随比例增加而上升，并在高掺氨比下出现氨逃逸现象。这些研究共同表明，合理的燃烧组织与氨气注入方式对于保证氨煤混燃的稳定性和经济性至关重要。

在污染物排放，尤其是  $\text{NO}_x$  生成特性方面，现有研究揭示了其复杂的变化规律，该规律受到掺氨比、注入位置及空气分级等多种因素的耦合影响。Tamura 等<sup>[10]</sup>的试验结果表明， $\text{NO}_x$  排放与氨的注入位置密切相关：当  $\text{NH}_3$  从炉膛侧壁注入时， $\text{NO}_x$  浓度随掺氨比增加而升高；而当  $\text{NH}_3$  与煤粉预混并从燃烧器注入且掺氨比低于 30% 时， $\text{NO}_x$  排放与纯燃煤相当，超过此比例后则开始上升。Cardoso 等<sup>[13]</sup>对循环流化床的二维模拟发现，在 10% 掺氨比下  $\text{NO}$  排放与纯煤

相当，但当掺氨比从 20%增至 80%时，由于  $\text{NH}_3$  的还原作用， $\text{NO}$  排放可降低高达 40%。同时，他们将  $\text{NO}$  排放的降低归因于远离床层的氨注入点和 20%的空气分级。Ishihara 等<sup>[11]</sup>的零维模拟进一步指出，将  $\text{NH}_3$  注入火焰区可获得最低的  $\text{NO}$  排放，且  $\text{NO}$  排放随掺氨比的变化呈现非单调性：在 20%掺氨比下低于纯煤，在 20%-60%间单调增加，而在 80%时又回落至 40%掺氨比的水平。Zhang 等<sup>[12]</sup>的三维模拟则观测到， $\text{NO}$  排放峰值出现在 10%掺氨比工况，随后随掺氨比增加而下降。为协同控制  $\text{NO}_x$ ，Lyu 等<sup>[14]</sup>提出将富氧燃烧与深度空气分级技术结合，可在提升炉温的同时降低  $\text{NO}_x$  排放。

然而，现有研究多集中于常规负荷工况，对于在低负荷这一特殊运行条件下，炉内温度场、流动及组分分布的剧烈变化将如何影响氨煤混合火焰的稳定性、燃尽特性以及  $\text{NO}_x$  的生成路径，尚缺乏系统深入的研究。

## 2.2. 燃煤锅炉低负荷运行研究现状

为提升电网灵活性，我国自 2016 年起推动火电灵活性改造<sup>[15]</sup>，燃煤锅炉深度调峰下的安全、稳定、环保运行已成为核心研究课题。国内外学者通过试验研究、数值模拟和燃烧器改造等手段，在低负荷运行领域取得了系列重要成果。

试验研究是探索低负荷运行规律的基础。王学华<sup>[16]</sup>通过 600 MW 机组试验发现，煤质对稳燃至关重要，燃用烟煤可比贫煤显著提升着火性能。刘综绪等人的研究指出，通过降低煤粉细度、风煤比及集中投运燃烧器，可有效维持炉内火焰稳定<sup>[17]</sup>。张绪辉<sup>[18]</sup>对多台机组的试验则揭示了低负荷下炉内燃烧对一次风量变化极为敏感的特性。在  $\text{NO}_x$  方面，金炜<sup>[19]</sup>的研究表明，集中燃烧、避免断层是保障稳燃的关键。然而，为稳燃而采用的高氧量会破坏分级燃烧，导致  $\text{NO}_x$  排放激增。

数值模拟为深入理解低负荷燃烧机理提供了强大工具。众多研究者利用 CFD 方法系统探索了运行参数的优化空间。Jiang 等<sup>[20]</sup>和 Ma 等<sup>[21]</sup>的模拟结果表明，集中投运中层燃烧器（如 BCDE 组合）能在低负荷下形成集中稳定的火焰。付旭晨等<sup>[22]</sup>的研究建议，通过降低一次风速、关小周界风等方式可改善燃烧稳定性。孙倩倩<sup>[23]</sup>则证实，提高一次风温是增强低负荷着火的有效措施。在污染物控制方面，马达夫等<sup>[24]</sup>发现，减少主燃区助燃空气能有效降低  $\text{NO}_x$  排放。袁来运<sup>[25]</sup>的系统研究进一步指出，在超低负荷下，主燃区一、二次风分配对燃烧与  $\text{NO}_x$  生成的影响可能超过燃尽风，指明了后续研究的重点方向。

燃烧器及系统优化改造是实现宽负荷运行的重要途径。研究者提出了多种创新技术。哈工大的李争起团队开发的偏心二次风旋流燃烧器，通过改变气流

结构,显著增强了火焰穿透力和稳燃性,在低负荷下可实现  $\text{NO}_x$  减排超 20%<sup>[26]</sup>。Su 等人<sup>[27]</sup>对旋流燃烧器喷嘴结构的优化,同样旨在促进低负荷下的快速点火。对于切圆燃烧锅炉,Chang 等<sup>[28]</sup>发现燃烧器上倾布置有助于火焰集中,而 Jiang 等<sup>[20]</sup>则优化了燃烧器组合与分级风配比,实现了 50%负荷下的稳定低氮燃烧。此外,Zeng 等<sup>[29]</sup>探讨了一次风当量比的最佳范围,而 Hu 等<sup>[30]</sup>提出的烟气再循环技术,则能同时解决低负荷下 SCR 入口烟温不足与  $\text{NO}_x$  排放高的难题,有效提升机组调峰能力。

综上所述,现有研究已在燃煤锅炉低负荷运行的稳定性提升、 $\text{NO}_x$  生成机理及控制策略方面形成了较为丰富的认识。然而,当引入氨作为混燃燃料时,其独特的理化特性必将对已建立的炉内流动、传热、燃烧及  $\text{NO}_x$  转化路径产生深刻影响。因此,在现有研究基础上,亟需开展低负荷下氨煤混燃的耦合特性研究,以理清其相互作用机制,保障新型燃烧方式的顺利应用。

### 2.3. 低负荷下氨煤混燃的耦合研究现状

目前,国内外对氨煤混燃技术与燃煤锅炉低负荷运行的研究多集中于单一维度,而将二者耦合的研究尚处于初步阶段,对低负荷尤其是深度调峰条件下氨煤混燃的系统性影响尚未形成系统认识。张皓玮<sup>[31]</sup>、白晨曦<sup>[32]</sup>等对低负荷下掺氨燃烧的传热特性、 $\text{NO}_x$  排放等进行了初步探讨,但其研究对象为四角切圆锅炉;Jin<sup>[33]</sup>等人针对 1050MW 变压运行直流燃煤锅炉机组在低负荷下氨煤混燃进行了数值研究,揭示了掺氨比例与空气分级对温度场及污染物排放的影响规律。针对超临界 W 型火焰锅炉在低负荷下掺氨燃烧的耦合特性研究较为缺乏,尤其在火焰稳定性、燃烧组织方式、污染物协同控制等方面的系统分析尚未深入。因此,在低负荷与氨煤混燃耦合背景下,针对超临界 W 型锅炉的燃烧特性与  $\text{NO}_x$  排放影响的研究具有较大的探索空间。

### 2.4. 研究现状简析

综合上述国内外研究结果,氨煤混燃作为一种实现燃煤电站低碳转型的潜在技术路径,其基础可行性已得到初步验证,并在燃烧特性与污染物生成规律方面形成了一些基本共识。尽管锅炉系统与燃烧环境十分复杂,但氨气掺混比例与注入方式是影响混燃效果的关键因素已成为普遍认识。研究表明,合理的燃烧组织(如预混注入、优化分级风)能够在一定的掺氨比例下(如低于 30%)实现与纯燃煤相当的燃烧效率与  $\text{NO}_x$  排放水平。同时,通过将富氧燃烧、深度

空气分级等先进技术与氨煤混燃相结合，展现出协同控制  $\text{NO}_x$  排放的潜力。这说明了通过精细化的燃烧调控，有望化解氨燃料带来的负面效应，并充分发挥其零碳价值。

然而，当前国内外研究在将氨煤混燃技术推向实际应用，尤其是在应对火电深度调峰的严峻挑战时，其研究范式与技术路线存在明显的局限性与过程复杂性。目前的研究多集中于常规负荷这一理想工况，所获得的优化策略与结论对于负荷剧烈波动的实际运行环境适用性存疑。而为实现锅炉低负荷稳燃所发展的技术体系，如集中燃烧、优化配风、燃烧器改造等，又完全构建在纯燃煤的基础之上，未能考虑氨气引入后对炉内流场、反应动力学的根本性改变。将这两套在各自领域相对成熟但彼此割裂的技术体系简单叠加，难以应对低负荷下氨煤混燃这一高度耦合的复杂系统。

综上所述，氨煤混燃与锅炉低负荷运行虽分别提供了低碳与灵活的解决方案，但当前的研究方法均存在其固有的“瓶颈”。集中于常规负荷的氨煤研究无法揭示低负荷下温度场、流场剧变对氨火焰稳定性、燃尽特性及  $\text{NO}_x$  生成路径的深刻影响；而基于纯燃煤的低负荷优化策略则无法应对氨气掺混后其独特的理化特性（高汽化潜热、慢火焰速度、复杂的燃料氮化学反应）对现有燃烧组织的冲击<sup>[34]</sup>。苛刻的低负荷运行条件与敏感的氨煤混燃反应之间尚未建立清晰的作用机制，这是当前研究面临的核心矛盾。

从低负荷下氨煤混燃特性的研究视角出发，超临界 W 型火焰锅炉本身的结构与燃烧特性，可能为解决上述矛盾提供独特的切入点，同时也构成了研究的难点。W 型锅炉的长下行火焰、强中心回流区及其对低挥发分煤种的适应性，构成了一个特殊的燃烧环境。在低负荷下，这一环境中的流动、混合与燃烧过程更为脆弱与敏感。氨气的掺入，一方面其高氢含量可能促进自由基生成，有助于在低温环境下稳定火焰；另一方面，其作为“冷源”的特性又可能抑制煤粉着火，并重塑炉内的温度分布，进而深刻影响  $\text{NO}_x$  的“生成-还原”平衡。因此，低负荷、W 型火焰与氨煤混燃三者之间的耦合机制，是一个亟待探索的科学前沿。针对此矛盾，本课题旨在系统研究低负荷下氨煤混燃在超临界 W 锅炉中的特性，通过揭示其燃烧特性及对  $\text{NO}_x$  排放影响的规律，为开发适用于此类锅炉的低碳灵活运行技术奠定理论基础，从而填补现有研究空白，这也是本课题的核心创新点。



### 3. 主要研究内容

由于氨掺混比例与锅炉负荷两个变量同时存在会显著增加实验工况数量，导致研究工作量剧增，因此本课题选择将负荷固定为 40%额定工况，关注于 600MW 超临界 W 火焰锅炉在 40%负荷下氨煤混燃的燃烧特性与污染物生成行为，旨在揭示其内在影响规律并提出优化控制策略，为（虚构的）项目组研究提供支撑。氨的掺混可有效降低  $\text{CO}_2$  排放，但其较低的火焰温度可能威胁低负荷下的燃烧稳定性，且其氮元素的存在对  $\text{NO}_x$  的生成具有复杂的双重影响。因此，本课题具体从氨掺混对燃烧稳定性的影响、 $\text{NO}_x$  的生成与转化机理、以及基于空气分级的协同优化控制等方面进行。规划的课题整体研究结构如图 3-1 所示。



图 3-1 课题研究结构图

#### 3.1. 氨掺混比例对锅炉燃烧稳定性及常规污染物生成的影响研究

燃烧稳定性是锅炉在低负荷下安全运行的首要前提，而氨气的掺混因其物理化学特性与煤粉存在差异，必然对炉内燃烧过程产生重要影响。目前针对 600MW 超临界 W 火焰锅炉的氨煤混燃研究尚不充分，尤其是氨气对煤粉气流着火特性、火焰传播行为及燃尽过程的基础影响机制尚未系统揭示。因此，本课题将从燃烧稳定性的核心判据出发，系统研究不同掺氨比例条件下炉内流场结构、温度分布及关键组分浓度的变化规律。

具体而言，本部分研究将首先建立并验证 40%额定负荷下的纯煤燃烧基准

模型,在此基础上,分别对氨热值掺混比例为 0%、20%、40%和 60%四种工况开展数值模拟。重点关注炉内高温区分布、煤粉颗粒运动轨迹与着火距离、以及温度波动特性,系统评估氨掺混对燃烧稳定性的影响程度。同时,监测 CO、未燃尽碳等常规污染物的生成与空间分布,揭示在氨部分替代煤粉的混燃过程中常规污染物的演变行为,为综合评价氨煤混燃技术的环保性能提供理论依据。

### 3.2. 氨煤混燃条件下 NO<sub>x</sub> 的生成机理与迁移路径研究

在明确宏观燃烧特性的基础上,深入揭示 NO<sub>x</sub> 的生成机理是本课题的核心与深化所在。氨的加入引入了新的氮源和新的化学反应路径(NH<sub>3</sub> 的氧化与还原),使得 NO<sub>x</sub> 的生成机制相较于纯煤燃烧更为复杂。目前的研究多集中于报道 NO<sub>x</sub> 排放总量的变化现象,但对其中各生成路径的贡献、关键反应的竞争关系及其在炉内空间上的分布缺乏深入的机理性阐释。

本课题拟在上述不同掺混比例模拟结果的基础上,采用反应路径分析(Reaction Path Analysis)方法,对 NO<sub>x</sub> 的生成进行溯源。定量分析随着氨比例增加,来自煤的燃料氮(Volatile-N, Char-N)与来自氨的燃料氮(NH<sub>3</sub>)对总 NO<sub>x</sub> 的贡献份额演变,并评估热力型 NO<sub>x</sub> 的贡献变化。进一步,通过提取并可视化关键均相反应(如 R6:  $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \dots$  和 R7:  $\text{NH}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \dots$ )在炉内不同区域的体积反应速率,揭示“NH<sub>3</sub> 氧化生成 NO”与“NH<sub>3</sub> 还原 NO”这两个竞争性反应的主导区域及强弱关系,从化学反应动力学层面解释在低负荷条件下这种强弱关系的内在原因。

### 3.3. 基于空气分级技术的 NO<sub>x</sub> 排放控制策略优化研究

在梳理清楚 NO<sub>x</sub> 生成机理后,发展有效的控制策略是实现低负荷允许的情况下氨煤混燃技术清洁应用的关键。空气分级(如调节 SOFA 风率)是电站锅炉最常用且高效的 NO<sub>x</sub> 减排技术,但其在低负荷氨煤混燃这一特殊燃料体系下的适用性与优化方法有待深入研究。如何在抑制 NO<sub>x</sub> 生成的同时,兼顾因氨掺混而已受影响的燃烧稳定性与燃尽效率,是一个需要解决的平衡问题。

本部分研究将在固定 40%氨掺混比例的条件下,系统改变分离燃尽风(SOFA)的风率,设定 8%、16%、24%三种典型工况,探究其对燃烧与污染物排放的协同影响机制。重点分析 SOFA 风率变化如何重塑主燃烧区的化学当量比(还原性气氛强度)和温度水平,从而影响燃料氮的转化路径。最终,构建一个兼顾低 NO<sub>x</sub> 排放、高燃烧稳定性(以温度水平和燃尽率为表征)的多目标

评价体系，对不同 SOFA 风率下的综合性能进行对比，提出适用于 40% 负荷下氨煤混燃的较优空气分级方案。

## 4. 研究方案及进度安排，预期达到的目标和取得的研究成果

### 4.1. 研究方案（我意识到我的研究内容和方案写得很像了……）

#### 4.1.1. 锅炉氨煤混燃基础模型的建立与验证

本课题首先基于目标 600 MW 超临界 W 火焰锅炉的实际尺寸，构建其三维几何模型，确立数值模拟的物理基础。利用专业网格划分软件生成高质量的计算网格，并对燃烧器区域进行局部加密处理，完成网格无关性验证，确保计算结果的准确性。锅炉的燃烧过程采用如图 4-1 所示的基于 ANSYS Fluent 的数值模拟系统进行求解。采用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型模拟炉内湍流流动，采用离散坐标（DO）模型计算辐射传热，气相燃烧采用有限速率/涡耗散（Finite-Rate/Eddy-Dissipation）模型，煤的热解采用两步竞争反应模型，焦炭燃烧采用动力学/扩散控制反应模型。最终通过与锅炉在 40% 负荷下的现场运行数据（如炉出口  $O_2$  浓度、 $NO_x$  排放值、炉膛温度分布）进行比对，验证所建立基础模型的可靠性，为后续氨煤混燃研究提供准确的计算平台。

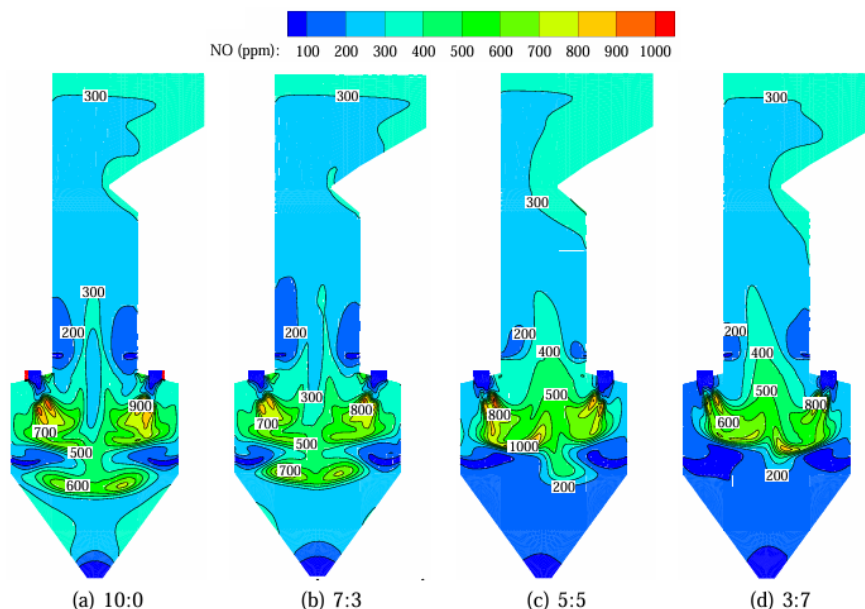


图 4-1 锅炉数值模拟计算结果举例，参考文献[1]

### 4.1.2. 氨掺混比例对燃烧及 NO<sub>x</sub> 生成机理的影响研究

在上述已验证的纯煤模型基础上，系统研究氨气掺混的影响。具体地，保持锅炉总热输入功率和 40% 负荷不变，将氨气与煤粉在燃烧器入口处进行混合，设定氨掺混比例（按热值）为 0%、20%、40%、60%，共四个工况进行对比研究。通过分析计算得到的炉内温度场、流场及关键气体组分（O<sub>2</sub>、CO、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>）的分布云图，揭示氨气加入对煤粉气流着火特性、火焰中心位置及燃烧稳定性的影响规律。重点通过后处理功能提取并积分 NH<sub>3</sub> 氧化生成 NO（R6）与 NH<sub>3</sub> 还原 NO（R7）等关键反应路径的体反应速率，结合局部当量比和温度分布，阐明不同掺混比例下 NO<sub>x</sub> 的生成与还原竞争机制，从机理上解释氨掺混导致 NO<sub>x</sub> 排放变化的本质原因。

### 4.1.3. 基于空气分级技术的 NO<sub>x</sub> 控制优化策略研究

基于上述对 NO<sub>x</sub> 生成机理的认识，本课题拟开展基于空气分级的燃烧优化研究，以寻求在保证燃烧效率的同时有效控制 NO<sub>x</sub> 排放的策略。具体地，在固定 40% 氨掺混比例条件下，系统改变分离燃尽风（SOFA）的风率分配，设定 SOFA 风率占总风量的比例分别为 8%、16%、24% 三种工况。通过对比分析不同 SOFA 风率下主燃烧区的还原性气氛强度（通过 CO 和未燃尽碳浓度表征）、燃尽区的气流混合情况以及整个炉膛的温度分布，探究空气分级对抑制 NO<sub>x</sub> 生成的效果及其对燃烧过程的影响。最终，通过构建以“低 NO<sub>x</sub> 排放、高燃烧稳定性、高燃尽率”为核心的多目标评价体系，对上述优化方案进行综合评估，提出适用于 40% 负荷下 40% 氨掺混比例的较优 SOFA 风率控制策略，为实际锅炉运行提供理论依据。

## 4.2. 预期达到的目标和取得的研究成果

本课题预期在氨煤混燃反应动力学机制、低负荷下燃烧稳定性与 NO<sub>x</sub> 生成路径的耦合关系方面开展深入研究，系统揭示氨掺混比例与空气分级对燃烧特性及污染物生成的作用机理，建立适用于 W 火焰锅炉的低负荷掺氨燃烧优化调控方法。通过系统数值模拟研究，阐明不同工况下氨燃料氮的迁移转化路径及关键反应竞争机制，形成兼顾燃烧效率与污染物控制的优化方案，并完成一篇高水平期刊论文。

在机理研究基础上，重点突破低负荷掺氨条件下燃烧稳定性与 NO<sub>x</sub> 排放协同控制的技术难点，实现优化方案的多目标综合评价与验证。通过构建燃烧组

织与空气分级的协同调控策略，形成适用于超临界 W 火焰锅炉在低负荷下氨煤混燃的运行指导原则，为后续中试试验提供可靠的理论基础与技术支撑，最终申请一项涵盖燃烧优化方法与控制系统的发明专利。

#### 4.3. 进度安排

时间	进度安排
2026.07~2026.09	进行文献查阅，明确具体技术路线；学习并掌握数值模拟相关软件（如 ANSYS Fluent、前处理软件等）
2026.10~2027.02	建立 600MW 超临界 W 火焰锅炉的三维几何模型，完成网格划分与无关性验证；构建并调试纯煤燃烧（40%负荷）的基准模型
2027.03~2027.04	利用现场运行数据对基准模型进行验证与校准，确保模型的准确性与可靠性
2027.05~2027.07	系统开展不同掺氨比例（0%、20%、40%、60%）的数值模拟，分析其对燃烧稳定性及常规污染物生成的影响，完成研究内容 3.1
2027.08~2027.10	深入分析模拟数据，开展 NO <sub>x</sub> 生成机理研究，完成研究内容 3.2；撰写并投出第一篇学术论文
2027.11~2028.01	系统开展不同 SOFA 风率（8%、16%、24%）的优化模拟，完成研究内容 3.3；完成多目标评价与优化策略分析
2028.02~2028.04	整理全部研究成果，系统分析数据，撰写学位论文初稿
2028.05~2028.06	最终定稿学位论文，完成毕业论文答辩

## 5. 为完成课题已具备和所需的条件和经费

课题组已具备 ANSYS Fluent、ICEM CFD 等商用数值模拟软件平台，具备高性能计算集群，可满足全炉膛三维燃烧数值模拟的计算需求。实验室具备锅炉燃烧过程数值模拟与数据分析的基础条件，具备相关前处理与后处理工具。

超临界 W 火焰锅炉运行数据及模型验证所需的现场数据可从合作电厂及课题组前期积累中获取。其他相关燃烧机理分析、数据处理等工作可在学校高性能计算中心与能源清洁利用国家重点实验室的支持下完成。课题组在燃煤锅炉低碳燃烧与数值模拟方向经费充足，具备保障本课题顺利推进的软硬件条件和计算资源。

## 6. 预计研究过程中可能遇到的困难和问题，以及解决的措施

序号	可能遇到的问题	解决措施
(1)	低负荷与氨煤混燃耦合工况复杂，低负荷下炉内温度场不均匀，氨掺混可能加剧燃烧不稳定（或者说该虚构项目本身步子可能就有些大）	通过数值模拟分析不同掺氨比例下的温度波动特性与回流区强度，结合火焰稳定性判据（如温度梯度、CO 波动），优化燃烧器配风与氨喷射策略以强化着火
(2)	低负荷氨煤混燃反应机理的复杂性：氨的掺入引入了新的氮源（ $\text{NH}_3$ ），其氧化与还原路径与煤粉燃料氮（Volatile-N、Char-N）相互竞争，可能导致 $\text{NO}_x$ 生成机理不明确，模拟中难以准确预测 $\text{NO}_x$ 排放趋势	采用详细的化学反应机理（如包含 $\text{NH}_3$ 氧化生成 NO 和 $\text{NH}_3$ 还原 NO 的关键反应路径），并通过反应路径分析定量评估各路径贡献。结合局部当量比和温度分布，分析“生成-还原”竞争关系，利用敏感性分析确定主导反应，提高机理模型的准确性

## 7. 主要参考文献

- [1] 李晓光.超临界 W 火焰锅炉多次引射分级燃烧及壁温特性研究[D].哈尔滨

工业大学,2022.

- [2] Energy Institute. Statistical Review of World Energy 2025 [EB/OL]. London: Energy Institute, 2025 [2025-06-19]. <https://www.energyinst.org/statistical-review>.
- [3] WANG Tianpeng, SU Xin, MEI Yichuan, et al. Climate change intensifies low-carbon transition pressure in China's power system[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2025, 114: 107949.
- [4] 国家能源局. 煤电低碳化改造建设行动方案 [EB/OL]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content\\_6963501.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content_6963501.htm)
- [5] 国家能源局. 新一代煤电升级专项行动实施方案 [EB/OL]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202504/content\\_7018738.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202504/content_7018738.htm)
- [6] 黎博,陈民铀,钟海旺,等.高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报,2023,43(02):555-581.
- [7] MADHESWARAN D K, VENGATESAN S, JEGADHEESWARAN S, et al. Ammonia as a hydrogen carrier: A comprehensive analysis of electrolysis efficiency and its potential in sustainable energy systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 221: 115915.
- [8] KUANG M, LI Z. Review of gas/particle flow, coal combustion, and NO<sub>x</sub> emission characteristics within down-fired boilers[J]. Energy, 2014, 69: 144-178.
- [9] NAGATANI G, ISHI H, ITO T, et al. Development of co-firing method of pulverized coal and ammonia to reduce greenhouse gas emissions[J]. IHI Engineering Review, 2020, 53(1): 1-10.
- [10] TAMURA M, GOTOU T, ISHII H, et al. Experimental investigation of ammonia combustion in a bench scale 1.2 MW-thermal pulverised coal firing furnace[J]. Applied Energy, 2020, 277: 115580.
- [11] ISHIHARA S, ZHANG J W, ITO T. Numerical calculation with detailed chemistry of effect of ammonia co-firing on NO emissions in a coal-fired boiler[J]. Fuel, 2020, 266: 116924.
- [12] ZHANG J W, ITO T, ISHII H, et al. Numerical investigation on ammonia co-firing in a pulverized coal combustion facility: Effect of ammonia co-firing ratio[J]. Fuel, 2020, 267: 117166.
- [13] SOUSA CARDOSO J, SILVA V, EUSÉBIO D, et al. Numerical modelling of ammonia-coal co-firing in a pilot-scale fluidized bed reactor: Influence of ammonia addition for emissions control[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115226.

- 
- [14] LYU Q, WANG R R, DU Y B, et al. Numerical study on coal/ammonia co-firing in a 600 MW utility boiler[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(45): 17293-17310.
- [15] 国家能源局综合司. 关于下达火电灵活性改造试点项目的通知[EB\OL]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto84/201607/t20160704\\_2272.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto84/201607/t20160704_2272.htm).
- [16] 王学华. 600 MW 超临界锅炉深度调峰对燃烧及脱硝影响研究[J]. 能源与节能, 2022, (12): 160-163.
- [17] 刘综绪, 张营帅, 石峰, 等. 600 MW 四角切圆燃烧锅炉深度调峰试验调整及优化[J]. 锅炉技术, 2022, 53(03): 67-74.
- [18] 张绪辉, 杨兴森, 辛刚, 等. 燃煤火电机组深度调峰运行试验[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(04): 144-150.
- [19] 金炜. 深度调峰下大型电站燃煤锅炉炉内过程特性研究[D]. 东南大学, 2024.
- [20] JIANG Y, LEE B H, OH D H, et al. Optimization of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NO<sub>x</sub> emission at half-load for a 550-MW tangentially fired pulverized coal boiler[J]. Fuel, 2021, 306: 121727.
- [21] MA D F, ZHANG S Y, HE X, et al. Combustion stability and NO<sub>x</sub> emission characteristics of a 300 MWe tangentially fired boiler under ultra-low loads with deep-air staging[J]. Energy, 2023, 269: 126795.
- [22] 付旭晨, 郭洋, 于英利, 等. 300 MW 等级锅炉变工况低负荷稳燃能力数值模拟与预测 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(05): 112-118.
- [23] 孙倩倩. 超超临界锅炉深度调峰下稳燃能力提升技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [24] 马达夫, 张守玉, 何翔, 等. 煤粉锅炉超低负荷运行的技术问题和应对措施[J]. 动力工程学报, 2019, 39(10): 784-791.
- [25] 袁来运. 超临界煤粉锅炉变负荷燃烧的数值模拟及配风优化[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [26] WANG Q, CHEN Z, LI L, ZENG L, LI Z. Achievement in ultra-low-load combustion stability for an anthracite- and down-fired boiler after applying novel swirl burners: From laboratory experiments to industrial applications [J]. Energy, 2020, 192: 116623.
- [27] SU X Q, FANG Q Y, MA L, et al. Improving combustion and lowering NO<sub>x</sub> emissions of an industrial coal swirl burner by optimizing its nozzle structure[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 218: 119340.
- [28] CHANG J, WANG X, ZHOU Z J, et al. CFD modeling of hydrodynamics,



- combustion and NO<sub>x</sub> emission in a tangentially fired pulverized-coal boiler at low load operating conditions [J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(2): 290-303.
- [29] ZENG G, ZHOU A Q, FU J M, et al. Experimental and numerical investigations on NO<sub>x</sub> formation and reduction mechanisms of pulverized-coal stereo-staged combustion [J]. *Energy*, 2022, 261: 125358.
- [30] HU Z Y, LI M, FANG J W, et al. Collaborative optimization for deep peak-shaving and ultra-clean emission of coal-fired boiler using flue gas recycling technology[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2024, 46(1): 7861-7876.
- [31] 张皓玮,陈亮,王春波.深度调峰工况下燃煤锅炉煤氨混燃兼容性分析[J].*中国电机工程学报*,2025,45(09):3554-3563.
- [32] 白晨曦,宋佳星,韩志江,等.300 MW 四角切圆锅炉低负荷下煤氨共燃方案数值模拟[J].*热力发电*,2025,54(08):142-151.
- [33] JIN W, SI F Q, CAO Y, et al. Numerical research on ammonia-coal co-firing in a 1050 MW coal-fired utility boiler under ultra-low load: Effects of ammonia ratio and air staging condition[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 233: 121100.
- [34] CHENG Q, MUHAMMAD A, KAARIO O, et al. Ammonia as a sustainable fuel: Review and novel strategies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 207: 114995.