

新型旋流燃烧器对炉膛内流动特性的影响机理分析

李娟 龚昊 刘峰 王龙

国家市场监督管理总局技术创新中心（锅炉清洁低碳高效燃烧与安全评价）中国特种设备检测研究院
北京 101300

摘要：针对传统旋流燃烧器回流区稳定性差、中心风管磨损严重等问题，本文提出一种取消中心风结构并增设锥形环与钝体的新型旋流燃烧器。采用冷态模化实验与CFD数值模拟相结合的方法，系统研究了旋流强度、叶片角度及风量配比对炉膛内速度场、压力场、湍流特性及回流区分布的影响规律。结果表明，新型结构通过优化旋流效应与气流组织，实现了回流区稳定性与混合效率的协同提升。研究揭示了旋流效应调控、气流混合强化及回流区稳定三大核心机理，为新型旋流燃烧器的结构优化与工程应用提供了理论指导。

关键词：新型旋流燃烧器；炉膛；流动特性；回流区；湍流强度

引言：在能源利用与工业燃烧领域，炉膛内流动特性对燃烧效率、污染物排放等有着关键影响。传统旋流燃烧器在实际应用中存在一些局限，难以充分满足高效清洁燃烧的需求。新型旋流燃烧器应运而生，它基于传统轴向旋流燃烧器优化设计，在结构上进行了创新改进，旨在强化旋流效应、优化气流组织、提升混合效率。深入研究新型旋流燃烧器对炉膛内流动特性的影响机理，对于推动燃烧技术的进步、实现能源的高效利用以及减少污染物排放具有重要的现实意义。

1 新型旋流燃烧器结构特性与工作原理

1.1 新型旋流燃烧器结构设计

新型旋流燃烧器基于传统轴向旋流燃烧器优化设计，核心围绕“强化旋流效应、优化气流组织、提升混合效率”，主要由旋流器、一次风喷口、二次风喷口、锥形环及钝体等关键部件组成，具体结构特点如下：旋流器采用 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 可调叶片设计，可动态调控旋流强度以适应不同工况；取消中心风结构，既解决风管磨损问题，又扩大回流区、增强火焰稳定性；出口增设锥形环，可降低湍流强度与压力损失，避免气流紊乱；一次风为环形直流喷口，二次风分旋流与直流两类，通过调节流量配比优化旋流与混合效果；头部中心钝体可形成稳定回流区，引导高温烟气回流，助力燃料着火燃烧。相较于传统旋流燃烧器，新型燃烧器的结构优化核心是实现“旋流强度可调、气流组织合理、回流区稳定”，通过各部件协同作用，有效改善炉膛内流动特性，为后续高效燃烧提供坚实基础。

1.2 新型旋流燃烧器工作原理

新型旋流燃烧器的工作核心是通过旋流器使二次风产生旋转运动，形成高速旋转气流，与一次风携带的燃

料颗粒在出口充分混合，进而在炉膛内形成稳定燃烧流场^[1]。一次风携带燃料经环形直流喷口轴向进入炉膛内，保证燃料均匀输送；二次风分为旋流与直流两类，旋流二次风经可调叶片形成旋转射流，直流二次风补充氧气；旋转射流产生离心力使气流扩散，出口中心形成负压引导高温烟气回流，锥形环与钝体协同抑制气流紊乱、强化混合，保障燃料充分反应、提升燃烧效率。新型旋流燃烧器可通过调控旋流强度、风量配比等参数，灵活改变炉膛内流动状态，其对炉膛内流动特性的影响主要体现在回流区分布、速度场分布、湍流特性及压力场分布四个方面，后续将结合实验与模拟方法，深入剖析其影响机理。

2 实验方案与数值模拟设置

2.1 实验平台搭建

为探究新型旋流燃烧器对炉膛内流动特性的影响，搭建1:4冷态单相模化试验平台，模拟实际锅炉炉膛内的流动环境，实验系统主要包括燃烧器模拟装置、炉膛内模拟体、测量系统及送风系统四部分。炉膛内模拟体采用长方体结构，横截面尺寸为 $400\text{mm}\times 400\text{mm}$ ，高度为 600mm ，与实际炉膛内结构相似，保证流动特性的相似性；新型旋流燃烧器模拟装置按照实际燃烧器结构等比例缩小，叶片角度可在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内调节，可通过改变旋流二次风与直流二次风的流量配比，实现旋流强度（旋流数 S ）的调节，实验选取 $S = 0.5、0.7、0.9$ 三种典型旋流强度工况；送风系统采用变频风机，可精确调节一次风、二次风的流量，确保实验工况稳定；测量系统采用粒子图像测速（PIV）系统与压力传感器，PIV系统由高速摄像机（最大分辨率 1280×800 像素，最高帧率不小于 10000fps ）和平面连续激光器（波长 532nm ，功率

18W)组成,用于测量炉膛内速度场分布,压力传感器用于测量炉膛内不同位置的壓力分布,数据通过专用软件进行采集与处理。

2.2 实验工况设置

实验以新型旋流燃烧器的旋流强度、叶片角度、风量配比为变量,设置多组对比工况,探究不同参数对炉膛内流动特性的影响,具体实验工况如下:固定叶片角度为 35° ,改变旋流二次风与直流二次风的流量配比,得到旋流数 $S=0.5$ (弱旋)、 0.7 (中旋)、 0.9 (强旋)三种工况;固定旋流数 $S=0.7$,改变叶片角度,选取 30° 、 35° 、 40° 三种工况;固定旋流数 $S=0.7$ 、叶片角度 35° ,改变一次风与二次风的风量配比(一次风率分别为25%、30%、35%),探究风量对比对流动特性的影响。实验过程中,每组工况稳定运行30min,待流场稳定后进行数据采集,每个测量点采集100组数据,取平均值作为实验结果,确保实验数据的准确性与可靠性。

2.3 数值模拟设置

采用计算流体力学(CFD)软件Fluent 19.0进行数值模拟,建立与实验平台一致的三维模型,实现实验结果的验证与补充,深入分析炉膛内流动特性的变化规律。(1)模型建立:采用SolidWorks软件构建新型旋流燃烧器与炉膛内的三维几何模型,忽略次要结构(如连接螺栓),简化模型以提高计算效率;网格划分采用结构化网格,对燃烧器出口、炉膛内中心等流动特性复杂区域进行网格加密,网格数量为 1.2×10^6 ,经网格独立性验证,该网格数量可确保计算精度与效率的平衡。(2)边界条件设置:入口边界采用速度入口,根据实验工况设置一次风、二次风的入口速度与流量;出口边界采用压力出口,设置为标准大气压;炉膛内壁面采用无滑移边界条件,壁面温度设置为室温;燃烧器壁面采用绝热边界条件,减少热量损失对流动特性的影响^[2]。(3)数值方法选择:湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型,该模型适用于旋转射流等复杂流动场景,可准确捕捉炉膛内的湍流特性;离散相模型采用DPM模型,用于模拟燃料颗粒的运动轨迹;求解器采用压力耦合方程组的半隐式方法(SIMPLE),压力插值采用二阶迎风格式,动量方程、能量方程采用二阶精度格式,收敛判据设置为残差小于 10^{-6} ,确保计算结果的准确性。

3 新型旋流燃烧器对炉膛内流动特性的影响分析

3.1 对炉膛内速度场的影响

速度场是炉膛内流动特性的核心指标,直接决定燃料与空气混合效果、火焰传播速度及燃烧效率,新型旋流燃烧器通过调控旋流强度、叶片角度及风量配比,显

著改变炉膛内速度场分布。弱旋工况($S=0.5$)下,轴向速度占主导,速度分布不均,无明显中心回流区;中旋工况($S=0.7$)下,速度分布均匀,形成稳定回流区,回流速度适中,可有效引导高温烟气回流;强旋工况($S=0.9$)下,径向速度提升、轴向速度下降,回流区扩大但不稳定,易偏移且壁面速度过高。叶片角度 30° 时旋流弱、回流区小; 35° 时速度分布最均匀、回流区稳定; 40° 时气流紊乱。一次风率30%时混合效果最佳,过高或过低均会导致速度分布异常。

3.2 对炉膛内压力场的影响

炉膛内压力场分布决定气流流动方向与速度,新型旋流燃烧器通过改变气流旋转状态,使压力场呈现明显轴向与径向梯度,且受旋流强度影响显著。轴向方向,燃烧器出口为负压区以引导烟气回流,随轴向距离增加负压减小,炉膛内中部压力趋于常压,出口略高于大气压。径向方向,中心为负压、壁面为正压,旋流强度越大,径向压力梯度越大。取消中心风后,出口中心负压区扩大,负压值降低15%~20%;增设锥形环可使压力损失降低10%~12%。叶片角度 35° 、一次风率30%时,压力分布最均匀,流动稳定性最佳。

3.3 对炉膛内湍流特性的影响

湍流特性决定燃料与空气混合效果,新型旋流燃烧器可优化湍流特性,平衡混合效率与流动稳定性,其湍流强度较传统燃烧器提升25%~30%且分布更均匀。弱旋工况下,湍流强度0.15~0.20,混合不充分;中旋工况下,湍流强度0.25~0.30,混合效果与稳定性最佳;强旋工况下,湍流强度0.35~0.40,气流紊乱。叶片角度 35° 时湍流强度分布最均匀;增设锥形环可使局部湍流峰值降低10%。此外,40 μm 左右的燃料颗粒经回流区重新进入高温区,可进一步增强局部湍流强度,促进混合^[3]。

3.4 对炉膛内回流区的影响

回流区的大小、形状与稳定性直接影响火焰稳定性及燃烧效率,新型旋流燃烧器通过结构优化显著改善回流区特性。取消中心风后,回流区高度由0.07m(0.2d)增至0.1m(0.28d),增大43%,稳定性更强。弱旋工况下回流区小且不稳定;中旋工况下回流区大小适中、形状规则,稳定性最佳;强旋工况下回流区扩大但易偏移破碎。叶片角度 35° 时,回流区形状规则、速度稳定;角度增大或减小均会影响回流区稳定性。一次风率30%时回流区状态最佳,其存在可引导烟气回流、储热,抑制 NO_x 生成,实现高效清洁燃烧。

4 新型旋流燃烧器影响炉膛内流动特性的机理探讨

4.1 旋流效应的调控机理

新型旋流燃烧器影响炉膛内流动特性的核心机理是旋流效应的灵活调控,通过改变旋流强度、叶片角度等参数,改变气流的旋转状态,进而调控炉膛内的速度场、压力场与湍流特性。旋流效应的本质是气流在旋转过程中产生的离心力与惯性力的相互作用,当旋流强度适中时,离心力使气流向四周扩散,同时在中心区域形成负压,引导高温烟气回流,形成稳定的回流区;惯性力则保证气流的轴向流动,确保燃料与空气的均匀输送。新型旋流燃烧器通过可调叶片设计,实现旋流强度的动态调控,叶片角度的改变直接影响二次风的旋转速度,进而改变旋流数,当叶片角度在 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 范围内时,旋流效应与轴向流动平衡,流动特性最佳;叶片角度超过 35° ,旋流效应过强,离心力大于惯性力,导致气流紊乱;叶片角度低于 30° ,旋流效应较弱,无法形成稳定的回流区。另外,二次风的风量配比也会影响旋流效应,旋流二次风比例越高,旋流强度越大,反之则越小,通过合理调节风量配比,可实现旋流效应的精准调控。

4.2 气流混合的强化机理

新型旋流燃烧器通过优化气流组织,强化燃料与空气的混合,其核心机理包括两个方面:一是旋转射流的剪切作用,二是回流区的搅拌作用。旋转射流在炉膛内流动时,与周围静止气流产生强烈的剪切作用,形成剪切层,剪切层内的湍流强度较高,可促进燃料颗粒与空气的快速混合;同时,回流区的高温烟气与新鲜燃料-空气混合物形成强烈的对流与搅拌,进一步提升混合效率,确保燃料与氧气充分接触。锥形环的设置进一步强化了气流混合效果,锥形环可抑制旋转射流的扩散速度,避免气流过早扩散导致的混合不均,同时引导气流形成有序的旋转运动,增强剪切作用与搅拌作用;取消中心风结构后,回流区范围扩大,高温烟气与新鲜混合物的接触面积增大,混合效率进一步提升。燃料颗粒的运动轨迹也促进了混合过程, $40\mu\text{m}$ 左右的燃料颗粒在旋转气流的作用下,部分颗粒会重新进入回流区,与高温烟气充分接触,同时在湍流作用下,颗粒均匀分散在气

流中,实现燃料与空气的充分混合。

4.3 回流区的稳定机理

回流区的稳定性是新型旋流燃烧器优化炉膛内流动特性的关键,其稳定机理主要与旋流强度、结构设计及气流组织密切相关。当旋流强度适中时,中心负压稳定,高温烟气的回流速度与新鲜气流的输送速度达到平衡,回流区不会出现偏移或破碎现象;新型旋流燃烧器的钝体与锥形环协同作用,可抑制气流的紊乱,固定回流区的位置,增强回流区的稳定性。钝体在燃烧器出口形成阻挡作用,可降低气流的轴向速度,促进旋转射流的形成,同时在钝体后方形成稳定的负压区,引导高温烟气回流;锥形环则可降低湍流强度,避免局部涡流对回流区的冲击,确保回流区的形状与大小稳定。一次风与二次风的合理配比,可保证新鲜气流的输送速度与回流速度平衡,避免因气流速度过高或过低导致回流区不稳定,进而确保炉膛内流动特性的稳定性。

结束语

本文围绕新型旋流燃烧器对炉膛内流动特性的影响机理展开系统研究。通过实验与数值模拟相结合的方法,全面分析了其对炉膛速度场、压力场、湍流特性及回流区的影响,并深入探讨了旋流效应调控、气流混合强化和回流区稳定等机理。研究表明,新型旋流燃烧器在改善炉膛流动特性方面具有显著优势。未来,可进一步优化其结构与参数,开展更多实际工况下的研究,以推动新型旋流燃烧器在工业领域的广泛应用,实现更高效、清洁的燃烧。

参考文献

- [1]何勇,黄雅兰.微粒捕集器喷油助燃再生旋流燃烧器流场特性研究[J].南方农机,2022,53(10):29-31.
- [2]刘美婷,张玥,李宝昌,等.高烟气循环率下燃烧器火焰稳定性及燃烧特性[J].工业炉,2023,45(3):13-16,37.
- [3]周鹏辉,曾琳,代黎,等.微旋流混合器的混合特性数值计算[J].化工进展,2025,44(6):3280-3287.