

新型内置式烟气热风炉贫氧亚高速燃烧器的结构优化研究

杨婷¹, 陈光², 陈宝新³

(1. 马鞍山学院建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243100; 2. 安徽工业大学能源与环境学院, 安徽 马鞍山 243032; 3. 合肥水泥研究设计院有限公司热工技术装备公司, 合肥 240041)

摘要: 针对负荷为 3 822 kW 的内置式烟气热风炉贫氧亚高速燃烧器, 利用 CFD (computational fluid dynamics, 计算流体力学) 数值模拟方法对其燃烧性能进行研究, 通过在燃烧室增设直径 10 mm 陶瓷稳焰棒, 分析燃气喷孔间距 (31~70 mm)、周向喷孔组数 (4~9 组) 及不同稳焰棒组合方式对燃烧性能的影响, 据此优化燃烧器结构。结果表明: 当燃气喷孔间距为 62 mm、周向喷孔组数为 5 组并采用十字形组合稳焰棒结构时, 燃气与助燃烧结烟气混合强度显著增强, 燃烧更充分, 火焰稳定性有效提升; 与初始结构相比, 优化后燃烧室烧结烟气出口温度提升 6.3% (达到 1 140 °C), 流速增加 4.5% (至 93.18 m/s), CO 质量分数大幅降低 70.8% (至 0.003 8)。该优化方案通过稳焰棒锚定火焰以及喷孔布局强化湍流混合、旋流场调控阻力的协同作用, 实现了燃烧温度、流速稳定性及污染物控制效率的同步提升。

关键词: 热风炉; 燃烧器; 数值模拟; 结构优化; 稳焰棒; 喷孔; 污染物控制; 燃烧性能

中图分类号: TF 061 文献标志码: A doi: 10.12415/j.issn.1671-7872.25030



Structure Optimization of a Novel Built-in Sub-high Velocity Oxygen-lean Burner for Flue Gas Hot Blast Stoves

YANG Ting¹, CHEN Guang², CHEN Baoxin³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Maanshan University, Maanshan 243100, China; 2. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 3. Thermal Technology Equipment Company, Hefei Cement Research & Design Institute Co., Ltd, Hefei 240041, China)

Abstract: The combustion performance of a built-in flue gas hot-blast stove sub-stoichiometric high-velocity burner with a load of 3 822 kW was investigated using the CFD (computational fluid dynamics) numerical simulation method. Based on the initial structure, a ceramic flame stabilizer rod with a diameter of 10 mm was added to the combustion chamber to enhance combustion stability. The effects of the gas nozzle spacing (31–70 mm), the number of circumferential nozzle groups (4–9 groups), and the combination methods of the flame stabilizer rod on the combustion performance were examined to optimize the structure. The results indicate that when the gas nozzle spacing is set at 62 mm, the number of circumferential nozzle groups is 5, and a cross-shaped flame stabilizer rod

收稿日期: 2025-03-04

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFB1711101); 安徽省高校自然科学基金项目 (2023AH052621); 安徽省高校质量工程项目 (2023sdxx128)

作者简介: 杨婷 (1989—), 女, 安徽淮北人, 讲师, 主要研究方向为系统节能与能耗分析。

通信作者: 陈光 (1963—), 男, 黑龙江黑河人, 博士, 教授, 主要研究方向为能源低碳与智能化。

引文格式: 杨婷, 陈光, 陈宝新. 新型内置式烟气热风炉贫氧亚高速燃烧器的结构优化研究 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(5):546–553.

configuration is adopted, the mixing intensity between the fuel gas and combustion-supporting flue gas is significantly enhanced, leading to more complete combustion and improved flame stability. Compared with the initial structure, the optimized configuration increases the outlet temperature of sintered flue gas in the combustion chamber by 6.3% to 1 140 °C, raises the flow velocity by 4.5% to 93.18 m/s, and reduces the CO mass fraction substantially by 70.8% to 0.003 8. The optimized approach achieves simultaneous improvements in combustion temperature, flow stability, and pollutant control efficiency through the synergistic effects of flame anchoring by the flame stabilizer rods, enhanced turbulent mixing via nozzle arrangement, and drag modulation by the swirl flow field.

Keywords: hot-blast stove; burner; numerical simulation; structural optimization; flame stabilizer rod; injection hole; pollutant control; combustion performance

烧结烟气是钢铁行业 NO_x 的主要排放源,其排放量占比超过 50%^[1-2]。研究表明,采用低温脱硝技术可将 NO_x 排放质量浓度降至 50 mg/m^3 ^[3-4]。然而,经脱硫处理后的烧结烟气温度通常较低,无法达到选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)技术中催化剂所需的工作温度(其反应区间需维持在 180 °C 以上)^[5-6],往往需要借助热风炉进行补热。相较于传统外置式热风炉,内置式热风炉在检修便利性、安全隐患控制、煤气消耗量、燃烧稳定性、启动时间及热效率等方面优势显著^[7-9]。作为内置式热风炉的核心部件,燃烧器的性能直接影响烟气出口温度的稳定性和最终的脱硝效率。其性能主要受燃料种类、燃烧器结构、操作条件和助燃风富氧浓度等因素的影响。目前热风炉普遍采用低热值高炉煤气为燃料,具有成本低、运输便利优势^[10],但存在燃烧速度慢、稳定性差等问题。高速燃烧器能够利用高温烟气的卷吸作用来改善炉内温度场的均匀性,但其也存在易脱火与噪声大等缺陷。亚高速燃烧器作为改进型高速燃烧器,兼具结构简单、检修方便、造价低、调节范围宽、噪音低、升温快及均温效果显著等优点^[11]。因此,开发高性能亚高速燃烧器并优化烟气补热技术,对实现烧结烟气高效 SCR 脱硝、保障稳定达标排放至关重要,可为钢铁行业超低排放改造与绿色低碳发展提供重要支撑。

为优化燃烧性能,国内外学者从燃料特性、结构参数及操作条件等角度对高速燃烧器展开研究。燃料特性方面,栾茜茜^[12]通过 CFD(computational fluid dynamics, 计算流体力学)模拟发现双燃料(中液化石油气和天然气)燃烧器中 6 mm 燃料入口直径可获得最低浓度的 NO_x 排放;张鑫等^[13]、陈隆等^[14]研究表明提高旋流强度(2.2~3.7)与二次风温度可提升碳转化率,但会降低喷口燃料浓度;Mustafa 等^[15]证实旋流强度显著影响含氢燃料火焰温度。结构优

化方面,Hinerichs 等^[16]发现燃烧器出口速度均匀性与 NO_x 浓度呈负相关;马志强等^[17]通过喷口流速优化改善了炉内流场分布。操作条件方面,Zhang 等^[18]证明氨燃料掺混位置决定 NO 排放;Moataz 等^[19]、Medhat 等^[20]、Woo 等^[21]研究证实富氧燃烧条件可显著抑制氨燃料中 NO_x 生成;罗明星等^[22]发现富氧燃烧条件可缩短火焰长度。综上所述,现有研究多聚焦高热值燃料富氧工况,对贫氧条件下亚高速燃烧器的关键参数(如燃气喷孔间距、周向组数、稳焰棒布置等)影响缺乏系统分析,难以指导实际工程中火焰稳定性与低污染排放的协同优化。鉴于此,本文以低热值高炉煤气为燃料,在 3 822 kW 热负荷下,探究燃气喷孔间距、周向组数及稳焰棒布置对贫氧亚高速燃烧器燃烧温度、效率及稳定性的影响,以实现火焰稳定性与低污染排放的协同优化。

1 初始结构燃烧器的数值模拟

为验证内置式烟气热风炉中贫氧亚高速燃烧器的设计合理性,本文利用 ANSYS Fluent^[23]建立其三维燃烧模型,并以燃烧温度与 CO 浓度为主要评估指标进行模拟分析。

1.1 控制方程

贫氧亚高速燃烧器内的流体流动涵盖湍流流动及传热传质等过程,需遵循质量、动量、能量守恒方程^[24]。湍流流动中的流体与不同组分发生化学反应时,还需遵循湍流输运方程与组分守恒方程。因此,文中选用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型和 PDF 燃烧模型^[25],模拟流体的湍流及湍流扩散燃烧过程。采用的算法为 SIMPLE 算法,离散格式选用计算精度较高的二阶迎风格式。

1.2 模型的建立

基于内置式烟气热风炉混合区燃烧器实际工况,采用 Design Modeler 软件建立三维几何模型。为精

确模拟燃烧过程及分析性能,将燃烧器置于 $6\text{ m} \times 4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 长方体外部计算区域,如图 1。燃烧器本体初始结构为周向 6 组燃气喷孔且无稳焰棒,如图 2。关键设计参数均按 3 822 kW 热负荷要求设定,具体如表 1。

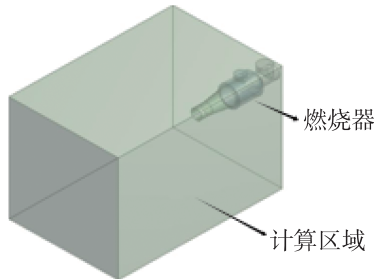


图1 氧亚高速燃烧器 CFD 计算域模型

Fig. 1 CFD computational domain model of the hypersonic combustor with oxygen deficiency

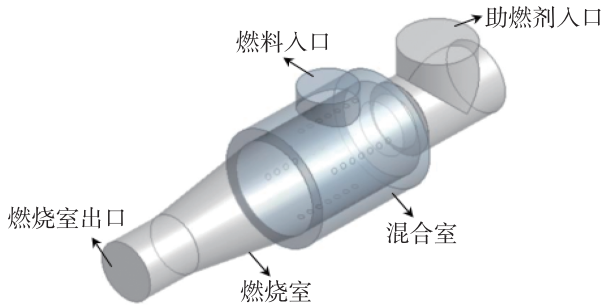


图2 贫氧亚高速燃烧器几何模型

Fig. 2 Geometric model of the hypersonic combustor with oxygen deficiency

表 1 贫氧亚高速燃烧器初始几何结构参数

Tab. 1 Geometric parameters of the initial design for the hypersonic combustor with oxygen deficiency

名称	结构尺寸/m
燃料入口管道直径	0.361
助燃风入口管道直径	0.469
混合室直径	0.603
燃气喷孔直径	0.039
燃气喷孔间距	0.039
混合室长度	0.844
燃烧室出口直径	0.381
燃烧室长度	0.790
长方体长度	6
长方体宽度	4
长方体高度	4

1.3 网格划分与无关性验证

通过 ANSYS Meshing 模块进行网格划分,采用以四面体为主的混合格。鉴于燃料喷孔尺寸较小且流速较高,在该部位进行局部加密,网格最小尺寸为 1 mm。燃烧室存在剧烈的湍流化学反应且出口烟气速度高,故对出口部位加密并设置五层膨胀网

格。划分后的燃烧器网格模型如图 3 所示,总网格数量为 77 万。

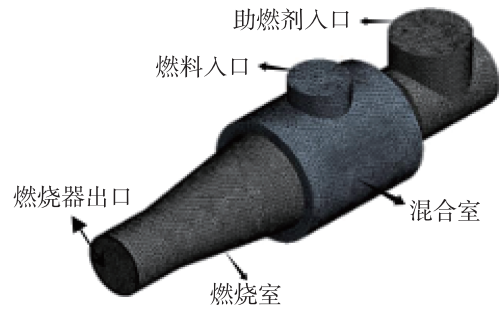
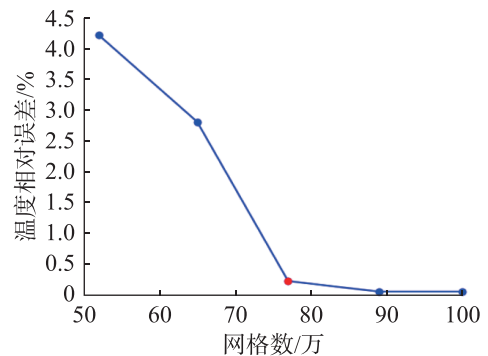


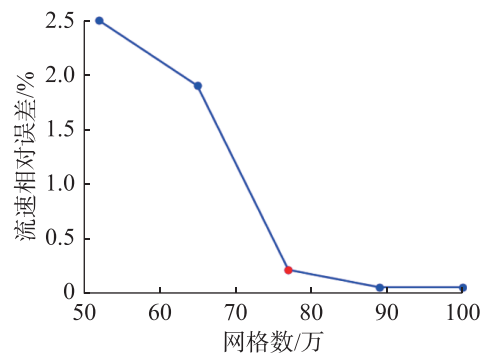
图3 燃烧器网格模型

Fig. 3 Burner grid model

为验证网格无关性,建立网格数量为 52 万、65 万、77 万、89 万、100 万的 5 种网络方案,分析燃烧室出口平均温度与流速相对误差的变化情况,结果如图 4。结果显示:随网格数的增加,出口平均温度和流速的相对误差均逐渐降低;当网格数量增至 77 万时,两者相对误差均收敛至 2% 以下。为在确保精度的同时兼顾计算效率,最终确定网格数量为 77 万的模型进行计算。



(a) 温度相对误差随网格数的变化规律



(b) 流速相对误差随网格数的变化规律

图4 网格无关性验证图

Fig. 4 Grid independence verification chart

1.4 边界条件

依据 3 822 kW/h 负荷下贫氧亚高速燃烧器的工作环境及建立的网格模型,设置计算域边界条件。

1) 入口边界条件。参考工程设计的经济流速

与煤气压力约束, 设定燃料入口速度为 12 m/s、助燃风入口速度为 10 m/s, 助燃烧结烟气入口温度为 170 °C; 为精确表征流动特性, 采用湍流强度与水力直径定义湍流参数。具体参数见表 2。

表 2 入口边界条件参数

Tab. 2 Boundary condition parameters for inlet

边界	速度/ (m·s ⁻¹)	入口 温度/°C	湍流 强度/%	水力 直径/m
燃料入口	12	20	3.3	0.361
助燃风入口	10	170	3.4	0.469

2) 出口边界条件。采用压力出口 (pressure-outlet) 边界条件, 鉴于燃烧室出口在实际工艺中处于微负压状态 (0~2 Pa) 且压力波动幅值较小, 其对燃烧器流场影响可忽略, 故将热风炉烟道出口压力设定为 0 Pa。

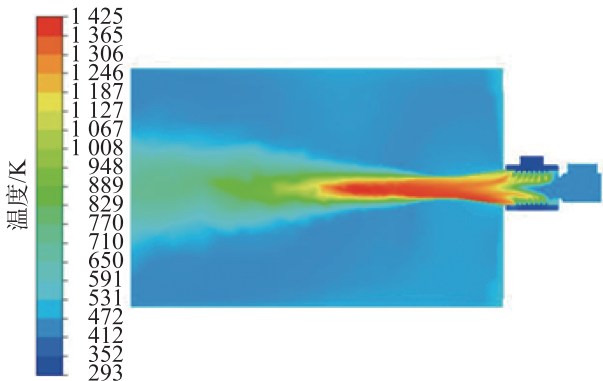
3) 传热边界条件。鉴于燃烧器及混合流场区外壁均设有保温材料, 保温壁面温度约为 200 °C 并与 20 °C 环境空气自然对流换热, 故将对流换热系数取 10 W/(m²·°C); 另将高炉煤气与混合室交界面以及燃烧室与计算域接触面设为耦合壁面。

1.5 结果与讨论

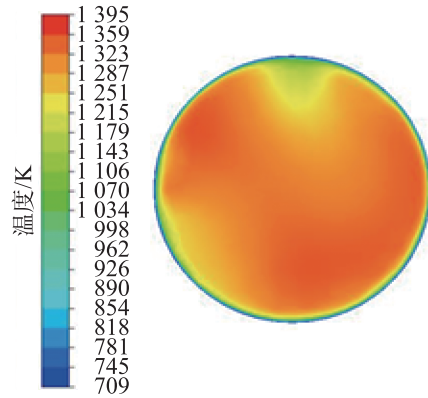
选取燃烧器纵向对称截面 ($x=0$ m) 与燃烧室出口截面 ($z=2.7$ m) 特征剖面, 分析温度、速度及 CO 浓度分布规律。

1.5.1 温度场的模拟结果分析

燃烧器在 $x=0$ m 与 $z=2.7$ m 截面的温度分布如图 5。由图 5 可知: 高炉煤气在混合室内与助燃烧结烟气混合燃烧形成 1 150 °C 的高温烟气, 且混合室上部温度低于下部, 主要原因在于上部高炉煤气入口喷出速度大于下部燃气喷孔, 导致下部煤气浓度增大而形成上部低温区; 燃烧室出口平均温度达 1 072 °C, 其温度分布同样呈现上低下高的趋势, 这主要是由于烟气在流动过程中延续了混合室温度场的特征。



(a) $x=0$ m 截面



(b) $z=2.7$ m 截面

图 5 特征剖面的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of characteristic profiles

1.5.2 速度场和浓度场的模拟结果分析

燃烧器 $x=0$ 截面的速度分布如图 6, $z=2.7$ m 截面 CO 浓度分布如图 7。

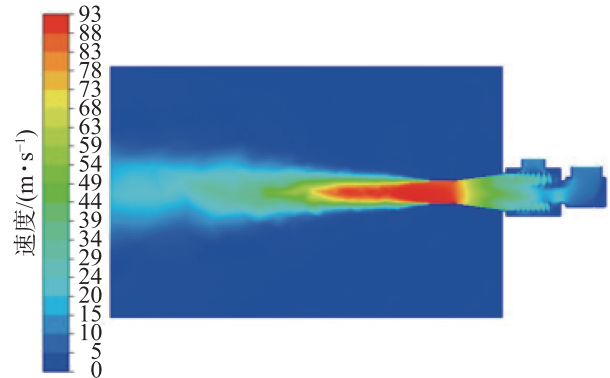


图 6 $x=0$ m 截面速度分布

Fig. 6 Velocity distribution at $x=0$ m

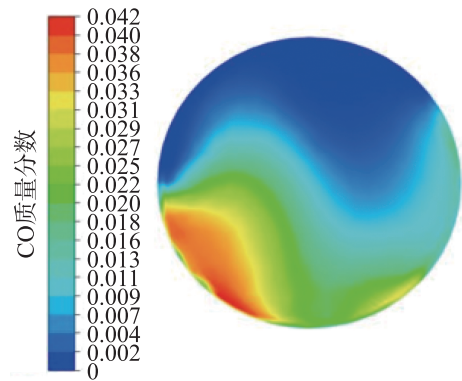


图 7 $z=2.7$ m 截面 CO 浓度分布

Fig. 7 CO concentration distribution at $z=2.7$ m

图 6 显示: 高温烟气经缩口段加速后以 89.17 m/s 的平均速度喷出, 在燃烧室出口处因空气与煤气混合强化导致燃烧加剧, 形成高速流场。图 7 表明: 燃烧器出口 CO 质量分数峰值达 0.024(均值 0.013), 富集区域集中于混合室与燃烧室中下部。

综上所述, 燃烧室出口平均温度 1 072 °C、流

速 89.17 m/s 及 CO 质量分数 0.013, 表明燃烧温度和效率尚需提升。高炉煤气喷孔数量较少且孔径偏大, 会导致燃气与助燃烧结烟气混合均匀性降低, 引发局部不完全燃烧并削弱系统性能。因此需开展结构优化, 以实现燃烧温度提升、CO 浓度控制及燃烧效率与稳定性的协同优化。

2 燃烧器结构的优化

基于燃烧器混合室内燃气与助燃气混合均匀性特征, 分析燃气喷孔间距、周向组数及稳焰棒组合方式对燃烧性能的影响规律, 以优化燃烧器结构, 并以燃烧室出口平均温度、烟气流动速度与 CO 浓度作为性能评价指标。

2.1 燃气喷孔间距的影响

燃烧器混合室初始配置 6 组周向燃气喷孔且无稳焰棒, 文中选取喷孔间距为 31, 39, 47, 55, 62, 70 mm, 间距示意如图 8。

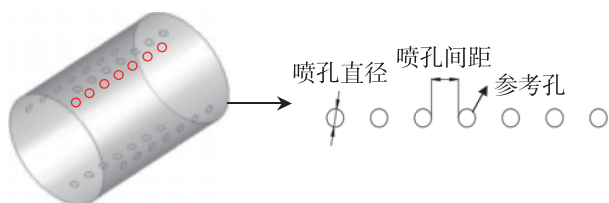
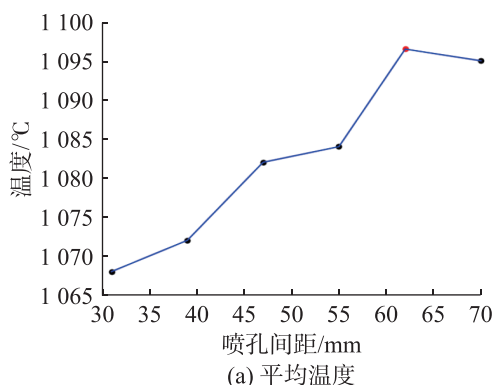


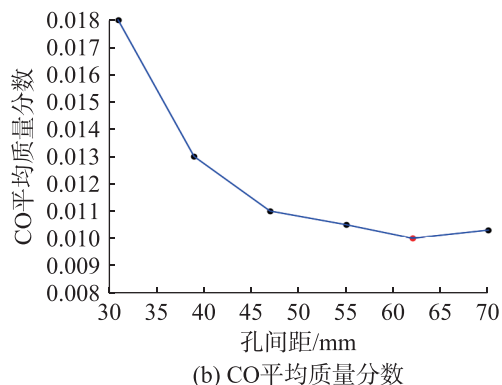
图8 混合室燃气喷孔间距示意图

Fig. 8 Schematic diagram of gas injection hole spacing in the mixing chamber

喷孔间距对燃烧室出口温度与 CO 浓度的影响如图 9。由图 9(a) 可见: 随着间距的增大, 出口平均温度呈先升后稳趋势。当间距为 62 mm 时, 燃料充分混合, 燃烧效率提升, 出口平均温度达 1 097 °C; 间距进一步增至 70 mm 时温度稳定于 1 095 °C(波动幅度 < 0.14%)。这是因为较小喷孔间距制约湍流混合边界层扩展, 抑制燃烧反应强度; 而喷孔间距超过临界值 (62 mm) 后混合强化效应趋于饱和。该规律证实存在最优喷孔间距。



(a) 平均温度



(b) CO平均质量分数

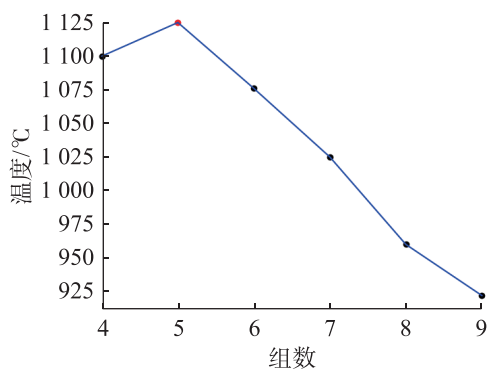
图9 喷孔间距对燃烧室出口温度与 CO 浓度的影响规律

Fig. 9 Effect of injection hole spacing on outlet temperature and CO concentration in the combustion chamber

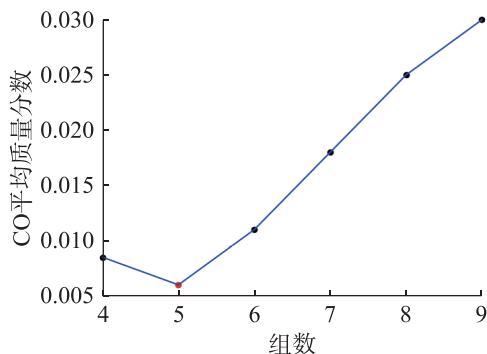
由图 9(b) 可见: 当喷孔间距从 31 mm 增至 62 mm 时, CO 质量分数自 0.018 降至 0.010(降幅 44.4%); 间距进一步增至 70 mm 时 CO 质量分数稳定于 0.01。产生该现象的机理在于: 间距 ≤ 62 mm, 通过扩展湍流掺混边界层强化扩散燃烧; 超过该阈值混合效应减弱导致反应动力学条件恶化, 间距增至 70 mm 时促进作用趋于饱和, 导致燃烧室出口 CO 浓度呈现先急降后趋于稳定的特征。结合出口温度峰值, 确定 62 mm 为最优喷孔间距。

2.2 燃气喷孔周向组数的影响

综上, 选取燃气喷孔间距 62 mm 且无稳焰棒的燃烧器结构, 模拟分析不同喷孔周向组数 (4~9 组) 对燃烧性能的影响规律, 结果如图 10。



(a) 燃烧室出口平均温度变化



(b) 燃烧室出口CO平均质量分数

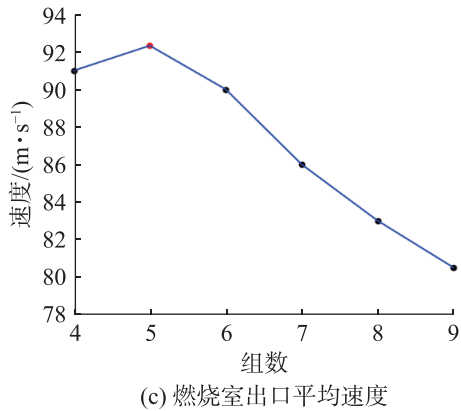


图10 喷孔周向组数对燃烧性能的影响规律

Fig. 10 Influence of circumferential fuel nozzle configuration on combustion performance

由图 10(a)(b) 可知: 当喷孔组数为 5 时, 燃料与助燃气充分混合实现完全燃烧, 出口平均温度达峰值 (1 125 °C) 且 CO 平均质量分数最低 (0.006); 组数增至 9 时温度降至 922 °C (降幅 18%) 且 CO 含量显著上升。这主要是因过量喷孔导致局部燃料流速低于火焰传播速度, 未燃组分直接逸出燃烧室, 造成燃烧效率下降。

结合图 10(c) 进一步揭示: 5 组喷孔构型下出口平均速度峰值 92.33 m/s, 较基准工况提升 3.16 m/s。这是因为充分燃烧产生的高温烟气 (1 125 °C) 增强热膨胀效应, 从而显著提升了流体动能; 而其他组数因燃烧不完全导致热膨胀衰减, 出口速度下降。由此表明, 通过优化反应流场与能量传递路径, 5 组喷孔布局实现了燃烧效率与流体动能协同效应的最大化, 为燃烧器的结构设计提供了理论依据。

2.3 稳焰棒组合方式的影响

针对 170 °C 含氧 16% (质量分数) 烧结烟气助燃的高炉煤气贫氧燃烧系统, 为探讨稳焰棒对燃烧器性能的影响, 选取 62 mm 喷孔间距、5 组喷孔, 增设直径 10 mm 陶瓷稳焰棒, 且设计 4 种稳焰棒组合构型 (横一字形、竖一字形、十字形和 60° 夹角, 几何模型如图 11)。增设稳焰棒的机理在于: 气流经稳焰棒时在后方形成低压涡流区, 有利于诱导高温燃气回流持续点燃新鲜混合气; 同时延长燃料在燃烧室的驻留时间, 促进燃料与空气充分混合并预热半预混气体, 从而提升燃烧温度与火焰传播速度, 优化燃烧效果。

稳焰棒组合方式对燃烧性能的影响规律如图 12。由图 12 可看出: 在 4 种构型中, 十字形 (组合 3) 的燃烧室出口平均温度最高 (1 140 °C) 且 CO 质量分数最低 (0.003 8); 而竖一字形 (组合 2) 温度最低 (1 133 °C) 且 CO 质量分数最高 (0.004 6)。十

字形构型的优势源于其对称正交涡系结构, 在燃烧室内形成上下、左右交互旋涡场, 当燃气喷入混合室时, 其竖直射流与水平旋涡的剪切效应显著强化燃料与助燃剂混合; 同时, 正交涡系将高温反应区延展至燃烧室壁面边界层, 可为燃料提供充分反应空间与驻留时间, 从而有效维持火焰的稳定性。

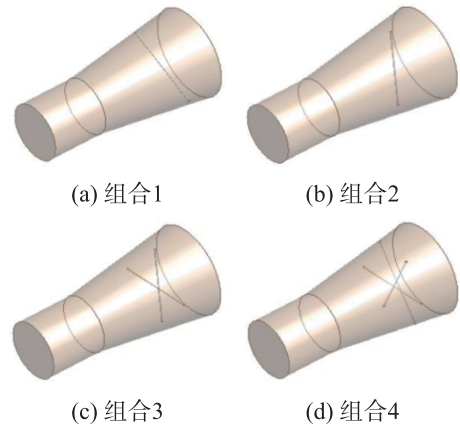


图11 稳焰棒 4 种不同组合方式的几何模型

Fig. 11 Geometric models of four different combinations of flame stabilizer rods

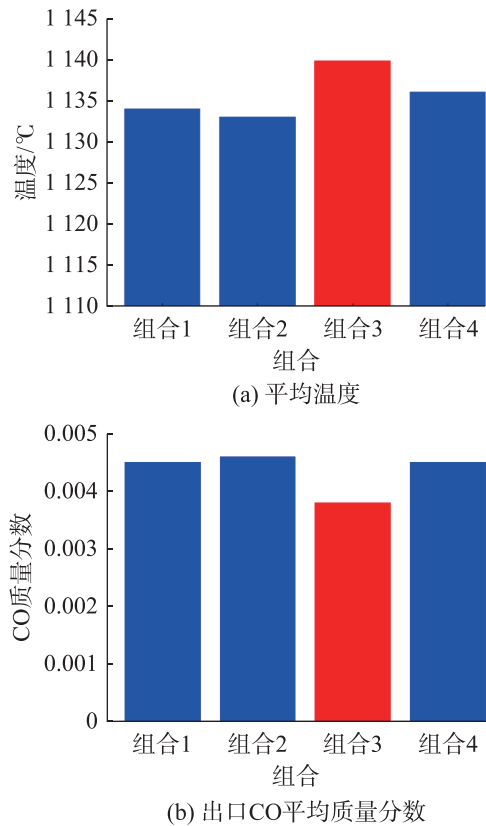


图12 稳焰棒组合方式对燃烧性能的影响规律

Fig. 12 Influence of flame stabilizer combination mode on combustion performance

综合分析表明, 采用十字形稳焰棒协同 62 mm 喷孔间距与 5 组周向喷孔的燃烧器构型可显著提升

烟气的紊流强度与混合效率,实现最佳火焰稳定性,此为最优结构。该设计使燃烧室出口温度达 1 140 ℃、CO 排放质量分数降至 0.003 8,提高了燃烧效率。

3 结论

针对负荷为 3 822 kW 的内置式烟气热风炉贫氧亚高速燃烧器,利用 CFD 数值模拟方法研究其燃烧性能,引入稳焰棒结构并考察燃气喷孔间距(31~70 mm)、周向喷孔组数(4~9 组)及稳焰棒组合方式对燃烧性能的影响,在此基础上优化结构,所得主要结论如下:

1) 贫氧亚高速燃烧器初始结构出口平均温度 1 072 ℃、流速 89.17 m/s、CO 质量分数 0.013,燃烧温度与效率有待提升。

2) 燃烧器最优结构参数组合为喷孔间距 62 mm、5 组周向喷孔及十字形稳焰棒,该构型下紊流强度与混合效率显著优化,火焰稳定性达到最佳。

3) 相较于初始结构,最优结构的出口温度提升 6.3% 至 1 140 ℃(主要原因为十字形稳焰棒形成高温回流区延长燃气驻留时间)、流速增加 4.5% 至 93.18 m/s(源于 5 组喷孔优化旋流强度并降低流动阻力)、CO 质量分数降低 70.8% 至 0.003 8(由于 62 mm 间距促进燃气-烟气均匀混合消除局部缺氧区)。该方案通过稳焰棒锚定火焰、喷孔布局强化湍流混合、旋流强度调控流动阻力,同步提升燃烧温度、流速稳定性及污染物控制效率。

参考文献:

- [1] 陶家杰,李俊杰,龙红明,等. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 对烧结烟气脱硫活性炭的中毒机理[J]. 钢铁, 2023, 58(12):146-155.
TAO J J, LI J J, LONG H M, et al. Poisoning effect of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ on activated carbon from sintering flue gas on desulfurization[J]. Iron & Steel, 2023, 58(12):146-155.
- [2] 杨小白,韩云龙,朱志伟. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CAC}$ 低温脱硝实验研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2019, 36(4):338-343.
YANG X B, HAN Y L, ZHU Z W. Experimental research on low temperature denitration of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CAC}$ [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2019, 36(4):338-343.
- [3] 闫隼,郭新. “双碳”目标下钢铁企业减排降碳绿色发展探析[J]. 资源节约与环保, 2024(7):1-3,8.
YAN Y, GUO X. Green development of emission reduction and carbon reduction in iron and steel enterprises under the goal of “double carbon” [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2024(7):1-3,8.
- [4] 刘利,母玉敏,曹文平. 烧结烟气脱硝超低排放技术的探讨[J]. 山东化工, 2022, 51(2):189-191.
LIU L, MU Y M, CAO W P. Discussion of ultra-low discharge technology for denitration of sintered flue gas[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(2):189-191.
- [5] 陆泽俊. 新形势下焦化厂焦炉烟气脱硫脱硝工艺技术简述[J]. 清洗世界, 2024, 40(8):58-60.
LU Z J. Brief introduction of desulfurization and denitrification technology of coke oven flue gas in coking plant under the new situation[J]. Cleaning World, 2024, 40(8):58-60.
- [6] 田迎春,彭永丽,殷翼云,等. 蜂窝式 VPO 低温脱硝催化剂浸渍法成型实验研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2021, 38(3):275-281.
TIAN Y C, PENG Y L, YIN Y Y, et al. Experimental study of immersion method of honeycomb VPO low temperature denitration catalyst[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2021, 38(3):275-281.
- [7] 毛鹏,毛娅,陈作炳. 基于 CFD 的内置式烟气加热装置数值模拟优化[J]. 数字制造科学, 2022, 20(1):34-38.
MAO P, MAO Y, CHEN Z B. Numerical simulation optimization of built-in flue gas heating device based on CFD[J]. Digital Manufacture Science, 2022, 20(1):34-38.
- [8] 张鹏程,胡海洋,田颖,等. 钢铁企业脱硝系统中的新型节能技术[J]. 包钢科技, 2024, 50(3):90-93.
ZHANG P C, HU H Y, TIAN Y, et al. New energy saving technologies in denitrification system of steel enterprises[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2024, 50(3):90-93.
- [9] 陈磊. 烧结烟气半干法脱硫后 SCR 脱硝中温设计低温运行研究与应用[J]. 现代矿业, 2023, 39(10):207-210.
CHEN L. Research and application of SCR denitration medium temperature design and low temperature operation after semi-dry desulfurization of sintering flue gas[J]. Modern Mining, 2023, 39(10):207-210.
- [10] 孙曼丽,张敏,王键,等. 高炉煤气全干式精脱硫工艺路线探讨[J]. 钢铁, 2022, 57(4):148-157.
SUN M L, ZHANG M, WANG J, et al. Discussion on process route for full-dry fine desulfurization of blast furnace gas[J]. Iron & Steel, 2022, 57(4):148-157.
- [11] 张文学,韩开文,周富民,等. MYS 型煤气亚高速烧嘴的研制[J]. 钢铁, 1990, 25(5):55-59.
ZHANG W X, HAN K W, ZHOU F M, et al. MYS-type subsonic gas burner[J]. Gangtie, 1990, 25(5):55-59.
- [12] 栾茜茜. 高速气体燃烧器的数值模拟[D]. 天津:天津大学, 2007.
LUAN X X. Numerical Simulation of a High-Speed Gas Combustor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [13] 张鑫,陈隆. 高速煤粉燃烧器内燃烧特性数值模拟及结构优化[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(2):66-72.

- ZHANG X, CHEN L. Numerical simulation of burning characteristics and structural optimization design of the high speed combustor of pulverized coal[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(2):66-72.
- [14] 陈隆, 王乃继. 解耦燃烧技术在煤粉工业锅炉高速燃烧器中的应用研究[J]. *煤质技术*, 2021, 36(4):1-7.
- CHEN L, WANG N J. Applied research of decoupling combustion in pulverized coal industrial boilers equipped with high-speed burner[J]. *Coal Quality Technology*, 2021, 36(4):1-7.
- [15] MUSTAFA İ, KARYEYEN S, YILMAZ İ. Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(17):7185-7191.
- [16] HINRICHS J, FELSMANN D, SCHWEITZER-DE BORTOLI S, et al. Numerical and experimental investigation of pollutant formation and emissions in a full-scale cylindrical heating unit of a condensing gas boiler[J]. *Applied Energy*, 2018, 229:977-989.
- [17] 马志强, 龚鑫成, 许辉. 高速单向气旋加热技术在特厚板热处理上的应用[J]. *冶金能源*, 2018, 37(6):33-35.
- MA Z Q, GONG X C, XU H. Application of high-speed one-way cyclonic heating technology in heat treatment of extra thick plate[J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2018, 37(6):33-35.
- [18] 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.
- [19] BRACKMANN C, ALEKSEEV V A, ZHOU B, et al. Structure of premixed ammonia + air flames at atmospheric pressure: laser diagnostics and kinetic modeling[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 163:370-381.
- [20] MEDHAT M, YEHIA M, KHALIL A, et al. A numerical prediction of stabilized turbulent partially premixed flames using ammonia/hydrogen mixture[J]. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2021, 87(3):113-133.
- [21] WOO M, CHOI B C. Numerical study on fuel-NO formation characteristics of ammonia-added methane fuel in laminar non-premixed flames with oxygen/carbon dioxide oxidizer[J]. *Energy*, 2021, 226:120365.
- [22] 罗明星, 曹慧, 饶映明. 高速气体燃烧器富氧燃烧的试验研究[J]. *煤气与热力*, 2012, 32(8):30-33.
- LUO M X, CAO H, RAO Y M. Experimental study on oxygen-enriched combustion in high-speed gas burner[J]. *Gas & Heat*, 2012, 32(8):30-33.
- [23] PARENTE A. Advanced combustion modeling via EDC with tabulated chemistry[J]. *Fuel*, 2020, 264:116843.
- [24] 吴小胜, 黄晓鹏. 计算流体力学基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021.
- WU X S, HUANG X P. *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics* [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2021.
- [25] 刘重阳, 戴斌. 湍流燃烧模型在燃烧室数值模拟中的对比分析[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2014, 27(5):12-18.
- LIU C Y, DAI B. Comparison and analysis of turbulent combustion models in numerical simulation of combustor[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2014, 27(5):12-18.

责任编辑: 何莉