

无焰燃烧发展及研究现状

程英杰, 李勤, 霍英妲

(沈阳工业大学 化工装备学院, 辽宁 沈阳 111000)

摘要: 无焰燃烧是一种同时具备高效和低排放特点的燃烧技术, 然而传统实现无焰燃烧所需的高温预热空气及高速射流两大重要条件, 提高了整体工业设备实现无焰燃烧的复杂性, 限制了该技术在更广阔领域的发展。本文综述了无焰燃烧燃烧机理与特性的研究发展, 并提出了未来可能的发展趋势。分析发现: 高温预热空气并不是实现无焰燃烧的必要条件, 而通过高速射流提高炉内烟气循环率却必不可少; 使用 EDC 模型结合 GRI 3.0 反应机理能在数值模拟中得到贴合实验数据的结果; 气体、液体及固体燃料均可实现无焰燃烧, 使用 CH_4/H_2 混合气体实现无焰燃烧可在提升燃烧稳定性的同时依旧保持低排放的特点; 炉膛结构可很大程度上影响炉内流场进而影响无焰燃烧效果。因此, 研究无需预热的无焰燃烧系统在降低工业成本的同时可增大燃料种类的选择性, 通过设计合理的炉膛结构, 营造良好的炉内流场在强化无焰燃烧效果的同时可一定程度降低对初始射流速度的要求, 研究 CH_4/H_2 混合气体的燃烧机理具有十分重要的意义。

关键词: 无焰燃烧; 高温空气燃烧; 弥散燃烧

中图分类号: TK16 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.08.002

[引用本文格式] 程英杰, 李勤, 霍英妲. 无焰燃烧发展及研究现状[J]. 热能动力工程, 2022, 37(8): 9-17. CHENG Ying-jie, LI Qin, HUO Ying-da. Development and research status of flameless combustion[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 9-17.

Development and Research Status of Flameless Combustion

CHENG Ying-jie, LI Qin, HUO Ying-da

(School of Chemical Equipment, Shenyang University of Technology, Liaoyang, China, Post Code: 111000)

Abstract: Flameless combustion is a combustion technology with both high efficiency and low emission characteristics. However, two important conditions of high temperature preheated air and high speed jet, which are required to realize flameless combustion traditionally, have increased the complexity of the overall industrial equipment to achieve the flameless combustion and limited the development of this technology in a wider field. This paper reviews the research development of combustion mechanism and characteristics of flameless combustion, and proposes possible future development trends. The analysis shows that high preheated air is not a necessary condition for flameless combustion, but it is essential to increase the flue gas circulation rate in the furnace by high speed jet. The use of the EDC model combined with the GRI 3.0 reaction mechanism can achieve the most practical test data results in numerical simulation. Flameless combustion is possible for gas, liquid and solid fuels, and flameless combustion using a CH_4/H_2 gas mixture can improve combustion stability while still maintaining low emission characteristics. The furnace chamber structure can greatly influence the flow field in the furnace and thus the flameless combustion effect. Therefore, flameless combustion systems without preheating can be investigated to reduce industrial costs and increase the selectivity of fuel types. By creating a good flow field in the furnace with a well-designed chamber structure, the flameless combustion effect can be enhanced and the initial jet ve-

locity requirement can be reduced to a certain extent. The study of the combustion mechanism of CH_4/H_2 gas mixture is of great practical significance.

Key words: flameless combustion, high-temperature air combustion, diffusion combustion

引 言

二十世纪末至今,众多学者致力于研究高效、节能且低排放的燃烧技术,提出了一些新的燃烧方式及理念。在直流燃烧器的基础上研发的旋流燃烧器,提高了火焰温度并增加了燃烧强度,但因局部火焰温度过高造成了 NO_x 的大量排放;而循环流化床技术虽然有燃料适应性强、 NO_x 排放少等优点,却也存在由于燃烧温度不高造成的效率低下的问题。可见,在保证高效燃烧的同时,很难达到低排放的要求,而无焰燃烧(Flameless Combustion)却可以兼顾两者。

无焰燃烧(Flameless Combustion)又称无焰氧化(Flameless Oxidation, FLOX),因其燃烧时观察不到明显火焰锋面且整个炉膛区域明亮而得名。由于无焰燃烧通常需要将空气预热至 1 500 K 以上,也被定义为“高温空气燃烧”(High Temperature Air Combustion, HTAC)^[1],因其形成所需的低氧环境以及弥散燃烧的特点也被称为低氧稀释条件下的中高強度燃烧(Moderate & Intense Low Oxygen Dilution, MILD)。本文统一采用无焰燃烧名称。但需要注意的是,实现传统的完全预混燃烧时,热强度高,燃烧完全且速度很快,火焰很短甚至看不见,所以此时的全预混燃烧也可被称作“无焰燃烧”,但与本文所说的无焰燃烧在形成机理上是截然不同的。

1 无焰燃烧的机理及燃烧特性

上世纪九十年代,日本和德国的学者发现,当利用蓄热器将空气预热温度升高到 1 500 K、射流速度达到 90 m/s 时,观察不到明显的火焰锋面^[2],现场研究人员以为反应已经停止,随即却发现烟气中氧气的体积分数为正常燃烧后的体积分数。同时,尾气中的氮氧化物体积分数极低,据此判断燃烧还在炉内进行,且这种燃烧方式既回收了余热、减少了排烟热损失,又降低了 NO_x 排放。

1.1 无焰燃烧的形成及特征

无焰燃烧是一种弥散燃烧,即燃烧反应的区域不局限于传统燃烧反应的火炬区,而会弥散到整个炉膛区域,所以肉眼观察不到完整的火焰锋面,炉膛透亮。

国外学者通过对无焰燃烧的初期研究达成了基本共识^[1,3-7]:(1) 无焰燃烧的形成需要高温预热空气与高速射流相配合;(2) 维持无焰燃烧需通过高速射流卷吸高温烟气并稀释助燃空气;(3) 高温空气与燃气混合之前,通过高速射流产生的卷吸效应混合周围烟气,形成低氧氛围,且高温空气提供维持燃料自燃的温度;(4) 利用蓄热器回收高温烟气余热来加热伴流空气时,热效率可提高 30% 以上,同时 NO_x 减排 70% 以上。

综上,形成无焰燃烧的两个重要条件是高温预热空气和低氧环境。无论是卷吸高温伴流空气还是利用蓄热器回收烟气余热,其目的都是营造炉膛内的高温环境。而采用高速射流则是为了产生卷吸效应,与周围的烟气混合,进而降低燃烧环境的氧浓度,延缓反应时间,使燃烧扩散到整个炉内空间。正是这种大空间的弥散燃烧形成了无焰燃烧的特征:(1) 化学反应速率相对较低;(2) 容积内局部释热少;(3) 热流分布均匀;(4) 燃烧峰值温度低而且噪音非常小;(5) NO_x 和 CO 等污染物的排放显著降低;(6) 炉膛整体温度提高、辐射换热增强。

1.2 火焰温度特征

一切燃烧过程都可分为燃料与空气预热、到达着火温度燃烧及火焰传播。无焰燃烧也是如此,但区别于传统燃烧。传统的扩散燃烧一般采用体积分数为 21% 和温度低于 750 K 的空气,当其与燃料相遇后,在交界面发生剧烈的氧化反应。中心是未燃燃料,外围为空气,边混合边燃烧,其火焰峰值温度高、体积小。在火焰的尾部,由于燃烧后的烟气与空气混合,氧气体积分数低、火焰形状不规则、炉内的温度场与浓度场非常不均匀。

无焰燃烧需要高速射流配合低氧环境,并且有相当高的空气预热温度。射流的速度超过了火焰传

播的速度,导致一开始无法形成火焰,且低氧环境降低反应速率。按化学当量比混合好的燃料和氧分子完全反应就需要更多的时间,延缓了初期的混合燃烧反应,使燃料有充分的时间扩散到整个炉膛区域,燃烧火焰不明显,炉内的温度梯度减小,火焰峰值温度降低,分布更加均匀,炉内平均温度上升,辐射换热增加。辐射换热占无焰燃烧总换热量的90%以上,因此需选择合适的辐射传热模型来模拟无焰燃烧过程。常用的方法主要有热流法、区域法、概率模拟法和离散坐标近似法。其中,离散坐标辐射传热模型在计算精度、计算量及边界处理等方面均具有优势。

作为无焰燃烧重要特征之一,弥散特征指标的研究可以为其炉膛结构的优化提供可靠的科学理论依据。为了研究其弥散性,可定义相同氧消耗条件下无焰燃烧反应区的体积相对于传统燃烧反应区体积增大的倍数为弥散度^[8]。弥散度可直接反映弥散性能,与空气预热温度没有直接关系,但预热空气可以加大射流的卷吸能力,一定程度上增强其弥散性能。弥散度反映了火焰强度、火焰体积的相对变化,是衡量火焰温度的重要指标。一般而言,火焰体积越小,代表燃料越集中,燃烧空间小,火焰峰值温度越高且温度分布不均匀。

提高空气与燃气射流初始动量、分散燃料与空气气流、改变燃气与空气喷嘴间距、直接采用低氧浓度的氧化剂射流或者烟气/惰性气体稀释燃气射流、优化喷嘴结构、优化炉膛结构都是强化炉膛弥散性能的有效措施。

炉温均匀、温度梯度小作为无焰燃烧的一大优势,对热力型 NO_x 排放的减少有重大意义。通常利用燃烧最高温度与炉内最低温度,或最高与平均温度之差来衡量温度不均匀度^[8]。炉温不均匀度受空气预热温度、火焰体积、进口速度及炉壁散热等因素的影响,可以间接反映弥散性能的优劣,弥散效果越好,火焰体积越大,整体炉温越均匀。

在传统扩散燃烧中,强化炉内的气流对流扩散作用,增强了烟气与壁面的表面传热系数及燃烧的对流传热能力,对于无焰燃烧而言,强化炉内的气流扩散作用则是为了加强炉内的扰动,强化弥散性能。对流传热的比例通过增加入口速度而提高。但是,与辐射传热相比,炉中对流传热的比例仍然很小。

尽管增加入口速度会降低炉温,但是更均匀的温度分布和增强的对流传热可能会补偿辐射传热的损失。

1.3 无焰燃烧排放特性

NO_x 的生成主要分为热力型 NO_x 、快速型 NO_x 和燃料型 NO_x 。在气体燃料的燃烧反应中,热力型 NO_x 占主要地位。在燃烧过程中,空气中的 N_2 高温氧化形成 NO_x ,温度起支配作用,温度高于 $1500\text{ }^\circ\text{C}$,每升高 $100\text{ }^\circ\text{C}$,反应速度增大 $6\sim 7$ 倍, NO_x 排放数据上升显著。同样,影响其生成速率的还有过量空气系数和停留时间。因此,降低火焰的峰值温度、去除局部高温区以及降低氧气的体积分数都是抑制热力型 NO_x 生成的重要措施。

在气体燃料燃烧过程中, NO_x 的生成以热力型为主,在固体、液体燃料的燃烧过程中以燃料型为主。同时,还需要考虑少部分的快速型 NO_x 的生成。在模拟无焰燃烧 NO_x 的生成时,通常使用扩展的Zeldovich机理来描述 NO_x 的热力生成反应。

无焰燃烧的形成过程中,高速射流喷入炉内造成烟气回流,混合了烟气和空气或将助燃空气与惰性气体进行混合稀释,以达到较低的氧浓度。同时,也延缓了初期反应,扩大了反应体积,降低了温度梯度,不存在局部高温区,有效地降低了热力型 NO_x 的生成。

2 无焰燃烧研究的发展

2.1 理论发展现状

无焰燃烧的燃烧区域不仅局限在传统燃烧的火焰区域。Wüning等人^[9]通过定义烟气内部循环率 K ,分析了内部废气循环(可利用烟气或惰性气体稀释氧体积分数)对无焰燃烧的影响,燃料与空气射流演化及其被烟气稀释过程如图1所示,具体影响规律整理如图2所示。

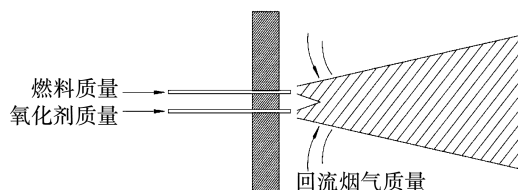


图1 燃料与空气射流演化及其被烟气稀释过程示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the evolution of fuel and air jets and the process of being diluted by flue gas

利用实验室规模的无焰氧化燃烧器(flameless oxidation, FLOX)得到了甲烷扩散火焰的 K_v 与温度的关系,将无焰燃烧分为4个区域:有焰区域、不稳定火焰区域、无焰燃烧区域、无反应区域,如图2所示。当炉膛温度达到自燃温度且 $K_v > 2.5$ 才能形成无焰燃烧。栾聪聪等人^[10]利用化学动力学分析软件CHEMKIN中的WSR模型,对WSR反应器中 CH_4 的燃烧区域进行了重新分类,以热力型 NO_x 排放量为标准确定温度边界,并明确了无焰燃烧区。Cavigiolo等人^[2]发现,即使不同的燃料实现无焰燃烧的 K_v 不同,但无焰燃烧的稳定性以及大幅减排 NO_x 的特性并不受影响。因此,加强炉内的烟气循环可作为实现无焰燃烧的一种方式。

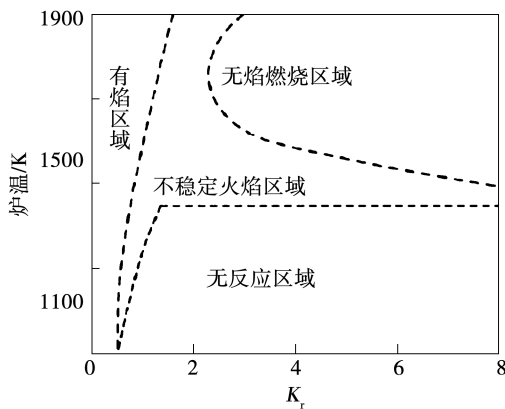


图2 甲烷扩散燃烧方式下 K_v 与温度的关系

Fig.2 The relationship between K_v and temperature in methane diffusion combustion mode

米建春等人^[11-13]研究发现,当初始动量足够高时,可以在常温空气的状态下实现无焰燃烧,并利用20 kW实验炉研究了初始动量和预混方式对无焰燃烧特性的影响,发现射流存在临界动量,低于此临界点无法实现无焰燃烧,高于此点无焰燃烧稳定性并不发生明显变化;聂陈翰等人^[14-16]利用空气搅拌器加强炉内烟气的循环率实现了气体燃料在常温空气非预混方式下的无焰燃烧。

Dally等人^[17-19]采用自制热伴流燃烧器研究了不同氧浓度空气伴流对无焰燃烧火焰结构、稳定性以及氮氧化物排放的影响;田红等人^[20]通过实验和数值模拟的方式研究了燃料和空气进口喷嘴间距对形成无焰燃烧的影响,并发现增大 CO_2 稀释率可以有效降低燃烧的峰值温度和氮氧化物的排放,更好

地实现无焰燃烧;朱彤等^[21-22]研究了空气入射流喷嘴形状对无焰燃烧的影响,发现与圆形喷嘴相比,矩形喷嘴更有利于降低 NO_x 的排放。我们发现,无论是增加入射流的初始动量、利用搅拌器增大炉内的扰动还是通过增大喷嘴间隔都是为了延缓初期反应的时间使炉内的燃料与空气有更充分的时间混合均匀以便扩大反应区域;Mei等人^[23]通过改变试验炉的喷射参数,验证其燃烧性能的相关性。燃料喷射角的增大或间隔的减小减小了主气流和副气流的汇合区域中的峰值温度,从而降低了 NO 的排放。Krishnamurthy等人^[24]还发现,即便将氧气含量提高到100%,但要实现无焰燃烧仍需将进口射流速度提高到接近音速,即满足高 K_v 值的条件。综上, K_v 可作为实现无焰燃烧的一大重要衡量参数,且与 NO_x 排放特性有紧密的联系。

2.2 数值模拟发展现状

Galletti等人^[25]通过对实验结果与CFD的数值模拟结果的对比分析发现,对于许多工程问题,无焰燃烧炉的三维模拟过程可以适当简化为二维模型, K_v 的变化很小,而二维模型可大大缩短计算时间。通过减小了空气进口面积来提高入射流的初始动量从而加强烟气的混合和卷吸。李鹏飞等人^[26]比较了不同的工况下、不同湍流模型及燃烧模型的无焰燃烧模拟效果,并与实验结果对比,结果表明,只有EDC燃烧模型配合GRI-3.0详细化学反应机理模拟得到的结果与实验数据吻合较好;修正过的 $k-\epsilon$ 模型可以更好模拟无焰燃烧的火焰结构。Wang等人^[27]通过大涡模拟,利用热伴流燃烧器研究了无焰燃烧、高温燃烧以及传统燃烧的不同特性。

在工业CFD模拟上,EDC燃烧模型成本过高,如果需要相对清晰和可接受的精度边界,则低成本模型(例如简单的Flamelet模型)可能更适用。Chitgarha等人^[28]使用RANS方法和GRI2.11的详细化学机理在实验室同流燃烧器上进行建模,对比了Flamelet模型与EDC模型的差异,结果表明,EDC模型能更好地预测无焰燃烧特性,当同时考虑精度和成本时,尤其是在大型工业应用中,利用Flamelet模型模拟无焰燃烧特性也是不错的选择。

2.3 燃料种类发展现状

燃料方面,早期的研究大多数都局限在甲烷、丙

烷等气体燃料。但研究发现,不管是气体、液体,还是固体,都可实现无焰燃烧。楼波等人^[29]首次实现了生物质燃料的无焰燃烧;张海等人^[30]确认了煤粉无焰燃烧的可行性,并利用燃烧器多级结构回流高温烟气,加热煤粉气流,同时增大 K_v 值实现无焰燃烧。Dally B B 等人^[31]验证了锯末在炉膛内的停留时间对其燃烧以及 NO_x 生成的影响,但对于固体燃料而言, NO_x 的生成就不能仅仅考虑热力型 NO_x , 还有燃料型 NO_x 的生成也需纳入在内;Vascellari M 等人^[32]利用一种新的非均质燃烧子模型对煤粉的无焰燃烧进行了数值模拟,可以详细表示碳颗粒周围边界层中扩散与对流过程中的均相反应,与异质动力学完全耦合。

即使目前已经实现固体燃料(如煤粉、生物质末)的无焰燃烧,但其形成条件相对气体燃料来说依旧比较苛刻。而二元混合物燃料在高效低排放燃烧装置上具有广泛应用。研究表明, H_2 的添加可促进点火并提高燃烧稳定性,但会提高火焰温度并导致 NO_x 排放上升^[33-35]。因此,研究二元混合物燃料的无焰燃烧技术可以有效解决这个问题。

Ayoub 等人^[36]进行了 H_2 体积分数为 0 ~ 100% 的 CH_4/H_2 混合物在预热及非预热条件下实现无焰燃烧的研究。无论其比例如何均实现了无焰燃烧状态,且其 CO 和 NO_x 排放始终很低。

Li P 等人^[37]研究了 CH_4/H_2 混合燃料在无焰燃烧过程中 NO 的生成机理,发现在当量比 $\Phi \leq 0.8$ 条件下,当氢气体积分数从 5.7% 上升到 14.4% 时,炉温升高,但 NO 排放量基本保持不变。这意味着在增强换热的基础上却抑制了 NO 的排放。Ghufran Ali 等人^[38]研究了 H_2 和 O_2 质量分数对 CH_4/H_2 混合物燃烧过程中 NO_x 形成的影响,发现在燃料混合物中添加 H_2 可以降低其自燃和熄灭温度,并且可在低于 CH_4 的自燃点温度下稳定燃烧。这表示在气态燃料中添加 H_2 可以降低对预热温度的要求,从而降低工业运行成本。并且 H_2 的添加可以抑制热力型和快速型 NO_x 的生成,但总的 O_2 体积分数不宜过高。Fabián E 等人^[39]界定了一个空燃比临界值来同时保证 CH_4/H_2 混合物的燃烧稳定性和低排放特性,并实现了常温空气下 CH_4/H_2 混合物的无焰燃烧。

氢是低热值燃料(如合成气,焦炉气和高炉气)的主要成分,而甲烷为多种可燃气体(如天然气,沼气)的主要组成成分,研究 CH_4/H_2 混合物的燃烧机理及特征可提高今后无焰燃烧燃料的选择性。

3 无焰燃烧的发展趋势

虽然无焰燃烧具有节能、低排放和燃料适用性高等优点,但目前应用依旧存在局限性,通过分析其影响因素,提出了几种可能的发展趋势。

3.1 空气伴流温度对无焰燃烧的影响

无焰燃烧在工业上的应用,依据回收余热的方式分为蓄热式和换热式两种,但这两种方式不可避免地需要装备蓄热室和换向阀,这无疑提高了设备的复杂性和成本,并限制了预混方式无焰燃烧的实现。且由于蓄热器独特的蜂窝状结构,存在积灰风险,始终难以燃烧固态燃料。因此,研究无需预热或低预热温度的无焰燃烧系统具有重大意义。

李鹏飞等人^[26]研究了空气预热温度对无焰燃烧的影响,射流经预热后密度降低、粘性增加。因此,射流速度提高、剪切力增强会提高局部标量耗散率,加强了对周围流体的卷吸能力和小规模混合,并可以有效抑制火焰锋面的形成。卷吸作用和粘度的提高都有利于射流混合物被周围烟气混合和稀释,从而降低射流中的氧气浓度,更容易实现无焰燃烧。提高射流初始动量以加强射流的卷吸能力,当射流动量提高到反应物足以被周围烟气充分稀释的临界点时(存在临界动量),也可实现常温空气下的无焰燃烧。

Zharfa M 等人^[40]研究了磁场对无焰燃烧反应流行为的影响,并成功将氧化剂预热温度降到 300 K 且增加了反应区面积,提高了燃烧效率。Xu 等人^[41]发现,壁温下降会延迟无焰燃烧的形成过程,但可增强烟气与炉壁间的传热能力,且能够实现未预热空气条件下无焰燃烧需要维持的最低壁温。

在非预热条件下实现无焰燃烧可以理解为“两步”实现:第一步,先实现传统燃烧,传统燃烧可以在炉内营造高温环境,更有利于无焰燃烧的形成;第二步,逐渐增大射流动量,高速射流卷吸传统燃烧后产生的高温烟气,从而降低炉膛内氧气的体积分

数,火焰体积逐渐增大,火焰轮廓慢慢模糊,随后实现无焰燃烧。

因此,预热空气并不是实现无焰燃烧的充分必要条件,开发无需预热的无焰燃烧设备将是未来的一大趋势。在实际应用上,如不能完全达到常温实现无焰燃烧时,降低预热温度以节约工业成本也是可以实现。

3.2 几何学对无焰燃烧的影响

研究显示,炉内的动态流动会影响甚至控制火焰的结构,进而影响无焰燃烧的形成,而内部动态流在很大程度上取决于燃烧室结构和燃烧器的配置。

3.2.1 旋流场对无焰燃烧的影响

目前,对于燃烧器方面所作的研究较多,关于喷嘴的构造^[42]、喷嘴的数量^[43]和喷嘴尺寸^[43-45]的影响,归纳为:(1)较小的氧化剂喷嘴有助于获得更好的燃烧状态;(2)燃料喷嘴尺寸必须最佳,并且应该针对各个腔室几何形状确定喷嘴数量,使用带尖角的非圆形喷嘴能增加炉内涡流,更好地混合流体。

无焰燃烧器通常由具有高动量的入口喷嘴驱动,一般采用直流燃烧器,但利用此燃烧器氧化剂射流仅能通过卷吸作用得到稀释。可以通过改变喷嘴形状或配置位置,改变炉内流场,利用旋流促进氧化剂射流的二次稀释,当无焰燃烧与富氧燃烧结合时,这种稀释机制可能变得更重要。

大多数旋流场利用整体旋流或切向注入形成^[46-48],一部分也采用转向叶片或局部旋流的方式^[49-50]。Karyeyen S 等人^[51-52]利用转向叶片将预混合反应物注入炉膛内,观察到了旋流结构。而目前利用旋流促进富氧模式下的天然气无焰燃烧的研究还较少,不失为一种未来的研究趋势。

3.2.2 炉膛结构对无焰燃烧的影响

预热与否并不影响无焰燃烧的形成,而利用烟气循环率 K_v 可以判断其是否形成。目前,无焰燃烧的研究方向主要集中在燃烧器方面,例如喷射速度或方向、喷嘴分离距离、混合模式及燃烧器位置和布置等,且几乎所有的测试都是在立式炉或者圆柱形卧式炉中进行的,对于炉膛的内部结构,即燃烧室的形状对无焰燃烧的影响及形成的研究较少。Li^[53]利用 Speziale-Sarkar-Gatski (SSG) 雷诺应力模型,Ed-ly - 耗散模型 (EDM), 离散纵坐标方法 (DTM) 和加

权总和 - 灰色气体模型 (WSGG) 进行数值模拟,同时考虑了热力型 NO_x 和快速型 NO_x 的形成机理来评估 NO_x 的生成,表明有无涡流产生对甲烷喷射火焰的燃烧特性有较大影响。无涡流的高温空气会形成大量 NO_x , 而通过涡旋的高温空气则可显著抑制 NO 的产生。因此,可通过改善炉膛结构来改变炉内流场的流动,从而增强炉内对流效果,强化弥散性能。在射流出口处设置钝体,打散集中的燃气射流使其扩散到整个炉膛区域及在壁面处设置导流板改变炉内烟气流动都是可行的方法。

通过数值模拟的方式对比了不同炉膛形状的炉内流场,通过改变传统长方体燃烧炉进口端的角度,收缩上游炉膛宽度使其成梯形,使得部分烟气沿炉壁回流增强,用以稀释刚入射的燃气射流,营造低氧环境,提高了 K_v 值,且温度场更大,更均匀。

图3对比了 90° , 98° 和 100° 的3种炉膛角度结构内的烟气回流情况。可以看出,在保证炉膛整体容积不变的情况下,相比 90° 炉膛结构, 98° 和 100° 可以得到更大范围的烟气回流区域。炉膛角度为 98° 与 100° 时炉内流线情况差别不大。

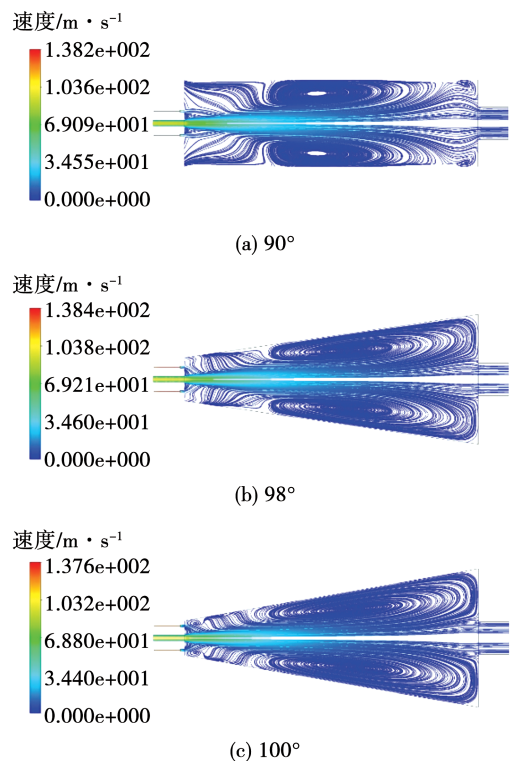


图3 3种角度的炉膛内部流线示意图

Fig.3 Schematic diagram of internal flow lines in the furnace at three angles

4 结 论

无焰燃烧因具有燃烧效率高、氮氧化物排放极低、燃烧稳定性好等特点,具有良好的发展潜力及广阔的市场需求。目前对无焰燃烧的燃烧机理,形成机制的研究还不够深入,这无疑限制了该技术更广阔的发展及推广。

常规实现无焰燃烧的方式需高温预热空气与高速射流相配合,预热空气的高温给燃烧提供所需热量,高速射流可卷吸烟气稀释射流形成低氧环境,有利于峰值温度的降低以及 NO_x 排放的降低,当射流速度足够快时可实现常温下的无焰燃烧。并且,无论是气体、液体或是固沫,预热与否以及是否预混都可实现无焰燃烧。使用 CH_4/H_2 混合气体实现无焰燃烧可以在提升燃烧稳定性的同时依旧保持低排放的特点。

数值模拟上,当需研究燃烧过程中详细的反应机理以及精度较高的收敛结果时,EDC 模型结合 GRI 3.0 反应机理模拟效果最好,当需考虑计算时间与成本,仅观察稳态结果,Flamelet 模型也是不错的选择。

炉膛结构可较大程度影响炉内流场从而影响无焰燃烧效果,在整体容积不变时采用进口端角度更大的梯形结构可形成更好的烟气回流,并在一定程度上降低对射流速度的要求。

因此,研发无需预热的无焰燃烧系统可降低设备复杂性,降低工业成本的同时将燃料种类扩大到液体及固沫,将无焰燃烧技术推广到燃油、燃煤锅炉等更广泛的工业领域。而有关结构的研究大多基于喷嘴方向,对炉膛本体结构研究较少,因此设计合理的,可以降低无焰燃烧初始条件的炉膛结构也可作为降低工业成本的一大研究方向。此外,随着技术的发展,利用可再生能源发电,降低电解水制备氢气的工业成本,让发展 CH_4/H_2 混合运输网络变成可能。因此, CH_4/H_2 混合气体在将来可作为应用十分广泛的气体燃料,研究 CH_4/H_2 混合物的无焰燃烧机理具有十分重要的研究意义。

参考文献:

[1] KATSUKI M, HASEGAWA T. The science and technology of combustion in highly preheated air [J]. Proceedings of the Combustion

Institute, 1998, 27(2): 3135 - 3146.

- [2] CAVIGIOLO A, GALBIATI M A, EFFUGGI A, et al. Mild combustion in a laboratory-scale apparatus [J]. Combustion Science Technology, 2003, 175(8): 1347 - 1367.
- [3] DALLY B B, SHIM S H, CRAIG R A, et al. On the burning of sawdust in a MILD combustion furnace [J]. Energy Fuels, 2010, 24: 3462 - 3470.
- [4] TSUJI H, GUPTA A, HASEGAWA T, et al. High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction [M]. Florida: CRC Press, 2003.
- [5] SZEGÖ G G, DALLY B B, NATHAN G J. Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system [J]. Combustion & Flame, 2009, 156: 429 - 438.
- [6] MEDWELL P R, KALT P A M, DALLY B B. Imaging of diluted turbulent ethylene flames stabilized on a Jet in Hot Coflow (JHC) burner [J]. Combustion & Flame, 2008, 152(1-2): 100 - 113.
- [7] MEDWELL P R, KALT P A M, DALLY B B. Reaction zone weakening effects under hot and diluted oxidant stream conditions [J]. Combustion Science and Technology, 2009, 181(7): 937 - 953.
- [8] 蒋绍坚. 高温低氧燃烧技术及应用 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.
- JIANG Shao-jian. High temperature and low oxygen combustion technology and application [M]. Changsha: Central South University Press, 2010.
- [9] WUNNING J A, WUNNING J G. Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation [J]. Progress Energy and Combustion Science, 1997, 23(1): 81 - 94.
- [10] 栾聪聪, 涂垚杰, 谢逸豪, 等. 基于 WSR 反应器不同稀释介质条件下 MILD 燃烧分区特性研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2019, 25(6): 492 - 500.
- LUAN Cong-cong, TU Yao-jie, XIE Yi-hao, et al. Characterization of MILD combustion partitioning based on different dilution media conditions in WSR reactors [J]. Combustion Science and Technology, 2019, 25(6): 492 - 500.
- [11] 李鹏飞, 米建春, DALLY B B, 等. 当量比和反应物混合模式对无焰燃烧的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2011(5): 20 - 27.
- LI Peng-fei, MI Jian-chun, DALLY B B, et al. Effect of equivalent ratio and reactor mixing pattern on flameless combustion [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2011(5): 20 - 27.
- [12] MI J C, LI P F, ZHENG C G. Numerical simulation of flameless premixed combustion with an annular nozzle in a recuperative furnace [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(1): 10 - 17.
- [13] MI J C, LI P F, DALLY B B, et al. Importance of initial momen-

- tum rate and air-fuel premixing on moderate or intense low oxygen dilution(Mild) combustion in a recuperative furnace[J]. *Energy & Fuels*,2009,23:5349 – 5356.
- [14] 聂翰翰. 基于无焰燃烧技术小型燃油锅炉的改造及实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
NIE Chen-han. Modification and experimental study of small oil-fired boilers based on flameless combustion technology [D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2010.
- [15] 俞 瑜. 气体喷射式无焰燃烧的数值模拟和实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
YU Yu. Numerical simulation and experimental study of gas-directed flameless combustion[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2010.
- [16] 邢献军. 常温空气无焰燃烧研究及其在燃煤锅炉煤改气中的应用[D]. 合肥:中国科学技术大学,2006.
XING Xian-jun. Research on flameless combustion of room temperature air and its application in coal-fired boiler coal-to-gas conversion[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2006.
- [17] DALLY B B, KARPETIS A N, BARLO R S. Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*,2002,29(1):1147 – 1154.
- [18] CHRISTO F C, DALLY B B. Modeling turbulent reacting jets issuing into a hot and diluted coflow[J]. *Combustion and Flame*, 2005,142:117 – 129.
- [19] CHRISTO F C, DALLY B B. Application of transport PDF approach for modelling MILD combustion [C]//15th Australasian Fluid Mechallics Conference. Sydney:Sydney University of Sydney,2006.
- [20] 田 红,刘正伟,王飞飞,等. CO₂ 稀释对不同燃料无焰燃烧及 NO 生成特性的影响 [J]. *动力工程学报*,2017,37(6):440 – 446.
TIAN Hong,LIU Zheng-wei,WANG Fei-fei,et al. Effect of CO₂ dilution on flameless combustion and NO generation characteristics of different fuels[J]. *Journal of Power Engineering*,2017,37(6):440 – 446.
- [21] 朱 彤,吴家正,冯 良,等. 高温空气低燃气浓度燃烧过程的数值模拟研究[J]. *工程热物理学报*,2005(S1):277 – 279.
ZHU Tong,WU Jia-zheng,FENG Liang,et al. Numerical simulation study of combustion process with low gas concentration in high temperature air[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005(S1):277 – 279.
- [22] 朱 彤,张毅勤,刘敏飞,等. 低热值煤气高温空气燃烧数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*,2002(8):932 – 937.
ZHU Tong,ZHANG Yi-meng,LIU Min-fei,et al. Numerical simulation of high temperature air combustion of low calorific value gas [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2002(8):932 – 937.
- [23] MEI Z,LI P,MI J,et al. Diffusion MILD combustion of firing pulverized-coal at a pilot furnace[J]. *Flow Turbulence and Combustion*,2015,95:803 – 829.
- [24] KRISHNAMURTHY N,PAUL P J,BLASIAK W. Studies on low-intensity oxy-fuel burner[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*,2009,32(2):3139 – 3146.
- [25] GALLETI C,PARENTE A,TOGNOTTI L. Numerical and experimental investigation of a mild combustion burner[J]. *Combustion and Flame*,2007,151(4):649 – 664.
- [26] 李鹏飞,米建春,DALLY B B,等. MILD 燃烧的最新进展和发展趋势[J]. *中国科学:技术科学*,2011,41(2):135 – 149.
LI Peng-fei,MI Jian-chun,DALLY B B,et al. Recent progress and development trend of MILD combustion[J]. *China Science: Technical Science*,2011,41(2):135 – 149.
- [27] WANG G,MI J. What differences does large eddy simulation find among traditional, high-temperature, and moderate or intense low oxygen dilution combustion processes of a CH₄/H₂ jet flame in hot oxidizer coflow[J]. *Energy & Fuels*,2018,32:5544 – 5558.
- [28] CHITGARHA F,MARDAI A. Assessment of steady and unsteady flamelet models for MILD combustion modeling [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*,2018,43(32):15551 – 15563.
- [29] 楼 波,罗玉和,马骁茜,等. 回转窑内生物质高温空气燃烧 NO_x 生成模型与验证[J]. *中国电机工程学报*,2007,27(29):68 – 73.
LOU Bo,LUO Yu-he,MA Xiao-qian,et al. Modeling and validation of NO_x generation from high-temperature air combustion of biomass in rotary kilns[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*,2007,27(29):68 – 73.
- [30] ZHANG H,YUE G,LU J,et al. Development of high temperature air combustion technology in pulverized fossil fuel fired boilers [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007,31(2):2779 – 2785.
- [31] DALLY B B,SHIM S H,CRAIG R A. On the burning of sawdust in a MILD combustion furnace[J]. *Energy & Fuels*,2010,24:3462 – 3470.
- [32] VASCELLARI M,SCHULZE S,NIKIRITYUK P,et al. Numerical simulation of pulverized coal MILD combustion using a new heterogeneous combustion submodel[J]. *Flow Turbulence and Combustion*,2014,92:319 – 345.
- [33] CHEN Z,DAI P,CHEN S. A model for the laminar flame speed of binary fuel blends and its application to methane/hydrogen mixtures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*,2012,37

- (13):10390-10396.
- [34] CHEN S, LI J, Han H F, et al. Effects of hydrogen addition on entropy generation in ultra-lean counter-flow methane-air premixed combustion[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(8):3891-3902.
- [35] WANG J H, HUANG Z H, ZHENG J J, et al. Effect of partially premixed and hydrogen addition on natural gas direct-injection lean combustion[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(22):9239-9247.
- [36] AYOUB M, ROTTIER C, CARPENTIER S, et al. An experimental study of mild flameless combustion of methane/hydrogen mixtures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(8):6912-6921.
- [37] LI P, WANG F, MI J, et al. Mechanisms of NO formation in MILD combustion of CH₄/H₂ fuel blends[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(33):19187e203.
- [38] ALI G, ZHANG T, WU W, et al. Effect of hydrogen addition on NO_x formation mechanism and pathways in MILD combustion of H₂-rich low calorific value fuels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(15):9200-9210.
- [39] CANO F. Emissions and dynamic stability of the flameless combustion regime using hydrogen blends with natural gas[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 46(1):1246-1258.
- [40] ZHARFA M, KARIMI N. Intensification of MILD combustion of methane and hydrogen blend by the application of a magnetic field - a numerical study[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 184:259-268.
- [41] XU S T, TU Y J, HUANG P, et al. Effects of wall temperature on methane MILD combustion and heat transfer behaviors with non-preheated air[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 174(25):115282.
- [42] DENG X, XIONG Y, YIN H, et al. Numerical study of the effect of nozzle configurations on characteristics of MILD combustion for gas turbine application[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2016, 138(4):1-8.
- [43] GALLETTI C, PARENTE A, TOGNOTTI L. Numerical and experimental investigation of a mild combustion burner[J]. *Combustion and Flame*, 2007, 151(4):649-664.
- [44] VERÍSSIMO A S, ROCHA A M A, COSTA M. Importance of the inlet air velocity on the establishment of flameless combustion in a laboratory combustor[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 44:75-81.
- [45] AANJANEYA K, CAO W, CHEN Y, et al. A numerical study of confined turbulent jets for homogeneous combustion with oxygen enrichment[J]. *Fuel*, 2020, 261:1-10.
- [46] KHALIL A E E, GUPTA A K. Swirling flow field for colorless distributed combustion[J]. *Applied Energy*, 2014, 113:208-218.
- [47] KHALIL A E, ARGHODE V K, GUPTA A K, et al. Low calorific value fuelled distributed combustion with swirl for gas turbine applications[J]. *Applied Energy*, 2012, 98(1):69-78.
- [48] SORRENTINO G, SABIA P, DE J M, et al. The effect of diluent on the sustainability of MILD combustion in a cyclonic burner[J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 2016, 96(2):449-468.
- [49] LI P, WANG F, TU Y, et al. Moderate or intense low-oxygen dilution oxy-combustion characteristics of light oil and pulverized coal in a pilot-scale furnace[J]. *Energy Fuels*, 2014, 28(2):1524-1535.
- [50] KHALIL A E E, GUPTA A K. Fostering distributed combustion in a swirl burner using prevaporized liquid fuels[J]. *Applied Energy*, 2018, 211:513-522.
- [51] KARYEYEN S, FESER J S, GUPTA A K. Hydrogen concentration effects on swirl-stabilized oxy-colorless distributed combustion[J]. *Fuel*, 2019, 253:772-780.
- [52] KARYEYEN S, FESER J S, GUPTA A K. Swirl assisted distributed combustion behavior using hydrogen-rich gaseous fuels[J]. *Applied Energy*, 2019, 251:113354.
- [53] LI X, JIA L. Investigation on combustion characteristics and NO formation of methane with swirling and non-swirling high temperature air[J]. *Journal of Thermal Science*, 2014, 23:472-479.