

当量比和反应物混合模式对无焰燃烧的影响

李鹏飞¹, 米建春¹, Bassam B. Dally², Richard A. Craig², 王飞飞¹

(1. 湍流与复杂系统国家重点实验室(北京大学), 北京市海淀区, 100871;

2. 阿德莱德大学机械工程学院, 南澳大利亚 5005, 澳大利亚)

Effects of Equivalence Ratio And Mixing Pattern of Reactants on Flameless Combustion

LI Pengfei¹, MI Jianchun¹, Bassam B. Dally², Richard A. Craig², WANG Feifei¹

(1. State Key Laboratory of Turbulence and Complex Systems(Peking University), Haidian District, Beijing 100871, China;

2. The University of Adelaide, School of Mechanical Engineering, South Australia 5005, Australia)

ABSTRACT: This paper reported the experimental results of flameless combustion obtained from investigation of the influence of equivalence ratio and initial reactants mixing pattern. The furnace operates at the thermal input of 7.5-15 kW, and equivalence ratio varying from 0.5 to 1. Experiments show that the flameless combustion is easy to maintain once it has been established. It is found that, regardless of using non-premixing, partially premixing or fully premixing pattern, the furnace temperature is similar while CO, H₂ and NO_x emissions are extremely low. When the equivalence ratio is near 1, although it is still in the flameless mode and NO_x emissions are low, extremely high CO and H₂ emissions are obtained and thus the combustion is not clean. When the equivalence ratio is less than 0.98, CO and H₂ emissions are low in all the three cases, and relatively, the partially premixing produces the most of NO_x whereas the fully premixing obtains the lowest. This paper also discussed the influence of equivalence ratio on NO_x emissions in detail.

KEY WORDS: high temperature air combustion; equivalence ratio; premixing; nonpremixing; partially premixing

摘要: 给出空气和燃料在3种初始混合模式(非预混、部分预混和完全预混)下无焰燃烧的实验结果,介绍了无焰燃烧的实现方法,研究当量比和初始混合模式对无焰燃烧的影响。实验炉在功率为7.5~15 kW下运行,当量比的变化范围为0.5~1。实验结果表明,无焰燃烧状态一旦建立则很稳定,很容易维持。无论是预混、非预混还是部分预混燃烧,其炉温

差别不大,CO和NO_x排放低。当量比接近1时,虽然炉内仍处于无焰燃烧状态且NO_x排放量少,但CO和H₂排放量都极多,此时并不是清洁燃烧。当量比小于0.98时,3种混合模式下烟气中的CO和H₂含量都极低,但部分预混无焰燃烧产生的NO_x排放量相对较多,而完全预混无焰燃烧的NO_x排放量最低。文中还对当量比对NO_x排放量的影响进行了详细分析。

关键词: 高温空气燃烧; 当量比; 预混; 非预混; 部分预混

0 引言

无焰燃烧也称无焰氧化(flameless oxidation, FLOX),是一种反应物被稀释后在低氧氛围下的燃烧模式,故亦称之为温和与深度低氧稀释燃烧(moderate & intense low oxygen dilution, MILD)。由于工业中实现该燃烧方式通常需将空气高温预热到燃料的自燃点以上(绝大多数情况下大于1200 K),因此在工业界多被称为高温空气燃烧(high temperature air combustion, HTAC)。与传统燃烧方式相比,无焰燃烧的热利用效率可提高(故CO₂排放可降低)30%以上,NO_x排放可减少70%以上。由于无焰燃烧技术集节能与减排于一体,自20世纪90年代提出后,迅速在德国、意大利、日本、美国、瑞典和中国等国家的钢铁和冶金部门得到应用,并被国际燃烧界誉为本世纪最有发展前途的燃烧技术之一。

近十几年各国对无焰燃烧进行了大量研究,已成功利用气体、液体和固体燃料实现无焰燃烧,并开发了相关商业化产品。Wüning等^[1]、Cavaliere等^[2]和Tsuji等^[3]综述了非预混燃烧方式下无焰燃烧的研究进展。国内,北京大学米建春等^[4-6]对无焰燃

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2007AA05Z312); 国家自然科学基金项目(10772006); 煤燃烧国家重点实验室开放基金项目(FSKLCC0801)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program(2007AA05Z312); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(10772006); Project Supported by the open foundation of State Key Laboratory of Coal Combustion (FSKLCC0801).

烧的研究确认了射流初始动量(或雷诺数)对实现无焰燃烧的重要性。清华大学祁海鹰等^[7-9]对高温空气燃烧系统中蓄热体的传热性能以及高温低氧燃烧条件下 NO_x 的生成特性进行过研究,为蓄热体的设计与高温空气燃烧技术的应用提供了依据;清华大学张海等^[10]成功地在 12 MW 工业燃烧炉上实现了煤粉燃料的无焰燃烧;中国科学技术大学的林其钊等^[11-13]成功利用常温空气实现了气体燃料无焰燃烧,并利用 Chemkin 对含氢燃料的无焰燃烧进行研究,最近还将无焰燃烧成功应用于煤气化过程^[12];北京科技大学^[14]对无焰燃烧的燃烧特性与低 NO_x 特性进行了机制讨论;华南理工大学^[15]对无焰燃烧应用于生物质燃料进行了尝试;同济大学的朱彤等^[16]对无焰燃烧的 NO_x 排放特性进行过研究;中南大学^[17-20]对无焰燃烧进行过较长时间的研究,目前已有有关此方向的专著出版;东北大学^[21-22]对无焰燃烧炉进行了数值模拟研究,模拟结果与实验相符;昆明理工大学^[23]也对蓄热体性能、无焰燃烧低 NO_x 特性等进行过研究,并总结成专著出版。总体而言,国内对无焰燃烧的研究已接近或达到国际先进水平,但目前国内对无焰燃烧的绝大多数研究都针对燃料与空气非预混燃烧方式下进行。

意大利对部分预混条件下的无焰燃烧进行了初步研究。Effuggi 等^[24]研究了部分预混条件下天然气和生物气无焰燃烧效果,得到了实现稳定无焰燃烧的工况参数条件,并发现无焰燃烧不仅能降低 NO_x 排放,还能降低炭黑和多环芳香化合物的排放。Derudi 等^[25]通过实验得到了部分预混条件下含氢燃料无焰燃烧建立和维持的条件,他们发现将燃料中加入氢气后需提高混合物的初始速度才能实现无焰燃烧。Galbiati 等^[26]通过对部分预混条件下无焰燃烧的实验研究,发现无焰燃烧不仅能降低热力型 NO_x 排放,还能降低燃料型 NO_x 排放。

完全预混无焰燃烧方面, Plessing 等^[27]确认了预混条件下实现无焰燃烧的可能性, Özdemiir 等^[28]发现相比于非预混无焰燃烧,预混条件下无焰燃烧的反应区域更接近射流上游,且反应区域的 OH 组分分布与非预混无焰燃烧的差别不大。米建春^[4]对不同初始预混模式下的无焰燃烧进行了实验和数值模拟研究,发现存在一个实现无焰燃烧的临界初始动量,低于此动量则无焰燃烧无法实现,高于此临界动量时,动量和初始预混模式对燃烧反应影响不大。米建春^[5-6]还通过数值模拟发现,对于完全预混条件下的无焰燃烧,也存在一个初始临界动量(或

临界雷诺数),低于此动量(或雷诺数)无焰燃烧无法实现。

本研究目的为比较非预混、部分预混和完全预混 3 种初始混合模式下无焰燃烧状态的不同,并系统总结当量比对这 3 种初始混合模式下无焰燃烧的影响。本文的数据由实验获得,实验在三种功率(7.5、10 和 15 kW)下分别进行,以确保分析结果与功率无关。

1 实验设备

本实验使用如图 1 所示的实验室规模的无焰燃烧炉。该燃烧炉由 4 层 38 mm 厚的陶瓷纤维板保持良好的绝热性能,只有约 20% 的总热量能通过炉壁散出。良好的保温性能对建立和维持无焰燃烧状态有利,其能使燃烧炉被快速加热,缩短达到稳定无焰燃烧的时间。燃烧炉在竖直 3 个方向设有 5 个开口,这些开口可以用绝热窗封闭。实验中采用 2 个 U 型水冷换热器控制炉内热负荷。换热器可以通过任意一个开口插入炉内,本实验中换热器被置于 A_3 和 C_3 2 个窗口。单个换热器在炉内表面积为 0.03 m^2 。在 7.5、10 和 15 kW 下,换热器共能获得约 4.01、4.46 和 4.93 kW 的热量。

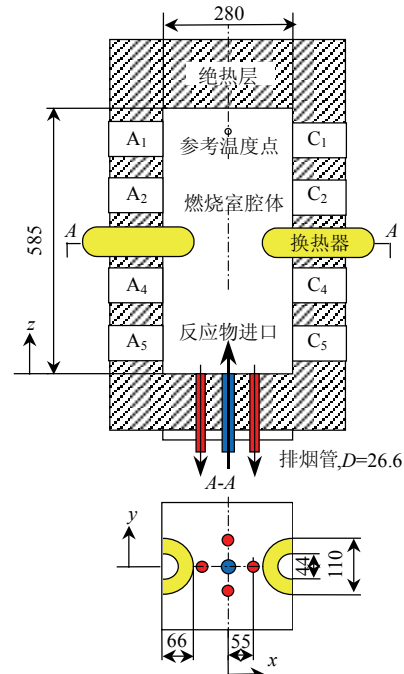


图 1 无焰燃烧实验炉结构示意图(单位: mm)

Fig. 1 Schematic figure of the flameless combustion furnace(mm)

天然气(由质量分数为 85% 的 CH_4 和 15% 的 C_2H_6 组成)为实验燃料气。燃料气与空气都在常温(288 K)状态下送入炉膛。燃烧炉的设计最大功率为

20 kW。燃烧器由沿轴线布置的中心圆形燃料管和包围圆形管的钝体环形空气管组成(图 2)。钝体将中心圆形管包围,钝体本身被外围更大的管道包围,形成环形空气管通道。中心圆形管的直径为 7.2 mm,外围环形管的内径为 26.6 mm,钝体外径为 22 mm。实验中,有 4 种燃烧器布置形式,如图 2 所示。图 2(a)为用于稳定火焰的传统钝体燃烧器示意图,燃料气和空气分别通过中心圆管和环形管送入炉内,实验中利用被钝体稳定的传统火焰预热炉膛。图 2(b)、(c)和(d)分别为预混、非预混和部分预混燃烧方式的无焰燃烧器。将图 2(a)所示的钝体燃烧器中的钝体下移至炉底平面,即形成了图 2(c)所示的非预混无焰燃烧器;再将空气管关闭,并将空气与燃料气预混,经由中心直管一同送入炉内,即形成了图 2(b)所示的预混无焰燃烧器。将图 2(c)所示的非预混无焰燃烧器中的钝体继续下移(下移 90 mm),让燃料气与空气在进入炉膛之前就在外围管道内部分预混,即构成了图 2(d)所示的部分预混无焰燃烧器。4 个直径为 26.6 mm 的排气口对称布置在与燃料气空气进口同侧的炉底。

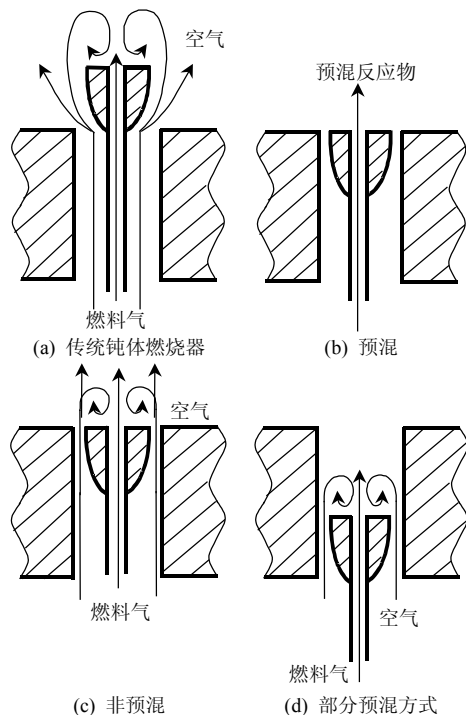


图 2 无焰燃烧器示意图

Fig. 2 Flameless combustion burners

时间平均的炉膛参考温度由细线 R 型热电偶 (Pt-Pt-13%Rh, 线直径 254 μm , 珠直径 1.2 mm) 在 ($x=0, y=0, z=542.5$ mm) 位置处测得。排烟温度由不锈钢套管 K 型热电偶 (Ni-Cr) 测得。烟气中 CO、CO₂、NO、NO_x、O₂ 和 UHC 浓度由 TESTO 350 XL

型便携式气体分析仪测量。气体分析仪的误差范围为: [O₂] = 测量值的 $\pm 0.8\%$, [CO] = 测量值的 $\pm 10 \times 10^{-6}$ 或 5% (取最小值), [NO] = $\pm 5 \times 10^{-6}$, [NO₂] = $\pm 5 \times 10^{-6}$, [CO₂] = 测量值的 $\pm 0.3\%$, UHC [C_xH_y] = $\pm 20 \times 10^{-6}$ 。

2 结果与讨论

2.1 无焰燃烧实现过程

当燃烧炉被充分预热,火焰锋面被消除,无焰燃烧才能实现。即无焰燃烧实现的条件为:炉膛被充分预热使炉内任意处的温度都大于燃料的自燃点;射流出口速度足够大,大于火焰传播速度,使火焰锋面被吹开,使传统燃烧无法形成。这两个条件对于实现无焰燃烧缺一不可。无焰燃烧器的设计应能使实际情况满足这两个条件。通常使用传统火焰预热炉膛。旋流和钝体通常被用于稳定火焰锋面,使传统燃烧发生。

本实验使用钝体来稳定火焰,利用如图 2(a)所示的被钝体稳定的非预混火焰预热炉膛,产生的传统火焰如图 3(a)~(d)所示。很明显,传统燃烧状态下火焰锋面清晰可见。利用图 3(a)所示的点火枪点燃火焰后,炉温较低,火焰为冷火焰。利用该火焰预热炉膛,炉内颜色逐渐变红,如图 3(b)和(c)所示。经过约 1.5 h 的预热,燃烧炉被充分加热后,将钝体下移,并将空气和燃料气都通过中心直管以完全预混的方式送入炉内,燃烧器结构变化为如图 2(b)所示。因中心直管直径较小 ($D=7.2$ mm),而所有的空气与燃料气都由此细管通入炉内,因此射流速度被大大提高,火焰锋面被立即吹开,加之整个炉膛的温度也已超过燃料的自燃点,燃烧反应开始在整

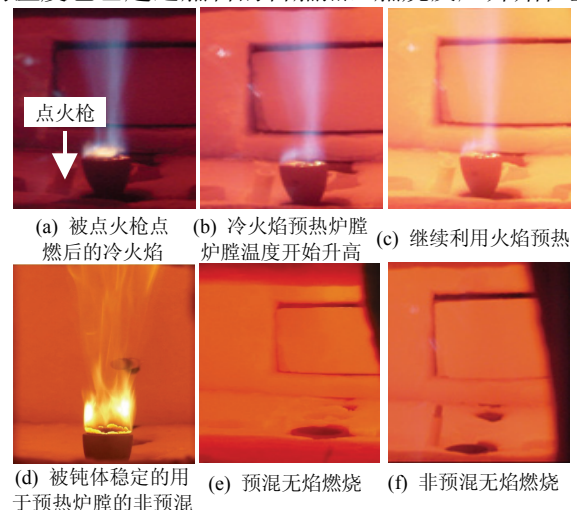


图 3 实验中无焰燃烧的建立过程

Fig. 3 Process of establishing flameless combustion in the experiment

个炉内均匀缓慢的发生，无焰燃烧状态开始建立。如图 3(d)所示，传统燃烧时火焰锋面清晰可见，而图 3(e)所示的无焰燃烧发生时无明显火焰锋面，反应在整个炉内进行。无焰燃烧被建立后，将燃烧器继续变化为如图 2(c)和(d)所示的非预混和部分燃烧方式，炉内保持无焰燃烧状态，其中，非预混无焰燃烧时炉内照片如图 3(f)所示，火焰锋面也不可见。

2.2 炉温与排烟温度

图 4 为不同功率下，不同混合模式的炉温随当量比的变化。总的来看，随着功率由 7.5 kW 增大到 15 kW，炉温逐渐相应增加。而在同一功率下，随着当量比的增加，炉温也相应升高，但升高的量不大。如：15 kW 非预混时，当量比由 0.6 增加到 0.98，炉温的增量低于 100 K。炉温随当量比的变化可由空气供给量的变化解释。随着当量比增加，空气供给量逐渐减少，空气由室温加热到炉温所需的热量逐渐减小，部分热量可以用于继续加热炉膛，因此炉温升高。实验中，当无焰燃烧实现后，初始混合模式在非预混、部分预混和完全预混之间的随意切换并不会使反应由无焰转换为传统燃烧，因此可以认为无焰燃烧一旦实现则很稳定并很容易维持，这也被实验证实。

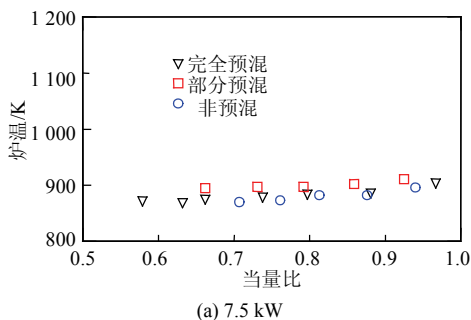
图 5 显示了不同功率下，不同混合模式的排烟温度随当量比的变化。与图 4 中炉温随当量比增加而增加的趋势相反，图 5 中同一功率下，排烟温度随当量比的增加而减少。排烟温度随当量比增加而减少的趋势与炉壁散热量有关。式(1)为通过炉壁对流换热散热量的计算式，式(2)为通过炉壁辐射换热的计算式：

$$Q_f = h_f (T_f - T_w) \quad (1)$$

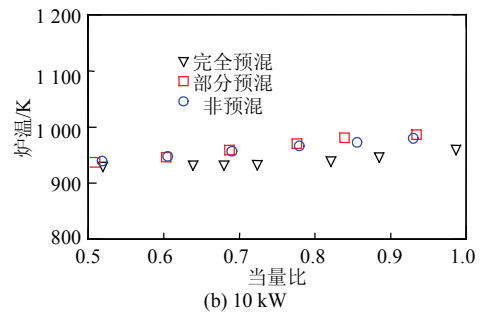
$$Q_{rad} = C_0 [\varepsilon_g (T_f/100)^4 - \alpha_g (T_w/100)^4] \quad (2)$$

式中： h_f 为平均对流换热系数； T_f 为炉内烟气平均温度； T_w 为固体表面平均温度； C_0 为黑体辐射系数； ε_g 为气体发射率； α_g 为气体吸收比。

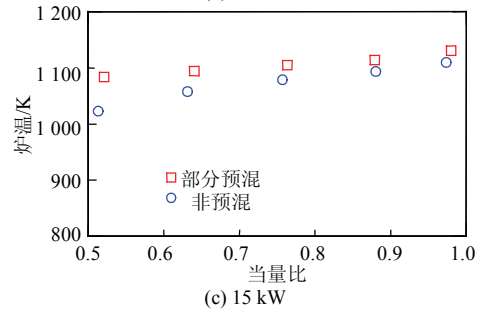
从式(1)和式(2)可见，当炉温增加时， T_f 增加，壁面温度 T_{w1} 也相应增加，炉内烟气温度与壁面温



(a) 7.5 kW



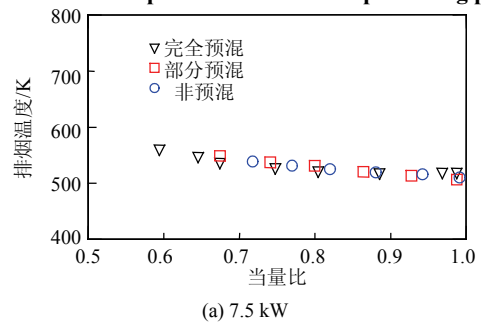
(b) 10 kW



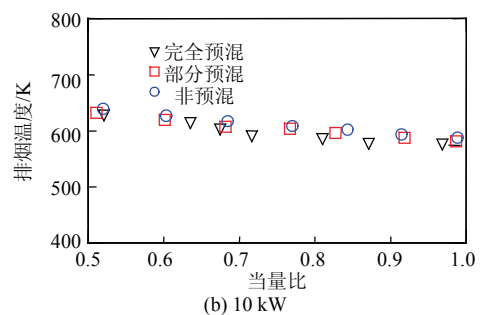
(c) 15 kW

图 4 不同混合模式下的炉温

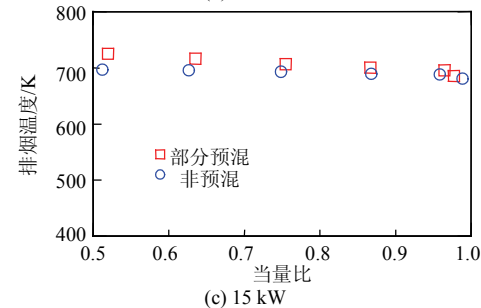
Fig.4 Furnace temperature at different premixing pattern



(a) 7.5 kW



(b) 10 kW



(c) 15 kW

图 5 不同混合方式下的排烟温度

Fig.5 Exhaust temperature at different premixing pattern 度的差值($T_f - T_{w1}$)变化不大，因此，通过炉壁的对流热量和辐射热量基本不变；然而，因水的比热较大，炉温 T_f 增高时换热器表面的平均温度 T_{w2}

变化并不大,因此炉温与换热器表面温度的差值($T_f - T_{w1}$)增加,通过换热器表面的对流换热量 Q_f 和辐射换热量 Q_{rad} 都相应增加。因此,考虑通过炉壁和换热器表面的总换热量,在同一功率下,随着当量比的增加,炉温增加,燃烧炉的总散热量增加,因而导致了排烟温度的略微下降。

2.3 O_2 和 CO_2 排放量

图6和图7分别为不同功率和不同初始混合模式下 CO_2 和 O_2 的排放量。两图数据表明,烟气中 CO_2 的含量随当量比的增加而增加,而烟气中 O_2 的含量随当量比的增加而减少, CO_2 和 O_2 的含量与功率无关,且与初始混合模式无关,而只和当量比有关。不同当量比下的 CO_2 或 O_2 含量与该当量比下燃料完全反应后生成和剩余的 CO_2 和 O_2 相符,因此,本实验中 CO_2 和 O_2 排放量的结果客观上确认了在当量比为0.5~1的范围内燃料气的确几乎被完全氧化,客观上确认了实验结果的正确性。进一步分析图7烟气中 O_2 排放量的数据,在当量比接近或等于1时,烟气中的 O_2 含量几乎为0,此时

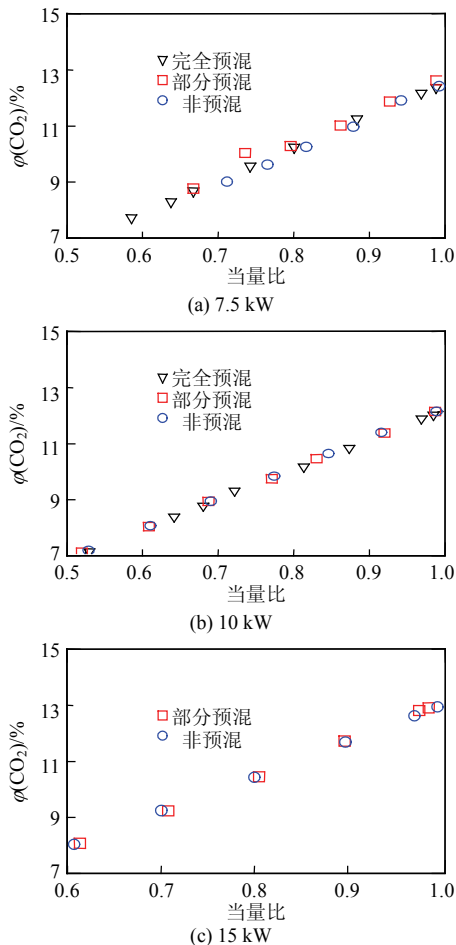


图6 不同混合方式下 CO_2 排放含量

Fig. 6 CO_2 emissions at different pre-mixing pattern

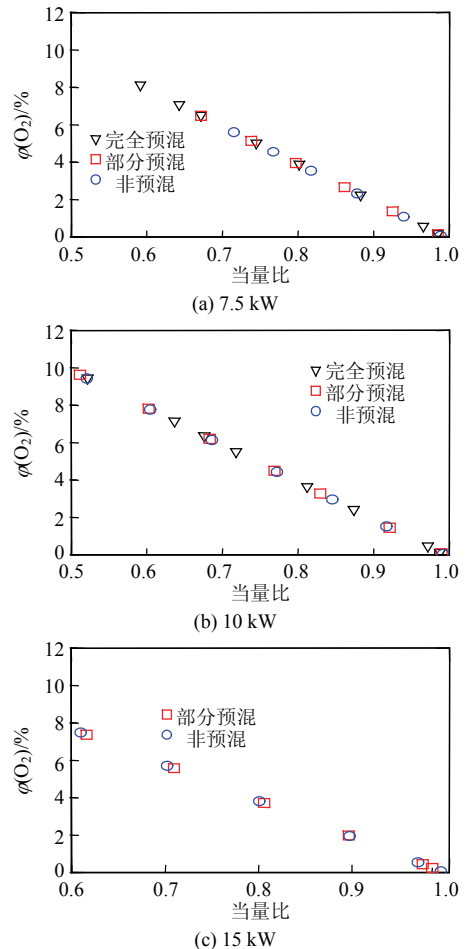


图7 不同混合方式下 O_2 排放含量

Fig. 7 O_2 emissions at different pre-mixing pattern

O_2 的供给可能不足以满足燃料气完全氧化的需求,可能出现燃料不完全燃烧的现象,该现象在实验中被当量比为1时 CO 和 H_2 的排放量证实。

2.4 NO_x 排放量

图8为不同功率,不同混合模式下的 NO_x 排放量。完全预混条件下, NO_x 排放量极低(低于 5×10^{-6}),且 NO_x 排放量不随当量比的变化而变化。部分预混时,虽然 NO_x 排放量仍较低(低于 150×10^{-6}),但当量比对 NO_x 排放有影响:在当量比小于0.9时, NO_x 排放随当量比的增加而逐渐增加,到当量比为0.9左右, NO_x 排放达到一个峰值,然后 NO_x 排放量又随当量比的增加而减少。非预混条件下也有类似趋势,不过 NO_x 排放量都相当低(低于 30×10^{-6})。进一步,由图8发现,完全预混条件下的 NO_x 排放量最低,而部分预混条件下的 NO_x 排放量最高,非预混时的 NO_x 排放量在两者之间。

不同初始混合模式下当量比对 NO_x 排放量的影响可以用燃料气与空气的初始动量解释。完全预混时,由图2(b)所示的燃烧器结构,燃料气与空气

都经由中心小管送入炉内,射流速度最高,射流动量最大。大的初始动量带动炉内更充分的大尺度卷吸和搅动,使反应能在炉内分布式进行,另一方面,由于燃料气与空气已被充分均匀预混合,炉内无局部富燃或局部富氧状态,反应较平缓,反应温度稳定(图 4),因此 NO_x 排放量极低,也因此原因,在当量比为 0.5 ~ 0.98 的范围内,当量比的变化对 NO_x 排放量无影响。而部分预混时,根据图 2(d)所示的燃烧器结构,射流动量被部分消耗于钝体后燃料气与空气的部分预混过程,相比于完全预混和非预混状态,部分预混时的射流初始动量最低。较低的初始动量相对而言无法保证炉内流场的大尺度搅动和卷吸,因而炉内组分浓度并不均匀,存在局部富氧状态(因为实际空气量大于理论空气量),因此 NO_x 排放量相对较多。而且,当量比小时(如 0.6 左右),空气量较多,射流动量比当量比大时(如 0.8 时)高。相比于当量比高时,当量比低时射流动量更高,炉内混合性能更好,因此 NO_x 排放量较少。而随着当量比的增加,空气量逐渐减少,射流初始动量逐渐降低,炉内混合性能逐渐变差,炉内局部开

始呈现富氧状态, NO_x 排放量逐渐增加。当量比从 0.9 继续增大到 1 时,实际空气量逐渐接近理论空气量,因此炉内的局部富氧状态也逐渐减弱,整体反应趋于均匀而平缓,因此 NO_x 排放量开始降低。非预混条件下,射流初始动量虽小于完全预混的情况,却大于部分预混的情况,因此,非预混时的 NO_x 排放量在两者之间,即小于部分预混时的值,而大于完全预混时的值。

2.5 燃烧完全反应程度

燃料在炉内是否完全反应与烟气中 CO 和 H_2 含量有关。烟气中 CO 和 H_2 含量极低,说明燃料几乎被完全氧化,而 CO 和 H_2 含量较高时,则说明燃烧反应不完全。图 9 和图 10 为功率分别为 7.5、10 和 15 kW 条件下 3 种初始混合模式下(完全预混、部分预混和非预混)的 CO 和 H_2 排放量。在当量比为 0.5 到 0.98 的范围内,不同功率和不同初始混合模式下, CO 和 H_2 的排放量都极低(低于 6×10^{-6}),且当量比在 0.5 ~ 0.98 范围内的变化对 CO 和 H_2 排放量没有影响。另外,实验中,在当量比接近 1 时(未在图 9 和图 10 中显示), CO 和 H_2 排放量都急剧增加,大于 2000×10^{-6} ,说明炉内燃烧反应不充分,燃料没有被完全氧化。

当量比对 CO 和 H_2 排放量的影响说明,在实际空气量大于理论空气量时(即当量比小于 1 时),不管初始混合状态为预混、部分预混还是非预混,只要炉内处于无焰燃烧状态,炉内强烈的大尺度回流与卷吸过程都可以保证空气与燃料气在炉内被充分的搅动和混合,因此燃料可被充分氧化, CO 和 H_2 排放量很低;而当实际空气量接近理论空气量时(即当量比约等于 1 时),因实际过程燃料气与空气存在混合不均匀性,如果实际燃烧炉中只供给理论空气量,很难保证燃料气与空气的充分混合,燃料气不能完全被氧化, CO 和 H_2 排放量都急剧增加。值得注意的是,虽然此时烟气中 NO_x 的浓度仍然很低(图 8),炉内也为无焰燃烧状态,但此时并不是清洁燃烧。目前,关于无焰燃烧的很多研究并没有特别关注 CO 和 H_2 排放量,而仅仅认为当炉内无火焰锋面和 NO_x 排放量低时就成功实现了无焰燃烧。根据本实验结果,虽然无焰燃烧状态已经建立,但无焰燃烧状态并不能保证 CO 和 H_2 排放量低。因此,研究无焰燃烧时,不应只关注炉内无火焰锋面和 NO_x 排放量低这两项指标,还应关注 CO 和 H_2 排放量。只有燃料气被完全氧化,才是清洁的无焰燃烧,才是有工业应用价值的燃烧状态。

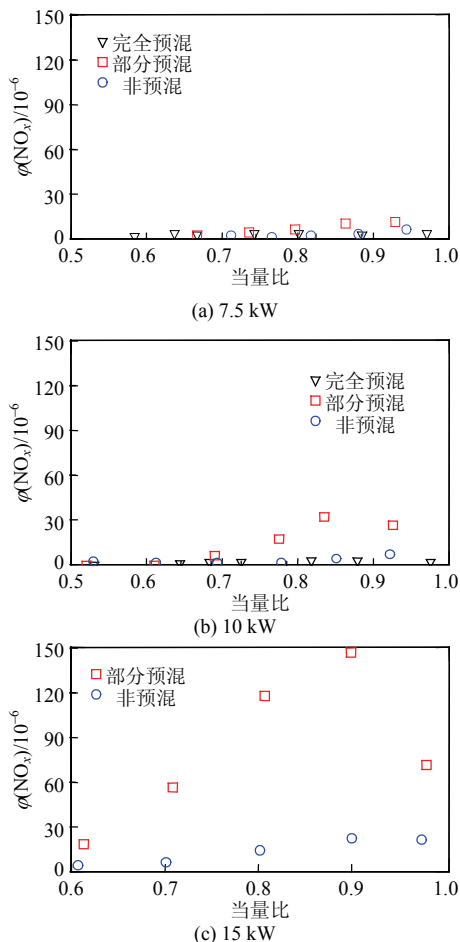


图 8 不同混合方式下的 NO_x 排放量

Fig. 8 NO_x emissions at different premixing pattern

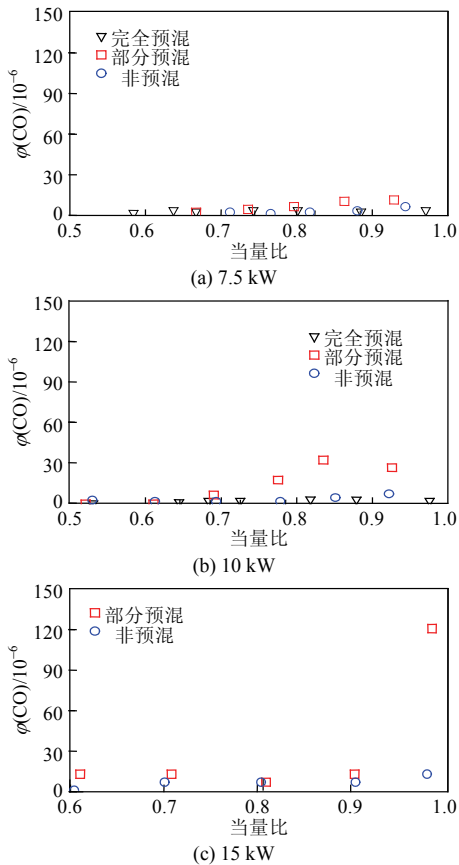
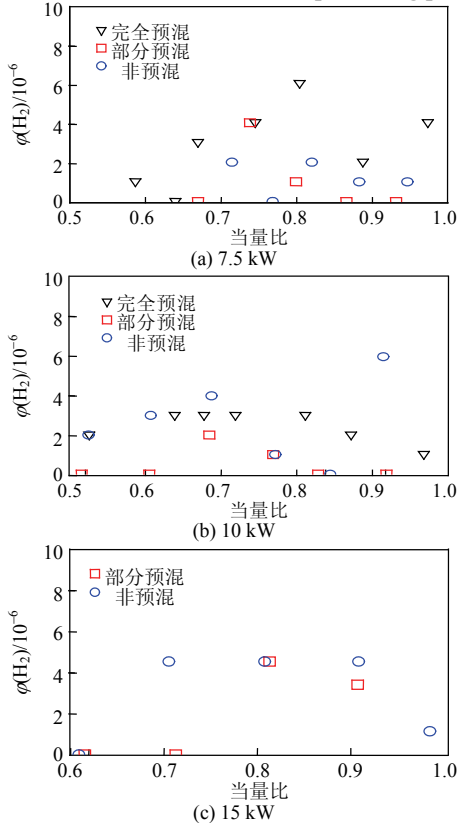


图9 不同混合方式下的CO排放量

Fig. 9 CO emissions at different premixing pattern

图10 不同混合方式下的H₂排放量Fig. 10 H₂ emissions at different premixing pattern

3 结论

本文实验研究了当量比和3种燃料空气初始混合状态(非预混、部分预混和完全预混)对无焰燃烧的影响,详细介绍了无焰燃烧的建立过程,并对3种初始混合模式下的NO_x、O₂、CO₂、CO和H₂排放量以及炉温和排烟温度进行了分析和讨论,得到以下结论:

1) 无焰燃烧在燃料气空气非预混、部分预混和完全预混三种初始混合模式下都可以发生。但无焰燃烧的发生并不能保证燃料的完全氧化。为实现清洁的无焰燃烧,除需关注炉内火焰锋面状态和烟气NO_x排放量外,还需考察烟气CO和H₂排放量,以确保燃料被充分氧化。

2) 7.5、10和15 kW 3种功率下无焰燃烧实验结果都发现,虽然3种燃料气空气初始混合模式无焰燃烧状态下的NO_x排放量较低,但相对而言,部分预混无焰燃烧产生的NO_x最多,而完全预混无焰燃烧的NO_x最低。初始混合模式对无焰燃烧的影响体现在其对射流初始动量的影响上。完全预混时,射流初始动量最高,炉内卷吸更充分,无焰燃烧效果最好,因此NO_x最低。部分预混时,射流初始动量最低,炉内卷吸效果相对较弱,局部可能存在富氧状态,因此NO_x最高。非预混时的情况介于两者之间。

3) 完全预混和非预混时,因初始动量较大,炉内反应物与烟气的卷吸充分,当量比对炉温和NO_x排放量影响不大;部分预混时,当量比对NO_x排放量影响较大,当量比小于0.9时,NO_x值随当量比的增加而增加;当量比大于0.9时,NO_x值随当量比的增加而降低。

4) 无焰燃烧时烟气中O₂和CO₂的排放量与功率无关,与初始混合模式无关,只与当量比有关。

5) 当实际空气量大于理论空气量时(当量比小于0.98时),无论为非预混、部分预混还是完全预混无焰燃烧,CO和H₂的排放量都非常低。而当实际空气量接近理论空气量时(当量比接近1时),3种初始混合模式下的CO和H₂的排放量都急剧升高。

参考文献

- [1] Wünnig J A, Wünnig J G. Flameless oxidation to reduce thermal no-formation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(1): 81-94.
- [2] Cavaliere A, de Joannon M. Mild combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(4): 329-366.
- [3] Tsuji H. High temperature air combustion: from energy conservation

- to pollution reduction[M]. Florida: CRC Press, 2003: 29-168.
- [4] Mi Jianchun, Li Pengfei, Dally BB, et al. Importance of initial momentum rate and air-fuel premixing on moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion in a recuperative furnace[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(11): 5349-5356.
- [5] Mi Jianchun, Li Pengfei, Zheng Chuguang. Numerical simulations of flameless premixed combustion in a recuperative furnace[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, 18(1): 10-17.
- [6] Li Pengfei, Mi Jianchun. Critical reynolds numbers for realization of mild combustion in a recuperative furnace[C]//The 8th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Casification, Poznan, Poland: Poznan University of Technology Press, 2010: 318-326.
- [7] 祁海鹰, 李宇红, 由长福, 等. 高温低氧燃烧条件下氮氧化物的生成特性[J]. *燃烧科学与技术*, 2001, 8(1): 17-22.
Qi Haiying, Li Yuhong, You Changfu, et al. Emission on NO_x in high temperature combustion with low oxygen concentration[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2001, 8(1): 17-22(in Chinese).
- [8] 李宇红, 祁海鹰, 苑皎, 等. 预热温度影响甲烷高温空气燃烧特性的数值分析[J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(2): 257-260.
Li Yuhong, Qi Haiying, Yuan Jiao, et al. Numerical analysis of high temperature combustion of methane[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001, 22(2): 257-260(in Chinese).
- [9] 王皆腾, 祁海鹰, 李宇红, 等. 蜂巢蓄热体换热性能的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2003, 24(5): 897-899.
Wang Jieteng, Qi Haiying, Li Yuhong, et al. Experimental study on heat transfer performance of honeycomb heat regenerator[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(5): 897-899(in Chinese).
- [10] 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.
- [11] 邢献军, 林其钊. 常温空气无焰燃烧中 NO_x 生成的研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(10): 1671-1676.
Xing Xianjun, Lin Qizhao. Research on NO_x formation in normal temperature air flameless combustion[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10): 1671-1676(in Chinese).
- [12] 唐志国, 马培勇, 李永玲, 等. 基于无焰氧化的煤粉气化炉模型设计与试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(8): 50-55.
Tang Zhiguo, Ma Peiyong, Li Yongling, et al. Design and experiment research of a novel pulverized coal gasifier based on flameless oxidation technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(8): 50-55(in Chinese).
- [13] Yu Y, Wang G F, Lin Q Z, et al. Flameless combustion for hydrogen containing fuels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(7): 2694-2697.
- [14] 苍大强, 关运泽, 毛一心, 等. 高温空气燃烧的超低 NO_x 研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2003, 9(2): 190-193.
Cang Daqiang, Guan Yunze, Mao Yixin, et al. Experimental study on the technology of extra low NO_x emissions in industrial furnace with HTAC[J]. 2003, 9(2): 190-193(in Chinese).
- [15] 楼波, 罗玉和, 马晓茜, 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 Yuhe, Ma Xiaoqian, et al. Model and experimental validation on NO_x emissions of biomass combustion in rotary kiln with HTAC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(29): 68-73(in Chinese).
- [16] 朱彤, 朱尚龙, 曹甄俊, 等. 高温空气燃烧 NO_x 排放特性的试验研究[J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(5): 894-896.
Zhu Tong, Zhu Shanglong, Cao Zhenjun, et al. Experimental study on the NO_x emission of high temperature air combustion[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(5): 894-896(in Chinese).
- [17] 欧俭平, 萧泽强, 蒋邵坚, 等. 蓄热式钢包烘烤装置的热工特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2004, 35(2): 217-221.
Ou Jianping, Xiao Zeqiang, Jiang Shaojian, et al. Thermal performance of regenerative ladle heater[J]. *Journal of Central South University*, 2004, 35(2): 217-221(in Chinese).
- [18] 萧泽强, 朱苗勇. 冶金过程数值模拟分析技术的应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 318-351.
Xiao Zeqiang, Zhu Miaoyong. Applications of numerical simulation for analysis of metallurgical processes[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 318-351(in Chinese).
- [19] 萧泽强. 冶金中单元过程和现象的研究[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 456-575.
Xiao Zeqiang. Studies on unit processes and unit phenomena in metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 456-575(in Chinese).
- [20] 蒋邵坚. 高温低氧燃烧技术及应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010: 56-275.
Jiang Shaojian. Applications of high temperature air combustion technology[M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 56-275(in Chinese).
- [21] 王力军, 蔡九菊, 邹宗树, 等. 高温空气燃烧炉内湍流混合特性的数值研究[J]. *计算物理*, 2004, 21(3): 357-361.
Wang Lijun, Cai Jiujun, Zou Zongshu, et al. Numerical investigation of turbulent mixing in a high temperature air combustion furnace[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2004, 21(3): 357-361(in Chinese).
- [22] Wang Aihua, Cai Jiujun, Xie Guowei. Numerical simulation of combustion characteristics in high temperature air combustion furnace[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2009, 16(2): 6-10.
- [23] 王华, 王胜利, 饶文涛. 高性能复合相变蓄热材料的制备和蓄热燃烧技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 134-291.
Wang Hua, Wang Shenglin, Rao Wentao. The preparation of high performance phase change material and the regenerative combustion technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 134-291(in Chinese).
- [24] Effuggi A, Gelosa D, Derudi M, et al. Mild combustion of methane-derived fuel mixtures: Natural gas and biogas[J]. *Combustion Science and Technology* 2008;180(3): 481-493.
- [25] Derudi M, Villani A, Rota R. Mild combustion of industrial hydrogen-containing byproducts[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007: 46(21): 6806-6811.
- [26] Galbiati M, Cavigiolo A, Effuggi A, et al. Mild combustion for fuel- NO_x reduction[J]. *Combustion Science and Technology*, 2004: 176(7): 1035-1054.
- [27] Plessing T, Peters N, Wüning J G. Laseroptical investigation of highly preheated combustion with strong exhaust gas recirculation[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1998, 27(2): 3197-204.
- [28] Özdemir IB, Peters N. Characteristics of the reaction zone in a combustor operating at mild combustion[J]. *Experiments in Fluids* 2001, 30(6): 683-695.



李鹏飞

收稿日期: 2010-06-07.

作者简介:

李鹏飞(1986), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高效低污染燃烧技术, pengfeilipku@gmail.com.

米建春(1961), 男, 博士, 教授, 目前从事湍流基础、射流、自激振荡射流燃烧及无焰燃烧方面的研究, jcmi@coe.pku.edu.cn.

(编辑 王庆霞)