

低NO_x自激振荡射流燃烧器

米建春, 李鹏飞

(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)

Low NO_x Self-excited Oscillating-jet Burners

MI Jian-chun, LI Peng-fei

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

ABSTRACT: A small flow ejecting into a relatively large specific chamber can produce large-scale low-frequency oscillations, this jet is termed as a self-excited oscillating jet. The self-excited oscillation imposes a profound influence on turbulent mixing process: i.e., it not only enhances large-scale engulfment or entrainment but also simultaneously decreases the molecular mixing rate. Previous combustion experiments reveal that the self-excited oscillating jet burners always produce relatively larger flames with more soot, thus increasing flame radiation, decreasing flame temperature and resulting in low NO_x emissions. Many installations of these burners at cement kilns have consistently delivered a reduction of 40%~60% of NO_x emissions and also less fuel consumption by 5%~10%, relative to the conventional multi-jet burners. This paper reviewed the influence of jet oscillation on turbulent mixing and flame performance, then discussed the limitations of the burners, and finally gave suggestions to their further development.

KEY WORDS: burner; turbulent mixing; NO_x emissions; radiation; self-excited oscillation

摘要: 流体射入特定结构的突扩腔体会发生整体低频振荡, 这类射流称为自激振荡射流。射流振荡对近场和远场的湍流混合过程都具有重要影响。自激振荡射流能增强宏观上的大尺度搅动, 但同时却减弱了微观上的小尺度混合。以此为基础开发的自激振荡射流燃烧器能在不增加火焰长度的情况下增加火焰体积, 显著提高火焰辐射换热, 降低火焰温度, 降低热力型氮氧化物(NO_x)的生成。在工业水泥回转窑及其他窑炉的应用中, 长期的实践证明, 该燃烧器与以往的多喷嘴燃烧器相比, 降低 40%~60%的NO_x排放, 并降低了 5%~10%的单位产量燃料消耗。该文综述了射流振荡对湍流混合及火焰特性的影响, 亦对这种燃烧器的局限性做了分析讨论, 最后

给出利用自激振荡射流现象进一步发展工业燃烧器的建议。

关键词: 燃烧器; 湍流混合; NO_x; 辐射换热; 自激振荡射流

0 引言

流体经由一相对小的喷嘴射入一相对大的突扩腔体时, 构成的射流会自然地发生整体低频振荡^[1]。这种射流已应用于工业燃烧器, 称自激振荡射流(self-excited oscillating jet)燃烧器。该燃烧器^[2](国际标准化标为Gyro-ThermTM)是澳大利亚阿德莱德大学和燃料燃烧技术公司于 20 世纪 90 年代开发的新型低 NO_x燃烧器, 已在欧美等国的工业燃气窑炉上运行十余年^[3-7]。相比旋流、钝体和多射流等有悠久历史的传统燃烧器, 自激振荡射流燃烧器在降低NO_x排放和节能方面有很大的优势。多年来在水泥、玻璃等工业燃烧炉上的实践证明, 它们作为气体燃烧器的使用, 可降低 40%~60%的NO_x排放, 节约 5%~10%的燃料, 从而减少 5%~10% CO₂的排放^[3-5,7-8]。

研究发现, 射流自激振荡的存在是该类燃烧器实现节能减排的关键因素^[8]。

燃料与空气的混合过程对火焰燃烧的发生、发展及最终产物的形成具有重要影响, 尤其对工业扩散火焰更是如此。许多燃烧器都着眼于控制燃料与空气的混合来优化燃烧性能, 降低NO_x排放。例如, 工业上广泛应用的旋流燃烧器^[9]和钝体燃烧器^[10-11], 它们增强了燃料与氧料的混合, 提高了火焰的稳定性; 又例如, 高温空气燃烧技术^[12-13]和本文所述的自激振荡燃烧器, 它们的应用不仅降低NO_x的排放, 而且提高了燃烧热利用效率。

自激振荡射流燃烧器可应用于工业窑炉、炼钢炉和甚至电站锅炉等能耗大户, 故研究相关射流的混合特性和抑制NO_x生成的机制对我国借鉴、运用

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)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program(2007AA05Z312); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(10772006)。

和改善这种技术有重要意义。基于笔者对该类燃烧器开发和研究的多年经验^[8,14-22]，本文对该类燃烧器降低 NO_x 排放的机制与应用做简要介绍，并给出进一步发展的建议。

1 射流振荡对湍流混合的影响

1.1 射流的分类

射流的振荡是该类燃烧器能降低 NO_x 生成的关键因素^[8]，因此，探讨射流振荡对湍流混合的影响很有必要。Nathan与米建春等人^[8]根据射流是否发生整体振荡，将射流分为振荡射流和非振荡射流 2 类。振荡射流又依其是否由外力作用，分为外力型振荡射流和自激发型振荡射流。

1.2 外力激励振荡射流的混合特性

1.2.1 音频共振激励射流

使环境声音频率与射流涡脱落频率(无量纲频率 $St = 0.2 \sim 0.8$ ，其中Strouhal数 $St \equiv fd/u$ ， f 为大尺度拟序运动的频率， d 为喷嘴直径， u 为出口平均速度)相同，会使射流发生共振形成音频共振激励射流^[23-27]。其属于外力激励振荡射流，振荡频率较高($St = 0.2 \sim 0.8$)。音频激励射流能增加流场内大尺度结构的有序性和其发生、发展的概率，因而增加射流在近场的扩散角与标量衰减速率^[23,25-26,28-30]。研究还发现音频激励能使火焰体积大为减小，说明音频激励射流增加了湍流小尺度分子层面的混合速率^[30]。

1.2.2 机械式激励射流

射流的机械式激励是利用机械装置使射流产生振荡。机械式激励射流有多种类型^[14,31-33]，它们的共同特点是振荡频率较低，因而对应的Strouhal数低(这里的 St 比音频激励的要低 1~3 个数量级)。机械式激励射流也会增加近场大尺度拟序结构，并增加近场的扩散与衰减^[14,32,34]。米建春等人^[14]发现：对电动机带动喷嘴旋转的机械式旋进射流而言，由于施加了外界能量，近场区的局部应变率很高。而在远场区，该射流的局部应变率比简单直流射流的低很多，这是因为射流的整体旋进运动将湍流的小尺度能量重新分配到了大尺度运动上^[8]，使整个湍流能量在不同尺度上的分布发生了改变，而且这一改变传递到远场区，尽管那里旋进运动已不发生^[15]。

1.3 自激振荡射流的混合特性

1.3.1 自激拍打射流

流体通过某种结构的喷嘴，无需外力激励，可产生拟二维拍打运动^[35-37]。米建春等人^[16-17]发展的自激拍打射流喷嘴的结构如图 1(a)所示，而图 1(b)

给出的是射流的拍打图像。所有这类自激拍打射流装置产生的振荡 St 都比音频共振激励的 St 低 1~2 个数量级，说明自激拍打射流振荡的尺度更大、影响的范围更宽。射流的自激拍打运动也能增加近场的大尺度拟序结构，增加近场区的扩散与衰减^[16,35-36,38-39]。更重要的是，比较自激拍打射流与非拍打射流的能谱发现，自激拍打射流相比非拍打射流具有更多的低频能量和更少的高频能量^[16]。这说明自激拍打射流的大尺度拍打运动将湍流能量由小尺度转移到了大尺度。这符合热力学第一定律，即射流的大尺度振荡无外力激励，是射流自激励的，大尺度振荡的能量来自流体自身，更来自于流体的小尺度能量^[8]。

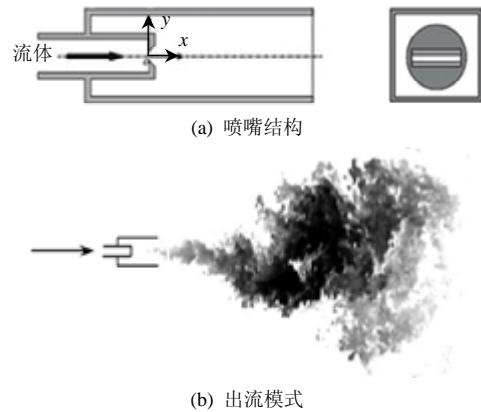


图 1 自激拍打射流

Fig. 1 Self-excited flapping jet

1.3.2 自激旋进射流

流体经由圆形喷嘴射入轴对称突扩腔体，在突扩腔体为特定尺寸时射流会发生整体旋进运动^[1](图 2)。腔内射流是不稳定的，有轴流模式与旋进模式 2 种形式，可通过改变腔体尺寸使射流维持在旋进模式^[1]。研究表明，该射流的振荡无量纲频率 St 数，而非 Re ，是决定该类射流混合特性的无量纲准则数^[18-19]，且 St 也比音频激励射流的低 1~2 个数量级^[18]。自激旋进射流增加了近场的衰减和扩散，其大尺度振荡发生所需的能量来源于对小尺度能量的减小(因而后者的份额相对降低)^[18]。值得指出，自激旋进射流与旋流射流的流动有差异亦有相似处：它们都有呈旋进运动的涡核结构，但自激旋进射流的流体自身无旋，而旋流射流的流体有旋^[40]；自激旋进射流和旋流射流都增强了近场区的衰减和扩散速率，但自激旋进射流减弱了小尺度分子的混合，而旋流射流却恰恰相反，它增强了小尺度分子的混合。理解这些混合特性对理解自激振荡射流火焰抑制 NO_x 生成具有重要帮助。

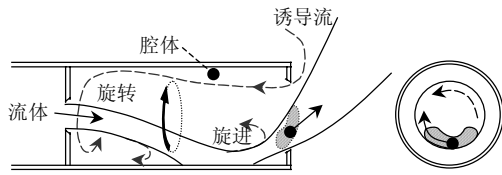


图2 自激旋进射流喷嘴结构与流体模式示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the self-excited precessing jet nozzle and its flow pattern

1.3.3 非圆形自激振荡射流

米建春等^[17]发现,流体经过非圆形孔板射入突扩腔体,也会形成自激振荡射流(图3)。特别是当喷嘴或入口孔板为三角形时,相比于自激旋进射流,前者振荡更易发生、更不易间断,且阻力损失更小^[20,41]。该装置和自激旋进射流都可应用于自激振荡射流燃烧器,应用于高温工业过程。由于上述特点,三角形自激振荡射流在应用上更具优势,特别有利于应用在工业煤粉炉上^[41]。

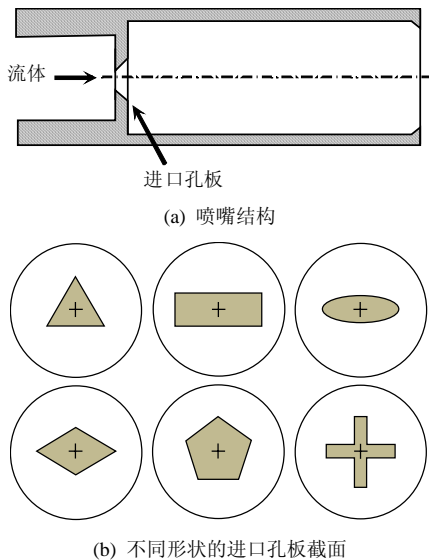


图3 非圆形孔板自激振荡射流喷嘴结构与各孔板截面示意图

Fig. 3 Examples of self-excited oscillating jet nozzles with non-circular inlet orifice

1.4 振荡射流对湍流混合影响的机制

射流做高频振荡时($St = 0.2 \sim 0.8$),流动的高频振荡会增加湍流小尺度混合速率。射流的音频共振和脉动燃烧技术^[42-43]都使射流局部产生高频振荡,增加了射流的近场扩散和衰减,也增加了射流的小尺度分子混合速率。

射流整体做低频振荡时($St = 0.0001 \sim 0.08$,比射流的高频振荡低1~3个数量级),流动的低频振荡会降低小尺度混合速率。自激振荡射流和机械式旋进射流都使射流产生低频振荡,都增加了射流的近场扩散和衰减,都减小了射流远场的小尺度分子混合

速率。特别是对自激振荡射流,其射流整体大尺度振荡的能量来源于小尺度能量的减少。

2 自激振荡射流对燃烧的影响

2.1 自激振荡射流火焰的基础研究

2.1.1 火焰体积与 NO_x 生成

Newbold等人^[44]对直流射流、旋流射流、钝体射流和自激振荡射流火焰的实验研究揭示了混合对扩散火焰的影响。图4(a)为直管燃料喷嘴;图4(b)为燃料管与下游腔体直接连接构成的自激振荡射流喷嘴,结构与后面的图6(b)所示的类似;图4(c)喷嘴的中心管为燃料喷嘴,环形的钝体将其包围,环形空气射流经过钝体后会在喷嘴出口处产生回流区;图4(d)喷嘴的中心管为燃料管,有旋的空气射流通过环形通道。所有燃烧器中心燃料管的直径均相等(5 mm)。他们实验时使用商业丙烷作为燃料,4个不同喷嘴的燃料流量保持相同。图4给出了4个喷嘴的结构形状和对应的8 s曝光火焰照片。不难看出,一方面,增加旋流和绕钝体的空气流流速会使火焰体积减小;另一方面,自激旋进射流比直流射流的火焰体积大许多,且火焰长度并未增加(图4(a)、4(b))。这些结果说明,对于旋流和钝体燃烧器,增加空气流的流速 u_a 会加快燃料与空气分子的混合、提高燃烧速率,因而导致火焰体积减小;

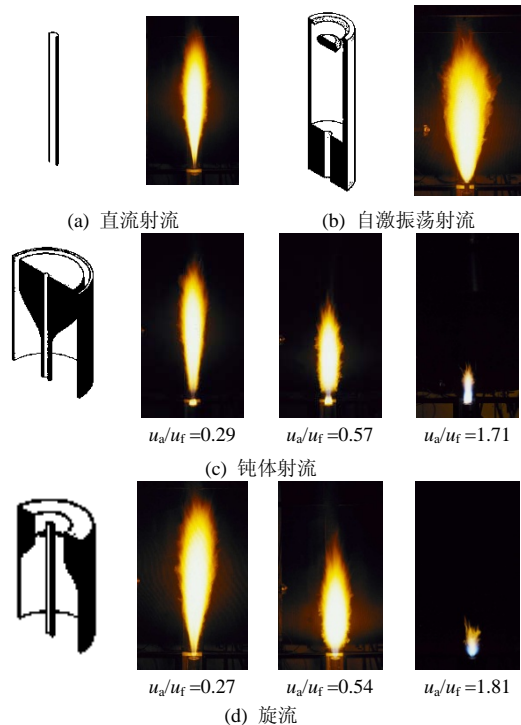


图4 喷嘴火焰照片(曝光8 s)
Fig. 4 Nozzles and long exposure (8 s) photographs of flames

而相比直流射流, 自激旋进射流的小尺度湍流混合速率更低, 导致火焰体积增大。实验测量了停留时间与火焰辐射的关系; 图 5 的结果说明, 碳黑停留时间与火焰辐射强度成正比。换言之, 通过加速外围空气流的流动, 旋流和钝体燃烧器增强了燃料分子与空气分子的混合, 提高了燃烧速率, 缩小了火焰体积, 缩短了炭黑在火焰中的停留时间, 从而减少了辐射传热。而自激振荡射流比简单直流射流的火焰体积大, 炭黑停留的时间长, 所以辐射强; 从另一方面讲, 这也说明自激振荡射流的小尺度分子混合速率低, 与前文的冷态分析是一致的。自激振荡射流火焰体积的增加并未导致其火焰长度的增加。因实际窑炉的几何尺寸固定, 不允许火焰长度过大, 自激振荡射流的这个特性使其极具工业应用的优势(工业燃烧的热传递主要是通过辐射传热实现的)。

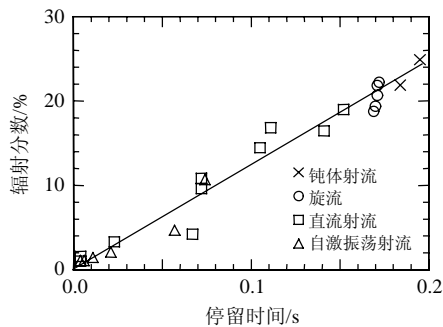


图 5 射流和旋流射流火焰停留时间与辐射分数的关系

Fig. 5 Relationship between radiant fraction and global residence time from

Newbold等人^[44]的实验还测量了 4 个燃烧器火焰的 NO_x 和CO排放数据。分析发现, 在空气与燃料的速度比 $u_a/u_f < 0.8$ 时, 相比其他 3 种射流火焰, 自激振荡射流火焰的 NO_x 和CO排放最低; 而当 $u_a/u_f > 0.8$ 时钝体射流和旋流射流由于空气流速过大使火焰吹熄, 导致CO排放巨大, 不利于实际应用。自激振荡射流 NO_x 的低排放是因其相对较大的辐射换热(图 5)降低了火焰温度, 这也和火焰停留时间与炭黑生成有关。

2.1.2 火焰炭黑生成

因气体中的细小固体颗粒物辐射占气体辐射换热总量的绝大部分, 所以气体火焰的辐射换热与火焰中炭黑的含量有很大关系。因此很有必要考察自激振荡射流火焰中的炭黑量。

Qamar等人^[45]通过实验测量了直流射流、自激振荡射流和钝体射流火焰中炭黑体积分数。他们发现, 在空气与燃料的速度比 $u_a/u_f = 0.857$ 时, 自激

振荡射流火焰的炭黑含量是直流射流火焰炭黑含量的 2.5 倍, 比钝体射流火焰炭黑含量多 1~2 个数量级。

燃料种类、火焰体积、火焰流场的应变率、混合、辐射和炭黑排放的相互关系很复杂, 目前仍不清楚, 但其相互影响的大致趋势已探明。正如上文对实验结果的讨论: 小尺度混合速率低的区域, 局部速度应变率也低, 这利于炭黑的生成。自激振荡射流降低了小尺度的分子混合速率, 降低了火焰局部应变, 火焰中炭黑含量增多。这就增加了辐射传热, 降低了火焰温度, 降低了热力型 NO_x 的生成, 这与燃烧实验中 NO_x 排放减少的结果是一致的^[44]。

另外, 因为自激振荡射流增强了燃料与空气的大尺度卷吸, 在射流远场区域, 炭黑被其周围大尺度卷吸作用下所包围的空气充分氧化, 因此, 烟气中炭黑的排放并不会增加。工业应用中, 自激振荡射流并不会导致 CO 排放的增加, 这表明炭黑在炉内已被燃尽(工业炉烟气 CO 的排放并不多时, 表明炉内整体为氧化性气氛, 此时烟气中炭黑的排放也相应很低)。

2.1.3 火焰的着火距离

已证实自激振荡射流火焰稳定性较好^[46-47]。相比于直流射流火焰, 自激振荡射流火焰的着火距离减小了 5~10 倍^[48]。有 2 个因素使自激振荡射流火焰着火距离减小: 1) 旋进动导致近场速度衰减加快, 使火焰更靠近喷嘴; 2) 旋进的大尺度结构增加了流场中的回流^[49-51]。实验测量也表明, 自激振荡射流火焰的峰值温度比直流射流火焰更低、更靠近喷嘴^[45,52]。另外, 射流的振荡也避免了火焰局部高温区固定在一个区域, 抑制了局部高温区的温度, 这也有利于提高燃烧器的寿命。

2.2 自激旋进射流燃烧器的应用

按图 6 设计的多种燃烧器结构都可使流经它的射流产生自激旋进动^[53-54]。图 6(a)给出的是最简单的结构, 经由它的射流时而短暂地停止旋进动, 这对用它做燃烧器不利。图 6(b)中显示的喷嘴腔体出口附近有一中心体(钝体), 能使射流发生的振荡不易中断, 但这也增加了阻力损失。图 6(c)中的燃烧器设置了二次风通道, 可在调节二次风风量的同时控制自激振荡射流的扩散角。图 6(d)在中心体内设置轴流出口, 以控制自激振荡的扩散角, 但这也增加了结构的复杂性。

在加拿大Lafarge公司的 2 MW 中试水泥回转窑上, 使用自激旋进射流燃烧器和多射流燃烧器

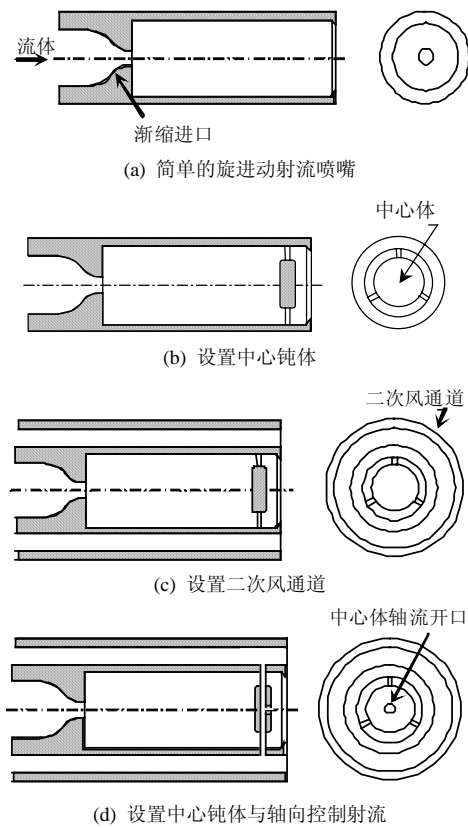


图6 自激旋进动射流燃烧器结构
Fig. 6 Arrangement of the self-excited oscillating jet nozzles

进行对比试验。结果发现，自激旋进动射流燃烧器产生的火焰体积更大且更明亮，说明火焰中有更多的炭黑发光，加强了辐射换热。测量又表明，前一燃烧器的使用使烟气中的NO_x排放降低约40%。另外，自激旋进燃烧器在相同的燃料消耗量下，因其燃烧效率提高，增加了约10%的水泥产量^[6,54](图7)。

将自激旋进燃烧器应用到Geelong(位于澳大利亚墨尔本附近)的水泥回转窑炉(100 MW)上替代多射流燃烧器后，多年运行发现，自激旋进燃烧器的使用使水泥产量增加约5%，燃料节约5%，且自激旋进燃烧器的使用使运行时火焰更宽、更明亮(图8)，还降低了50%的NO_x排放^[3,7]。自激振荡射流

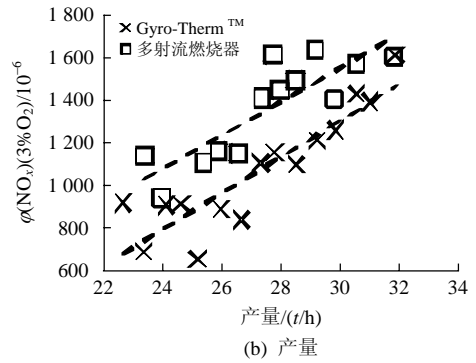
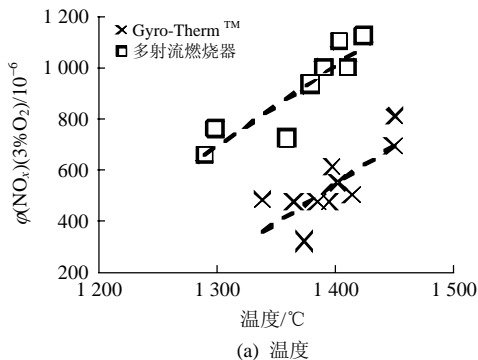


图7 燃烧器的NO_x排放与燃烧区域温度及产量的关系
Fig. 7 A comparison of NO_x emissions between the self-excited oscillating jet burner and a multi-jet burner as a function of burning-zone temperature, and clinker production

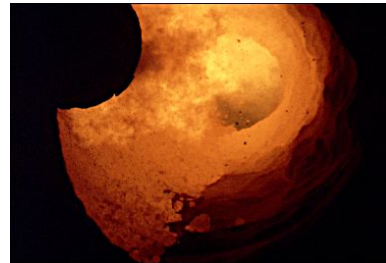


图8 火焰比较

图8 Flames produced by burners

应用于煤粉燃烧的工业运行数据也表明其能降低30%的NO_x排放，节约5%的燃料^[55]，并降低煤粉火焰着火距离至原来的1/5^[56-58]，但相比气体燃烧器，振荡射流在煤粉燃烧中的应用实例还很少，其抑制NO_x生成的机制还有待进一步研究。

2.3 自激振荡射流燃烧器的局限性

虽然自激振荡射流燃烧器应用于工业窑炉能极大降低NO_x排放并节约燃料，但其也有局限性。如，射流旋进动的连续性难以始终保持，燃料射流通过燃烧器的压力损失较大，难以适应不同燃料，难以在工业生产中控制运行负荷。在这个认知下，燃料燃烧技术公司和阿德莱德大学在米建春等人发明^[17]的自激振荡射流喷嘴的基础上开发了以三角形喷嘴(图3)为主的第3代燃烧器。相比第1代产品，

新一代燃烧器降低了燃料射流的压力损失, 实现了振荡的连续性, 且更适用于煤粉燃烧^[20,41], 但仍同样具有无法主动控制燃烧器负荷的缺陷。本文作者目前正在研究新的方法实现燃烧负荷的主动控制, 目的是按实际需要控制射流火焰的高度、体积和扩散角等燃烧特性, 该方向也有新成果发表^[21-22]。

3 结论

基础研究发现, 射流自激振荡对湍流混合和火焰燃烧都具有显著的影响。一方面, 振荡增加了大尺度搅动, 导致燃料、氧料和高温燃烧烟气大面积的宏观“混合”, 造成局部富燃和富氧; 另一方面, 它也降低了局部燃料和氧料的分子混合, 却使火焰局部应变率降低, 使火焰中炭黑量增加; 炭黑量的增加提高了火焰的辐射放热, 因此降低了燃烧区域的温度, 进而减少了热力型 NO_x 的排放。工业应用表明, 自激振荡射流燃烧器不仅使燃烧火焰稳定, 污染物 NO_x 排放降低约 40%~60%, 并使燃料消耗减少约 5%~10% (即降低了 5%~10% 的碳排放), 还增加了约 5%~10% 的工业生产产量。

自激振荡射流燃烧器还未在国内过程及制造工业(如水泥、玻璃、陶瓷、冶金、炼钢)燃烧炉上得到应用。在这样的情况下, 作者认为, 改善该类燃烧技术对国内发展节能减排燃烧器具有重要意义。现有自激振荡射流燃烧技术, 尽管节能减排效果明显, 但还无法在运行过程中适应燃料和负荷的变化, 主动控制自身的混合特性, 达到适时最佳燃烧效果。为了克服这个缺陷, 本文作者目前正在尝试利用侧向微细射流与自激振荡射流燃烧技术相结合, 发展一种新型高效、低污染、混合可控型燃烧器。

致 谢

本文的大部分研究工作是近二十年来在澳大利亚研究委员会(ARC)和燃料燃烧技术(FCT)公司的支持下开展的。作者在此感谢阿德莱德大学能源技术中心的成员为该研究做出的巨大贡献, 同时也感谢审稿人对本工作的认同和给予的建议。

参考文献

- [1] Nathan G J, Hill S J, Luxton R E. An axisymmetric 'fluidic' nozzle to generate jet precession[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 370(1): 347-380.
- [2] Luxton R E, Nathan G J. Mixing of fluids: AU, 624528 [P]. 1988-01-08.
- [3] Manias C G, Balendra A S, Retallack D J. New combustion technology for lime production[J]. *World Cement*, 1996, 27(12): 34-39.
- [4] Manias C G, Nathan G J. The precessing jet gas burner—a low NO_x burner providing process efficiency and product quality improvements [J]. *World Cement*, 1993, 4(3): 4-11.
- [5] Manias C G, Nathan G J. Low NO_x clinker production[J]. *World Cement*, 1994, 25(5): 54-56.
- [6] Rapson D, Stokes B, Hill S J. Kiln flame shape optimization using a Gyro-Therm gas burner[J]. *World Cement*, 1995, 26(7): 2-5.
- [7] Videgar R. Gyro-therm technology solves burner problems[J]. *World Cement*, 1997, 28(11): 39-41.
- [8] Nathan G J, Mi J, Alwahabi Z T, et al. Impacts of a jet's exit flow pattern on mixing and combustion performance[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, 32(5-6): 496-538.
- [9] Zhou L X, Chen X L, Zhang J. Studies on the effect of swirl on NO formation in methane/air turbulent combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2003, 29(2): 2235-2242.
- [10] Shi X F, Qian R Z, Shi H S, et al. Investigation of the optimization of slit width for a slitted bluff-body burner: pulverized coal ignition and flame stabilization[J]. *Combustion Science and Technology*, 1997, 124(1): 1-15.
- [11] Shi X F, Qian R Z, Zhen Y P, et al. A new principle of ignition and flame stability for low-volatile pulverized coal with slitted bluff-body burner[J]. *International Journal of Energy Research*, 1996, 20(11): 933-941.
- [12] Cavaliere A, de Joannon M. Mild combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(4): 329-366.
- [13] 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.
- [14] Mi J, Nathan G J. Statistical analysis of the velocity field in a mechanical precessing jet flow[J]. *Physics of Fluids*, 2005, 17(1): 015102-1-015102-17.
- [15] Mi J, Kalt P, Nathan G J. Velocity measurements in a circular jet from an orifice plate with high initial turbulence intensity[J]. *Dynamics of Continuous, Discrete & Impulsive Systems B*, 2007, 14(8): 19-29.
- [16] Mi J, Nathan G J, Luxton R E. Mixing characteristics of a flapping jet from a self-exciting nozzle[J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 2001, 67(1): 1-23.
- [17] Mi J, Nathan G J, Luxton R E. Family of Oscillating Jets: US 6685102[P]. 2004-5-27.
- [18] Mi J, Nathan G J. Self-excited jet-precession Strouhal number and its influence on downstream mixing field[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, 19(6): 851-862.
- [19] Mi J, Nathan G J. Influence of precession strouhal number on the self-excited precessing-jet flame[C]. *Proceedings of the Ninth Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization*, Beijing, 2008.
- [20] Lee S K, Lanspeary P V, Nathan G J, et al. Low kinetic-energy loss oscillating-triangular-jet nozzles[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27(5): 553-561.
- [21] Cao Y, Wu J, Mi J, et al. Flame structure of a jet flame with penetration of side micro-jets[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, 16(6): 861-866.
- [22] Mi J, Cao Y, Zhou Y. Jet flames under perturbation of side mini-jets [C]. *Proceedings of the Ninth Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization*, Beijing, 2008.
- [23] Hussain A K M F, Hasan M A Z. The 'whistler-nozzle' phenomenon [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 134(1): 431-458.
- [24] Crow S C, Champagne F H. Orderly structure in jet turbulence [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971, 48(3): 547-591.

- [25] Reynolds W C, Parekh D E, Juvet P J D, et al. Bifurcating and blooming jets[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35(1): 295-315.
- [26] Hill W G, Greene P R. Increased turbulent jet mixing rates obtained by self excited acoustic oscillations[J]. Journal of Fluids Engineering, 1977, 99(3): 520-525.
- [27] 曹红加, 聂超群, 那永洁, 等. 声波对锥形预混火焰表面温度脉动的影响[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 201-204.
Cao Hongjia, Nie Chaoqun, Na Yongjie, et al. Response of conical premixed flame surface temperature fluctuation to acoustic perturbation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 201-204(in Chinese).
- [28] Abell C J. Acoustic coupling in a turbulent flow[C]. Proceedings of the 6th Australasian Hydraulic and Fluid Mechanics Conference, Adelaide, 1977.
- [29] Parekh D E, Reynolds W C, Mungal M G. Bifurcation of round air jets by dual-mode acoustic excitation[C]. AIAA, 25th Aerospace Sciences Meeting, Reno, 1987.
- [30] Lakshminarasimhan K, Ryan M D, Clemens N T, et al. Mixing characteristics in strongly forced non-premixed methane jet flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 1617-1624.
- [31] Lai J C S, Simmons J M. Instantaneous velocity measurements in a periodically pulsed plane turbulent jet[J]. AIAA Journal, 1980, 18(12): 1532-1534.
- [32] Simmons J M, Lai J C S, Platzer M F. Jet excitation by an oscillating vane[J]. AIAA Journal, 1981, 19(6): 673-676.
- [33] Simmons J M, Plazer M F, Smith T C. Velocity measurements in an oscillating plane jet issuing into a moving air stream[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 84(1): 33-53.
- [34] Schneider G M, Hooper J D, Musgrove A R, et al. Velocity and Reynolds stresses in a precessing jet flow[J]. Experiments in Fluids, 1997, 22(6): 489-495.
- [35] Viets H. Flip-flop jet nozzle[J]. AIAA Journal, 1975, 13(10): 1375-1379.
- [36] Piatt M, Viets H. Conditioned sampling in an unsteady jet[C]. AIAA Aircraft Systems and Technology Meeting, New York, 1979, 1857-1866.
- [37] Raman G, Rice E J, Cornelius D M. Evaluation of flip-flop jet nozzles for use as practical excitation devices[J]. Journal of Fluids Engineering, 1994, 116(3): 508-515.
- [38] Favre M M, Binder G, Hac T V. Generation of oscillating jets [J]. ASME Transactions Journal of Fluids Engineering, 1981, 103(4): 609-614.
- [39] Binder G, Favre M M. Some characteristics of pulsating or flapping jets[C]. Unsteady Turbulent Shear Flows-Proceedings of the Symposium. Toulouse, France, 1981.
- [40] Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(2): 93-161.
- [41] Lee S K. Study of a naturally oscillating triangular jet flow [D]. Adelaide: The University of Adelaide, 2008.
- [42] Candel S M. Combustion instabilities coupled by pressure waves and their active control[J]. Symposium (International) on Combustion, 1992, 24(1): 1277-1296.
- [43] Zinn B T. Pulsed combustion: recent applications and research issues[J]. Symposium (International) on Combustion, 1992, 24(1): 1297-1305.
- [44] Newbold G J R, Nathan G J, Nobes D S, et al. Measurement and prediction of NO_x emissions from unconfined propane flames from turbulent-jet, bluff-body, swirl, and precessing jet burners [J]. Symposium (International) on Combustion, 2000, 28(1): 481-487.
- [45] Qamar N H, Nathan G J, Alwahabi Z T, et al. The effect of global mixing on soot volume fraction: measurements in simple jet, precessing jet, and bluff body flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 1493-1500.
- [46] Nathan G J, Luxton R E. A stable, un-premixed gas burner with infinite turn-down ratio[C]. 1st European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Portugal, Lisbon, 1988.
- [47] Nathan G J, Luxton R E. Flame stability and emission characteristics of the enhanced mixing burner[C]. 2nd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Portugal, Algarve, 1991.
- [48] Nathan G J, Turns S R, Bandaru R V. The influence of jet precession on NO_x emissions and radiation from turbulent flames[J]. Combustion Science and Technology, 1996, 112(1): 211-230.
- [49] Wong C Y, Lanspeary P V, Nathan G J, et al. Phase-averaged velocity in a fluidic precessing jet nozzle and in its near external field [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2003, 27(5): 515-524.
- [50] Wong C Y, Nathan G J, Kelso R M. The naturally oscillating flow emerging from a fluidic precessing jet nozzle[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 606(1): 153-188.
- [51] Wong C Y, Nathan G J, O'Doherty T. The effect of initial conditions on the exit flow from a fluidic precessing jet nozzle[J]. Experiments in Fluids, 2004, 36(1): 70-81.
- [52] Smith E J, Nathan G J, Qamar N H, et al. Comparison of thermocouple temperature measurements of simple and precessing jet propane flames[C]. 5th Asia-Pacific conference on combustion, Adelaide, 2005.
- [53] Parham J J. Control and optimisation of mixing and combustion from a precessing jet nozzle[D]. Adelaide: The University of Adelaide, 2000.
- [54] Parham J J, Nathan G J, Smart J P, et al. The relationship between heat flux and NO_x emissions in gas fired rotary kilns[J]. Journal of the Institute of Energy, 2000, 73(1): 25-34.
- [55] Nathan G J, Hill S J. Full scale assessment of the influence of a precessing jet of air on the Performance of pulverized coal flame in a cement kiln[C]. Proceedings of the 6th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Portugal, 2002.
- [56] Smith N L, Megalos N P, Nathan G J, et al. The role of fuel rich clusters in flame stabilisation and NO_x emission reduction with precessing jet P. F. flames[J]. Symposium (International) on Combustion, 1998, 27(2): 3173-3180.
- [57] Smith N L, Megalos N P, Nathan G J, et al. Precessing jet burners for stable and low NO_x pulverised fuel flames-preliminary results from small-scale trials[J]. Fuel, 1998, 77(9-10): 1013-1016.
- [58] Smith N L, Nathan G J, Zhang D K, et al. The significance of particle clustering in pulverized coal flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2003, 29(1): 797-804.



米建春

收稿日期: 2009-09-07。

作者简介:

米建春(1961—), 男, 博士, 教授, 1995~2005年在澳大利亚阿德莱德大学进行自激振荡射流燃烧方面的研究, 2006年回国任北京大学教授及特聘研究员, 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, jemi@coe.pku.edu.cn;

李鹏飞(1986—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为自激振荡射流燃烧与无焰燃烧。

(责任编辑 王庆霞)