

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2015.07.002

多孔介质燃烧技术现状

□ 同济大学机械与能源工程学院(201804) 秦朝葵 郑璐

摘 要: 介绍了多孔介质燃烧技术的概念及其在国内外的的发展,并着重阐述了该技术的试验研究和数值模拟情况,以及该技术在工业方面的应用。多孔介质燃烧技术具有显著的低排放、高燃烧强度、节能、结构紧凑、可燃用低热值燃气等优势。由于其特殊的结构形式,在处理低热值气体方面具有广阔的前景。

关键词: 多孔介质燃烧 低热值 火焰面 节能 低排放

Present Status of Porous Medium Combustion Technology

School of Mechanical Engineering, Tongji University Qin Chaokui, Zheng Lu

Abstract: The concept of the porous medium combustion technology was briefly introduced in this paper, with main focuses on the experimental study and numerical simulation and its application in the industrial processes. Porous media combustion features lower emissions, high combustion intensity, high energy-efficiency, compactness, and being capable of handling low calorific value gas and so on. Due to its special structure, it has promising prospects in low calorific value gas treatment.

Keywords: porous medium combustion low calorific value flame surface energy-saving low emissions

1 前言

化石能源一直是世界能源结构的主体,当今世界80%以上的能源都来自于化石燃料的燃烧。近年来可再生能源等技术发展较快,但受资源总量、技术水平及工业基础的限制,在相当长的时间内将维持化石能源占能源消费主导地位的状态。目前我国正处于高速经济发展阶段,能源与环境对经济发展的制约作用日益明显。然而在能源利用上,一方面存在效率低、污染环境、浪费严重等问题,另一方面,大量的低品位能源未被开发和利用。要建立可持续发展的经济模

式,改善能源结构,改进能源消费方式,提高能源有效利用率,必须充分利用工业生产及能源生产中的各种低热值燃气,实现常规能源的高效清洁利用。

低热值燃气并没有明确的概念。通常根据气体燃料的热值将其分为3类^[1],大于15.07MJ/m³为高热值燃气,6.28MJ/m³~15.07MJ/m³为中热值燃气,而热值小于6.28MJ/m³的为低热值燃气。工业中常见的低热值气体燃料主要有:化工过程低热值尾气、高炉煤气、石油化工行业冶炼尾气、煤矿低浓度瓦斯气等。在自然界及日常生活中存在大量的生物质气化气,如生物质热解产生的C₂H₂、CO、CH₄等可燃气体,养殖和酿

造行业产生的沼气，垃圾气化以甲烷为主的可燃气体也属于低热值气体。此外，低热值气体又可分为富氧和无氧低热值气体。VOCs及煤矿乏风为典型的富氧低热值气体，而高炉煤气、化工过程尾气、生物质热解气化气等均为无氧低热值气体。根据其性质不同，利用方式也不尽相同。

2004年中国工程项目报告^[2]指出：我国每年排空近200亿m³焦炉煤气，约合1 100万t标煤；每年排空的冶炼尾气占总量20%以上，约合880万t标煤；每年产生的沼气折合约730万t标煤；若我国可利用量的3.5亿t秸秆的10%用来生产秸秆气，则每年产量约折合900万t标煤；若全部收集利用1.1亿t生活垃圾产生的填埋气体，相当于利用天然气10亿m³~70亿m³。煤石厂瓦斯、污水处理厂的沼气、垃圾填埋气等这些可再生资源，每年排空达到430亿m³，若加以利用，相当于增加8个“西气东输”，用于发电可达1 200亿kWh。同时直接排放的低热值气体内的某些成分也是温室气体，如甲烷的温室效应相当于二氧化碳的21倍，对臭氧的破坏能力是二氧化碳的7倍^[3]。

低热值气体的可燃成分稀薄，使用常规燃烧技术难以有效利用，如何实现该种气体的有效燃烧、减缓直接排放造成的环境问题，一直是燃烧界的难题。开发新型的低热值气体燃烧技术，对缓解能源紧张、提高能源利用率、改善居住环境，具有重要的意义。而多孔介质燃烧技术正是能够满足这些要求的新型燃烧技术。

2 多孔介质燃烧技术概述

多孔介质燃烧技术，又称为PMC技术（Porous Medium Combustion）。多孔介质燃烧过程中，由于多孔基体的存在，预混气体流经多孔介质的同时，在多孔介质中进行燃烧；气体在多孔介质孔隙内部产生漩涡、分流与汇合，剧烈扰动，燃烧产生的热量通过多孔介质的导热和辐射效应不断地向上游传递并预热新鲜燃气，同时利用多孔介质自身的蓄热能力回收燃烧产生的高温烟气余热。这样不仅提高气体燃料的燃烧效率，降低污染物排放，而且能够显著拓宽燃烧贫燃极限，同时无需传统的换热设备来进行燃烧余热的回收和传递，在减小设备体积、实现燃烧设备小型化方

面具有强大的优势，为天然气等气体燃料，特别低热值气体燃料高效清洁燃烧提供一条新途径。

多孔介质燃烧原理如图1。

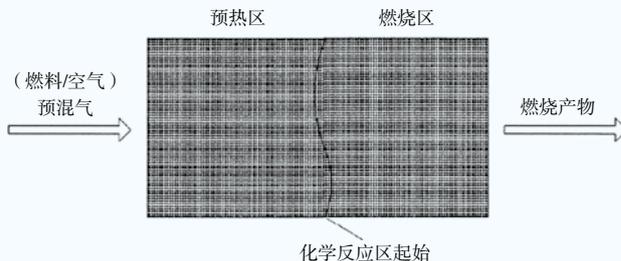


图1 多孔介质燃烧原理

多孔介质内预混燃烧系统的热运输循环原理如图2。

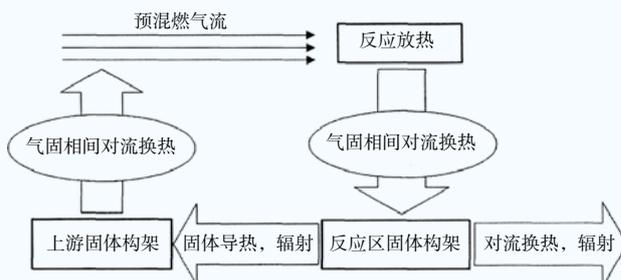


图2 多孔介质内预混燃烧系统的热运输循环原理

与传统自由空间燃烧火焰相比，多孔介质燃烧技术是一种新颖独特的燃烧方式，其特点包括以下几点：

- (1) 功率大、极低的CO和NO_x排放量、燃烧安全稳定；
- (2) 多孔介质燃烧器的结构紧凑，尺寸大大减小，制造成本低，系统效率较高，消除了额外能耗；
- (3) 燃烧器对燃料的适应性很强，当量比调节范围很宽，可燃极限最小当量比为0.026，可实现极稀薄气体或超低热值气体稳定燃烧；
- (4) 燃烧热强度可达3 500kW/m²（常规燃烧器热强度一般为3 000 kW/m²），燃烧器系统功率调节范围可增大到1:50（常规预混式燃烧器的功率调节范围只有1:2.5）。

由于多孔介质材料特殊的性质，对燃料有很好的适应性，因此可以设计出低热值气体燃烧系统，使低热值气体稳定燃烧，实现工业中低热值气体能量的极限回收和高效清洁利用。多孔介质燃烧器可以很方便

地用于燃烧气体或液体燃料,包括:天然气、生物质气、发动机燃料等多种燃料,其在燃烧煤油、庚烷、等液体燃料时,表现出很好的燃烧稳定性、功率调节范围和辐射输出能力。由多孔介质材料作为内芯的燃烧器可应用于家用采暖系统、动力设备、汽车发动机及各种各样的工业用途。

多孔介质材料具有足够高的硬度和脆性,但缺乏一定的刚度和韧性,基本不具有机械加工性能。多孔介质材料的高孔隙率结构,使得其本身力学性能下降,且随着孔隙率的提高,力学性能下降显著,且在经历高温波冲击时,热膨胀变形引起的热应力会导致多孔陶瓷的抗震性降低,影响和制约其在高温燃烧蓄热领域中的应用。

3 多孔介质燃烧的研究进展

3.1 国内研究进展

国内多孔介质燃烧技术的研究相比国际上起步较晚,上世纪90年代开始南京理工大学最早开始相关方面的研究,而从2000年开始,浙江大学、上海交通大学^[4]、大连理工大学、中国科技大学等对多孔介质燃烧技术进行了深入全面的研究。其研究工作主要集中在多孔介质内低热值气体燃烧利用、多孔介质燃烧特性及传热机理方面。

岑可法等^[5]研究了大型低热值气体往复多孔介质燃烧利用系统、多孔介质内低热值气体燃烧利用、多孔介质燃烧特性及传热机理。该项技术可应用于工业和民用诸多领域,如石油冶炼、多孔催化燃烧、空气中有机挥发物去除、污染物控制等领域,从而满足节能和环保的要求。

王恩宇^[6]设计了一种新型的渐变型多孔介质燃烧器,对空气和天然气的预混气体在其内稳定燃烧的特性、非稳态特性进行了详细研究。获得了渐变型多孔介质中的污染物排放、温度分布、压降随当量比和燃烧强度的变化特性,并研究了渐变型多孔介质中稳定燃烧的气流速度和当量比极限。

赵平辉^[7]采用实验和数值模拟的方法,对单层和双层多孔介质燃烧器内的火焰传播及驻定机理进行了分析研究,结果表明单层多孔介质燃烧器不利于火焰驻定在多孔介质内,而双层则易于把火焰驻定在交界

面附近,可防止回火和吹脱。

史俊瑞^[8]通过实验和数值模拟方法对火焰面的移动特性进行研究,结果表明火焰面移动速度和混合气体的当量比、混合气体入口速度、多孔介质的材料特性等因素有关。

3.2 国外研究进展

自1971年英国学者提出从燃烧产物中提取热量预热反应物的热量回流概念以来,多孔介质燃烧技术的研究便蓬勃发展起来。目前,包括美国、日本、德国、澳大利亚、俄罗斯、新加坡等国家均对多孔介质燃烧进行了深入而全面的研究,并且在机理研究的基础上向工业化方向发展。

前苏联的Babkin课题组从上世纪80到90年代在多孔介质燃烧方面做出了创新性的工作,其研究的内容涉及火焰面在多孔介质中传播及驻定机理^[9]、多孔介质燃烧器内的火焰面特性^[10],发现在多孔介质燃烧器中会出现火焰面倾斜的现象,当燃烧器的直径小于一定值后,火焰面倾斜现象将消失,火焰向上游传播时火焰面的稳定性远远好于火焰向下游传播的稳定性以及多孔介质内燃烧不稳定现象^[11,12,13],近年来该课题组对多孔介质燃烧机理进行了更为深入的分析。

Min等人^[14]采用实验和数值模拟的方法,研究了丙烷和空气的混合物在泡沫陶瓷中的燃烧情况。在没有外加热源的情况下,仅靠燃烧器内部的热量反馈,燃料的可燃极限和火焰的稳定性均得到延伸,且实验结果与模拟结果吻合得比较好。

Hayashi^[15]使用三维数学模型模拟正庚烷和空气在双层多孔介质燃烧器内的预混燃烧。研究表明在过剩空气系数为1到1.8时火焰能够稳定在双层多孔介质的交界处。但是当过剩空气系数或者功率较小的时候,火焰稳定在扩散层内,为了避免回火,Hayashi建议在扩散层内采用小孔径的多孔介质。

Barra和Ellzey^[16]等人用一维模型模拟了甲烷和空气预混气体在双层多孔介质燃烧器内燃烧的火焰稳定性问题,并考察了这两段多孔介质的导热系数、传热系数和辐射特性对火焰稳定范围的影响。

Foutko等^[17]通过能量守恒原理在理论上推导了火焰面移动速度与多孔介质燃烧温度、散热损失、混合气体入口速度及绝热燃烧温度之间的关系。除理论分析外,研究者也从实验和数值模拟方面对火焰面移动

进行了研究。

Bubnovich等^[18]把多孔介质分为预混区、反应区、蓄热区3段,通过数值模拟及理论计算对气体在多孔介质燃烧器内的火焰面移动及火焰面形态进行分析。结果表明火焰面并不是无限薄的,并预测了火焰面的厚度。

Saveliev等^[19]试验研究了稀薄的氢气-空气混合气在多孔介质燃烧器中的燃烧情况,试验中观测到局部高温结构,其结构主要是由多孔介质空隙结构尺寸下传热及扩散的不稳定性引起的,在后期的实验中观测到明显的火焰面倾斜现象。

Dobrego等^[20]通过理论分析的方法研究了气体过滤燃烧中的火焰面不稳定性热力学原理,研究证明火焰面的一个小的温度扰动都将引起火焰面一定角度的倾斜,这种火焰面倾斜或稳定的正反馈机制是由系统的热物理特性所引起的。Dobrego等^[21]接着通过试验及数值模拟的方法验证并分析了多孔介质燃烧器内的火焰面倾斜不稳定性现象。

4 工业应用现状及前景

目前在日本、德国和美国,PMC技术已成功地应用于冶金、机械、化工、陶瓷等工业部门的一些燃气炉窑上。荷兰能源研究中心率先开发研制了泡沫陶瓷表面炉^[22]。Trimis^[23]等设计了一台换热器与燃烧器一体化的多孔介质燃烧器样机,体积比已有的燃烧器和热交换器减小20倍,而负荷调节范围分别达1:10和1:20,烟气温度可以降低到低于水蒸气凝结温度,有效提高了系统热效率,而且污染物排放量很低。瑞典的MEGTEC公司^[24]设计的多孔介质燃烧器,运行时温度分布均匀,污染物排放低(NO_x 排放几乎为0),低热值气体的处理效率可达98%。该公司的第三台煤矿瓦斯氧化处理装置处理甲烷浓度0.9%的煤矿瓦斯250 000 Nm^3/h ,富余的热量产生的蒸汽可带动6MW的汽轮机运行发电。一些学者利用多孔介质的蓄热作用,采用循环往复式燃烧方式的多孔介质燃烧器,可燃极限最小可达当量比为0.026^[25],可以实现极稀薄混合气或超低热值的气体稳定燃烧,瑞典的ADIEC公司已成功应用在汽车喷漆车间排气中有机污染物的燃烧净化^[26]。

但是由于缺乏产学研的渠道和没有解决多孔介质的寿命问题,PMC技术目前在国内没有实现工业化,宝钢研究院^[27]在2010年8月在一台2MW功率的加热炉上实现了多孔介质燃烧技术的应用,填补了国内的空白。

多孔介质燃烧的用途大致如下:

(1) 民用加热器。多孔介质燃烧器可用于民用加热器与暖风机中。由于调节比大,在大功率条件下启动可以减小污染物排放,温度正常时,可以方便地调小热负荷输出以减小能源消耗。

(2) 多孔介质燃烧器可与预混式工业燃烧器联合利用。常规预混式燃烧器的功率调节范围只有1:2.5,当其环形多孔介质燃烧器联合使用时,系统功率调节范围可达到1:50,且不会对污染物的排放造成影响。

(3) 干燥器的空气加热系统。干燥器利用燃气燃烧后产生的烟气与冷空气以一定的比例混合使其达到合适温度来作为干燥介质。在许多干燥器中,混合气体的热量是直接传给干燥物的。

(4) 燃气轮机燃烧室。目前燃气轮机燃用预混燃气可达到低 NO_x 与CO排放。但它的功率降到额定功率的50%时,燃气轮机里的燃烧过程将变得很不稳定。此时,就需要切换为扩散燃烧方式, NO_x 与CO的排放会变得较高,或者关闭部分燃烧器,这又会使燃气轮机温度分布不均而减少使用寿命。但是应用多孔介质燃烧室可以克服这两方面的缺点。

(5) 超绝热燃烧发动机、内燃机。多孔介质既有利于燃烧又可以优化环境,既可以实现超低污染物的排放,又可以通过蓄热作用降低排热损失。

(6) 蒸汽发动机。它采用多孔介质燃烧器作为燃烧系统,缩小了系统的体积,可以用在火车和大型的机车上。

(7) 低热值气体燃烧装置。往复式多孔介质燃烧器内的火焰温度比自由空间中的普通火焰理论值高出13倍,可燃极限最小可达当量比为0.026,可以实现极稀薄混合气或超低热值的气体稳定燃烧。

5 结论

由于多孔介质特殊的结构形式,其应用范围相当广泛,已在国内外取得了飞速发展。多孔介质燃烧器

不仅可以代替原来常规的燃烧器,大大改进其工作特性,还可以在原来常规燃烧器无法应用的场合使用,其在处理低热值气体方面具有广阔的应用前景。

参考文献

- 1 娄马宝. 低热值气体燃料(高炉煤气)的利用[J]. 燃气轮机技术, 2000; 13(3): 16-18
- 2 戴彦德. 燃气资源合理采集科学利用空排燃气. 中国节能服务导刊, 2005; 7: 25-27
- 3 政府间气候变化委员会. 2006年IPCC的国家温室气体清单指南(中文版). 全球环境战略研究所, 2006
- 4 郑中青. 天然气在惰性多孔介质内预混燃烧的数值模拟研究. 上海: 上海交通大学, 2007
- 5 王关晴, 程乐鸣, 郑成航等. 往复热循环多孔介质“超焔燃烧”特性. 化工学报, 2009; 60(2): 435-442
- 6 王恩宇. 气体燃料在渐变型多孔介质中的预混燃烧机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004
- 7 赵平辉. 惰性多孔介质内预混燃烧的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007
- 8 史俊瑞. 多孔介质中预混气体超绝热燃烧机理及其火焰特性的研究. 大连: 大连理工大学, 2008
- 9 Babkin VS, Drobyshovich VI, Laevskii IM, Potytniakov SI. On the Mechanism of Combustion Wave-Propagation in a Porous-Medium during the Gas Filtration. Doklady Akademii Nauk Sssr. 1982; 265(5): 1157-1161
- 10 Korzhavin AA, Bunev VA, Babkin VS. Flame propagation in porous media wetted with fuel. Combustion Explosion and Shock Waves. 1997; 33(3): 306-314
- 11 Minaev SS, Potytnyakov SI, Babkin VS. Thermal-Stability of Distorted Gas Flame in Porous-Media. Combustion Explosion and Shock Waves. 1994; 30(6): 761-763
- 12 Minaev SS, Potytnyakov SI, Babkin VS. Combustion Wave Instability in the Filtration Combustion of Gases. Combustion Explosion and Shock Waves. 1994; 30(3): 306-310
- 13 Kakutkina NA, Babkin VS. Propagation of spherical gas filtration combustion waves in inert porous media. Combustion Explosion and Shock Waves. 1999; 35(1): 53-59
- 14 M in D K, Sh in E D. Laminar premixed flame stabilized inside a honey comb ceramic [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991; 34(2): 341-356
- 15 Hayashi T C, Malico I, Pereira J C F. Three-dimensional modeling of two-layer porous burner for household application [J]. Computers and Structures, 2004; 82: 1543-1550
- 16 Barra A J, Diepvens G, Ellzey J L, Henneke M R. Numerical study of the effects of material properties on flame stabilization in a porous burner [J]. Combustion and Flame, 2003; 134: 369-379
- 17 Foutko SI, Shabunya SI, Zhdanok SA, Kennedy LA. Superadiabatic combustion wave in a diluted methane-air mixture under filtration in a packed bed. Symposium (International) on Combustion. 1996; 26(2): 3377-3382
- 18 Bubnovich VI, Zhdanok SA, Dobrego KV. Analytical study of the combustion waves propagation under filtration of methane-air mixture in a packed bed. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006; 49(15-16): 2578-2586
- 19 Saveliev AV, Kennedy LA, Fridman AA, Puri IK. Structures of multiple combustion waves formed under filtration of lean hydrogen-air mixtures in a packed bed. Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion. 1996; 3369-3375
- 20 Dobrego KV, Zhdanok SA. Theory of thermo hydrodynamic instability of the front of filtration combustion of gases. Combustion Explosion and Shock Waves. 1999; 35(5): 476-482
- 21 Dobrego KV, Zhdanok SA, Zaruba AI. Experimental and analytical investigation of the gas filtration combustion inclination instability. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2001; 44(1): 2127-2136
- 22 Boum a P H, Goey D. Premixed combustion on ceramic foam burners [J]. Combustion and Flame, 1999; 119: 133-143
- 23 Trim is D, Durst F, Pick enacker O, et al. Porous medium combustor versus combustion systems with free flame. Personal communication
- 24 Energy from Coal Mine Ventilation Air Methane. 2011 [cite; Available from: <http://www.megtc.com/energy-from-coal-mine-ventilation-methane-p-682-l-en.html>]
- 25 Hoffmann JG, E chigo R, Yoshida H, and Tada S. Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system. Combustion and Flame. 1997; 111: 32-46
- 26 Commercial report. A new method of destroying organic pollutants in exhaust air. ADTEC Co., Ltd.. 1990
- 27 饶文涛. 钢铁厂节能温室气体减排现状及对策[J]. 宝钢技术, 2008; 3(6): 17-21