

# Exploration on the Combustion and Utilization of Coal Mine Methane with Low Concentration

Qingzhao Li, Baiquan Lin

School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, National Engineering Research Center for Coal Gas Control, Xuzhou, Jiangsu, China, 221116  
qingzhaolee@yahoo.com.cn, lbq21405@126.com

**Abstract:** In this paper, the current research status of combustion and oxidation technology used for coal mine methane with low concentrations and ventilation air methane (VAM) of our research team are summarized and partial research results has been listed and displayed. Using filtration combustion experimental units, the typical flame structure and temperature profiles of porous burner were obtained. By the self-designed VAM oxidation apparatus, the axial temperature profiles in the experimental unit with VAM reciprocating flow were measured. The conception of combustion and energy utilization system used for coal mine methane with low concentration were organized which coordinated effectively the reasonable matching of different devices. The system avoided effectively the low-density energies losses.

**Keywords:** Greenhouse gas; Coal mine methane with low concentration; Ventilation air methane; Combustion/Oxidation; Energy utilization

## 煤矿低浓度瓦斯燃烧及能量利用系统研究

李庆钊, 林柏泉

中国矿业大学安全工程学院, 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 煤矿瓦斯治理国家工程中心, 江苏徐州, 中国 221116  
qingzhaolee@yahoo.com.cn, lbq21405@126.com

**摘要:** 本文系统阐述了本科研团队在煤矿低浓度瓦斯及乏风瓦斯燃烧利用方面的研究状况及取得的部分研究成果, 团队通过构建过滤式燃烧实验平台, 获得了煤矿低浓度瓦斯过滤燃烧时的典型火焰现象及燃烧器内部的温度分布特性; 自行设计建造了的乏风瓦斯实验台, 通过实验及模拟获得了往复流动方式下超低浓度瓦斯氧化反应的温度场特性及不同化学当量比时温度分布结构的变化特点。自行组织构思了煤矿低浓度瓦斯燃烧及能量利用系统, 有效协调了能量的梯级利用及设备间的合理匹配关系, 避免了低密度能量的浪费与缺失。

**关键词:** 温室气体; 煤矿低浓度瓦斯; 乏风瓦斯; 燃烧/氧化; 能量利用

### 1 引言

气候变化问题是二十一世纪人类所面临的最严峻的挑战之一, 遏制气候变暖, 拯救地球家园, 是全人类共同的使命。在全球温室气体的排放中, 甲烷气体温室效应仅次于二氧化碳, 位居第二位, 但由于甲烷的强温室特性(为  $\text{CO}_2$  的 21 倍)使得其对全球气候变暖效应的贡献达到 17% (如图 1 所示) [1]。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB201205), 国家自然科学基金重点项目(50574093, 50534090), 中国矿业大学青年教师启动经费及启航计划资助项目。

我国是煤炭大国, 具有丰富煤层气资源, 占世界排名前十二位国家资源总量的 13%, 位居第三位<sup>[2]</sup>, 其中埋藏深度在 1000~2000m 以浅的约占 71%<sup>[3]</sup>。

目前, 煤矿风排瓦斯总含量约占我国煤矿瓦斯总量的 81%, 年排放量超过 150 亿立方米以上, 相当于 1140~1700 万吨标准煤。然而由于煤矿乏风甲烷含量极低, 如果进行分离提纯, 耗能要远远超过获取甲烷的能量, 很不经济<sup>[4]</sup>; 另外这种浓度的甲烷无法直接燃烧, 所以长期以来只能空排, 造成了巨大的能源浪费和环境污染。

煤矿瓦斯不仅是一种强效应的温室气体, 更是一种清洁的能源。如果能够充分、合理、有效的利用煤

矿瓦斯、特别是煤矿低浓度瓦斯（1%~10%）和通风瓦斯（<1%），将使我国煤矿的安全生产走上良性循环的轨道<sup>[5]</sup>。

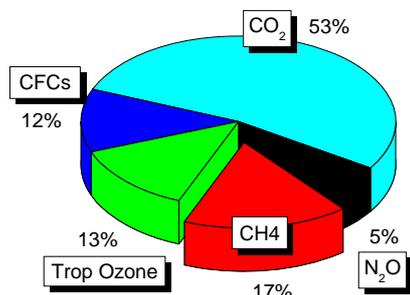


Figure 1. Contributions of gas to greenhouse effects (Watts/M<sup>2</sup>)  
图 1 温室气体排放对温室效应的贡献 (Watts/M<sup>2</sup>)

## 2 基于惰性多孔介质的煤矿抽采低浓度瓦斯过滤燃烧技术

### 2.1 低浓度瓦斯过滤燃烧技术原理简介

目前，惰性多孔介质已被应用于诸多领域，包括动力工艺、火灾及爆炸的预防等。实际上，气体在多孔介质中的燃烧又被成为过滤燃烧（Filtration combustion, FC），即可燃气体在流经多孔介质的同时发生的燃烧过程。对于惰性多孔介质中的燃烧，基本可分为 2 种情况：气体在孔隙中的“浸没燃烧”和气体在多孔介质的“表面燃烧”（在本文的 3.1 部分研究了该 2 种燃烧的火焰状况）。

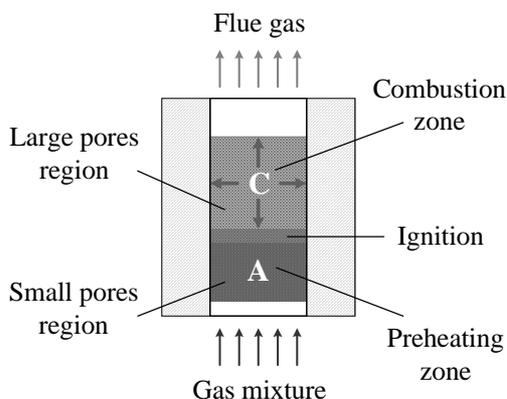


Figure 2. Schematics of porous burner  
图 2 多孔介质燃烧器示意图

惰性多孔介质中预混气体的燃烧方式是一种新颖的燃烧过程，涉及到多种热交换过程（气气对流、气固对流及辐射、固体导热及辐射等），燃烧放热首先

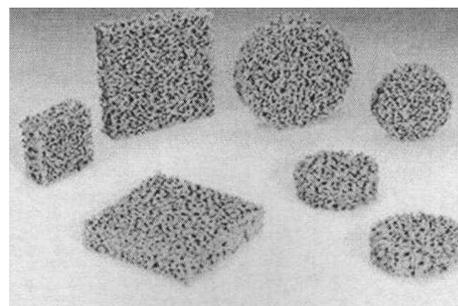
以对流及辐射形式传给多孔介质，同时，多孔介质以固体导热和辐射的形式向火焰上游传递，以实现热量的回流和预混可燃气体的预热，从而实现燃烧强度和稳定性的改善。由于惰性多孔介质良好的导热性以及气固间的热量交换，使得多孔介质内部的温度场比较均匀，同时热量的“自回流”甚至可以获得超过正常的绝热燃烧温度以实现“超绝热燃烧”（Super-adiabatic combustion），相关的燃烧机理示意图如图 2 所示。

### 2.2 低浓度瓦斯过滤燃烧实验研究

为了研究惰性多孔陶瓷内低浓度瓦斯的燃烧、传热及污染物排放特性，本研究团队自行设计建造了基于惰性多孔陶瓷的煤矿低浓度瓦斯过滤燃烧实验平台，实物如图 3（a）所示，本实验装置包括：配气系统、点火系统、测控系统及烟气分析系统等四部分。实验所用惰性多孔陶瓷为 SiC 材质，孔隙密度范围为：10PPI~40PPI，如图 3（b）所示。



(a) 过滤燃烧实验系统



(b) SiC 材质多孔陶瓷

Figure 3. Pictures of experimental units of porous burner and porous ceramics

图 3 多孔介质过滤式燃烧器及多孔陶瓷实物图片

实验测得燃烧器轴线方向上温度的分布如图 4 所示。由图中气相及固相的温度可知，燃烧器内的多孔介质基本可分为两个典型的区域，即：气体预热区和燃烧反应区两部分。在预热区部分，多孔介质的固相

温度高于混合气体的温度，此时可燃预混气体被固体加热而多孔介质本身温度则有所降低；随着气体温度逐步升高并达到着火点而发生燃烧化学反应，同时气相的温度迅速上升并远高于多孔介质固体本身的温度，此时由于气体的辐射、对流作用，使得固体介质被气相所加热，同时由于多孔介质的导热及辐射，使得热量向上游预热区不断传递而用于预混可燃气体的预热。

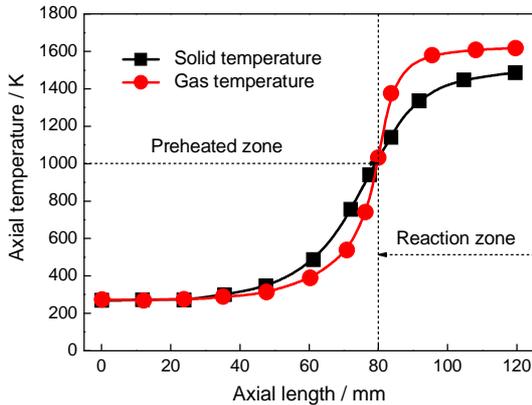


Figure 4. Axial temperature profiles of porous burner  
图 4 多孔介质燃烧器内的轴线温度分布情况

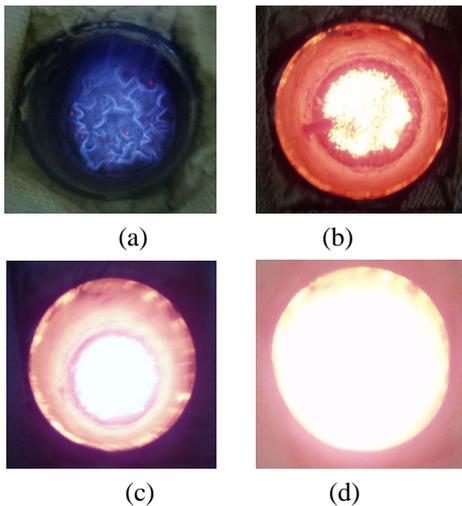


Figure 5. Pictures of TFRR experimental systems  
图 5 不同入口气流速度下的燃烧火焰照片

如 2.1 部分所述，实验也发现低浓度瓦斯空气预混气体在多孔介质内的燃烧呈现出表面火焰图 5 (a) 和浸没火焰图 5 (b)、(c)、(d) 两种典型的现象。在较高的气流速度下，预混气体的预热不足，同时由于流速较高使得气体燃烧的火焰锋面逐步后移甚至脱离多孔介质的表面从而形成表面燃烧火焰；适当降低

进气流速，在惰性多孔介质蓄热、传导及辐射作用下，由于热量的回流使得火焰锋面逐步前移，由此预混气体的燃烧基本发生在多孔介质孔隙的内部，即形成了所谓的浸没火焰。由实验可知，对于过滤式燃烧实验系统，其稳定燃烧的最低瓦斯浓度可达 2%~3%。

### 3 基于热逆流氧化 (TFRR) 原理的乏风瓦斯处理技术

#### 3.1 TFRR 技术原理简介

热逆流反应原理最早由瑞典 ADTEC 公司所提出，主要用于有机废气的氧化处理，而此后该技术在能源利用、超低浓度污染物净化方面发挥了重要的实用价值；同时热逆流氧化反应也是燃烧学中的一个新颖的课题。

TFRR 反应器内部的填充体一般为设计成型的惰性多孔蓄热材料或颗粒堆积床蓄热体，系统的启动需由辅助加热器对床体进行预热至乏风瓦斯 (VAM) 的自氧化温度，而后进入的 VAM 发生“无焰”氧化反应，放出热量并加热蓄热体，在蓄热体的导热及辐射作用下产生热量“回流”以达到进气预热的目的。由于 VAM 浓度极低，氧化热量有限，如果进排气只以单一流向进行，则床体内的“有效预热区”将沿气流方向逐渐缩减以至于消失，此时反应器则不足以维持自身的稳定运行。为此，反应气流有必要在换向阀的动作下进行周期性流向的切换以达到床体的自稳定运行，系统原理示意图如图 6 所示。

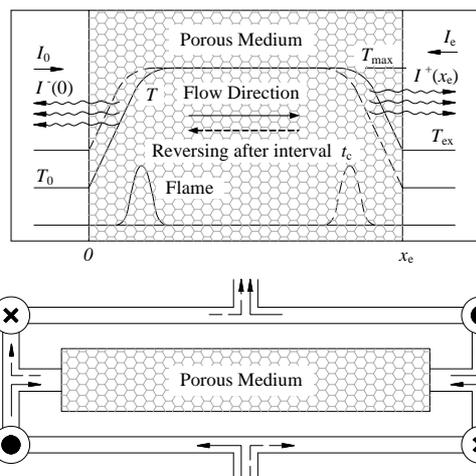


Figure 6. Schematics of the reciprocating combustion system and temperature profile

图 6 多孔介质内往复流动燃烧系统及其温度分布示意图<sup>[6-7]</sup>

### 3.2 基于 TFRR 的乏风瓦斯氧化实验研究

由于 TFRR 技术涉及到流体力学、传热学和热力学中的一系列学科中的基础问题，如三种热交换耦合作用下预混气体火焰在孔隙内的行为及着火特性、热波与燃烧波耦合作用下的能量急剧特性等都已成为燃烧学领域内的前沿性的难题及关键。

为此，中国矿业大学自行设计建造了 TFRR 实验平台，如图 7 所示。反应装置包括：配气系统（a）、测控系统（b）及反应器装置本体（c）。



(a) 配气系统



(b) 测控系统



(c) TFRR 反应器装置本体

Figure 7. Pictures of TFRR experimental systems

图 7 乏风瓦斯热逆流氧化装置实物图片

采用实验及数值计算的方法，本文研究了 TFRR 内部的轴向温度分布特性。如图 8 所示，组合一个流向切换周期，床体内的温度场基本呈现类“梯形”的结构分布。此外，由计算可知，不同化学当量比条件下床内的温度分布表现出不同的结构如图 9 所示，在低的化学当量比条件时“双峰”结构的温度分布距离相距较近，在一个周期内的温度分布整体形状基本呈现近“三角形”分布<sup>[8]</sup>。

此外，由计算可知，不同化学当量比条件下床内的温度分布表现出不同的结构如图 9 所示，在低的化学当量比条件时“双峰”结构的温度分布距离相距较近，在一个周期内的温度分布整体形状基本呈现近“三角形”分布<sup>[8]</sup>。

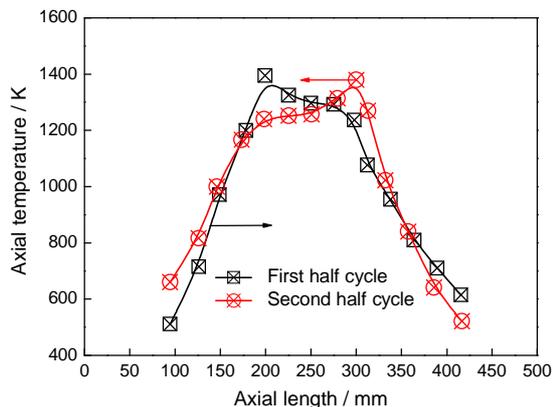


Figure 8. Axial temperature profiles of TFRR apparatus

图 8 TFRR 反应器内的轴线温度分布情况

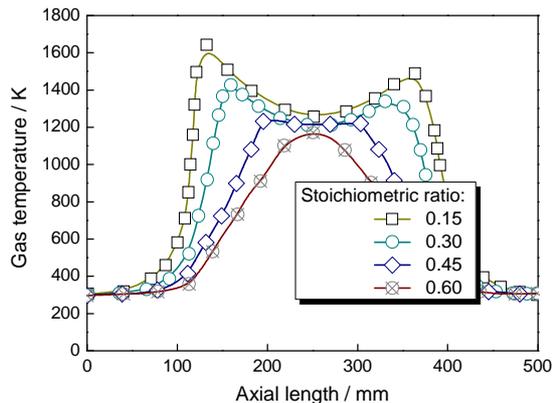


Figure 9. Axial temperature profiles of TFRR apparatus

图 9 TFRR 反应器内的轴线温度分布的模拟情况

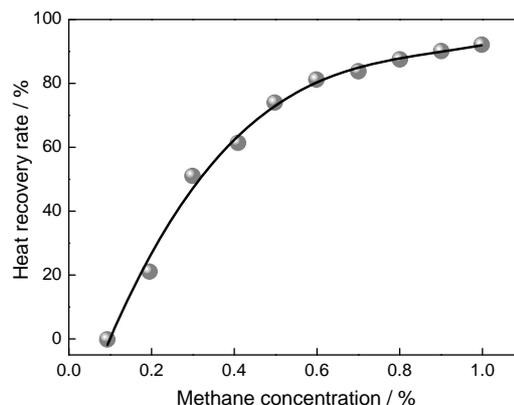


Figure 10. Heat recovery rates vs. methane concentrations

图 10 热回收率随瓦斯浓度的变化情况<sup>[9]</sup>

此外，加拿大矿物与能源技术中心学者哈瑞斯<sup>[9]</sup>多考察了逆流反应条件热量回收率随乏风瓦斯浓度变化的规律，如图 10 所示，在乏风瓦斯浓度约为 5% 的条件时，热量回收率仍可达 70% 以上，这对于温室气体减排及能量的回收利用显现了极其重要的显示意义。

#### 4 低浓度瓦斯燃烧发电及矿井局部降温系统构成的初步探索

对于浓度 < 10% 的煤矿瓦斯以及浓度 < 1% 的矿井乏风瓦斯，由于瓦斯含量少，燃烧/氧化过程体积发热量及能量密度低，以致于常规的大型能量利用设备

(动力机及发电机) 与之难以相匹配，因此能量的提取及利用对于低浓度瓦斯的有效处理与利用至关重要。为此，中国矿业大学矿井瓦斯防治与利用研究所广泛调研的基础上并结合矿井实际，设计构思了用于煤矿超低浓度瓦斯燃烧发电的装置与系统，如图 11 所示。其中包括超低浓度瓦斯氧化反应装置、能量提取及蒸汽发生装置、小型回转式动力机、发电机、以及用于能量梯级利用的以蒸汽余热为动力的吸收式制冷系统，产生的冷媒水可用于矿区办公或井下局部热区的降温。

(注：超低浓度瓦斯反应装置及发电系统已申请国家专利)

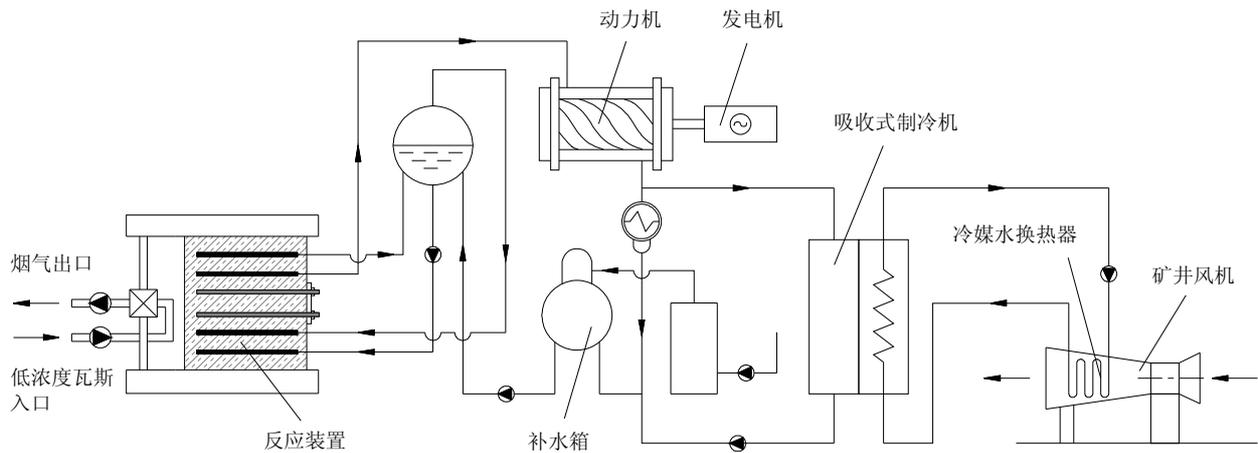


Figure 11. Schematics of the power generation and mine cooling system using mine gas of low concentration

图 11 煤矿低浓度瓦斯燃烧发电及矿井降温系统

#### 5 结论

本文系统阐述了科研团队在煤矿低浓度瓦斯及乏风瓦斯燃烧利用方面的研究状况及取得的部分研究成果，主要包括：

- 通过构建过滤式燃烧实验平台，获得了煤矿低浓度瓦斯过滤燃烧时的两种典型的火焰现象及燃烧器内部的温度分布特性。
- 在自行设计建造的乏风瓦斯实验台上，通过实验及模拟获得了往复流动方式下超低浓度瓦斯氧化反应的温度场特性及不同化学当量比时温度分布结构的变化特点。
- 自行组织构思了煤矿低浓度瓦斯燃烧及能量利用系统，有效协调了能量的梯级利用及设备间的合理匹配关系，避免了低密度能量利的浪费与缺失。

#### 致 谢

感谢中国矿业大学安全工程学院“矿井瓦斯防治与利用研究所”对本工作所给予的支持。

#### References (参考文献)

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, Climate Change 2007: Synthesis Report, 2007.
- [2] Zhao Qingbo, Tian Wenguang, Advances and understandings of coalbed methane exploration and development in China [J], Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 16-18. 赵庆波, 田文广. 中国煤层气勘探开发成果与认识[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 16-18.
- [3] Qian Bozhang, Zhu Jianfang. Non-regular natural gas resources in the world and utilization process [J]. Natural gas and oil, 2001, 25(2): 28-32. 钱伯章, 朱建芳. 世界非常规天然气资源和利用进展[J]. 天然气与石油, 2001, 25(2): 28-32.
- [4] Olajossy A., Gawdzik A., Budner Z., Dula J., Methane separation from coal mine Methane gas by vacuum pressure swing adsorption [J]. Trans IChemE, 2003, 81(4): 474-482.

- [5] Gatnar K., Tor A., Drainage and economic utilization of methane from coal seams in the Kastrzebie mining-field [J]. *Applied Energy*, 2003, 74(3-4): 331-341.
- [6] Hoffmann J.G., Echigo R., Tada S., Yoshida H., Analytical study on flame stabilization in reciprocating combustion in porous media with high thermal conductivity [J]. *Twenty-sixth International symposium on combustion*, The Combustion Institute, 1996, 2709-2716.
- [7] Hoffmann J.G., Echigo R., Yoshida H., Tada S., Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system [J]. *Combustion and flame*, 1997, 111(1-2): 32-46.
- [8] Somers J.M., Schultz H.L., Thermal oxidation of coal mine ventilation air methane [J]. *Proceedings of 12th U.S./ North American mine ventilation symposium*, 2008, 301-306.
- [9] Hristo S., Gilles J., CH<sub>4</sub>MIN technology and its potential in China [J]. *China coalbed methane*, 2004, 1(1): 35-38.
- S. 哈瑞斯多, J. 吉利斯. 催化逆流反应器 (CH<sub>4</sub>MIN) 技术及其在中国的应用潜力 [J]. *中国煤层气*, 2004, 1(1): 35-38.