

多孔介质的热物性对往复流动下超绝热火焰的影响

杜礼明¹, 解茂昭²

(1. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023;

2. 大连理工大学动力工程系, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 多孔介质燃烧室的传热性能主要取决于多孔介质材料的热物性, 本文在气固两相局部非热平衡假设基础上, 建立往复流动下多孔介质超绝热燃烧的二维数学模型, 研究了多孔介质的比热、导热系数、衰减系数和体积换热系数等对温度分布和燃烧速率的影响, 以为多孔介质选材和往复流动下多孔介质超绝热燃烧器的优化设计提供理论依据。

关 键 词: 多孔介质; 超绝热燃烧; 往复流动; 热物性参数

中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 引 言

与自由火焰相比, 多孔介质预混合燃烧有很多优点^[1~3], 主要原因是多孔介质有高度发达的内表面, 其导热系数和热辐射能力比气体大得多, 因而有很好的换热性能, 另外它的热容量也比空气大得多, 蓄热性能很好, 可以存储部分燃烧热, 并使之在燃烧室内被循环利用。

预混合气体以往复流动方式在多孔介质中超绝热燃烧 (Reciprocating Superadiabatic Combustion in Porous Media, 以下简称 RSCP) 是近几年发展起来的一项新型多孔介质预混燃烧技术, 被认为是当前最有效和最实

用的燃烧技术之一^[4]。RSCP 的主要特点是利用多孔介质和往复换向装置的共同作用, 充分回收尾气余热, 降低热量损失, 使部分燃烧热得以循环利用, 从而可以实现稀薄乃至极稀薄自维持燃烧。关于 RSCP 的研究, 过去主要集中于研究预混气体的流速、燃气-空气当量比和换向半周期等工作参数对燃烧性能的影响^[4~5], 很少有文献探讨多孔介质材料本身的影响。本文通过研究 RSCP 燃烧器中多孔介质的热物性参数对温度分布和燃烧速率的影响, 得出有关多孔介质热物性参数对燃烧特性影响的规律, 为 RSCP 燃烧器的优化设计提供理论依据。

2 数学模型

2.1 问题描述

RSCP 燃烧室中填充有多孔介质, 燃烧器外壁裹一层绝热性能良好的保温材料。实验中通过控制管路的两组 4 个阀门交替开关来实现气流的换向。RSCP 的工作原理与系统组成见文献[6], 燃烧室是一细长圆柱形结构, 可用二维轴对称模型描述。本文将 RSCP 系统简化成如图 1 所示的物理模型。图

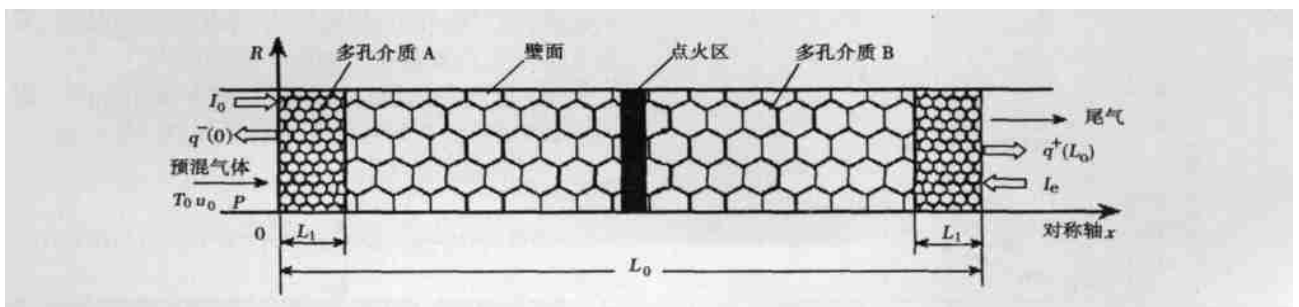


图 1 RSCP 燃烧器示意图

收稿日期: 2004-06-03; 修订日期: 2004-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50076005)

作者简介: 杜礼明(1972-), 男, 湖北英山人, 中科院大连化物所助理研究员, 博士。

中多孔介质 A 的孔径比多孔介质 B 的孔径小得多, 目的是防止“回火”^[7]。多孔介质燃烧室的总长度 $L_0=32$ cm, 其中 $L_1=L_0/8$, 新鲜可燃混合气以室温状态交替从多孔介质两端流入, 流动方向每隔 t_c (半周期) 时间间隔反向一次。

2.2 数学模型

由于多孔介质中气、固相的传热能力有明显差异, 气体燃料燃烧释放出来的热量不可能立刻完全传递给固体基质, 因此两相之间处于局部非热平衡状态, 应分别建立能量输运方程, 并通过两相之间的换热将这两个方程耦合起来。为简化问题, 研究中作了如下假设:

(1) 多孔介质是不可渗透和惰性的, 可当作连续介质处理, 在燃料燃烧过程中不变形, 孔隙率不随空间位置和多孔介质的孔隙结构变化而变化, 忽略两种多孔介质之间的接触热阻, 不考虑两种多孔介质的结构差异对换热和流体流动的影响;

(2) 多孔介质为一个各向同性的光学厚介质, 可发射和吸收热辐射, 忽略漫射, 忽略潜在的催化效应, 忽略混合气的热辐射;

(3) 燃料和空气在反应前已充分混合, 可以视为理想气体, 燃烧反应为一步不可逆化学反应, 服从 Arrhenius 定律, 并且火焰不发生畸变;

(4) 由于流速较低, 扩散效应明显强于弥散效应, 因此本文忽略弥散效应; 忽略气体热辐射和 Dufour 效应的影响。

根据以上假设, 建立如下控制方程:

连续方程:

$$\frac{\partial(\rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_g v) = 0 \quad (1)$$

轴向动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_g u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g uu) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_g vu) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu r \frac{\partial u}{\partial r}) - \frac{\Delta p}{\Delta x} \end{aligned} \quad (2)$$

径向动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_g v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g uv) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_g vv) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu r \frac{\partial v}{\partial r}) - \frac{\mu v}{r^2} - \frac{\Delta p}{\Delta r} \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)和式(3)最后一项表示气体反应流在多孔介质中的压力损失, 用 Ergun 模型可以描述为:

$$-\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\mu}{c_1} u + c_2 \rho_g |u| |u|, \quad -\frac{\Delta p}{\Delta r} = \frac{\mu}{c_1} v + c_2 \rho_g$$

$$|v| |v| \quad (4)$$

其中: c_1 和 c_2 分别表示多孔介质的渗透系数和惰性系数。

气相的能量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_g c_p T_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g c_p u T_g) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_g c_p v T_g) = \\ & \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\lambda_g r \frac{\partial T_g}{\partial r}) + H(T_s - T_g)/\epsilon + \\ & \Delta H_c \omega_{Fu} W_{Fu} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: H 是多孔介质中气、固两相间的体积换热系数; λ_g 与 c_p 分别是混合气的导热系数和定压比热; $\Delta H_c \omega_{Fu} W_{Fu}$ 表示混合气燃烧放出的热量, 其中 ω_{Fu} 为燃料和氧的摩尔反应速率, ΔH_c 为单位质量燃料的燃烧热。根据 Arrhenius 定律, 单步反应的热效应与详细化学反应的热效应是相同的, 本文关心的是燃料的热效应, 因此可用单步不可逆总反应来描述其燃烧反应。

多孔介质的能量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_s c_{ps} T_s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\lambda_s r \frac{\partial T_s}{\partial r}) + \\ & \frac{H(T_g - T_s)}{1 - \epsilon} - (\frac{\partial q_r}{\partial x} + \frac{\partial q_r}{\partial r}) - C_w(T_s - T_0) \end{aligned} \quad (6)$$

组分守恒方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_g m_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u m_i) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_g v m_i) = \\ & \frac{\partial}{\partial x}(\frac{\lambda_g}{Le c_p} \frac{\partial m_i}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \frac{\lambda_g}{Le c_p} \frac{\partial m_i}{\partial r}) - W_i \omega_i \end{aligned} \quad (7)$$

式中: Le 是 Lewis 数, $\rho c_p D / \lambda_g$, D 为组分扩散系数; ω_i 为 i 组分的摩尔反应速率; W_i 为 i 组分的分子量。

燃气是预先混合好的甲烷和空气的均匀混合物, 可以视作理想气体, 燃烧过程中气体混合物的密度根据理想气体状态方程求得。

2.3 计算条件

固体介质与气相之间的表面换热系数服从以下关系式^[8]:

$$Nu = \frac{h_p d_e}{\lambda_g} = 2 + 1.1 \times Pr^{1/3} Re_p^{0.6}$$

$$\text{其中: } Re_p = \frac{\rho u d_e}{\mu} \quad (8)$$

多孔介质热物性如表 1 所示, 表中两种多孔介质的材质均为 OB SiC 泡沫陶瓷, 其中多孔介质 A 每平方米面积上的孔目数为 28, 多孔介质 B 每平方米面积上的孔目数为 4, 初始条件和边界条件等详见文献 [6]。

表 1 多孔介质的热物性参数

参数	多孔介质 A	多孔介质 B
孔隙率 ϵ	0.87	0.87
密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	3.2×10^3	3.2×10^3
定压比热 / $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	$(-112 + 97.227 \times \log(T_g)) / 0.238$	$(-147.15 + 97.227 \times \log(T_g)) / 0.238$
导热系数 / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	$(-0.455 + 0.855 \times \log(T_g))$	$(-0.561 + 0.855 \times \log(T_g))$
比表面积 / $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	$A_p = 220.5(\epsilon m_p)^{0.9}$	$A_p = 220.5(\epsilon m_p)^{0.9}$
体积换热系数 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	$H = A_p h_p$	$H = A_p h_p$
衰减系数 / m^{-1}	676	94
散射系数 / m^{-1}	432	66
发射率(2000 K)	0.90	0.90
散射反照率	0.7	0.7
最大耐热温度 / $^{\circ}\text{C}$	1600	1600

动,高温区的宽度变窄,比热降低至基准值的 30% 时,气体温度分布由马鞍状变形至三角形,放热率也明显降低。比热从 $(1 + 35\%)c_p$ 减小至 $(1 - 70\%)c_p$ 时,气体的温度峰值从 1 295.0 K 降低至 1 090 K,可见多孔介质材质的选择对 RSCP 系统的燃烧性能尤为重要。

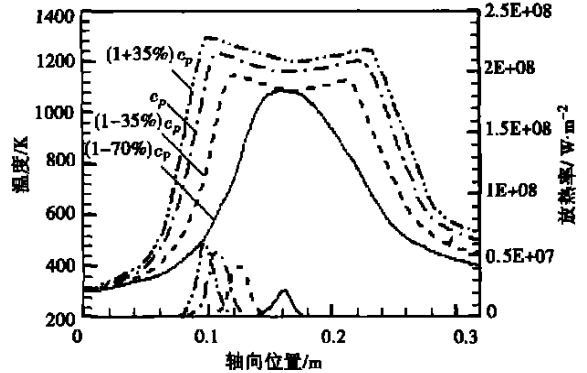


图 2 比热对气体温度分布与放热率的影响

3 结果与分析

对于式(6)中的辐射源项,采用辐射换热的有限容积法(Finite Volume Method)模型,离散与求解过程见文献[6]。对计算区域采用有限容积法离散,空间方向上将燃烧室均匀划分为 125×25 个网格,角空间均匀划分为 9×15 个网格。对扩散—对流项采用乘方格式,对时间项采用全隐格式。由于本文中模型的边壁条件简单,加之多孔介质是均匀和各向同性的,模拟得到的各参量在燃烧室的径向差异较小,因此,本文用最具有代表性的轴向上的量来描述各工况下 RSCP 的热结构和燃烧特性。文中未标注的混合气的流向均表示自左向右。

3.1 多孔介质的比热对温度分布的影响

定压质量比热与密度的乘积表征多孔介质蓄热能力的大小。多孔介质的密度不变时,固体基质的比热就决定了多孔介质的蓄热性能。保持多孔介质的其它热物性参数不变,仅改变比热,研究当量比 $\varphi = 0.15$, 气体初始流速 $u = 0.1 \text{ m/s}$, 换向半周期 $c_h = 25 \text{ s}$ 情况下气体温度分布与放热率变化。由图 2 可知,表明多孔介质的比热对气体温度分别影响很大。增大比热,蓄热能力增强,更多的反应热被吸收并输运到燃烧室的其它部位,特别是混合气入口端,对预混气体进行强化预热,气体的放热率增大,气体的峰值温度明显增大,反应区向燃烧室两端移动,高温区的宽度明显增宽;减小比热,蓄热能力减弱,放热率减小,气体的峰值温度降低,反应区向燃烧室中部移

3.2 多孔介质的导热系数对温度分布的影响

为研究多孔介质的导热系数 λ_s 对温度场的影响,本文以表 1 中 λ_s 值为基准,将 λ_s 分别增加和减少,保持其它参数不变,研究温度场的变化,各算例中工况参数是 $\varphi = 0.15, u = 0.1 \text{ m/s}, c_h = 25 \text{ s}$ 。由图 3 可知,随着 λ_s 值增加,峰值温度有降低趋势,高温区稍有扩宽,预热区和燃烧后区的温度都有所升高,但变化幅度都比较小,这是由于 λ_s 值提高有利于将高温区的热量向两端传递,提高对新鲜混合气的预热效果。但总体而言,多孔介质的导热系数对温度场的影响不大, λ_s 从 $(1 + 50\%) \lambda_s$ 降低至 $(1 - 50\%) \lambda_s$, 温度峰值从 1 240.5 K 升高至 1 254.0 K,波动幅度为 1.1%,高温区的平均温度从 1 160.5 K 升高至 1 171.5 K。根据 Hsu 的研究^[9],即使有效导热提高 100 倍,温度场的波动仍然不大,这表明在多孔介质燃烧系统中固体导热并不是占主导地位的传热方式。

3.3 多孔介质的衰减系数对温度分布的影响

在不考虑辐射热散射情况下,衰减系数 β 是辐射力大小的主要量度。图 4 表示保持其它参数不变, β 值波动对气体温度分布和放热率的影响,工况参数为 $\varphi = 0.10, u = 0.1 \text{ m/s}, c_h = 40 \text{ s}$ 。结果表明,随着 β 值增加,多孔介质辐射传热的能力降低,使得上游得到的热反馈量减少,反应区向下游的散热量也

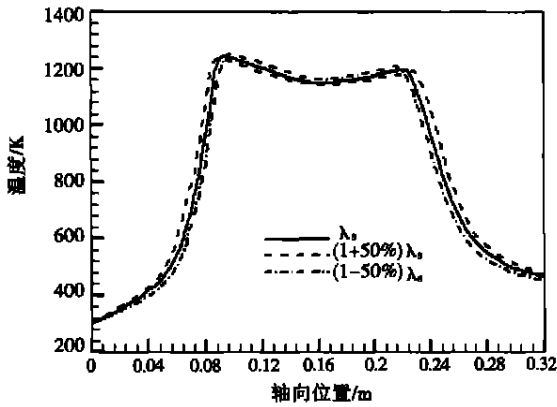


图 3 多孔介质的导热系数对气体温度分布的影响

降低, 结果反应热蓄积在反应区, 使得气体温度分布普遍较高; 另外, β 值较大时, 反应区温升较快, 反应速率较大, 火焰的相对移动速度较小, 故反应区向上游移动, 高温区增宽。 β 值降低时, 辐射传热性能增强, 高温区的热量通过辐射向上下游的反馈量增多, 峰值温度降低。为维持燃烧的持续进行, 正反两个反应区越来越靠近, β 值降低到基准值的 15% 时, 马鞍形温度分布转变为三角形。辐射在气体中衰减率很低, 几乎不衰减, 因此从利用热辐射角度看, 不宜选用孔隙率过高的多孔介质。

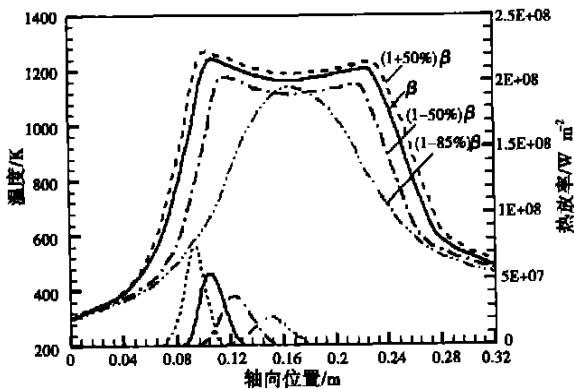


图 4 多孔介质的衰减系数对气体温度分布与放热率的影响

3.4 多孔介质的体积对流换热系数 H 对温度分布的影响

多孔介质的体积对流换热系数 H 决定混合气与固体基质之间的对流换热, $H \rightarrow 0$ 时, 两相之间无

对流换热, 而当 $H \rightarrow \infty$ 时, 气体的反应热瞬时传到多孔介质中, 反应区的固体温度等于气体温度。实际多孔介质的体积换热系数是有限值, 取决于固体基质的材料和多孔介质的结构。

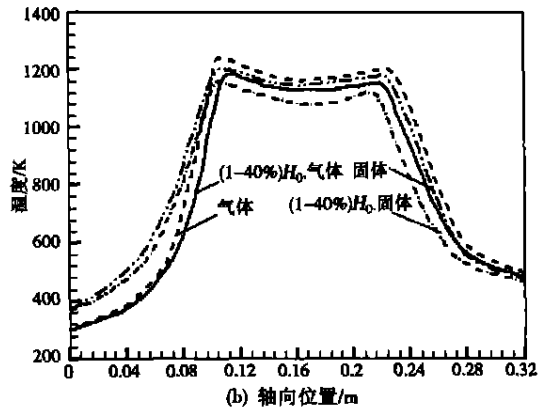
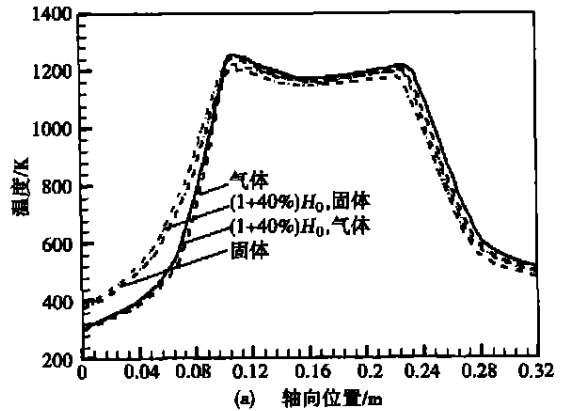


图 5 多孔介质的体积对流换热系数对气体温度分布的影响

图 5 描述了降低和增加 H 对气体温度分布的影响, 工况参数为 $\varphi = 0.10$, $u = 0.1 \text{ m/s}$, $c_h = 40 \text{ s}$ 。研究表明, H 值对温度分布有重要影响。由图 5(a) 知, H 增大 40%, 气、固两相之间的换热增强, 气体和固体的温度都有所升高, 但升高幅度都比较小, 气体温度峰值由 1245.5 升高至 1257.5, 气体和固体的平均温差由 16.6K 降低至 5.4K, 这说明 H 值足够大, 气、固换热已很充分。 H 降低 40% 时, 气、固两相之间的换热减弱, 气体的预热效果较差, 气体和固体的温度明显降低, 温度峰值分别从 1245.5K 和 1202.5K 降低至 1181.5K 和 1157.5K, 高温区气体的平均温度从 1188.9K 降低至 1147.7K, 而高温区固体的平均温度则从 1161.5K 降低至 1111.0K。可见, 对流换热是气、固之间的重要换热方式。

多孔介质的热物性参数不仅对 RSCP 系统的温度场有较大影响,对燃料的燃烧速率也有明显影响。图 6 表示导热系数和体积换热系数对燃烧速率的影响,其中 λ_{s0} 和 H_0 是根据表 1 计算得到的值,而 λ_s 和 H 分别是 λ_{s0} 和 H_0 与一个比例系数的乘积,模拟中工况参数是 $\varphi = 0.40$, $u = 0.1 \text{ m/s}$, $c_h = 40 \text{ s}$ 。由图可知,混合气在多孔介质中的燃烧速率随着 λ_s 增大而增大,尽管燃烧速率也随着 H 增大而增大,但 H 增大到一定程度后,燃烧速率不再明显升高。

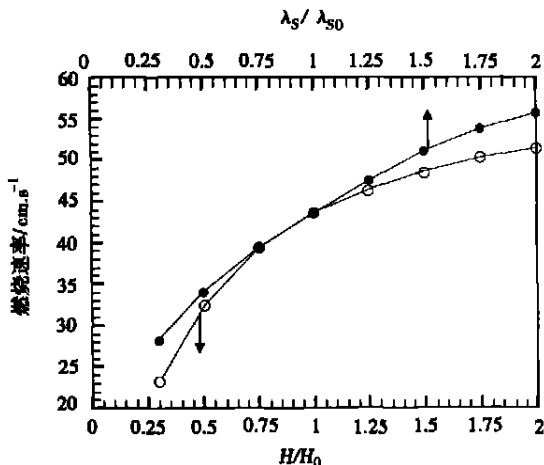


图 6 多孔介质的导热系数和体积换热系数对燃烧速率的影响

4 结 论

多孔介质固体基质材料本身的热物性决定着整个燃烧室的换热性能,从而对燃烧性能和温度分布有重要影响。多孔介质导热系数的波动对燃烧室中气体温度分布有一定影响,但影响并不大,而体积换

热系数和衰减系数的波动对气体温度分布和燃烧速率影响明显,说明多孔介质燃烧系统中占主导地位的传热方式是气、固对流换热和固体热辐射;另外,多孔介质的定压比热对燃烧室温度分布和放热率影响也很大。因此,优选多孔介质材料对充分发挥 RSCP 的燃烧性能有重要意义。

参考文献:

[1] TRIMIS D, DURST F. Combustion in a porous medium-advances and applications [J]. **Combustion Science and Technology**, 1996, **121**: 153-168.

[2] ZHDANOK S, LAWRENCE A, KOESTER G. Superadiabatic combustion of methane air mixtures under filtration in a packed bed [J]. **Combustion and Flame**, 1995, **110**: 221-231.

[3] 杜礼明, 解茂昭, 邓洋波. 惰性多孔介质中预混合燃烧的研究进展 [J]. **热能动力工程**, 2002, **17**(3): 221-226.

[4] HOFFMANN J G, ECHIGO R, YOSHIDA H, *et al.* Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system [J]. **Combustion and Flame**, 1997, **111**(1/2): 32-46.

[5] FABIANO CONTARIN, ALEXEI V SAVELIEV, ALEXANDER A FRIDMAN, *et al.* A reciprocal flow filtration combustor with embedded heat exchangers; numerical study [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2003, **46**: 949-961.

[6] 杜礼明. 稀薄预混气体在多孔介质中超绝热燃烧的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2003.

[7] TRIMIS D, DURST F. Combustion in a porous medium-Advances and applications [J]. **Combustion Science and Technology**, 1996, **121** (1-6): 153-168.

[8] WAKAO N, KAGUEI S. Heat and mass transfer in packed beds [M]. New York: Gordon and Breach Science Publications, 1982.

[9] HSU P F, HOWELL J R, MATTHEWS R D. A numerical investigation of premixed combustion within porous inert media [J]. **ASME**, 1993, **115**: 744-750.

(渠 源 编 辑)

作者撰写论文摘要注意事项

《热能动力工程》期刊是国内外公开出版刊物,它不仅是国家核心期刊,还被多家国外重要检索机构系统收录。为使语言规范,请您在撰写论文摘要时,注意以下事项:

1. 摘要 200 字为宜。要求语言通顺、精炼,具有实质性内容(背景材料和评论性语言不用)。
2. 问题的提出,试验和研究的情况、结果和结论等部分要表述清楚。
3. 语法运用恰当。逻辑关系清楚,指代明确,搭配合理;开头不用“本文”字样。
4. 缩写词语交待清楚(外文符号需用汉语文字说明其含义)。

湿法烟气脱硫系统除雾器特性试验研究 = **Experimental Investigation of the Characteristics of a Demister in a Wet Flue-gas Desulfurization System** [刊, 汉] / YANG Liu, WANG Shi-he (Department of Municipal Engineering, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), WANG Xiao-ming (Nanjing Research Institute of Electric Power and Environmental Protection, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 145 ~ 147

After an analysis of mist elimination principles and in connection with the different layouts of demisters the pressure drop and air flow speed of demisters were measured through numerous tests. Demisting efficiency was calculated with the use of a water balance method. The influence of air flow speed and layout modes of a demister on its efficiency was analyzed, and the relationship between the air flow speed and pressure drop identified. The results of the above work can serve as a very useful guide and reference for the industrial application of the type of demisters under discussion. **Key words:** wet flue-gas desulfurization, demister, mist elimination characteristics

多孔介质的热物性对往复流动下超绝热火焰的影响 = **The Influence of the Thermophysical Properties of Porous Media on a Superadiabatic Flame under the Condition of Reciprocating Flows** [刊, 汉] / DU Li-ming (Dalian Institute of Chemical Physics under the Chinese Academy of Sciences, Dalian, China, Post Code: 116023), XIE Mao-zhao (Department of Power Engineering, Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 148 ~ 152

The heat transfer properties of a porous media combustor mainly depend on the thermophysical properties of a porous-media material. Based on the hypothesis of local thermal non-equilibrium between the solid and gas phases the authors have set up a two-dimensional mathematical model for porous-media superadiabatic combustion under the condition of reciprocating flows. The influence of the porous-media specific heat, heat conductivity, dissipation factor and volume heat-exchange factor, etc on temperature distribution and combustion rate was studied in order to provide a theoretical basis for the selection of porous-media materials and the optimized design of a reciprocating-flow porous-media superadiabatic combustor. **Key words:** porous media, superadiabatic combustion, reciprocating flow, thermophysical parameters

气化半焦加压着火特性及燃烧稳定性研究 = **A Study of the Ignition Characteristics and Combustion Stability of Gasified Semi-char under an Elevated Pressure** [刊, 汉] / CHEN Xiao-ping, GU Xiao-bing, DUAN Yu-feng, et al (Education Ministry Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 153 ~ 157

On a pressurized thermogravimetric analytical device of single-furnace and double sample bucket structure a relatively systematic experimental and theoretical study was conducted of the ignition characteristics and combustion stability of gasified semi-char under an elevated pressure. Investigated was the influence of various factors, such as the categories of semi-char, total pressure, oxygen concentration, particle diameter and heating rate, etc on the ignition characteristics and combustion stability of the above-mentioned semi-char. In addition, with the test data of pure carbon serving as a basic reference the authors have proposed index R_w for judging the degree of combustion stability. The results of the investigation indicate that the main factors which have an impact on the semi-char ignition temperature are: the volatile content of the semi-char, fixed carbon content and pore structure. With the increase in total pressure and oxygen concentration and a decrease in particle diameter the ignition temperature of the semi-char will decrease and the combustion stability increase. There will be a conspicuous rise in semi-char ignition temperature when the heating rate is increased. **Key**