

研究论文

自由堆积多孔介质内预混燃烧火焰传播

凌忠钱, 周 昊, 钱欣平, 李国能, 岑可法
(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了解多孔介质内预混燃烧火焰前沿的传播特性, 对不同化学当量比 ($\phi=0.7\sim 1.0$) 的甲烷/空气预混气体在不同孔隙率 (ϵ 为 0.37 和 0.42) 的多孔介质内的火焰前沿传播特性进行了研究, 多孔介质采用 3 mm 和 6 mm 直径的 Al_2O_3 小球在陶瓷管中堆积而成。结果表明, 预混气体在多孔介质中能够形成低速燃烧的稳定燃烧波; 其火焰传播速度随化学当量比增大而加快, 最大的火焰传播速度为 $3.52\times 10^{-3} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$; 多孔介质的结构对火焰前沿传播速度影响很大, 即使在孔隙率差别不大的情况下, 大球堆积而成的多孔介质比小球具有更高的火焰前沿传播速度。

关键词: 多孔介质; 预混燃烧; 火焰传播; 化学当量比

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 02-0456-05

Propagation of premixed combustion wave of methane/air in packed bed

LING Zhongqian, ZHOU Hao, QIAN Xinping, LI Guoneng, CEN Kefa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: Combustion wave propagation experiments in porous media were carried out for premixed methane/air mixtures with an equivalence ratio ranging from 0.7 to 1.0. Wave velocity, peak combustion temperature, and flame structure were studied. The parameters that affected these characteristics included inlet velocity, equivalence ratio, and structure of porous media. Experimental results showed that combustion wave propagation of a premixed mixture of methane/air combustion was possible at a very low velocity, and the wave velocity was determined by equivalence ratio and pore size of porous media. A larger equivalence ratio resulted in a larger combustion wave velocity. Porous media consisted of 6 mm diameter spheres had a larger combustion wave velocity than those consisted of 3 mm diameter spheres at the same porosity.

Key words: porous media; premixed combustion; combustion wave; equivalence ratio

引 言

多孔介质的强化传热和燃烧特性已使多孔燃烧成为一项新型的燃烧技术, 有着广泛的应用前景。研究表明利用多孔介质燃烧技术有利于减少有害排放物的生成, 能改善和控制环境污染^[1-2]。目前对

于多孔燃烧技术的研究主要集中在利用多孔燃烧器获得高辐射加热器、低污染气体燃烧等方面。

对于多孔介质中的燃烧特性所进行的研究, 已形成多种理论模型^[3-9], 并得到许多计算结果, 本课题组曾采用计算流体力学方法研究了均匀多孔介质中的超绝热燃烧现象^[10]。但国内外在试验方面

2007-04-29 收到初稿, 2007-11-05 收到修改稿。

联系人: 周昊。第一作者: 凌忠钱 (1977—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20307007)。

Received date: 2007-04-29.

Corresponding author: Prof. ZHOU Hao. E-mail: zhouhao@cme.e.zju.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20307007).

的工作还较少，所研究的多孔介质类型和内容也各不相同。吕兆华等^[11-12]对长度为7cm多孔泡沫陶瓷内燃烧温度分布进行了测量并对预混气体在多孔泡沫陶瓷内的燃烧速率进行了研究，发现多孔介质内的燃烧速度与层流的无多孔介质的自由火焰相比有显著提高，并且受到材质和孔径大小的影响；王恩宇等^[13]对渐变型多孔陶瓷内预混天然气的燃烧特性进行了大量研究，但其试验没能找到火焰燃烧的稳定面；邓洋波等^[14]对气体在多孔介质内的往复燃烧排放特性和温度场分布进行了很有意义的研究。然而，气体在多孔介质内燃烧是一个很难稳定的过程，通常其火焰峰面在多孔介质中会逆流或者顺流移动。但至今难以见到试验所得的完整反映火焰峰值温度分布变化的曲线和反映燃烧火焰峰面在多孔介质中传播过程的试验。

文献[15]综合比较了SiC、Al₂O₃、ZrO₂以及合金等认为采用Al₂O₃材质最适合作为多孔介质的材料，此外，多孔介质采用自由堆积的方式比采用同样材质添加黏结剂做成的泡沫陶瓷具有更好的热稳定性，本文采用Al₂O₃小球自由堆积作为多孔介质。试验对采用3mm和6mm均质Al₂O₃小球自由堆积多孔介质中燃烧火焰面的峰值温度及其变化进行了较全面的研究，对火焰峰面在不同化学当量比下的传播过程进行了试验研究，寻求燃烧波在多孔介质中的传播特性，为各种多孔燃烧器的设计提供依据。

1 试验装置及试验过程

本研究的试验系统如图1所示。压缩空气和甲烷分别经过减压阀和稳压罐之后进入质量流量控制器。质量流量控制器采用北京七星华创电子股份有限公司生产的D07系列，其精度为1.5%，配合使用D08系列流量显示仪，以实现对压缩空气和甲烷流量的精确控制。试验燃烧室为管长500mm、外径为50mm、内径为38mm的陶瓷管，外壁包有10cm厚的保温层，保温层外围包有一层铝箔。燃烧室下端封闭，上端开口。甲烷和压缩空气按一定化学当量比在气体混合室中混合后进入多孔燃烧器。多孔燃烧器分别为3mm和6mm直径的Al₂O₃小球在燃烧室中部堆积而成的多孔介质。

图1中TC1~TC11为温度传感器，其在燃烧器中沿轴心呈螺旋上升式均匀分布，间隔距离为4cm。温度传感器为S型WPR-100系列的铂铑热电

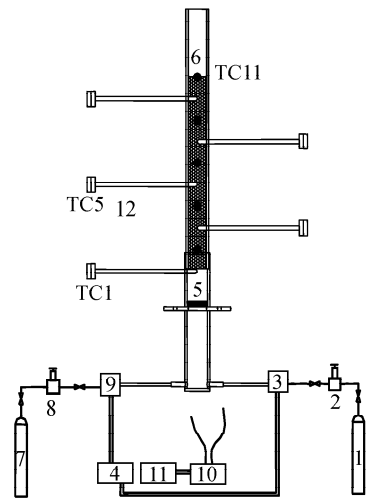


图1 系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

- 1—compress air; 2, 8—decompress valve;
3, 9—mass flow controller; 4—flow readout box;
5—premix house; 6—combustion house;
7—CH₄; 10—HP temperature acquisition;
11—computer; 12—thermocouple (TC1—TC11)

偶，精度为0.25%。温度传感器的温度信号由HP 34970A主机配合HP 34908A模块进行采集，其精度均为6位半。HP 34970A的总采样速率为每秒250个样本，根据使用的通道数平均分配采样速率，HP 34908A模块为40通道模块，内置各种采样函数，包括各种型号的热电偶信号转换函数。HP 34970A的计算机采集程序开发平台为HP BenchLink Data Logger，本次试验选择的采样速率为每5s采集一次温度数据。

试验开始，先打开温度采集系统对燃烧室温度进行监测，设置温度采集数据。调节甲烷和空气量使燃烧能够控制在设定的化学当量比下进行，然后在燃烧器顶端出口处点火。只有当多孔介质的温度达到能够点燃贫燃气体混合物时，气体混合物才能在多孔介质中燃烧并使燃烧波在其中传播。所以在试验初始阶段，要密切注意出口温度的热电偶TC11的变化，当其温度达到最高转而开始慢慢降低，并且不会出现上下波动时，说明火焰峰面已经开始在多孔介质中慢慢向下传播，达到该过程一般需要40min左右。试验过程中要通过质量流量控制仪维持流量稳定不变，因为微小的波动都可能引起燃烧波传播的振荡。本文的试验工况见表1。

表 1 试验工况

Table 1 Experimental conditions

Condition	Diameter of Al ₂ O ₃ /mm	Porosity, ε	Equivalence ratio, φ	Flow rate/L · min ⁻¹	
				CH ₄	Air
1	3	0.37	0.7	0.698	9.502
2	3	0.37	0.8	0.790	9.410
3	3	0.37	1.0	0.969	9.231
4	6	0.42	0.7	0.698	9.502
5	6	0.42	0.8	0.790	9.410

2 均相多孔介质内预混燃烧波的试验结果及分析

混合气体流速 w 为 $15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、化学当量比 ϕ 为 0.7 条件下, 3 mm 小球组成自由堆积多孔介质内 TC11 的温度随时间变化曲线如图 2 所示。该曲线显示了燃烧从刚开始点燃到燃烧火焰峰面慢慢向多孔介质内传播过程。在标准状态下, 甲烷的火焰前沿移动的正常速度值 $u = 28 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 如果混合气体流速 w 大于火焰前沿移动的正常速度值 u 就会发生脱火吹熄; 相反, 如果混合气体流速 w 小于火焰前沿峰面的正常速度 u , 就会出现回火现象。由于多孔介质的存在, 使得其孔隙流速 w_k 大于混合气体速 w , 孔隙流速 w_k 随孔隙率变化, 本试验中 $w < u < w_k$, 所以刚开始混合气体只能在多孔介质表面燃烧。

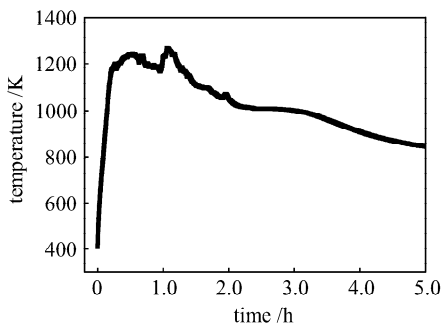


图 2 点燃初期热电偶 (TC11) 温度随时间变化
Fig. 2 Temperature profiles (TC11) during start-up period

从图 2 可以看出, 在多孔介质表面时, 燃烧很不稳定, 波动幅度比较大。由于堆积小球后的丰富尾涡、Al₂O₃ 的大热导率和 Al₂O₃ 大比热容, 使得在孔隙内火焰前沿正常移动速度 u_k 远远大于自由火焰前沿移动速度 u 并且 $u_k > w_k$, 所以火焰前沿能够克服混合气流的速度阻力, 火焰峰面在多孔介质中慢慢向下移动, 在其内部形成了一个稳定燃烧

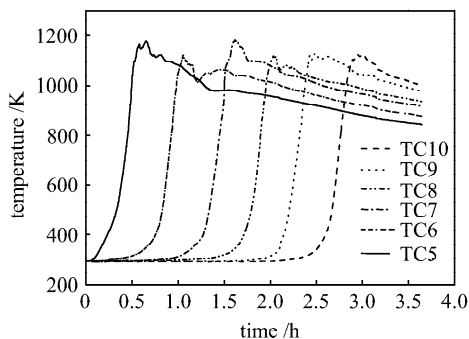


图 3 多孔介质中形成的稳定燃烧的燃烧波
Fig. 3 Self-propagation combustion wave

的燃烧波 (图 3)。

多孔介质燃烧一个很显著的特征就是燃烧反应释放出热量能够预热多孔介质, 多孔介质利用其强导热和辐射把能量又返回可燃混合气, 形成一个正向反馈。当燃烧反应放热、多孔介质蓄热、预热以及系统热损失之间达到平衡, 燃烧在多孔介质中趋于稳定, 此时燃烧速度和混合气气流速度叠加能够产生在多孔介质中稳定传播的燃烧波。图 4 为甲烷/空气化学当量比 ϕ 为 0.7、混合气流量 m 为 $8.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 6 mm 小球堆积孔介质中燃烧过程中的温度场的变化, 这里可以看出燃烧波的传播情况, 图中横坐标方向与气流方向一致, 起始坐标从多孔介质底部开始。从图中可以清晰地看出, 此时燃烧波的传播方向与气流速度方向相反, 燃烧释放出的热量对燃烧波下游的多孔介质加热, 由于多孔介质的蓄热, 故在燃烧波下游区域的温度场梯度很小, 而在其传播方向的上游有很高的温度梯度。此时多孔介质中燃烧波的传播速度见表 2。

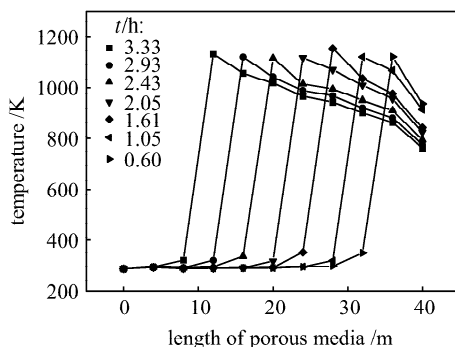


图 4 多孔介质中燃烧波的传播

Fig. 4 Propagation of combustion wave in porous media

表 2 为火焰峰面在热电偶 TC10~TC5 之间的传播情况。从表 2 可以看出, 多孔介质中的火焰峰面传播速度相对预混气体流速而言是一个很小的

量，其数量级为 $10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，根据 Dimosthenis Trimis 划分标准^[16]，属于低速燃烧。虽然燃烧波在不同热电偶之间的传播速度有少许不同，但仍然可以看出多孔介质中燃烧波的传播基本是以稳定的速率传播的，其火焰峰面的最高温度的波动也不是很明显。

表 2 流量为 $8.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、化学计量比为 0.7、孔隙率为 0.42 时的燃烧波传播

Table 2 Combustion wave at conditions of $m=8.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}, \phi=0.7, \varepsilon=0.42$

Thermocouple	Peak temperature /K	Time /h	Combustion wave velocity / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
TC10	1177	0.405	2.74×10^{-3}
TC9	1120		
TC9		0.525	2.12×10^{-3}
TC8	1182		
TC8		0.437	2.55×10^{-3}
TC7	1114		
TC7		0.377	2.95×10^{-3}
TC6	1120		
TC6		0.492	2.26×10^{-3}
TC5	1122		

Note: Distance of TC was 4 cm.

图 5 为燃烧波不同时间段传播速度与其线性拟合结果对比。线性拟合公式为 $y=2.57-0.026t$ 。可见，当燃烧波在多孔介质中传播时，其传播速度随时间的变化很小，基本可以认为是稳定传播，这同时也说明了燃烧所释放的热能抵消了系统的热损失，整个系统处于一个平衡状态。

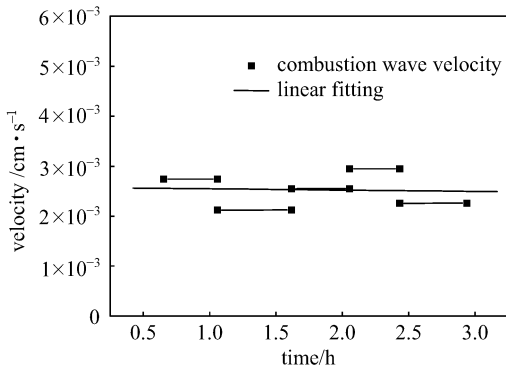


图 5 不同时间段燃烧波传播速度

Fig. 5 Combustion wave velocity at different time periods

虽然多孔介质中燃烧波的传播可以看作是一个稳定的过程，但化学当量比的变化会对其传播速度产生影响。图 6~图 8 分别为以 3 mm 小球自由堆

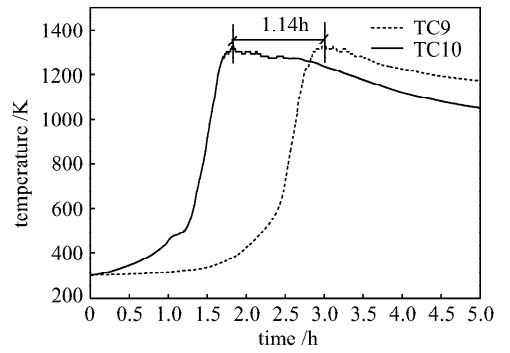


图 6 $\phi=0.7$ 时燃烧波的传播

Fig. 6 Propagation of combustion wave at $\phi=0.7$

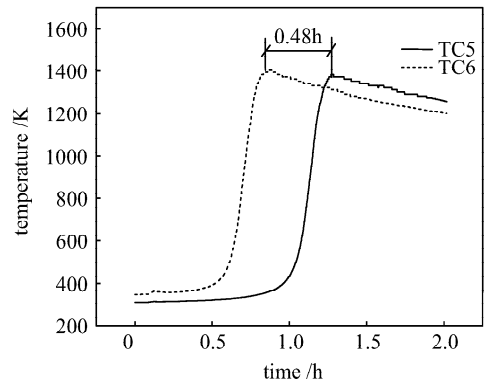


图 7 $\phi=0.8$ 时燃烧波的传播

Fig. 7 Propagation of combustion wave at $\phi=0.8$

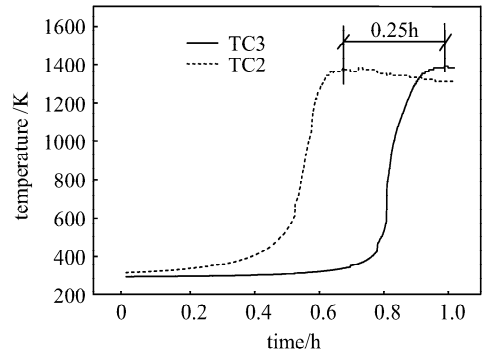


图 8 $\phi=1.0$ 时燃烧波的传播

Fig. 8 Propagation of combustion wave at $\phi=1.0$

积多孔介质，气体流量为 $12 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，化学当量比为 0.7、0.8 和 1.0 时火焰峰面移动情况。

可以看出，多孔介质中的火焰传播速度随着化学当量比而改变，在 $\phi=0.7$ 时，火焰面在两根相邻热电偶之间的传播时间为 1.14 h 左右，其燃烧波传播速度为 $1.06 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ；在 $\phi=0.8$ 时传播时间为 0.48 h 左右，燃烧波的传播速率为 $2.65 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，比在 $\phi=0.7$ 时快了 1.5 倍，当 $\phi=1.0$ 时，传播时间仅需 0.25 h，燃烧波的传播速率达到了 $3.52 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见，随着化

学当量比的增大, 火焰前沿移动速度加快, 这是由于化学当量比变大后其燃烧释放了更多热量, 促进了反应, 增加了多孔介质孔隙中的火焰传播速度 u_k , 其燃烧波传播速度也必然会变快。

表 3 列出了试验工况下的结果, 从中可以看出, 除了化学当量比之外, 火焰峰面的传播速度受多孔介质堆积结构的影响也很大, 在孔隙率相差不大的情况下, 大的孔隙结构产生较快的传播速度。在化学当量比同为 0.7 时, 6 mm 小球堆积多孔介质内的燃烧波传播速度为 $2.57 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 比 3 mm 小球堆积多孔介质内的燃烧波传播速度 $1.06 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 快了有 $1.51 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 之多。

表 3 试验结果

Table 3 Experimental results

Condition	Porosity, ϵ	Equivalence ratio, ϕ	Filtration velocity / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	Interstitial velocity / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	Combustion wave velocity / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
1	0.37	0.7	12	32.4	1.06×10^{-3}
2	0.37	0.8	12	32.4	2.65×10^{-3}
3	0.37	1.0	12	32.4	3.52×10^{-3}
4	0.42	0.7	12	28.6	2.57×10^{-3}
5	0.42	0.8	12	28.6	3.07×10^{-3}

3 结 论

试验研究了自由小球堆积多孔介质内的燃烧波的传播, 在多孔介质中能够产生稳定传播的燃烧波, 其传播速度几乎不受时间的影响, 但燃烧波的传播速度受到化学当量比和多孔介质孔隙结构的影响。化学当量比 ϕ 为 1.0 时的燃烧波的传播速度比 ϕ 为 0.7 时快了约 3 倍; 在孔隙率相差不是很大的情况下, 6 mm 小球堆积而成的多孔介质比 3mm 小球堆积的多孔介质具有更快的燃烧波传播速度。

References

- [1] Howell J R, Hall M J, Ellzey J L. Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, **22** (2): 121-145
- [2] Hanamura Katsunori, Echigo Ryoza, Zhdanok Serguei A. Superadiabatic combustion in a porous medium. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, **36** (13): 3201
- [3] Diepvens Guillaume, Ellzey Janet L, Henneke Michael R. Numerical study of the effects of material properties on flame stabilization in a porous burner. *Combustion and Flame*, 2003, **134** (4): 369-379
- [4] Brenner G, Pickenacker K, Pickenacker O, Trimis D, Wawrzinek K, Weber T. Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methane/air combustion in porous inert media. *Combustion and Flame*, 2000, **123** (1/2): 201-213
- [5] Hsu P F, Howell J R, Matthews R D. A numerical investigation of premixed combustion within porous inert media. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1993, **115**: 744-750
- [6] Ellzey Janet L. Numerical and experimental study of the conversion of methane to hydrogen in a porous media reactor. *Combustion and Flame*, 2006, **144**: 698-709
- [7] Bingué J P, Saveliev A V, Kennedy Lawrence A. Optimization of hydrogen production by filtration combustion of methane by oxygen enrichment and depletion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, **29** (13): 1365
- [8] Hsu P F, Matthews R D. The necessity of using detailed kinetics in models for premixed combustion within porous media. *Combustion and Flame*, 1993, **93**: 457-466
- [9] Korzhavin A A, Bunev V A, Abdullin R K H, Babkin V S. Flame zone in gas combustion in an inert porous medium. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1982, **18**: 628-631
- [10] Li Guoneng (李国能), Zhou Hao (周昊), Qian Xiping (钱欣平), Ling Zhongqian (凌忠钱), Cen Kefa (岑可法). Modeling hydrogen production in super-adiabatic combustion of hydrogen sulfide in porous media. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, **57** (9): 2175-2179
- [11] Lü Zhaohua (吕兆华), Sun Sicheng (孙思诚). Prediction of premixed flame burning rate within porous media. *Journal of Combustion Science and Technology* (燃烧科学与技术), 1998, **4** (3): 242-246
- [12] Lü Zhaohua (吕兆华), Sun Sicheng (孙思诚), Pei Jinghua (裴锦华), Matt R D. Experimental study of premixed burning rate within porous ceramics. *Journal of Combustion Science and Technology* (燃烧科学与技术), 1995, **1** (2): 129-134
- [13] Wang Enyu (王恩宇), Cheng Leming (程乐鸣), Wu Xuecheng (吴学成), Luo Zhongyang (骆仲泱), Cen Kefa (岑可法). Experimental research on premixed combustion in gradually-varied porous media. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science* (浙江大学学报: 工学版), 2002, **36** (6): 685-689
- [14] Deng Yangbo (邓洋波), Xie Maozhao (解茂昭). Emission characteristics of premixed superadiabatic combustion in porous media. *Journal of Dalian University of Technology* (大连理工大学学报), 2004, **44** (3): 392-397
- [15] Pantangi V K, Mishra S C. Combustion of gaseous hydrocarbon fuels within porous media—a review. *Advances in Energy Research*, 2006, **8**: 455-461
- [16] Dimosthenis Trimis, Wawrzinek Klemens. Flame stabilization of highly diffusive gas mixtures in porous inert media. *Journal of Computational and Applied Mechanics*, 2004, **5** (2): 367-381