

惯性分离器内气固两相流雷诺应力数值模拟

王海刚, 刘 石, 姜 凡

(中科院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 对循环流化床中气固惯性分离过程进行了详细的数值研究。湍流模型采用雷诺应力模型, 研究对象为 U 型分离器内的气-固两相流动。为了真实描述固体颗粒与分离器壁面之间的碰撞过程, 固体颗粒模拟采用颗粒轨道模型, 引入壁面粗糙度的影响, 同时考虑了固体颗粒在湍流中的扩散作用和颗粒之间的相互碰撞。模拟计算了不同入口速度、分离器挡板数目对颗粒分离效率和流体压降的影响, 计算结果不仅给出了分离器内的气-固两相流动结构特性, 而且给出了分离器效率、压降与入口主流速度和分离器结构参数的关系。

关 键 词: 雷诺应力模型; 惯性分离器; 颗粒轨道模型

中图分类号: TK223.4 O357 文献标识码: A

1 前 言

由于惯性分离器固有的结构特点, 其内部流场是一种十分复杂的带有各向异性的湍流流动。气相流动的计算是一项很复杂的研究内容, 湍流模拟应该用各向异性的湍流模型来研究, 但目前国内外有关这方面的研究还很少, 研究只停留在简单的双方程模型上^[1~3], 因此采用合理的湍流模型对于准确计算颗粒在流场中的运动是十分必要的。本文针对惯性分离器中的复杂三维湍流气-固两相流动, 采用雷诺应力模型, 颗粒相基于拉格朗日方法, 考虑颗粒与颗粒之间的碰撞、颗粒与壁面之间的碰撞, 研究不同尺寸、不同形状的颗粒在 U 形分离器中的运动, 及 U 形结构尺寸、不同排列组合、不同形状的挡板对分离效率和压降的影响。

2 控制方程

为了方便, 将流体控制方程写成统一的形式:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\phi \times \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_\phi(x, y, z) \quad (1)$$

其中: ϕ —通用变量; Γ_ϕ —输运系数; $S_\phi(x, y, z)$ —源项。方程总结见表 1。

表 1 控制方程

	Φ	P_Φ	S_Φ	
连续方程	1	0	0	(2)
动量方程	u_i	μ_e	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) + \Delta \rho g_i$	(3)
雷诺应力方程	$\overline{u_i u_j}$	m/s_k	$G_{ij} - \frac{2}{3} \rho \overline{e} \delta_{ij} + P_{ij}$	(4)
湍能耗散方程	e	$\mu + \mu/\sigma_e$	$\frac{\epsilon}{k}(C_{\epsilon 1} G_k - C_{\epsilon 2} \epsilon)$	(5)

表 1 中: G_{ij} —湍能生成项; P_{ij} —压力应变项。本文采用的模型为 SSG 模型^[3]。SSG 模型中压力应变项的系数依赖于雷诺应力的变化和湍能的产生, 而雷诺应力的变化和湍能产生又与壁面作用密切相关, 因此 SSG 模型体现了壁面对雷诺应力分布的影响。以上各项的展开计算参考文献 4 ~ 5]。

3 固体颗粒运动方程

颗粒确定轨道模型在 Euler 坐标系中处理连续的流体相, 进而在 Lagrangian 坐标系下处理单个颗粒相, 对大量颗粒轨迹进行统计分析就可以得到颗粒群的运动概貌。单个颗粒的运动方程可以直接从牛顿第二定律得出:

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = F_D + F_C + F_M \quad (6)$$

式中: F_D —流体对颗粒的曳力; F_C —颗粒之间、颗粒与壁面之间碰撞产生的力; F_M —体积力, 由重力产生。在以上所有的相间力中, 曳力相对而言是最重要的, 它对流动、传热、传质起着十分重要的作用, 其表达式为:

$$F_D = C_D A \frac{\rho}{2} (U - V_p) |U - V_p| \quad (7)$$

其中: C_D —阻力系数, 通过下式确定:

$$C_D = \begin{cases} Re_p/24 & Re_p < 1 \\ Re_p/24(1.0 + 1/6Re_p^{2/3}) & 1 \leq Re_p < 1000 \\ 0.424 & Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (8)$$

式中: Re_p —颗粒雷诺数, 定义为:

$$Re_p = \frac{\rho d_p |U - V_p|}{\mu}$$

由公式得到的颗粒轨迹是确定的, 称为确定轨迹模型。但事实上, 由于湍流的影响, 流体在不同时刻和各个方向上都存在着脉动速度, 因此, 颗粒在流场中的速度、位置都会受到这种脉动速度的影响。所以有必要对前面给出的确定轨迹模型做进一步修正, 修正后的轨道模型称为随机轨道模型。流体的瞬时速度可以表示为:

$$u = U + u' \quad (9)$$

其中: U —流体的平均速度, u' —流体的湍流脉动速度。

当湍流模型为雷诺应力模型时, 湍流的脉动速度直接由雷诺应力的三个正应力分量得到:

$$u' = \zeta \sqrt{u'u'}, v' = \zeta \sqrt{v'v'}, w' = \zeta \sqrt{w'w'} \quad (10)$$

将式(10)代入式(6)得到颗粒的随机轨道模型:

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (U + u' - U_p) \quad (11)$$

式中: τ_p —颗粒的迟豫时间, $\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$, 代表颗粒在湍流中的扩散特性。

颗粒与壁面之间的碰撞速度可以根据冲量定理得到, 具体的推导过程见文献[7]。为了考虑壁面粗糙度对颗粒运动行为的影响, 引入一随机角度 α , 定义为^[8]:

$$\alpha = -\delta(\eta - \beta) \quad (\eta \leq \beta) \\ \alpha = 0 \quad (\eta > \beta) \quad (12)$$

其中: β —临界角度; η —颗粒运动方向与壁面的夹角; δ —与流体平均流速有关的参数, 定义为^[8]:

$$\delta = \frac{2.3}{Fr} - \frac{91}{Fr^2} + \frac{1231}{Fr^3}$$

其中: $Fr = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gh}}$ 。

当 η 大于临界角 β 时, 可不考虑粗糙度的影响; 当夹角小于临界角 β 时, 必须考虑壁面粗糙度的影响。但采用式(12)计算时, 模拟计算结果仍与实验值有差别。为此, 文献[9]对此进行了改进, 引入随机变量对角度加以修正: $\delta = cR^k \delta_0$, 式中 c, k 为常数, 其取值与流动状况相关, R 为随机数。本文计算选取: $c = 5, k = 4$ 。

常见的颗粒之间碰撞模型可分为软球模型和硬球模型^[7]。硬球模型把颗粒之间的碰撞看成是瞬时的、二元的弹性碰撞。直接用冲量定理完成碰撞过

程。该方法完全适应稀薄气固两相的情况, 计算量也小于软球模型。本文采用这种碰撞模型计算颗粒之间的碰撞过程见文献[7]。

4 数值模拟结果

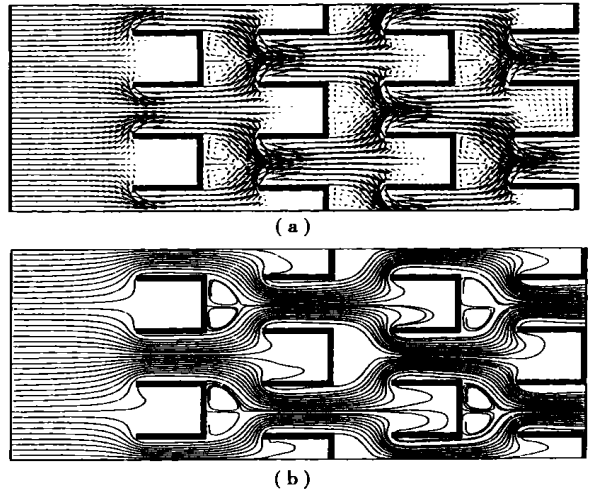


图 1 撞击式分离器内部速度矢量图(a)与流线(b)

模拟计算的惯性分离器挡板形状为 U 形, 交错布置 4 排, 入口速度为 5 m/s, 计算区域为 40 cm × 120 cm。图 1 为采用雷诺应力模型得到的速度矢量及对应的流线图。这两幅图可以清楚揭示分离器内部的复杂流动。图 2(a)~(d)为颗粒直径 100 μm、80 μm、40 μm、20 μm 时粒子的轨迹。通过计算可见, 对于 100 μm 和 80 μm 的颗粒, 很少能够流出分离器, 大多数颗粒通过第一和第二排挡板后就被分离。当颗粒直径减小时(如 40 μm 和 20 μm), 随流体流出分离器的颗粒数目增加(图 2(c)、(d)), 这主要是由于小颗粒对流体的跟随性好, 轨迹基本与流线一致, 而大颗粒受自身惯性影响, 与挡板碰撞后被分离下来。图 3 比较了直径为 20 μm 颗粒采用确定轨道模型和随机轨道模型计算得到的颗粒轨迹。计算结果显示了湍流脉动速度对颗粒的运动具有一定的影响。计算得出颗粒在湍流脉动速度的作用下, 开始做类似于布朗的运动, 颗粒直径越小, 现象越明显。而对于直径为 80 μm 的颗粒, 几乎不受湍流脉动的影响。图 4 为考虑颗粒之间碰撞, 直径为 80 μm 颗粒在分离器中运动轨迹与不考虑颗粒之间碰撞的轨迹比较; 图 5(a)为直径分别为 40 μm 和 20 μm 的颗粒位于相同的初始位置时, 考虑颗粒之间碰撞的模拟计算结果; 图 5(b)为直径 20 μm 颗粒的不同颗粒浓度

的运动轨迹。从以上计算结果可以看到:对于直径较大的颗粒同时颗粒浓度较高时,颗粒之间的碰撞不容忽视。

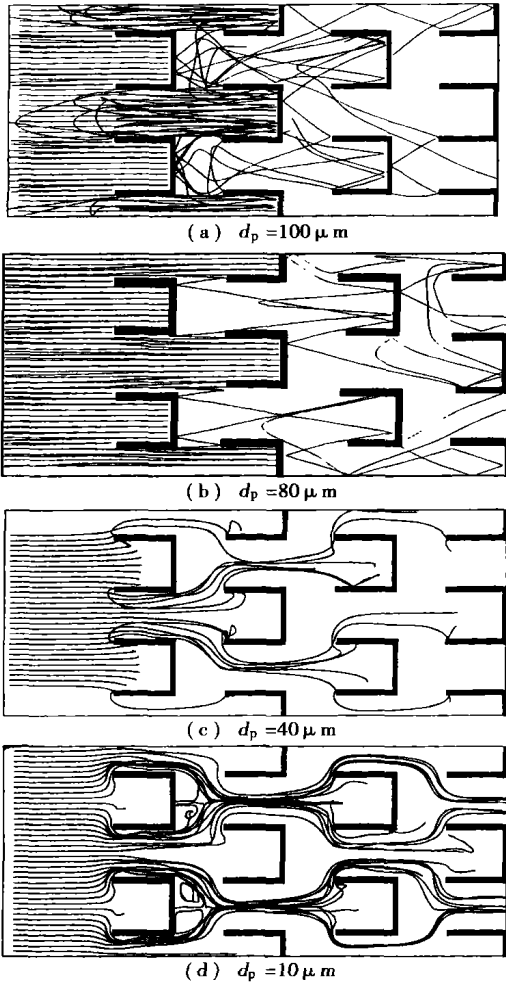


图2 颗粒运动轨迹

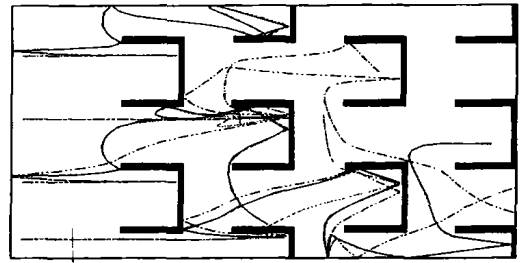


图4 颗粒运动轨迹($d_p = 80 \mu m$, 实线为考虑颗粒之间碰撞的颗粒轨迹, 点划线为不考虑碰撞影响的轨迹)

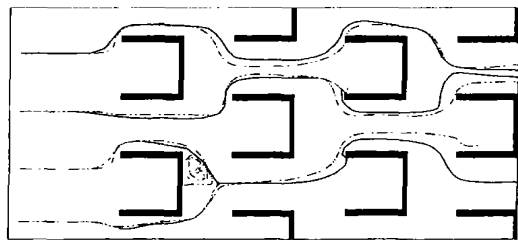
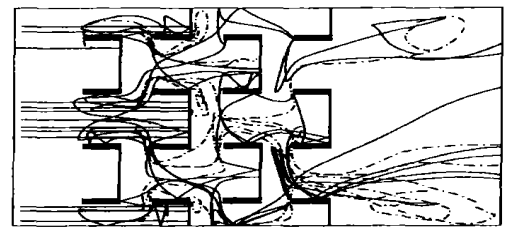
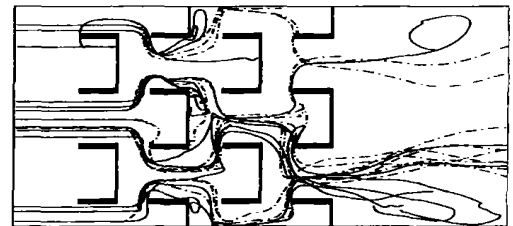


图3 颗粒运动轨迹($d_p = 20 \mu m$, 实线为受湍流影响的颗粒轨迹, 点划线为不考虑湍流影响的轨迹)



(a) 颗粒直径的影响
实线:颗粒直径 $40 \mu m$, 点划线:颗粒直径 $20 \mu m$



(b) 颗粒浓度的影响
实线:颗粒浓度 $0.1 kg/m^3$, 点划线:颗粒浓度 $1.0 kg/m^3$

图5 颗粒之间碰撞对径颗粒轨迹的影响

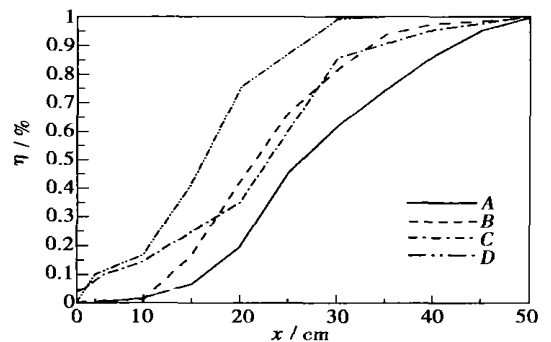


图6 分离效率曲线

通过对大量不同颗粒在分离器中的运动模拟,可以得到分离效率。为了考虑入口速度对颗粒分离

效率的影响,分别计算了入口速度为 $5.0 m/s$ 、 $7.5 m/s$ 和 $10.0 m/s$ 三种情况,同时为了比较挡板排数对分离效率的影响,分别采用了4排、5排和7排结构的U型

分离器。图 6 为计算得到的分离效率曲线, 图中 A 为入口流速为 5 m/s, 挡板数为 4 的分离效率曲线; B 对应入口速度 5 m/s, 有 5 排挡板时的分离效率; C 为入口速度 5 m/s, 7 排挡板时的分离效率; D 为有 4 排挡板时, 入口速度为 10.0 m/s 的分离效率曲线。图 7 为压降曲线, A 为入口流速 5 m/s, 4 排挡板时的压降; B 为入口流速 5 m/s, 有 5 排挡板时压降; C 为入口流速 7.5 m/s, 4 排挡板时的压降; D 为入口流速 10 m/s, 4 排挡板时的压降。计算结果表明, 当入口速度增加时, 颗粒分离效率增加(图 6 曲线 A 和 D), 说明当主流速度增大时, 颗粒的惯性力随之增加, 从而导致颗粒的分离速度加快, 但此时流体的压降增加(图 7 曲线 A、C、D); 计算同时表明, 增加一定数目的挡板, 能提高颗粒的分离效率(图 6 曲线 A、B), 并且压降损失的增加也不大(图 7 曲线 A 和 B), 说明增加一定的挡板数目, 有利于提高分离效率。但计算表明, 当挡板数为 7 排时, 分离效率的提高不明显, 反而压降损失增大(见表 2 计算结果), 这与实验观测得到的结果一致^[10]; 挡板排数超过 7 时, 不仅分离效率不会提高, 反而压降会迅速上升。因此对于此类型的分离器, 要综合考虑分离效率和压降损失, 不能盲目地增加挡板数和入流速度。

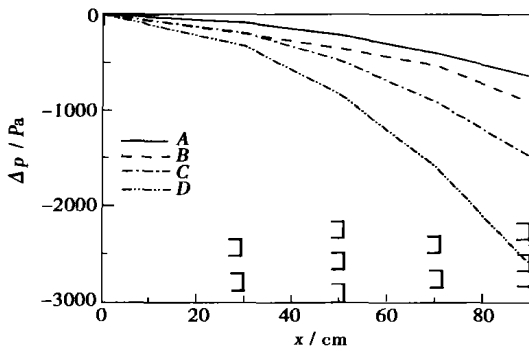


图 7 压降曲线

在计算过程中, 由于受颗粒数目的限制, 计算得到的分离效率、压降会与实际情况有一定的差别, 今后将对此类型的分离器进行更深入的数值计算和实验研究, 为工程应用和实际循环流化床锅炉运行提供有参考价值的参数和指导设计。

表 2 分离特性计算结果

挡板排数	4	5	7
压降 / Pa	207.6	482.7	714.5
分离效率 / % (颗粒直径 10 ^μ m)	1.9	1.85	14.56

5 结 论

采用雷诺应力模型, 在颗粒轨道模型的基础上, 综合考虑了颗粒与壁面之间、颗粒与颗粒之间的碰撞, 及颗粒在湍流中的扩散。通过对 U 型惯性分离器的计算, 结果表明:

(1) 撞击式分离器对于颗粒直径大于 50 μm 的颗粒有良好的收集效率, 颗粒的大部分在第 1 和第 2 排挡板之间被分离下来, 增加有限数目的挡板, 能提高分离效率。但过多挡板, 不但不能提高分离效率, 反而使压降增加;

(2) 分离器的分离效率随入口速度增加而增大, 但超过一定值时, 分离效率提高不明显, 反而压降急剧增大;

(3) 雷诺应力模型能够较准确预报惯性分离器内部复杂的流动结构, 在当前计算机硬件环境允许的条件下, 是一种十分有发展前景的湍流模型;

(4) 通过引入壁面粗糙度和湍流扩散影响的颗粒轨迹模型, 能够很好预测颗粒在分离器内部的运动规律和分离效率。

参考文献:

- [1] BASKAKOV A B, MUDRECHENKO A V, BUBENCHIKOV A M, et al. Modeling of U-beam separator[J]. *Powder Technology*, 2000, **107**: 84-92.
- [2] CHEN L H, FAN J R, CEN K F. Numerical study of U-beam inertial separator[J]. *J of Thermal Science* 2001, **10**(3): 264-268.
- [3] CHARLES G SPEZIAL, SUTANU SARKAR, THOMAS B GATSKI. Modelling the pressure-strain correlation of turbulence: An invariant dynamical systems approach[J]. *J Fluid Mech* 1999, **227**: 245-272.
- [4] 王海刚, 刘 石. 不同湍流模型在旋风分离器三维数值模拟中的应用和比较[J]. *热能动力工程*, 2003, **18**(4): 337-342.
- [5] 王海刚. 旋风分离器中气-固两相流数值计算与实验研究[D]. 北京: 中国科学院工热物理研究所, 2003.
- [6] CROWE C T. The state of the art in the development of numerical models for dispersed two-phase flows[A]. *Proceedings of the First International Conference on Multiphase Flows*[C], Tsukuba, 1991.
- [7] CROWE C T, SOMERFELD M, TSUJI Y. *Multiphase flows with droplets and particles*[M]. London: CRC Press, 1996.
- [8] SOMMERFELD M. Modelling of particle-wall collisions in confined gas-particle flow[J]. *Int J Multiphase Flow* 1992, **18**(6): 905-926.
- [9] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery from environmental solid particles[J]. *J Aircraft* 1975, **12**: 471-478.
- [10] NGUYEN A V, FLETCHER C A J. Particle interaction with the wall surface in two phase gas-solid particle flow[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1999, **25**: 139-154.

lift-off. The lower the resonant frequency, the stronger the turbulence. At other frequency values the flame remains attached and has a shorter length with the shortest length appearing at 50% to 60% of duty cycle. The condition of piping connection can also influence the pulsating characteristics of the flame. Under resonant frequencies and with an increase in average Reynolds number the flame may lift off at a relatively high fuel-rich combustion-time share while under other frequencies the flame will remain attached all the time. **Key words:** combustion with a pulsating fuel feed, low NO_x combustion, flame characteristics, flame alternative structure.

“旋转型气-液雾化喷嘴”流量特性的实验研究 = **Experimental Investigation of the Flow Characteristics of a Swirl-type Gas-liquid Atomization Spray Nozzle** [刊, 汉] / GONG Jing-song, FU Wei-biao (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 376 ~ 379.

The atomization mechanism of various types of pneumatic spray nozzles was analyzed. On this basis proposed is an innovative atomization spray nozzle, the so-called swirl-type gas-liquid atomization spray nozzle. Its air-to-liquid mass flow rate ratio (ALR) during hot-state tests is 4% - 6% (atomized by compressed air). A systematic study was conducted of its flow factor with main attention being focused on the influence of nozzle structural parameters, ALR and liquid viscosity on the flow factor. Through experimental measurements and fitting a mathematical expression of the nozzle flow factor is obtained, which can serve as a guide for the spray nozzle design. **Key words:** spray nozzle, flow factor, air-to-liquid mass flow rate ratio.

惯性分离器内气固两相流雷诺应力数值模拟 = **Numerical Simulation of Reynolds Stresses of Gas-solid Two-phase Flows in an Inertial Separator** [刊, 汉] / WANG Hai-gang, LIU Shi, JIANG Fan (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 380 ~ 383.

A detailed numerical study was conducted of the gas-solid inertial separation process in a circulating fluidized bed. A Reynolds stress model is used to serve as a turbulent flow model with the object of study being the gas-solid two-phase flow in a U-shaped separator. To truthfully describe the collision process between solid particles and a separator wall surface, a particle trajectory model was adopted to simulate solid particles. In addition to the introduction of the influence of the wall surface roughness, the diffusion action of the solid particles in turbulent flows and the mutual collision between particles have also been taken into account. The influence of different inlet speeds and quantity of separator dampers on particle separation efficiency and fluid pressure drop has been calculated through the use of simulations. The calculation results have given not only the structural features of the gas-solid two-phase flows in the separator, but also shown the relationship between the separator efficiency and pressure drop on the one hand and inlet main flow speeds and separator structural parameters on the other. **Key words:** Reynolds stress model, inertial separator, particle trajectory model.

多孔介质往复流动燃烧的一维数值模拟 = **One-dimensional Numerical Simulation of Reciprocating-flow Combustion in Porous Media** [刊, 汉] / MA Shi-hu, XIE Mao-zhao, DENG Yang-bo (Power Engineering Department, Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 384 ~ 388.

A one-dimensional mathematical model was set up to simulate the reciprocating-flow combustion in porous media. In this system combustible premixed gases change their direction periodically, and flow into a combustor from two ends. It is assumed that gas phase and solid phase exist in a state of local thermal equilibrium and the influence of radiation heat exchange has also been taken into account. A mathematical solution is obtained by using a finite volume scheme. By way of a huge quantity of numerical calculations investigated was the impact of major operating parameters on the temperature distribution and reaction characteristics of the combustion system. As for such parameters one can list: half cycle, flow speed, equivalence ratio, heat losses, attenuation factor of porous media and their heat capacity. The calculation results are qualitatively in fairly good agreement with experimental results. **Key words:** porous media, reciprocating, super adi-