

Two-Temperature Approximation Analyzing the Combustion Characteristics of Premixed Gas-Air Mixture in Inert Porous Media

Genfu Hou^{1,2}, Lanzhou Gao¹, Yukun Qin²

¹Dept. of Environment and Equipment Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, China

²School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China

Email: hougenfu@163.com, hougf@hit.edu.cn

Abstract: A study is concerning combustion waves propagation characteristics during the filtration of premixed gas-air mixtures in inert porous media, which the two-temperature approximation is used. Such processes are characterized by an intense thermal interaction between the gas and the porous material. Due to interfacial heat transfer, the solid phase is able to redistribute heat absorbed from reaction products to the unburned mixture. The analytical solution is built in three different regions: the pre-heating region, the reaction region and the region occupied by the combustion products. Analytic expressions predicting the temperature and methane mass fraction profiles in the wave, as well as the combustion wave velocity and the longitudinal extension of the reaction region are derived. The results are confirmed by a lean CH₄-air case calculation. It is shown that the reaction region is not infinitely thin.

Keywords: Combustion; Porous media; Analytical solution; Combustion wave velocity

二元温度近似法求解多孔介质中燃气空气预混燃烧火焰特性

侯根富^{1,2}, 高兰周¹, 秦裕琨²

¹福建工程学院 环境与设备工程系, 福州, 中国, 350108

²哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨, 中国, 150001

Email: hougenfu@163.com, hougf@hit.edu.cn

摘要: 本文采用二元温度近似分析法求解燃气空气混合物在多孔介质中的火焰燃烧传播特性。多孔介质与气相之间存在剧烈的热交换, 固相界面会将其吸收的热量的一部分热量传递给未燃气体。本文涉及的多孔介质颗粒床是由三种不同的区域构成: 预热区、反应区和燃尽的烟气区。针对这三个不同的区域, 分别计算出了火焰波中温度分布、燃气浓度的分布, 以及燃烧速度和反应区焰面厚度解析表达式。通过一个贫甲烷-空气预混混合物算例的计算, 结果显示, 反应区厚度不能忽略。

关键词: 燃烧; 多孔介质; 解析解; 燃烧速度

1 引言

多孔介质燃烧技术在提高燃烧效率、扩展可燃极限、节约燃料、改善环境以及处理各类垃圾和废弃物等方面具有其他燃烧技术不可比拟的优越性, 被誉为划时代的燃烧技术[1-3]。多孔介质燃烧器的换热以高温固体介质的辐射为主, 大大提高了换热效率。与传统的大气式燃烧相比具有突出的特点: 燃烧速度更快、

火焰稳定性好、系统的燃烧效率高、可燃用非常低热值的燃气、污染物排放量极少。该项技术可以应用于工业和民用诸多领域, 诸如: 石油冶炼、红外线无焰燃烧设备、辐射式加热器、陶瓷材料合成、多孔催化剂燃烧、空气中有机挥发物去除、多孔介质内衬内燃机、燃气轮机、污染物控制等环保与燃烧领域[4-7]。从而满足或达到节能和环保的要求。

文献[3,8-9]研究表明, 可燃混合物在多孔介质中的燃烧焰面出现向上、下游移动的情况, 其移动的方

福建省教育厅基金项目(JA06032); 福建工程学院基金项目(GY-Z0602)

向通常取决于气、固两相的物性参数和可燃混合物的初始速度、初始温度以及过剩空气系数。当这些参数改变时，焰面出现上下移动，不过其移动的速度远小于气流速度。对温度分布的研究表明，在反应区的温度非常高（比正常的绝热燃烧温度高），Weinberg[10]首次用超绝热燃烧（又称过焓燃烧）的概念来解释这一高温现象。多位学者[3, 11-15]对超绝热燃烧进行了更为细致全面的理论研究，均采用一维一步反应模型研究流速、传热系数、多孔介质厚度等对这种过焓燃烧特性的影响。研究表明，对有限的多孔介质厚度，存在一个维持稳定燃烧的临界气流速度。超过该临界速度，火焰就熄灭。这个临界速度主要与固相的厚度和热损失有关。

许多学者重点研究了多孔介质辐射对预混火焰燃烧速度及火焰结构的影。Yoshizawa 等人[16]采用一维解析模型分析固体辐射对火焰燃烧速度及火焰结构的重要影响。使用一维分析模型，分别对三个不同区进行求解，即预热区、燃烧区、烟气区。每个区的物性参数假设为定值，燃烧反应采用一步反应模型，能量方程考虑气体、固体的导热、固体的辐射、气固之间的对流换热，火焰位置设为固定不动。结果表明，在预热区，固相温度比气相温度高；在高温烟气区，刚好相反。同时得出对过焓燃烧的影响，固体的辐射比其导热显著得多。

又有多位学者采用解析解来分析多孔介质火焰特性。文献[17]假定热损失相对较小，采用对流模型或导热模型，得出了绝热和非绝热两种条件下温度分布、成分分布以及火焰焰面移动速度的解析表达式。而文献[18]采用一元温度近似法得出分析解。这种方法忽略了气固界面的换热系数及其对火焰特性的影响。

本文针对图 1 所示的多孔介质颗粒床：由三种不同的区域构成：预热区、反应区和燃尽的烟气区进行分析求解。采用二元温度近似分析法，一维一步反应模型，每个区的物性参数假设为定值，推导燃气浓度分布、温度分布解析表达式，同时要建立预测燃烧速度、反应区厚度的解析式。

2 多孔介质燃气空气预混燃烧数学物理模型

2.1 物理模型

物理模型如图 1 所示，直径为 D 的石英玻璃管内装满了用矾土做成的耐火固体实心球，球体的直径为

dp 。由火焰焰面可人为地将石英玻璃管内分成三部分：I 区：为完全预混的燃气-空气混合物的预热区，长度为 L ；II 区：中间为燃烧反应区，其厚度为 Δ ；III 区：为燃尽的高温烟气与固体颗粒换热区。

一定流速 (u_g) 的可燃混合物在多孔介质颗粒床入口处附近点燃后，由于较冷的固体吸热，焰面会逐渐右移抵达到 $Z=L$ 处。然后由于固体温度逐渐变高后，出现固体辐射换热加热未燃混合物，使得焰面左移，焰面向左移动的速度 S_n 可认为等于常数，且远远小于可燃混合物的流速。当焰面上移到某位置时就达到一种平衡，焰面驻定不动。当气流速度改变，或散热条件改变，焰面驻定不动的位置将发生改变。

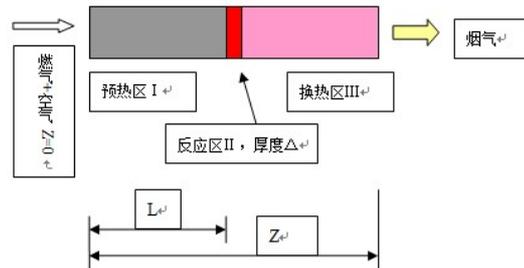


Figure 1. Schematic diagram of the physical problem considered.
图 1 多孔介质颗粒床物理模型示意图

焰面厚度 Δ 在本文中是这样定义的，即从石英玻璃管内温度等于燃气-空气混合物的着火温度某截面算起，到甲烷的质量成分等于入口处质量成分的千分之一时的那个截面为止，二截面之间的垂直距离就是焰面厚度 Δ 。

2.2 数学模型

石英玻璃管与外界之间的有效传热系数可写为：

$$\alpha_v = \frac{4}{D} (h + \varepsilon_s \sigma \varepsilon_{qt} \frac{T^4 - T_0^4}{T - T_0})$$

α_v - 与环境之间的有效换热系数；

h - 对流换热系数；

ε_s - 固体球的发射率；

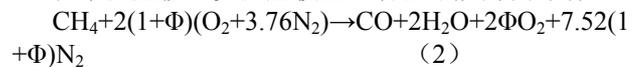
ε_{qt} - 石英玻璃管的透射率；

σ - 波尔兹曼常数；

D - 石英玻璃管的外径

(1)

化学反应按一步反应模型，若以甲烷为例即有：



Φ -入口处过剩空气量占理论空气量的比例。

燃气的燃烧反应热为： Δh_c ，化学反应的活化能为

E，初始平衡常数为 k_0

多孔介质的有效导热系数可写成以下形式：

$$\lambda_{eff} = (1 - \varphi)\lambda_s + \frac{32\sigma d_p \varphi T_s^3}{9(1 - \varphi)}$$

φ - 多孔介质孔隙率；
 λ_s - 多孔介质固相导热系数；
 d_p - 固体球的直径；
 T_s - 固体的表面温度。 (3)

气、固界面传热系数可按文献[11]给出的形式：

$$\alpha = \frac{6\lambda_s(1-\varphi)}{d_p^2} \left[2.0 + 1.1Pr^{1/3} \left(\frac{\varphi\rho_g u_g d_p}{\mu_g} \right)^{0.6} \right] \quad (4)$$

燃烧过程在常压下进行，所以忽略气体的可压缩性，燃气空气混合物可按理想气体处理。

气相的能量方程可写成：

$$\varphi(\rho C_p)_g \left(\frac{\partial T_g}{\partial \tau} + u_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) = -\alpha(T_g - T_s) + \Delta h_c k_0 y \varphi \rho_g e^{-E/RT_g} \quad (5)$$

固相的能量方程可写成：

$$(1-\varphi)(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial z}) + \alpha(T_g - T_s) - \alpha_v(T_s - T_0) \quad (6)$$

具有化学反应的连续性方程可写为：

$$\frac{\partial y}{\partial \tau} + u_g \frac{\partial y}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda_g}{C_{pg}} \frac{\partial y}{\partial z} \right) - k_0 y e^{-E/RT_g} \quad (7)$$

式中， y ---燃气的质量成分（容积成分）

初始条件：

$$\tau = 0: T_g = T_s = T_0, y = y_0 \quad (8)$$

边界条件：

$$z = 0: T_g = T_s = T_0, u_g = u_0, y = y_0$$

$$z \rightarrow \infty: T_g' = T_s' = y = 0 \quad (9)$$

本文的主要工作目的是要求出该物理数学模型下的解析解的表达式：温度分布、燃气质量成分分布，以及反应区火焰移动速度 S_n 、燃烧火焰的厚度 Δ 。

3 分析法求解过程

首先，方程式进行无量纲化处理。为了消除时间项，我们把时间与火焰的位置之间建立如下 的关系式：

$$\bar{z} = z - S_n \tau, S_n \ll u_g, \text{且 } S_n = const.$$

另外，假设方程式（7）中的扩散项仅在反应区存在，则方程式（5）、（6）、（7）可转变为如下的无因次方程式：

$$\bar{y}' = a_1 \bar{y} - a_2 \bar{y} \quad (10)$$

$$\theta_g' = a_3(\theta_s - \theta_g) - a_4 \bar{y} \quad (11)$$

$$a_5 \theta_s' = \theta_s'' + a_3(\theta_g - \theta_s) - a_6 \theta_s \quad (12)$$

式中

$$\bar{y} = \frac{y}{y_0}, a_1 = \frac{\lambda_g \varphi \rho_g}{\lambda_{eff}}$$

$$a_2 = \frac{k_0 \lambda_{eff} e^{-E/RT_g}}{\varphi \rho_g u_g^2 C_{pg}}$$

$$\theta_g = \frac{T_g - T_0}{T_{ig} - T_0}, \theta_s = \frac{T_s - T_0}{T_{ig} - T_0}$$

$$a_3 = \frac{\alpha \lambda_{eff}}{(\rho_g C_{pg} u_g \varphi)^2}, a_4 = \frac{y_0 \Delta h_c}{C_{pg} (T_{ig} - T_0)} \quad (13)$$

$$a_5 = \frac{\rho_s C_{ps} (1-\varphi) S_n}{\rho_g C_{pg} u_g \varphi}, a_6 = \frac{\alpha_v \lambda_{eff}}{(\rho_g C_{pg} u_g \varphi)^2}$$

引入无因次尺寸

$$x = \frac{\bar{z}}{Z_c}, Z_c = \frac{\lambda_{eff}}{\varphi \rho_g C_{pg} u_g}$$

$$\delta_L = \frac{L}{Z_c}, \delta = \frac{\Delta}{Z_c} \quad (14)$$

在式（13）中，系数 a_2 是个变量，与气体的温度有关。为了便于求解，假定每个区的温度为定值，这样公式（10）的积分就不受式（11）、（12）的制约，可单独积分。

根据经验知道，在多孔介质中的气体、固体的温

度梯度几乎相等，即存在： $\theta_g' \approx \theta_s'$

公式（11）、（12）可简化为一个公式：

$$\theta_s'' - (1 + a_5)\theta_s' - a_4 \bar{y}' - a_6 \theta_s = 0 \quad (15)$$

可用式（10）、（12）、（15）、（13）、（14）构建一套分析解方程组。对三个区分别积分求解，边界条件为：

$$x = -\delta_L: \theta_{s,I} = 0, \bar{y}_I = 1;$$

$$x = 0: \theta_{s,I} = \theta_{s,II} = 1, \bar{y}_I = \bar{y}_{II};$$

$$x = \delta: \theta_{s,II} = \theta_{s,III}, \theta_{s,II}' = \theta_{s,III}', \bar{y} = c;$$

$$x \rightarrow \infty: \theta_{s,III} = 0, \bar{y} = 0. \quad (16)$$

然后对方程式组进行积分求解。

第一步，对预热区 I 积分求解。在预热区，化学反应可忽略不计，式（10）中的扩散项忽略，系数 a_2

中的气体温度设为定值，其大小等于甲烷-空气混合物着火温度与初始温度算术平均值。

对式 (15)、(10) 分别积分，考虑到边界条件： $x = -\delta_L$ 时 $\bar{y} = 1, \theta_{s,1} = 0$ 以及 $x = 0$ 时， $\theta_{s,1} = 1$ ，我们可以得到：

$$\bar{y}_1 = e^{-a_{2,1}(x+\delta_L)}, a_{2,1} = \frac{k_0 \lambda_{eff}}{\varphi \rho_g u_g^2 C_{pg}} e^{-\frac{2E}{R(T_{ig}+T_0)}} \quad (17)$$

$$\theta_{s,1} = c_3 e^{k_3 x} + c_4 e^{k_4 x}$$

$$c_3 = -\frac{e^{(k_3-k_4)\delta_L}}{1 - e^{(k_3-k_4)\delta_L}}, c_4 = \frac{1}{1 - e^{(k_3-k_4)\delta_L}}$$

$$k_3 = \left(\frac{1+a_5}{2}\right) \left(1 + \sqrt{1 + 4a_6 / (1+a_5)^2}\right)$$

$$k_4 = \left(\frac{1+a_5}{2}\right) \left(1 - \sqrt{1 + 4a_6 / (1+a_5)^2}\right) \quad (18)$$

$$\theta_{g,1} = c_9 c_3 e^{k_3 x} + c_{10} c_4 e^{k_4 x}$$

$$c_9 = \frac{a_5 k_3 - k_3^2 + a_3 + a_6}{a_3}$$

$$c_{10} = \frac{a_5 k_4 - k_4^2 + a_3 + a_6}{a_3} \quad (19)$$

第二步对反应区 II 进行求解。

对具有化学反应的连续性方程式 (10) 进行积分时，假设系数 a_2 中的温度项不变且等于甲烷的着火温度 T_{ig} ，则积分后可得到：

$$\bar{y}_{II} = e^{k_2 x - b}, k_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{1 + 4a_1 a_{2,II}}}{2a_1}$$

$$b = a_{2,1} \delta_L, a_{2,II} = \frac{k_0 \lambda_{eff} e^{-E/RT_{ig}}}{\varphi C_{pg} \rho_g u_g^2} \quad (20)$$

对于燃烧反应区，在物理模型中已经明确指出：它是始于气体温度等于着火温度的截面，在这个地方， $\theta_{g,II} = 1$ ，结束于 $x = \delta$ ，在这里燃料质量成分趋近于 0，即 $x \rightarrow \delta, \bar{y} \rightarrow \zeta$ ，这里我们一般取 $\zeta = 0.001$ 。所以，代入 (20) 式，可得其中一种解为：

$$\delta = \frac{\ln \zeta + b}{k_2} \quad (21)$$

求出 δ 的值后，那么，火焰层的厚度即可计算得出：

$$\Delta = \delta Z_c = \frac{\delta \lambda_{eff}}{\varphi \rho_g C_{pg} u_g} \quad (22)$$

然后对式 (15) 积分求解，将 (20) 式中的 \bar{y}_{II} 求导数后代入 (15) 式中，用拉格朗日展开式求解，可得：

$$\theta_{s,II} = e^{k_3 x} (c_5 + c_5(x)) + e^{k_4 x} (c_6 + c_6(x))$$

$$c_5(x) = \frac{a_4 k_2 e^{-b}}{(k_3 - k_4)(k_2 - k_3)} e^{(k_2 - k_4)x}$$

$$c_6(x) = \frac{a_4 k_2 e^{-b}}{(k_4 - k_3)(k_2 - k_4)} e^{(k_2 - k_4)x} \quad (23)$$

$$c_5 = -c_5(\delta), c_6 = 1 - c_5(0) - c_6(0) + c_5(\delta) \quad (24)$$

在反应区中气相的温度可由 (12) 式求得：

$$\theta_{g,II} = c_9 e^{k_3 x} (c_5 + c_5(x)) + c_{10} e^{k_4 x} (c_6 + c_6(x)) - \frac{a_4 \bar{y}'_{II}}{a_3} \quad (25)$$

第三步，对高温烟气区 III 积分求解。

在该区，可认为燃料已完全燃尽，即存在：

$$\bar{y} = 0, \bar{y}' = 0, \text{ 连同边界条件: } x \rightarrow \infty, \theta_{s,III} = 0,$$

这是对 (14)、(12) 式分别积分求解，可得：

$$\theta_{s,III} = c_8 e^{k_4 x}, \theta_{g,III} = c_{10} c_8 e^{k_4 x} \quad (26)$$

$$c_8 = c_6 + c_6(\delta) \quad (27)$$

最后，我们可求出焰面在多孔介质中的移动速度 S_n 以及燃气可燃混合物在多孔介质中的着火温度。

在多孔介质中的着火温度可看成是燃气空气混合物在气穴内热力爆燃时的温度，可由 Frank-Kamenetki 理论得出一个近似的超越方程解析式：

$$\frac{e^{\frac{E}{RT_{ig}} - 1}}{\left(\frac{E}{RT_{ig}}\right)^{7/3}} = \left(\frac{\Delta h_c^2 y_0^2 R^5}{2\pi^2 C_{pg}^2 E^2}\right) \cdot \left(\frac{d_p \varphi T_0 k_0}{u_g}\right) \quad (28)$$

采用试算法就可求出某特定条件下的多孔介质燃气预混燃烧的着火温度。

多孔介质中焰面移动速度可由边界条件：

$$x = 0, \theta_{g,II} = 1 \text{ 进行求解得出:}$$

$$S_n = \left(\frac{\rho_g C_{pg}}{\rho_s C_{ps}}\right) u_g \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{4\alpha_v (T_{ig} - T_0)}{\rho_g y_0 \Delta h_c k_0} e^{E/RT_{ig}}} \right] + \frac{k_0 \lambda_s}{4u_g \rho_s C_{ps} e^{E/RT_{ig}}} \quad (29)$$

4 以甲烷空气混合物为算例的计算结果

设石英玻璃管的直径为 $D=100\text{mm}$ 内装满了用矾土做成的耐火固体实心球，球体的直径为 $dp=5.6\text{mm}$ ，空隙率为 0.4，耐火矾土球的密度为 3987kg/m^3 ，发射率

为 0.45 ， 比 热 $C_{ps} = 29.567 + 2.61177T_s - 0.00171T_s^2 + 3.382 \times 10^{-7}T_s^3$ (J/kg.K) ， 导 热 系 数 : $\lambda_s = -0.21844539 + 0.00174653T_s + 8.2266 \times 10^{-8}T_s^2$ (W/mK)。

预混的甲烷-空气混合物的过剩空气系数为 5.88, 初始温度为 300K, 流速为 1.075m/s, 密度为 1.13kg/m³, 比热为 $C_{pg} = 947e^{0.000183T_g}$ (J/kg.K) , 动力黏度为 $\mu_g = 3.37 \times 10^{-7}T_g^{0.7}$ (kg/ms), 导 热 系 数 为 $\lambda_g = 4.82 \times 10^{-7}C_{pg}T_g^{0.7}$ (W/mK)。

石英玻璃管与外界的对流换热系数设为定值, 为 10W/m²K。

甲烷的反应热为: $\Delta h_c = 50150000\text{J/m}^3$, 其化学反符合阿基里乌斯定律, 活化能为 $E = 129999.97\text{J/mol}$, 初始平衡常数 $k_0 = 2.6 \times 10^8\text{s}^{-1}$ 。

将上述的已知条件代入到前面所推倒的解析解表达式中, 可求得:

着火温度等于 1150K; 焰面厚度 Δ 为 9.16mm; 多孔介质颗粒床内固相与气相的温度分布结果见图 2。

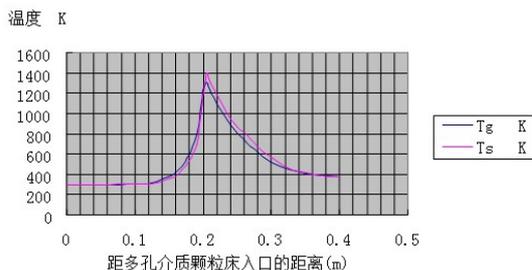


Figure 2. Profiles of the results derived from the two-temperature analytical solution

图 2 二元温度近似分析法求解的气固两相的温度分布

5 结论

通过对多孔介质燃气预混燃烧的理论研究, 采用二元温度近似法可以得到一系列简单的解析解代数关系式, 把多孔介质颗粒床人为分为三颗不同的区即: 预热区、反应区和燃尽的烟气区, 这样推导出了燃气浓度分布、温度分布, 同时还建立了预测燃烧速度、反应区焰面厚度的解析式。通过一个过剩空气量很大的甲烷-空气预混混合物的算例的计算, 其结果显示, 反

应区厚度不能忽略。该研究结果有助于指导分析多孔介质预混燃烧火焰特性, 以便得到广泛的应用。

References (参考文献)

- [1] Howell J R, Hall M J, Ellzey J L, Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media [J], *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996,22, P 122-145
- [2] Shi Mingheng, Yu Weiping, Wang Buxuan, Present Status and Prospect of research on heat and mass transfer in porous media [J], *Journal of Southeast University*, 1994, S1, P 1-7
施明恒,虞维平,王补宣,多孔介质传热传质研究的现状和展望 [J].东南大学学报,1994,24 (增刊), P 1-7
- [3] Oliveira A A M, Kaviany M, Nonequilibrium in the transport of heat and reactants in combustion in porous media [J], *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, 27, P 523-545
- [4] Bouma P H, De Goey L H, Premixed combustion on ceramic foam burners [J], *Combustion and Flame*, 1999, 119, P 133-143
- [5] Trimis D, Durst F, Combustion in a porous medium — advances and applications [J], *Combustion Science and Technology*, 1996, 121, P 153-168
- [6] Liu F J, Hsieh H W, Experimental investigation of combustion in porous heating burners[J], *Combustion and Flame*, 2004, 138, P 295-303
- [7] di Marea L, Mihalik T A , Continillo G , et al, Experimental and numerical study of flammability limits of gaseous mixtures in porous media[J], *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, 21, P 117-123
- [8] Zhdanok S, Lawrence A, Koester G, Superadiabatic combustion of methane air mixtures under filtration in a packed bed [J], *Combustion and Flame*, 1995, 110, P 221-231.
- [9] Sumrerng Jugjai, Anantachai Sawananon, The surface combustor-heater with cyclic flow reversal combustion embedded with water tube bank [J], *Fuel*, 2004, 83, P 2369-2379
- [10] Weinberg F J, Combustion temperature: The future [J], *Nature*, 1971, 233, P 239-241.
- [11] Mathis W M, Ellzey J L, Flame stabilization, operating range, and emissions for methane/air porous burner [J], *Combustion Science and Technology*, 2003,155, P 825-839
- [12] Aldushin A P, Rumanov I E, Maximal energy accumulation in a superadiabatic filtration combustion wave [J], *Combustion and Flame*, 1999,118, P 76-90.
- [13] Hsu P F, Evens W D, Howell J R, Experimental and numerical study of premixed combustion within nonhomogeneous porous media [J], *Combustion Science and Technology*, 1993, 90, P 149-172.
- [14] Henneke M R, Ellzey J L, Modelling of filtration combustion in a packed bed [J], *Combustion and Flame*, 1999, 117, P 832-840
- [15] Hashimoto T, Yamasaki S, An excess enthalpy flame stabilized in ceramic tubes [J], *In Prog.: In Astro and Aero*, 1983 ,88, P 57-77
- [16] Yoshizawa Y, Sasaki K, Echigo R, Analytical study of the structure of radiation controlled flame [J], *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1988, 31 (2), P 311-319
- [17] Akkutlu I Y , Yortos Y C, The dynamics of in-situ combustion fronts in porous media [J], *Combustion and Flame*, 2003, 134, P 229-247
- [18] Dobrego K V, Kozlov I M, Bubnovich V I, et al, Dynamics of filtration combustion front perturbation in the tubular porous media burner [J], *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46, P 3279-3289