

文章编号:1673-5005(2009)05-0130-05

陶瓷过滤器脉冲清灰过程的数值模拟

李海霞^{1,2}, 姬忠礼², 铁占续¹, 郭培红¹, 李同卓¹

(1. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 中国石油大学 机电工程学院, 北京 102249)

摘要:采用雷诺应力模型和欧拉双流体模型, 模拟多管陶瓷过滤器内脉冲反吹清除滤饼的三维非稳态气固两相流动, 分析反吹过程中和反吹后过滤过程中滤管腔体内压力沿轴向的分布变化, 考察参与反吹的滤管和不参与反吹的滤管外表面滤饼密度分布变化规律。结果表明: 反吹前滤管中部滤饼密度最大, 反吹后继续过滤, 滤管开口端附近滤饼密度最大; 与反吹滤管邻近的正常过滤的滤管受反吹过程的影响比较大, 靠近反吹滤管一侧的滤饼密度增加得比其他位置快。

关键词:陶瓷过滤器; 清灰; 数值模拟; 气固两相流

中图分类号: TQ 028.9

文献标识码: A

Numerical simulation of pulse cleaning performance of ceramic filter

LI Hai-xia^{1,2}, JI Zhong-li², TIE Zhan-xu¹, GUO Pei-hong¹, LI Tong-zhuo¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Faculty of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The 3D unsteady gas-solid two-phase flow of reverse jet pulse in ceramic filter vessel was simulated based on the Reynolds stress transport model and Eulerian two-fluid model. The variations of the pressure distribution along the axial direction in filter cavity during and after the back pulse process were analyzed. The distributions of the filter cake density in axial direction along the under cleaning filter and normal filter were studied. The results show that the maximum value of filter cake density occurs in the central position of the filter, while the maximum intensity at the vicinity of the open end of filter after the pulse cleaning. The pulse cleaning process has relatively much impact on the normal filter adjacent to the under cleaning filter, so the cake density on the normal filter surface near the under cleaning filter increases quickly compared with other locations far from the under cleaning filter. The simulation results agree well with experimental data.

Key words: ceramic filter; pulse cleaning; numerical simulation; gas-solid two-phase flow

陶瓷滤管具有过滤精度高和耐高温的特点, 广泛应用于煤气化和洁净煤燃烧发电技术高温气体除尘领域^[1-2]。陶瓷滤管是管状结构, 壁面采用双层结构, 内层为孔径较大的支撑体以保证滤管的强度, 在支撑体的外表面是孔径较小的薄陶瓷滤膜, 可以除去 5 μm 以上的颗粒, 实现表面过滤。过滤时, 气体中的粉尘颗粒在滤管外表面沉积形成滤饼, 过滤压力降增加, 需要定期通过高压气体脉冲反吹, 除去滤管外表面的滤饼, 使滤管压降恢复到过滤前的状态, 实现陶瓷滤管的循环再生, 使过滤除尘过程持续

进行^[3]。脉冲反吹效果是影响高温陶瓷过滤器长周期稳定运行的重要因素之一。因此, 研究脉冲反吹时过滤器内气体的非稳态流动对了解脉冲反吹机制和优化陶瓷过滤器的结构具有重要意义^[4-5]。目前对反吹过程的研究主要集中在气相流场^[6-11]、滤饼结构的分析^[12]和不考虑滤饼对后期过滤的影响^[13-14]等方面, 反吹过程中滤饼运动细节的研究还未见文献报道。笔者研究多管陶瓷过滤器内脉冲清灰过程中和清灰过程之后的过滤过程中含尘气体的流动, 考察滤管外表面粉尘浓度分布, 分析滤管之间

收稿日期: 2009-01-20

基金项目: 教育部博士点基金项目(20040425007); 河南理工大学博士基金项目(B2008648242)

作者简介: 李海霞(1975-), 女(汉族), 河南鹤壁人, 讲师, 博士, 从事高温气体除尘设备与技术、流体机械的教学与科研工作。

的相互影响。

1 计算模型及边界条件

过滤器示意图见图 1。过滤器内有 6 根陶瓷滤管,滤管以过滤器中心为轴对称分布,相邻滤管中心线之间距离 100 mm。陶瓷滤管内、外直径分别是 40 和 60 mm,滤管长度是 1.5 m。含尘气体到达滤管表面后,气体穿过陶瓷滤管空隙进入滤管内空腔,然后向上运动到集气室从过滤器出口排出。粉尘颗粒运动到滤管表面后,被滤管截留下来,黏附在滤管表面形成粉尘层。

含尘气体温度为 673 K,表观气体过滤速度为 $0.16\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,进入过滤器的气体含尘浓度为 $10\text{ g}/\text{m}^3$ (标准状态下)。粉尘的密度和平均直径分别为 $2000\text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。操作压力为 4 MPa。

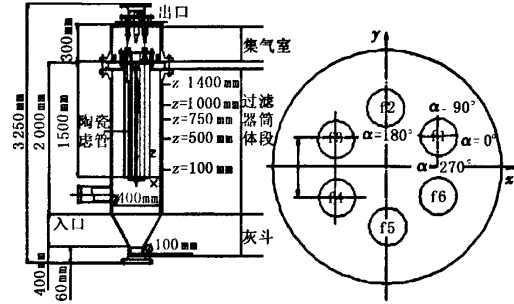


图 1 过滤器示意图

Fig.1 Schematic diagram of filter vessel

1.1 计算模型

FLUENT 软件提供了雷诺应力模型和 $k-\varepsilon$ 等模型来描述流体的湍流流动。雷诺应力模型对各相异性的湍流有良好的预报精度^[8],考虑到陶瓷过滤器内流体流动的各相异性的特点,本文中用雷诺应力模型模拟陶瓷过滤器内的流场。颗粒相的流动采用欧拉模型模拟。粉尘在滤管表面的沉积对反吹过程的影响作为用户自定义函数加载到 FLUENT 软件中,并把计算结果与试验结果进行了对比,验证了模型的可靠性。

1.2 计算区域网格划分

采用结构化和非结构化相结合的方法对计算区域进行离散,在能生成结构化网格的区域,在保证网格质量的前提下,尽量生成结构化网格,在较为复杂的区域用非结构化网格。

1.3 边界条件

计算涉及到的边界类型有速度入口、压力入口、压力出口、多孔介质、壁面。气体和粉尘颗粒均匀混

合后以同样的速度从一侧垂直进入过滤器。

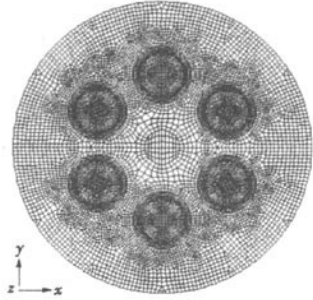


图 2 网格划分纵横截面示意图

Fig.2 Schematic diagram of grids of filter vessel

喷嘴出口的边界条件随着计算过程的变化而改变,过滤操作时,喷嘴出口看作固体壁面,脉冲反吹清灰操作时,喷嘴出口改成压力入口边界条件,反吹结束后,此处边界条件又改为固体壁面。

滤管介质用多孔介质模型,滤管壁作为渗流壁,其内部沿半径方向的流动由 Darcy 公式确定:

$$\Delta p = -\frac{\mu}{k}v\delta. \tag{1}$$

式中, Δp 为渗流压力降, Pa; μ 为气体的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; k 为渗透率,取决于滤管壁的几何结构,计算中取为 $1\times 10^{-12}\text{ m}^2$; v 为渗流速度, m/s ; δ 为多孔陶瓷薄膜的有效厚度, mm。

近壁网格点用壁面函数近似处理。

1.4 计算模型验证

为验证该计算模型的准确性,把模拟得到的滤管内外壁面压强差值随滤饼密度变化的关系与试验结果进行了对比,模拟计算结果与试验结果吻合比较好,证明所建立的模型可以用来模拟陶瓷过滤器内气固两相流动。

2 计算结果及其分析

首先用新鲜滤管进行过滤过程的模拟计算,过滤进行到 300 s 时,改变滤管 f3 对应的喷嘴入口处的边界条件,把固体壁面改为压力入口边界条件,脉冲反吹压力取 5 MPa,反吹气体温度是 300 K。反吹持续 0.6 s,反吹结束后,滤管 f3 对应的喷嘴入口边界条件再次改为固体壁面。

图 3 为从反吹开始到结束,不同时刻过滤器内 $z=1000\text{ mm}$ 横截面上静压分布云图。从图中可以看出,在反吹开始前,过滤器内滤饼层外静压最高,从滤饼外层到滤管内壁,压力逐渐降低,在滤管中心静压最低。反吹开始后,反吹气体进入反吹滤管,使

反吹滤管内压力升高,滤管内外压差逐渐增加,气体从反吹滤管流出,进入过滤器内,使过滤器内静压增大。由于过滤气体和反吹气体都要从过滤滤管离开,因此穿过过滤滤管的气体流量增大,并且进入过

滤器内的气体所带的颗粒将继续在过滤滤管表面沉积形成滤饼,导致反吹过程中其他滤管内外压差增大。反吹结束后,反吹滤管内的压力逐渐降低,滤管内压力低于过滤器筒体内的压力。

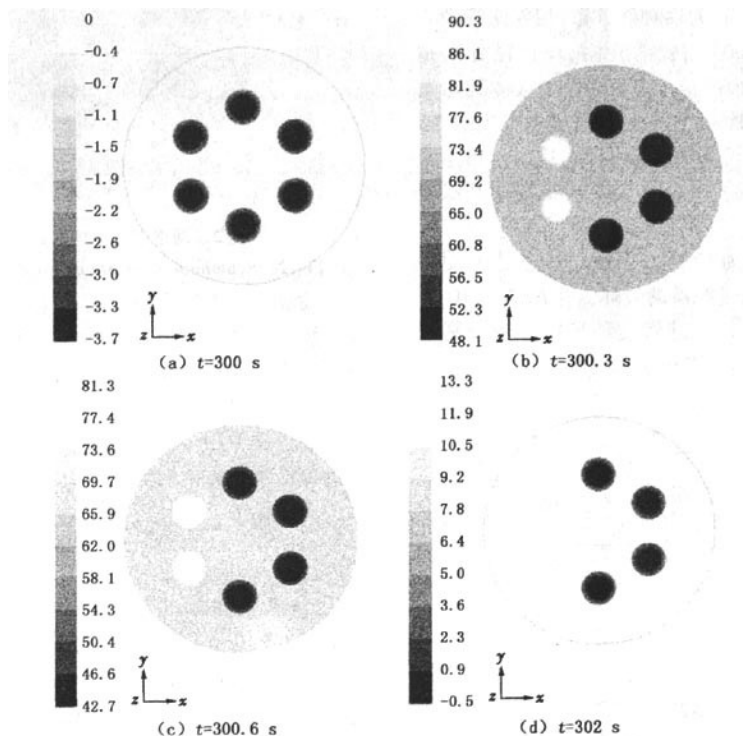


图3 过滤反吹过程中过滤器内 $z=1000$ mm截面上不同时刻静压(kPa)分布

Fig.3 Pressure distribution in the plane $z=1000$ mm during filtration and pulse cleaning process(kPa)

图4是过滤器内 $z=1000$ mm截面上从反吹开始($t=300$ s)到反吹结束($t=300.6$ s)以及反吹结束后继续过滤过程中不同时刻粉尘浓度分布的变化。从图中可以看出,反吹气体进入反吹滤管后,滤管内压力升高,滤管内外压差由过滤时的负值变为正值,气体从滤管内流出,在滤管内外压力差和气流的带动下,密实的滤饼层开始变得松散,密度减小,离开滤管表面向外流动。反吹结束后,参与反吹的滤管又重新起到过滤作用,粉尘颗粒在其表面沉积,逐渐形成新的滤饼。

图5为反吹前后反吹滤管 f3 内外压差沿滤管轴向位置变化。从图中可以看出,反吹开始前, $t=300$ s时,滤管 f3 内外压差值从滤管开口端($z=1500$ mm)向下到底部封闭端($z=0$ mm)逐渐减小,反吹到 0.3 s时刻,高速反吹气体进入滤管开口端,动能转化为压力能,反吹进行到 0.6 s后,高压反吹

气体在进入滤管 f3 过程中大部分压力能逐渐转变为动能,滤管内外压差从开口端向下逐渐减小直到开口端以下 300 mm降到最低,之后向下到滤管底部,滤管 f3 内外压差逐渐增加。滤管内外压差沿滤管轴向高度的这种分布对滤管外滤饼层的去除有重要影响。反吹结束后,随着过滤进行,滤管 f3 内部压力逐渐降低,逐渐恢复到过滤时的情况,静压值低于滤管外压力,滤管的各个部位都起过滤作用。图5(d)中反吹后继续过滤到 500 s的压降比反吹开始前图5(a)中压降高,这是由于只对滤管 f3 进行了反吹,其他4根滤管仍然保持过滤状态,在反吹结束后,气体穿过滤管 f3 的阻力比其他4根滤管低,有更多的含尘气体穿过滤管 f3 从过滤器排出,这两根滤管过滤速度增大,使得滤管的压降增加得比反吹之前快。

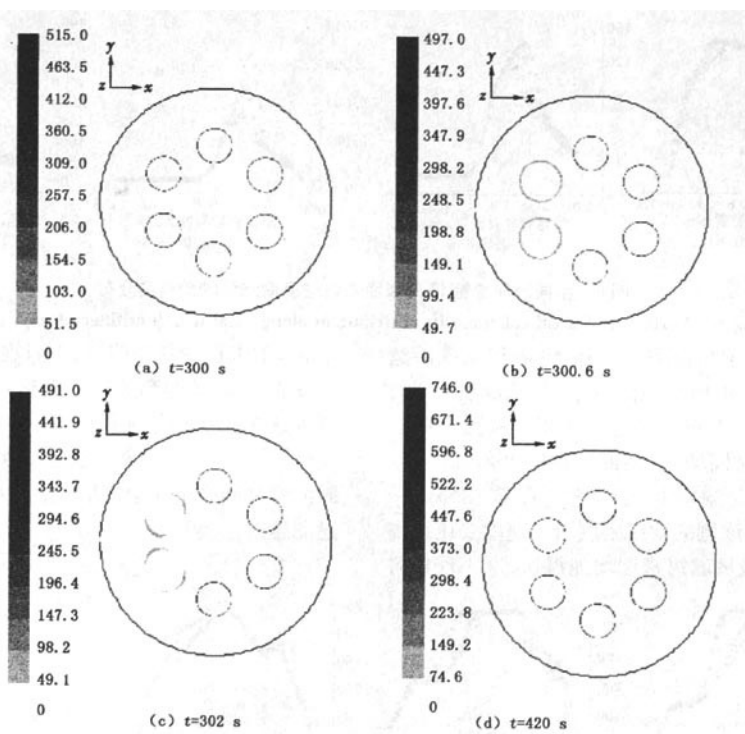


图4 过滤器内 $z=1000\text{ mm}$ 截面上不同时刻颗粒浓度 (kg/m^3) 分布

Fig.4 Particle concentration distribution in the plane $z=1000\text{ mm}$ in filter vessel

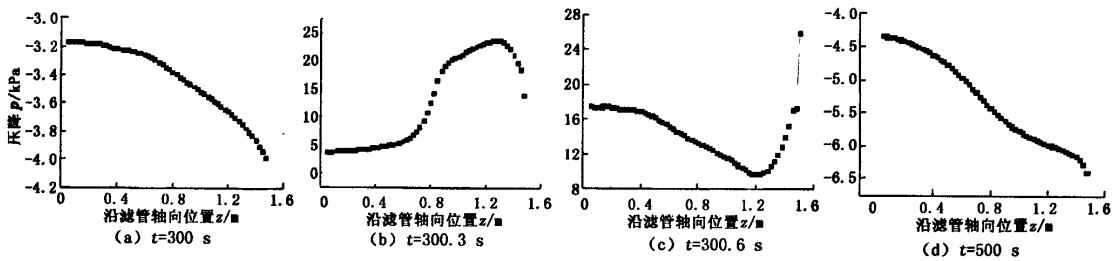


图5 滤管内外压差沿滤管轴向高度分布随时间变化曲线

Fig.5 Variation of pressure difference across filter wall along axial length of filter with time

图6为反吹前后滤管 Ω 外(滤管外表面)滤饼密度沿滤管轴向高度和周向角度分布曲线。从图中可以看出,反吹开始后,由于滤管开口端附近滤管内外压差比较大(图5(b)),所以此处滤饼粉尘层很容易去除,在 $z=1.0\sim 1.5\text{ m}$ 区域,滤管外表面粉尘密度几乎为零。随着反吹进行,大量反吹气体进入滤管 Ω ,滤管中部压力升高,滤管内外压差增大,滤管表面的滤饼随着从滤管内出来的气体离开滤管。反吹结束时滤管表面的粉尘浓度已经非常低,大约是原来滤饼密度的十万分之一,滤饼去除比较彻底,而实际反吹后,滤管表面都有少量的粉尘残留。这是由于反吹效果与反吹时间、反吹滤管内外压差分

布以及滤饼与滤管表面之间的黏附力等因素有关,而准确考虑滤饼与滤管表面之间的黏附力是建立过滤器气固流动模型的难点和关键点,后期研究工作将继续完善。反吹结束后,由于滤管中上部 $z=1.2\text{ m}$ 附近滤管内外压差小,气体比较容易从此处进入滤管,因此此处滤管表面粉尘浓度增加得快。过滤一段时间后,滤管底部压力降低,滤管中下部也起到过滤作用,滤管表面粉尘浓度增大。滤管反吹过一次后,滤管表面滤饼密度沿滤管轴向分布发生改变,滤饼密度最大值由之前的出现在滤管中部改为出现在滤管上部。

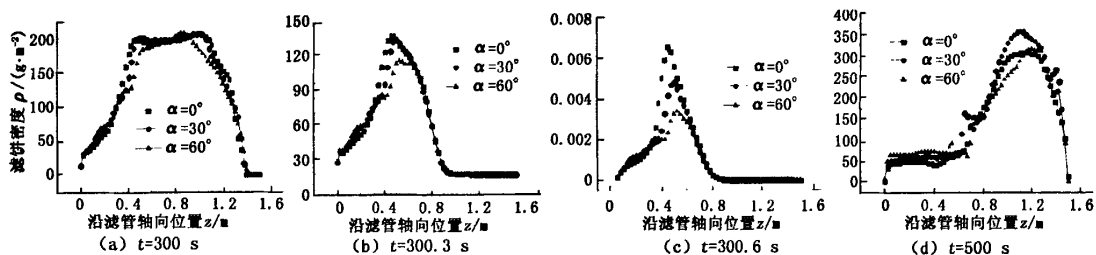


图6 不同时间滤管 f3 外表面滤饼密度沿滤管轴向高度分布

Fig. 6 Variation of areal cake density distribution along axial length of filter f3 with time

图7为反吹前后滤管 f2 外滤饼面积密度沿滤管轴向高度和周向角度分布曲线。反吹滤管 f3 时,与其相邻的滤管 f2 一直起过滤作用。从图中可以看出,随着过滤时间增加,表面滤饼密度增加。 $\alpha = 180^\circ \sim 240^\circ$ 区域是滤管 f2 与反吹滤管 f3 相邻的一侧,反吹结束后,该侧的滤饼密度增加速度要比远离滤管 f3 一侧的区域滤饼密度增加得快,这一现象对

于 $\alpha = 210^\circ$ 位置最为明显,并且在接近滤管 f3 一侧的滤管 f2 表面的高滤饼密度区域范围更大。滤管周围滤饼密度分布的不均匀会对滤管的过滤和脉冲反吹带来不利影响,在滤管长周期运行过程中,会导致滤管之间产生粉尘架桥现象,以致损坏滤管,影响过滤运行。

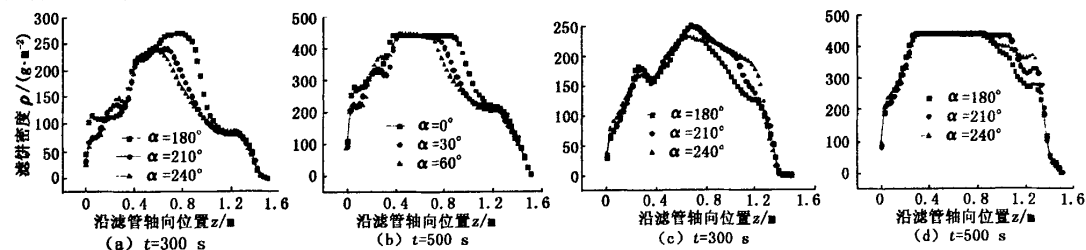


图7 不同时间滤管 f2 外表面滤饼密度沿滤管轴向高度分布

Fig. 7 Variation of areal cake density along axial length of filter f2 with time

3 结束语

反吹过程滤饼以环状结构逐渐从滤管外表面脱落,随着距离滤管外表面越来越远,滤饼密度越来越小。滤管清灰后再继续过滤,滤饼密度沿滤管轴向分布规律发生改变。反吹之前,滤饼最大密度出现在滤管中部,反吹后再经过一段时间过滤,滤管外表面顶部滤饼面积密度最大。与反吹滤管邻近一侧的过滤滤管外表面滤饼密度分布受反吹滤管的影响最为显著,在这一侧滤饼密度增加最快。

参考文献:

- [1] KIM Jin-hyung, YU Liang, SAKONG Kyoung-min, et al. Temperature effect on the pressure drop across the cake of coal gasification ash formed on a ceramic filter [J]. Powder Technology, 2008, 181(1): 67-73.
- [2] JI Zhong-li, SHI Ming-xian, DING Fu-xin. Transient

flow analysis of pulse-jet cleaning system in ceramic filter [J]. Powder Technology, 2004, 139: 200-207.

- [3] ALI R, GOODARZ Ahmadi, ISAAC K, et al. Temperature distribution in a demonstration-scale filter vessel with and without ash bridging [J]. Advanced Powder Technology, 2008, 19(2): 101-117.
- [4] LI Hai-xia, JI Zhong-li, WU Xiao-lin, et al. Numerical analysis of flow field in the hot gas filter vessel during the pulse cleaning process [J]. Powder Technology, 2007, 173: 82-92.
- [5] 姬忠礼, 刘加明, 史方军, 等. 高温陶瓷过滤器循环过程的热态实验研究 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(6): 92-97.

JI Zhong-li, LIU Jia-ming, SHI Fang-jun, et al. Thermal state experiment on cycle performance of high temperature ceramic filters [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(6): 92-97.

(下转第 147 页)

过程包括加氢饱和、脱羧、异构化和裂化反应,产物主要由烷烃组成。

(2) 选用具有选择性异构性能的 Pt/SAPO-11 双功能催化剂的催化加氢,产物的异构化烷烃比例明显提高,脱羧反应和裂解反应得到明显抑制。

参考文献:

- [1] 赵阳,吴佳,王宣,等. 植物油加氢制备高十六烷值柴油组分研究进展[J]. 化工进展,2007,26(10):1391-1394.
ZHAO Yang, WU Jia, WANG Xuan, et al. Advance in hydroprocessing technology of manufacturing diesel oil with high cetane number from vegetable oil[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007,26(10):1391-1394.
 - [2] SNARE Mahias, KUBICKOVA Iva, MALKI-ARVELA Pa Livi, et al. Heterogeneous catalytic deoxygenation of stearic acid for production of biodiesel [J]. Ind Eng Chem Res,2006(45):5708-5715.
 - [3] KUBICKOVA Iva, SNARE Mahias, ERANEN Kari, et al. Hydrocarbons for diesel fuel via decarboxylation of vegetable oils [J]. Catalysis Today, 2005(106):197-200.
 - [4] 邹建凯. 辛酸酸甘油酯的气相色谱/质谱分析[J]. 香料香精化妆品,2002(6):16-17.
ZOU Jian-kai. Determination of the composition of ODO by gas chromatograph-El mass spectrometry[J]. Flavour Fragrance Cosmetics, 2002(6):16-17.
 - [5] KRAUSE A O I. Hydrodeoxygenation of methyl esters on sulphided NiMo/g-Al₂O₃ and CoMo/Al₂O₃ catalysts [J]. Catalysis Today, 2005(100):331-335.
 - [6] SENOL O I, RYYMIN E M, VILJAVA T R, et al. Reactions of methyl heptanoate hydrodeoxygenation on sulphided catalysts [J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2007(268):1-8.
 - [7] SENOL O I, VILJAVA T R, KRAUSE A O I. Effect of sulphiding agents on the hydrodeoxygenation of aliphatic esters on sulphided catalysts [J]. Applied Catalysis A: General, 2007(326):236-244.
 - (编辑 刘为清)
-
- (上接第134页)
- [6] 赵洪滨,姬忠礼,史方军,等. 陶瓷过滤器脉冲清灰系统的性能测定与分析[J]. 燃烧科学与技术,2006,14(4):362-368.
ZHAO Hong-bin, JI Zhong-li, SHI Fang-jun, et al. Measurement and analysis of performance of ceramic filter pulse cleaning system[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006,14(4):362-368.
 - [7] 邱继峰,徐廷相,章利特,等. 高温陶瓷过滤器反向脉冲过程过滤管瞬态流场分析[J]. 西安交通大学学报,2004,38(1):15-18.
QIU Ji-feng, XU Ting-xiang, ZHANG Li-te, et al. Transient flow model solution of reverse jet pulse cleaning system in high temperature ceramic filter[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004,38(1):15-18.
 - [8] 焦海清,姬忠礼,陈鸿海,等. 操作参数对陶瓷过滤管脉冲反吹清灰过程的影响[J]. 化工学报,2004,55(7):1156-1161.
JIAO Hai-qing, JI Zhong-li, CHEN Hong-hai, et al. Influence of operating parameters on pulse cleaning process of ceramic filter[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2004,55(7):1156-1161.
 - [9] KOCH D, SWVILLE J, CLIFT R. Dust cake detachment from gas filters [J]. Powder Technology, 1996,86:21-29.
 - [10] GOODARZ A, DUANE H S. Analysis of steady-state filtration and back pulse process in a hot-gas filter vessel [J]. Aerosol Science and Technology, 2002,36(6):665-677.
 - [11] TANTHAPANICHAKOON W, CHARINPANITKUL T, JINTAWORN W, et al. CFD investigation of high-temperature gas filtration using twin ceramic candles [J]. Fuel, 2008,87(2):2807-2816.
 - [12] 王素华,姬忠礼,王树立. 陶瓷过滤器脉冲反吹系统内流场的数值模拟[J]. 石油大学学报:自然科学版,2002,26(4):94-99.
WANG Su-hua, JI Zhong-li, WANG shu-li. Numerical simulation of unsteady flow field in pulse cleaning system of ceramic filter[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2002,26(4):94-99.
 - [13] JI Zhong-li, JIAO Hai-qing, CHEN Hong-hai. Image analysis on detachment process of dust cake on ceramic candle filter[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2005,13(2):178-183.
 - [14] JI Zhong-li, LI Hai-xia, WU Xiao-lin, et al. Numerical simulation of gas/solid two-phase flow in ceramic filter vessel [J]. Powder Technology, 2008,180(1):91-96.
 - (编辑 沈玉英)