

# 泡沫碳化硅填料孔内流体微观流动特性研究

张洋,高鑫,严鹏,郝志强,Salah Mohammed Abdullah Abdo,李洪\*,李鑫钢  
(天津大学化工学院,精馏技术国家工程研究中心,天津 300350)

**摘要:**为了从微观角度探究泡沫碳化硅填料内部孔道的流动特性,采用高速摄影和示踪粒子法相结合的可视化方法,在微观尺度下观测液体在泡沫碳化硅波纹规整填料内部的流动特性。通过对获得图像数据的分析发现,当流量为 20~120 mL/min 时,部分流经液体在泡沫碳化硅填料孔道内形成稳定的涡旋流。在此基础上,进一步考察了液体流量对泡沫碳化硅波纹规整填料片孔内涡旋流动的尺度和强度影响,结果表明,在低流量条件下,随着流体流量从 20 mL/min 增加到 120 mL/min,孔内涡旋的半径减小、稳定性增强且旋流速度增加。

**关键词:**泡沫碳化硅填料;可视化技术;界面流动;液体涡旋;传质

中图分类号:TQ02

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)09-0192-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.09.038

## Microscopic experimental characterization of liquid flow in hole of SiC foam packings

ZHANG Yang, GAO Xin, YAN Peng, HAO Zhi-qiang, Salah Mohammed Abdullah Abdo, LI Hong\*, LI Xin-gang

(National Engineering Research Center of Distillation Technology, School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** The visualization method combining high-speed photography with tracer particle method is used to observe at a micro scale the flow characteristics of liquid in the foam silicon carbide corrugated packing. Through analyzing the image data, it is found that part of liquid forms a stable vortex in the pores of silicon carbide foam packings when the flow rate is in the range of 20-120 mL·min<sup>-1</sup>. Moreover, the effects of liquid flow rate on the vortex are studied. Results show that under low flow conditions, as the fluid flow rate increases from 20 mL·min<sup>-1</sup> to 100 mL·min<sup>-1</sup>, the radius of the vortex in the holes decreases, the stability enhances, and the rotation speed increases.

**Key words:** silicon carbide foam packings; visualization technology; interface flow; liquid vortex flow; mass transfer

泡沫碳化硅具有比表面大、孔隙率高、传质效率高、耐高温、耐腐蚀及三维连接的网孔结构的特点,因此被用做传质元件、催化剂载体、吸声吸波材料等<sup>[1-5]</sup>。独特的结构优势使其作为填料具有良好的轴向和径向扩散效率,从而间接增加了液相在填料内部的停留时间,同时也更利于气泡的形成,因此泡沫碳化硅填料在中低压力或低液体负荷操作的精馏以及反应精馏过程中具有广阔的应用前景<sup>[6-7]</sup>。

泡沫填料的结构参数与流体力学性能和传质性能之间的关系已有大量研究,Stemmet 等<sup>[8-9]</sup>在气塔中研究了泡沫铝填料的气液传质特性,并使用渗透理论进行建模,结果表明,相较于传统填料,泡沫填料的传质效率更高。天津大学精馏技术国家工程研究中心和中国科学院金属研究所合作开发了泡沫碳化硅规整波纹填料<sup>[10]</sup>,通过中试试验表明,与同型号的 BX 金属丝网填料相比,泡沫碳化硅规整波

纹填料具有压降低、等板高度低、传质效率高等优势。同时发现,在强酸环境下,规整波纹碳化硅填料无明显腐蚀现象,而 BX 金属丝网填料腐蚀现象明显,因此规整波纹碳化硅填料相较于传统填料在强腐蚀条件下的表现更好<sup>[11]</sup>。总体而言,泡沫碳化硅填料与传统的填料相比有更好的化学稳定性、更低的压降以及更高的传质效率<sup>[12-13]</sup>。

目前在宏观上泡沫填料的流体力学性能和传质性能方面已经有了大量的研究<sup>[14-16]</sup>,也有文献通过建立多孔结构模型模拟出泡沫填料孔内的液体流动,并用粒子图像测速技术加以验证<sup>[17-21]</sup>,然而由于泡沫填料的复杂结构以及可视化手段的限制,很少有可视化实验直接观测液体在泡沫波纹规整填料片孔内的微观流动行为,在微观角度下液体在泡沫碳化硅填料孔内的流动行为的实验研究较为缺乏。笔者通过探究不同的实验条件,建立了针对波纹泡

收稿日期:2020-10-25;修回日期:2021-07-14

作者简介:张洋(1995-),男,硕士生,研究方向为分离过程强化,409160951@qq.com;李洪(1980-),女,博士,教授,研究方向为分离过程强化,通讯联系人,lihong.tju@163.com。

沫碳化硅孔内液体的微观流动行为的可视化装置,在此基础上观察液体在泡沫碳化硅波纹规整填料孔内的流动行为,进一步从微观角度解释了泡沫碳化硅填料高效传质的原因。

## 1 实验测试填料

测试填料为中国科学院金属研究所生产的波纹泡沫碳化硅填料片,具体参数如表 1 所示。由于在生产过程中包含压缩工序,孔的方向和大小并不完全一致,因此表示其结构参数时不能用单位英寸长度上孔的个数(ppi),而采用结构参数孔径、波纹倾角、压缩比等。

表 1 波纹碳化硅泡沫填料片的结构参数

项目	参数	项目	参数
长(L)×宽(W)/mm	300×100	孔径/mm	3
厚(T)/mm	1	压缩比	3
波纹角( $\beta$ )/(°)	90	胞面直径( $D_p$ )/mm	2.21
峰高(h)/mm	9	筋径/mm	0.69
峰距(B)/mm	18		

## 2 实验设备与方法

### 2.1 实验光源

高速摄像仪的核心是图像数据的采集和处理,获得的所有数据都来自于图像,因此图像的质量尤为关键,而光源则是影响可视化系统成像水平的重要因素。在高速摄影中,选取光源主要从亮度、显色性和稳定性 3 个方面综合考虑。在摄影技术中,常用的光源包括钨丝聚光灯和 LED 灯。钨丝灯具有光谱范围广、照明强度稳定、聚光性强等优点,相比于钨丝灯,LED 灯具有节能、寿命长、不需要考虑散热等优势,采取预实验的方法对 2 种光源进行比较,探究合适的光源。

在光源的探究实验中,选用的钨丝灯为无频闪的可调节功率 150~1500W 的钨丝聚光灯(DP light, Lowel-Light Manufacturing, Inc. USA),选用的 LED 灯为可调节功率 20~200 W 的 LED 灯(上海金贝摄影器材实业有限公司 EF 系列)。采用可调节功率的光源是由于不同帧率条件下拍摄时,需要不同的光强,拍摄帧率越高需要的光源强度越高,因此选用可调节功率光源可以适应不同的拍摄条件。

钨丝聚光灯和 LED 灯下高速摄像仪在不同帧率下的拍摄结果如图 1 所示。

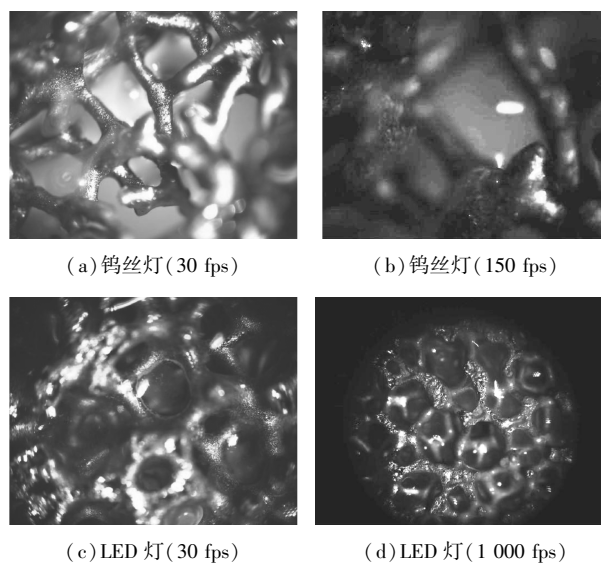


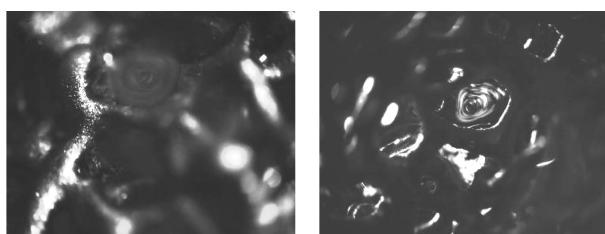
图 1 钨丝聚光灯和 LED 灯最大功率下在不同拍摄帧数下的结果

从图 1(a)中可以看出,在拍摄帧率较低时,钨丝灯可以较精确地显示出泡沫碳化硅填料的真实颜色。从图 1(b)中可以看出,当拍摄帧数增加到 150 fps 时,在聚光灯功率最大时仍然不能提供足够的亮度,进一步增加亮度只能通过减少光源与泡沫碳化硅填料片之间的距离实现,然而由于钨丝聚光灯会产生热量导致填料片上液体加速蒸发,因此减少距离会影响实验结果。由图 1(c)和图 1(d)中可以看出,LED 光源始终显色性稍差,但是在高帧数下仍然可以提供足够的光照强度。结合实验条件的要求考虑,LED 灯除了具有节能、使用寿命长、较高的光源强度的优势外,同时不会产生热量导致填料表面液体蒸发,因此选择 LED 灯作为本实验的光源。

### 2.2 照射方式的探究

光源和高速相机与被测物体之间的相对位置也同样十分重要,选择合适的角度可以提高特定区域的图像质量,当高速相机和光源在被测物体的同一侧时称为正面照射,正面照射可以更好地反映被拍摄物体的真实颜色和结构;而当高速相机和光源在被测物体的两侧时称为背光照射,背光照射可以获得特定区域的图像数据,同时可以补充光源强度。分别采用 2 种照射方式拍摄加入示踪粒子的液体在泡沫碳化硅填料上的流动,从而探究合适的光源照射方式,结果如图 2 所示。由图 2(a)中可以看出,当高速摄像仪和光源在泡沫碳化硅的同一侧时,可以更好地观测到泡沫碳化硅的结构,然而并不能较好地捕捉到液体的运动轨迹;由图 2(b)中可以看

出,当光源背面照射时,可以更清楚地捕捉到泡沫碳化硅材料孔内示踪粒子的位置。由于本研究的主要内容是液体在泡沫碳化硅孔内的微观流动行为,所以捕获液体的流动行为尤为重要,同时在高帧数下的拍摄也需要增加光源的亮度,因此研究更适合于背光照射的拍摄方式。



(a) 正面照射

(b) 背面拍摄

图 2 LED 灯正面照射和背面拍摄的图像结果

### 2.3 示踪粒子的选择

在流场中加入示踪粒子可以标记流体的流动情况,通过这些粒子来观察流体的流动,可以把各种流动情况显示出来。示踪粒子的选择尤为重要,选择液体性质相近的示踪粒子可以更准确的反应液体的运动情况。示踪粒子的选择主要考虑跟随性和光学特性 2 个方面。

选用运动状态与流体高度一致的示踪粒子尤为重要。当粒子的密度小于和大于流体的密度时,粒子分别会超前和滞后于流体,只有当示踪粒子和流体的密度一致时,粒子和流场的运动状态才会相同。同时示踪粒子的粒径与光学特性存在着矛盾关系,示踪粒子的直径越小,粒子的跟随性越好,光散射性越差;相应地,粒子的直径越大,跟随性越差,光散射性越好。在保证高速相机可以识别的前提下,应该尽可能选取直径较小的示踪粒子。

因此,在探究不同视野条件下的液体流动时,应通过预实验探究合适的示踪粒子粒径。如在倍率为 4.8 的显微镜下,可以较为清晰成像的粒子直径最小为  $5\ \mu\text{m}$ ,此条件下在拍摄方向上有均匀且足够的光强分布。并且红色的示踪粒子在图像识别中具有更好的识别性,因此,选用平均粒径为  $5\ \mu\text{m}$  的红色聚苯乙烯微球作为示踪粒子,其参数如表 2 所示。

表 2 聚苯乙烯示踪粒子的参数

项目	平均粒径/ $\mu\text{m}$	微球密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	折光指数(@ 589)
参数值	5.00	1.05	1.59

注:微球组成为聚苯乙烯微球水分散液;添加剂为少量表面活性剂,防止微球团聚,提高其储存稳定性;冷藏、密封保存。

### 2.4 实验流程和数据处理

本实验中采用单点进料和背光照射的可视化装置,包括实验装置与记录装置 2 部分。实验装置包括储液罐、铁架台、泵、转子流量计、玻璃滴管以及液体回收罐;记录装置包括 LED 光源、高速相机、反光板以及与高速相机连接的在线计算机,实验装置如图 3 所示。实验所使用的高速摄像机为奥林巴斯的 i-SPEED 3 型高速摄像机,具有超高灵敏感光度,最大的帧率可以达到每秒 15 万帧,同时高速相机的拍摄参数可以通过相机自带的控制面板进行调整。实验中拍摄照片的像素为  $1\ 280\times 1\ 024$ ,拍摄照片的帧率在  $30\sim 1\ 000\ \text{fps}$  (frame per second) 之间。实验采用的光源为可调节功率 ( $20\sim 200\ \text{W}$ ) 的 LED 光源。混合示踪粒子的测试液体通过泵进入玻璃滴管在泡沫碳化硅波纹填料片正上方进行单点进料,流经波纹填料后进入液体收集槽内。将高速相机聚焦于波纹填料片,实时记录液体在孔内的流动行为并将数据导出到在线计算机。



图 3 波纹泡沫碳化硅填料孔内液体流动的可视化实验装置

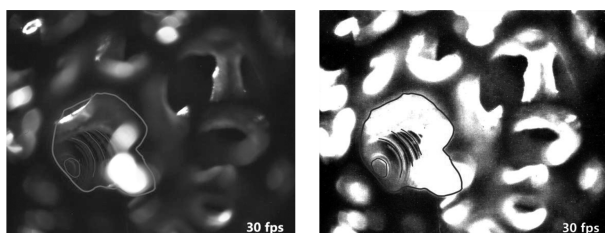
实验所获得的数据均为图像数据,因此选择合适的图像数据的分析处理方法尤为重要。希望通过数据处理获得泡沫碳化硅填料片孔内不同黏度的液体在不同流量的条件下,其液相在填料片上的流动分布情况,进一步获得材料孔内微观涡旋流动的流型和强度等定量数据,因此在保证能够识别示踪粒子的前提下应该保持统计标准的统一。本实验中图像的提取分析和处理在软件 Image Pro Plus 中进行,首先用 Image Pro Plus 软件打开图像数据,规定实际物体与图像像素的标尺,然后用自动测量功能,勾选 Automatic Dark Objects,示踪颗粒就会被标记出来。

## 3 实验结果和分析

### 3.1 液体在泡沫碳化硅孔内的流动行为

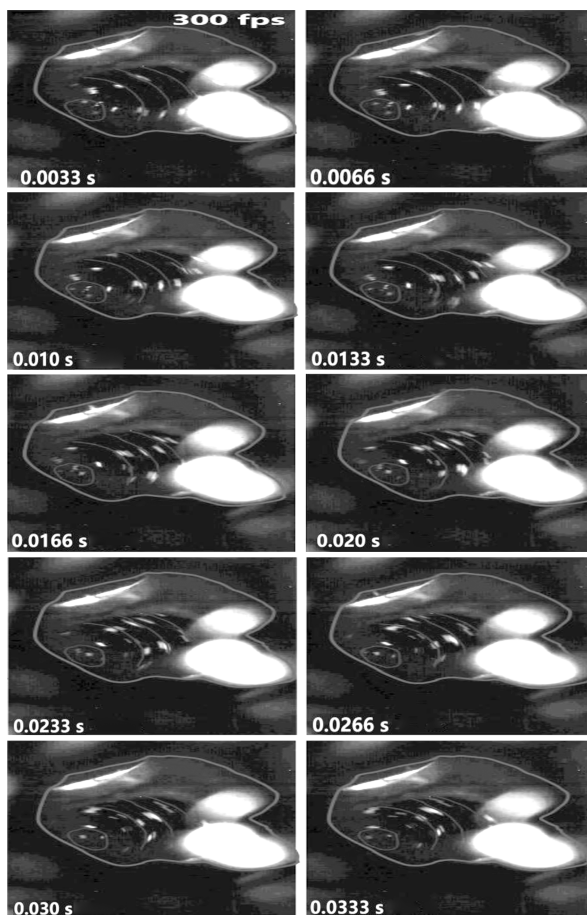
纯水溶液在流量为  $30\ \text{mL}/\text{min}$ 、拍摄帧率为  $30\ \text{fps}$  的条件下液体在波纹泡沫填料片内的流动情况

如图4(a)所示。由图4(a)中可以看出,在观察的平面范围内有很多涡旋,但由于波纹泡沫填料片的不透明性,且其本身具有相互连通的三维结构,难以将孔内所有的液体涡旋进行统计。为了对孔内涡旋的流动行为进行量化分析,通过调节高速相机的角度,对可以完整观测到的涡旋进行具体的探究。并将镜头聚焦到其中的一个涡旋。对图4(a)进行灰度处理得到图4(b),从图4(b)中可以看出,由于示踪粒子运动所遗留的残影而反映出孔内流场的运动轨迹,然后对该位置的拍摄帧率提高到300 fps,进行灰度处理得到图4(c),从图4(c)中可以清晰



(a) 30 fps 条件下液体在波纹泡沫填料片内的流动情况

(b) 灰度处理后得到的粒子运动轨迹图像



(c) 示踪粒子不同时刻的运动轨迹

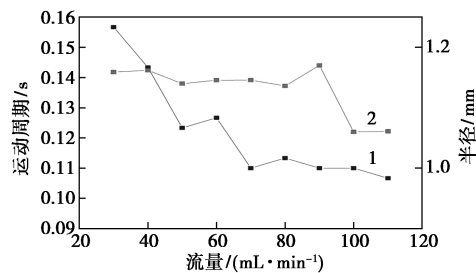
图4 30 mL/min 下泡沫碳化硅填料孔内液体涡旋分布

地看出孔道内液相运动轨迹中的示踪粒子。对图片进行尺寸矫正,并根据红色所标记的运动轨迹判断示踪粒子在间隔时间内运动的位移。最后根据位置与时间的关系导出在某一特定位置的线速度或角速度。

### 3.2 液体流量对泡沫碳化硅填料孔内涡旋的影响

通过确定涡旋半径、旋转方向和周期参数就可以定义一个类圆周运动的涡旋。稳定的涡旋运动由强制涡旋运动和自由涡旋运动组成。离涡核最近的内部区域属于强制涡旋运动,液体的速度会随着离涡旋中心距离的增加而增加。而涡旋结构外部区域中的粒子速度会随着旋涡中心距离的增加而减小,这属于自由涡旋运动。由于外部区域中的自由涡旋运动是非旋转运动,因此不需要能量供应,而内部强制涡旋运动是旋转运动,需要外部能量供应,并且引起该涡旋运动的主要能量来自液体主体流动。

流量对孔内涡旋运动半径和流速的影响如图5所示。从图5中可以看出,随着流量的增加,开始涡旋的半径整体并没有较明显变化,充斥在整个孔内,当流量增加到90 mL/min 时,涡旋半径有减小的趋势。说明液体在泡沫碳化硅填料孔内形成的涡旋形状主要与孔的结构有较大关系,当形成稳定的涡旋时,涡旋会存在于整个孔内,且形状由孔的形状决定,流量对于稳定涡旋半径的影响较小。



1—涡旋运动周期;2—涡旋运动半径

图5 流量对填料孔内液体涡旋半径和周期的影响

涡旋的运动周期随着液体流量的增加呈现先减小后趋于平缓的趋势,也就是涡旋的运动速度随流量的增加呈现先增加后趋于平缓的趋势。这是由于在流量较低时,流量的增加会明显地增加主体流速,主体流速与液膜之间的速度差会对孔内液体形成剪切应力,速度差越大对液膜的剪切应力越大,因此孔内的涡旋运动会更加剧烈。而在内部液体达到饱和状态时继续增大流量,多出来的这部分液体会更多地在泡沫碳化硅填料表面流动,并没有增加主体流道与孔内液膜之间的作用力,因此达到饱和时再增

加流量对孔内的液体涡旋流动影响较小,甚至会带负面的影响。

## 4 结论

通过在测试液体中加入示踪粒子,利用配有微距镜头的高速相机考察了波纹泡沫碳化硅填料孔内液体的流动行为,探究了液体的流量对于孔内涡旋流的影响。通过预实验发现,相比于钨丝灯,LED聚光灯更适合作为实验光源,同时发现,背光照射可以更好地补充光源强度且可以更清楚地捕捉到示踪粒子的位置,从而建立了示踪粒子法和高速摄像技术结合的可视化实验方法。液体在波纹泡沫碳化硅填料内部的流动较为复杂,除了会沿着骨架流动之外,还会在孔内形成液膜流动,并且在形成液膜的孔中发现液相涡旋。涡旋出现的位置以及结构都受到孔隙的特定结构的影响,涡旋的形状取决于孔的结构,同时孔内形成的涡旋十分稳定,在涡旋内部,涡旋的速度随半径的增大而增大。随着液体流量的增大,泡沫碳化硅填料孔内形成的涡旋运动速度加快,而涡旋半径没有较大变化。

## 参考文献

- [1] Elamin M M, Muraza O, Malaibari Z, *et al.* Microwave assisted growth of SAPO-34 on  $\beta$ -SiC foams for methanol dehydration to dimethyl ether[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 274: 113-122.
- [2] Jiao Y, Jiang C, Yang Z, *et al.* Synthesis of highly accessible ZSM-5 coatings on SiC foam support for MTP reaction[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2013, 181: 201-207.
- [3] Truong-Phuoc L, Truong-Huu T, Nguyen-Dinh L, *et al.* Silicon carbide foam decorated with carbon nanofibers as catalytic stirrer in liquid-phase hydrogenation reactions[J]. *Applied Catalysis A General*, 2014, 469: 81-88.
- [4] Kouamé N A, Robert D, Keller V, *et al.* Preliminary study of the use of  $\beta$ -SiC foam as a photocatalytic support for water treatment[J]. *Catalysis Today*, 2011, 161(1): 3-7.
- [5] Giani L, Groppi G, Tronconi E. Mass-transfer characterization of metallic foams as supports for structured catalysts[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(14): 4993-5002.
- [6] Lévêque J, Rouzineau D, Prévost M, *et al.* Hydrodynamic and mass transfer efficiency of ceramic foam packing applied to distillation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(11): 2607-2616.
- [7] Li H, Hao Z, Murphy J, *et al.* Experimental study of liquid renewal on the sheet of structured corrugation SiC foam packing and its dispersion coefficients[J]. *Chemical Engineering Science*, 2018, 180: 11-19.
- [8] Stemmet C P, Van Der Schaaf J, Kuster B F M, *et al.* Solid foam packings for multiphase reactors [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2006, 84(12): 1134-1141.
- [9] Stemmet C P, Bartelds F, van der Schaaf J, *et al.* Influence of liquid viscosity and surface tension on the gas-liquid mass transfer coefficient for solid foam packings in co-current two-phase flow [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, 86(10): 1094-1106.
- [10] Zhang J, Tian C, Yang Z, *et al.* A preparation methods and application of SiC ceramic foam structured corrugated packing; China, CN 102218293 A [P]. 2010-10-19.
- [11] Li X G, Gao G H, Zhang L H, *et al.* Multiscale simulation and experimental study of novel SiC structured packings [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(2): 915-924.
- [12] Li X, Shi Q, Li H, *et al.* Experimental characterization of novel SiC foam corrugated structured packing with varied pore size and corrugation angle [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 26(4): 452-465.
- [13] Meng Y, Li H, Zeng J, *et al.* A potential application of ceramic foam material to distillation; Structured corrugation foam packing [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, 150: 254-262.
- [14] Wang Z, Gupta M, Warudkar S S, *et al.* Improved CO<sub>2</sub> absorption in a gas-liquid countercurrent column using a ceramic foam contactor [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(5): 1387-1400.
- [15] Incera Garrido G, Patcas F C, Lang S, *et al.* Mass transfer and pressure drop in ceramic foams; A description for different pore sizes and porosities [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(21): 5202-5217.
- [16] Edouard D, Lacroix M, Huu C P, *et al.* Pressure drop modeling on solid foam; State-of-the art correlation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 144(2): 299-311.
- [17] Feli R, Altheimer M, Butscher D, *et al.* PIV study of flow through porous structure using refractive index matching [J]. *Experiments in Fluids*, 2014, 55(5): 1717-1043.
- [18] Meinicke S, Möller C O, Dietrich B, *et al.* Experimental and numerical investigation of single-phase hydrodynamics in glass sponges by means of combined  $\mu$ PIV measurements and CFD simulation [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 160: 131-143.
- [19] Kumar P, Topin F. Investigation of fluid flow properties in open cell foams; Darcy and weak inertia regimes [J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, 116: 793-805.
- [20] Zenklusen A, Kenjereš S, Rudolf von Rohr P. Vortex shedding in a highly porous structure [J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, 106: 253-263.
- [21] Zenklusen A, Walser S, Rudolf von Rohr P. Influence of ligament shape and thickness on vortex shedding in highly porous structures [J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 129: 1-8. ■