

FCE 空气过滤吸附材料压降试验与仿真研究

陈专^{1,2}, 吕洪^{1,2}, 马晓伟³, 马建新^{1,2}

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学新能源汽车工程中心, 上海 201804;

3. 上海燃料电池动力系统有限公司, 上海 201804)

摘要:对于燃料电池发动机(FCE)用空气过滤器,压降大小是其性能参数之一。活性炭对有害气体(SO₂, NOX等)有良好的吸附性能,被用于FCE空气过滤器的吸附层材料。运用实验的方法测量了空气经过活性炭颗粒堆积物的压降与空气流速,以及压降与堆积高度的关系。利用CFD软件Fluent对空气经过活性炭颗粒堆积物的压降进行了仿真研究。研究结果表明,利用压降和速度的试验数据来计算粘性阻力系数 $1/\alpha$ 和惯性阻力系数C₂由此得到的仿真结果和实验结果符合良好,仿真具有可靠性。

关键词:燃料电池发动机;空气过滤器;吸附材料;压强降;数值模拟

中图分类号:TM911.4 **文献标识码:**A

An Experimental and Stimulant Study of Pressure Drop in FCE Air Filter Adsorptive Material

CHEN Zhuan^{1,2}, LU Hong^{1,2}, MA Xiao-wei³, MA Jian-xin^{1,2}

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. Shanghai Fuel Cell Vehicle Powertrain Co., LTD. Shanghai 201804, China)

ABSTRACT: As to Fuel Cell Engine (FCE) air filter, pressure drop is one of its most important parameters. Active carbon is always used as adsorptive material in FCE air filter to eliminate SO₂ and NOX. In this paper, pressure drop in active carbon granule ventilation is tested by experiments. CFD tool (Fluent) is used to simulate the pressure drop in active carbon granule ventilation. The results indicate that, using the data of pressure drop and velocity to calculate the Viscous Resistance Coefficient $1/\alpha$ and Inertial Resistance Coefficient C₂ can have better stimulant results, which are in accord with the experimental results.

KEYWORDS: Fuel cell engine; Air filter; Adsorptive material; Pressure drop; Numerical simulation

1 引言

环境污染和资源短缺的双重压力,燃料电池汽车已经成为世界各国的研究热点,其技术也取得了飞速的发展。然而,空气中的有害气体(SO₂, NOX等)对燃料电池阴极侧催化剂会造成不良影响,导致燃料电池性能下降^[1]。解决此问题最有效的方法就是在燃料电池发动机空气进气口处安装空气过滤器。改性的活性炭由于其对有害气体具有良好的吸附能力和低廉的价格而被用作燃料电池空气过滤器的吸附层材料^[2]。

但是,空气过滤器的安装会造成燃料电池发动机进气阻力加大,从而导致燃料电池发动机效率的下降。目前,炭材料的压降性能研究国内已有报道^{[3][4]},但是他们只采用了实

验的方法,而结合计算机仿真方法进行的研究还少有报道。因此,本文采用试验和CFD仿真相结合的方法对活性炭压降进行了研究,从而指导设计开发燃料电池发动机空气过滤器,优化参数,降低燃料电池空气过滤器的进气阻力,提高燃料电池发动机的效率。

2 实验

实验在常温、常压下进行,实验流程如图1所示。实验装置的主体部分是直径D为46.5mm,高为100mm的圆柱形PVC塔。空气流量用转子流量计控制。前端压力P₁用压力计测量,后端压力为常压。空气通过活性炭堆积物的压降 $\Delta P = P_1$ 。

活性炭粒径为0.6-0.9mm,将活性炭颗粒按不同高度(25mm,50mm,75mm,100mm)装填于实验装置中,装填方式

为随意装填。

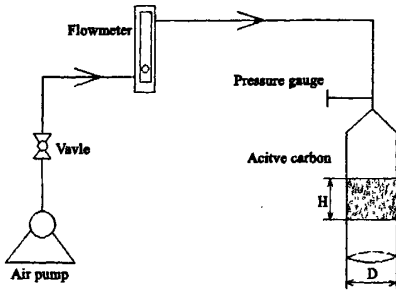


图1 实验装置及流程图

3 数学模型与仿真方法

3.1 湍流基本方程

上述实验装置中空气压力变化不大,可将其视为不可压缩流体的湍流流动。整个过程可以用连续性方程、雷诺平均 N-S 方程、湍动能 k 和湍动能的耗散率 ε 的输运传输输运方程等控制方程来描述^{[5][6]}。

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

雷诺平均 N-S 方程:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \right] \quad (2)$$

湍动能方程:

$$\frac{\partial u_i k}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = v_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right] - \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散方程:

$$\frac{\partial u_i \varepsilon}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = \frac{C_{\varepsilon 1} \cdot \varepsilon \cdot v_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 2} \cdot \varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中 u_i 为沿 i 方向的速度分量; f 为沿 i 方向的质量力; P 为压力; ρ 为空气密度; v 为运动粘性系数; v_t 为涡粘性系数。

湍流模型采用双方程的 $k-\varepsilon$ 模型,系数使用 Launder 和 Spalding 的推荐值: $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\rho_\varepsilon = 1.3$ 。

3.2 仿真方法

由于活性炭是一种具有发达微孔结构的物质,将活性炭颗粒堆积起来后,颗粒之间又会形成很多宏观孔。要想详细了解空气在这些孔道之间的流动,就需要对活性炭堆积物孔道进行网格划分,这势必会大大增大计算的工作量。从工

程的角度来说,人们只关心空气流过活性炭堆积物后的流体特性^[7]。为了较准确地分析流体特性,可以将活性炭堆积物看作多孔介质,利用 Fluent 软件中的多孔介质模型对空气经过活性炭堆积物的流体特性进行模拟。

Fluent 软件中的多孔介质模型采用经验公式定义多孔介质上的流动阻力。从本质上说,多孔介质模型就是在动量方程中增加了一个代表能量消耗的源项 S_i 。源项 S_i 由两部分组成:一个是粘性损失项,即方程(5)右端第一项;另一个是惯性损失项,即方程(5)右端第二项。

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_j \right) \quad (5)$$

式中 S_i 是第 i 个(x, y 或 z 方向)动量方程中的源项, D 和 C 是给定矩阵。

本实验中活性炭颗粒堆积物可以简化为简单、均匀的多孔介质。所以,还可以使用下面的数学模型:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_i \right) \quad (6)$$

式中 α 代表多孔介质的渗透性, C_2 是惯性阻力系数。将 D 和 C 分别定义为由 $1/\alpha$ 和 C_2 为对角单元的对角矩阵。其中, $1/\alpha$ 可以定义为粘性阻力系数。

所以,利用 Fluent 软件仿真实空气通过多孔介质的流体特性,就是确定 $1/\alpha$ 和 C_2 。对于活性炭颗粒堆积物,可以采用两种方法确定 $1/\alpha$ 和 C_2 。

第一种是:利用半经验公式 Ergun 方程来确定 $1/\alpha$ 和 C_2 。根据 Ergun 方程可得:

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}, C_2 = \frac{3.5}{D_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}$$

第二种是:根据压强和速度的试验数据计算 $1/\alpha$ 和 C_2 。在已知空气通过活性炭颗粒堆积物的速度与压强降的试验数据时,可以通过插值求出 $1/\alpha$ 和 C_2 。

4 结果与分析

4.1 实验结果

图2为不同堆积高度下空气通过活性炭堆积物的流速与压降关系图。

从图2中可以看出,随着空气流量的增加,压降越来越大。当活性炭颗粒堆积高度为 25mm 时,即使空气流量达到 0.65m/s,压降也只有 1300Pa。而当活性炭颗粒堆积高度为 100mm,空气流速为 0.65m/s 时,压降达到 4800Pa。当空气流速一定时,空气通过活性炭颗粒堆积物的压降与活性炭颗粒堆积高度成正比。堆积高度越高,空气通过活性炭堆积物的压降越大。

4.2 试验结果与仿真结果比较

有两种方法可以得到粘性阻力系数 $\frac{1}{\alpha}$ 和惯性阻力系数 C_2 。

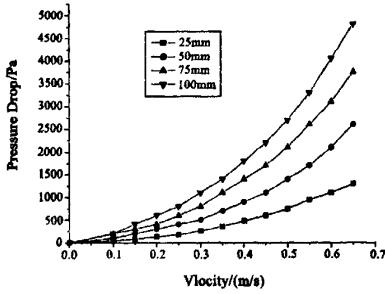


图2 不同堆积高度条件下速度 - 压降图

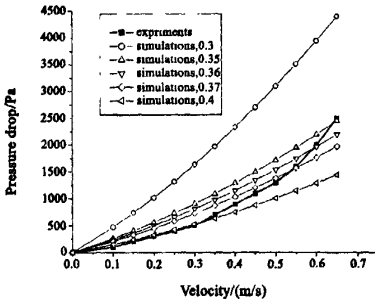


图3 试验结果和仿真结果比较

方法一是利用半经验公式 Ergun 方程来确定 $\frac{1}{\alpha}$ 和 C_2 。

通过实验,可以得到活性炭的孔隙率 $0.26 < \epsilon < 0.55$ 。活性炭粒径全部在 $0.6 - 0.8\text{mm}$ 之间。可以取活性炭颗粒的粒子平均直径 $D_p = 0.75\text{mm}^{[8]}$ 。

当活性炭堆积高度为 50mm 时,分别取 $\epsilon = 0.3, \epsilon = 0.35, \epsilon = 0.36, \epsilon = 0.37, \epsilon = 0.4$ 得到仿真结果和实验结果对比如图3。

由图3可以看出,在边界条件内,仿真结果与实验结果均有比较大的差距。所以,用方法一计算粘性阻力系数 $\frac{1}{\alpha}$ 和惯性阻力因子 C_2 得到的仿真结果不可靠。

方法二是根据速度和压降的试验数据计算 $\frac{1}{\alpha}$ 和 C_2 。

例如,当堆积高度为 50mm 时,根据速度和压降的试验数据,可以得出一条“速度 - 压降”曲线,如图4。

其曲线的方程为:

$$\Delta P = 120344v^2 + 1111v \quad (7)$$

此方程等价于方程(6),由此可得:粘性阻力系数 $\frac{1}{\alpha} = 6,232,224$,惯性阻力系数 $C_2 = 196,480$ 。根据这两个系数得到的仿真结果和试验结果比较见图5。

从上图可以看出,实验结果和仿真结果基本一致。在堆积高度较小时,试验结果与仿真结果符合良好。在堆积高度较大时,试验结果和仿真结果有一点误差,但是误差在可接

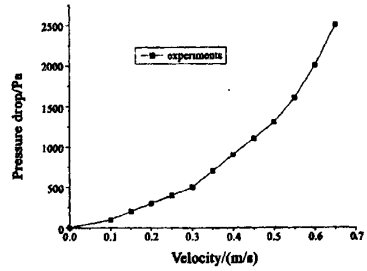


图4 堆积高度为 50mm 时速度 - 压降图

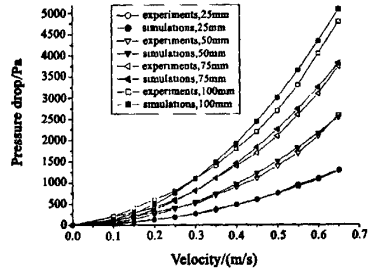


图5 实验结果和仿真结果比较图

受范围内。

5 结论和展望

采用了试验的方法和仿真的方法研究了空气经过活性炭堆积物的压强降。得到的主要结论有:

- 1) 当活性炭堆积高度为 25mm 时,即使空气流速达到 0.65m/s ,压降也只有 1300Pa 。而当活性炭堆积高度为 100mm ,空气流速为 0.65m/s 时,压降达到 4800Pa ;
- 2) 基于半经验公式 Ergun 方程计算出来的渗透性系数 α 和惯性阻力因子 C_2 ,会使得仿真结果和实验结果有比较大的差距;
- 3) 可以根据压强和速度的试验数据来计算渗透性系数 α 和惯性阻力因子 C_2 ,利用这种方法得到的仿真结果和实验结果符合良好,仿真具有可靠性。

通过对活性炭压降的计算机仿真研究,有助于燃料电池空气过滤器吸附层厚度的设计和结构优化,对空气过滤器系统的开发具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Daijun Yang, et al. Effects of NOx and SO2 in cathode stream on performance of PEMFC[J]. 电池, 2006, 36(5): 354 - 358.
- [2] Ma Xiaowei, et al. Evaluation of activated carbon adsorbent for fuel cell cathode air filtration[J]. Power Sources, 2008, 175(1): 383 - 389.
- [3] 曾莉,岑望来,樊瑜波. 活性炭形状和大小对其压降特性的影响研究[J]. 四川化工, 2007, 10(2): 10 - 13.

(下转第 340 页)

- [5] 武晓冬,戴波. 基于数字信号处理的超声自动无损检测技术的研究[D]. 北京化工大学, 2006.
- [6] 梁磊. A型数字式超声探伤系统中几项关键技术的研究[D]. 天津大学, 2002.
- [7] Cui Shaohui, Feng Zhensheng. liability processing of the circuits in CPLD design[C]. ASIC, 2003. Proceedings. 5th International Conference on, 21-24 Oct. 2003, 2:1349-1352.

[作者简介]



唐春菊(1984-),女(汉族),四川南充人,在读硕士研究生,重庆大学通信工程学院硕士研究生,主要从事FPGA,SOPC开发;

何世彪(1963-),男(汉族),安徽怀宁人,博士后,重庆大学通信工程学院教授,重庆通信学院三系副主任,主要从事抗干扰通信与宽带无线通信的研究。

(上接第281页)

- [4] 张卫华,石琴,刘强. 公交优先信号交叉口延误计算与配时优化方法[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2004, 1(24):30-33.
- [5] 陈群,晏克非. 考虑公交优先的城市交叉口遗传算法信号配时研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 11(6):133-138.
- [6] 季彦婕,邓伟. 基于公交优先通行的交叉口相位设计方法研究[J]. 公路交通科技, 2005, 12(5):118-122.
- [7] Y Sazi Murat, Erugun Gediziloglu. A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions[J]. Transportation Research Part C13, 2005. 19-36.
- [8] 黄安胎,吴晓华. 基于模糊理论的单交叉路口变相位两级控制研究, 交通控制, 2005, 7:33-35
- [9] 万绪军,陆化普. 实时自适应交通信号控制优化理论模型[J].

交通运输工程学报, 2001, 1(4):60-66.

- [10] 李瑞敏,陆化普. 公交优先的交通信号多层模糊控制模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 9(9):1510-1513.

[作者简介]



张云星(1980-),男(汉族),山西晋中人,硕士研究生,研究方向为模式识别与智能控制;

陈锋(1966-),男(汉族),江苏睢宁人,副教授,博士,研究方向为智能交通,数据融合等;

董伟鹤(1984-),男(汉族),黑龙江鹤岗人,硕士研究生,研究方向为控制理论与工程;

万映涵(1986-),女(汉族),重庆巴南人,本科生,研究方向为模式识别与智能控制。

(上接第298页)

- [4] 王建伟,等. 固定床层中四种不同粒径柱状活性炭流动阻力特性[J]. 锅炉技术, 2004, 35(2):14-17.
- [5] 张智辉,陈军,王树宗. 消声器内部流场的数值模拟[J]. 振动与冲, 2006, 25(6):21-24.
- [6] 吴玉林,刘树红. 粘性流体力学[M]. 北京:中国水利出版社, 2007.
- [7] 杨成,宫镇,曾发林. 车用催化转化器内流场的三维数值模拟的研究[J]. 中国农机化, 2004, (6):38-40.
- [8] 蒋维均. 化工原理[M]. 北京:清华大学出版社, 1993.

[作者简介]



陈专(1984-),男(汉族),江西新余人,硕士研究生,现从事氢能与燃料电池发动机方面的研究;

吕洪(1978-),男(汉族),浙江丽水人,博士,讲师,从事氢能与燃料电池领域的研究;

马晓伟(1982-),男(汉族),山东潍坊人,硕士,工程师,从事氢能与燃料电池领域的研究;

马建新(1954-),男(汉族),浙江萧山人,教授,博士生导师,从事氢能与燃料电池领域的研究。

(上接第310页)

- [4] A B de Moraes, A B Pereira, J P Teixeira. Strength of epoxy adhesive-bonded stainless-steel joints[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2007, (27):679-686.
- [5] 余海洲,游敏,郑小玲,付建科. 胶瘤中嵌入金属块对搭接接头强度的影响[J]. 中国胶粘剂, 2005, 14(10):20-23.
- [6] A Abedian, W Szyszkowski. Effects of surface geometry of composites on thermal stress distribution - a numerical study[J]. Compos Sci Technol 1999, 59(1):41-54.
- [7] M Kemal Apalak, Recep Gunes. On non-linear thermal stresses in an adhesively bonded single lap joint[J]. Computers and Structures, 2002, (80):85-98.

[作者简介]



曹茜茜(1983-),女(汉族),辽宁沈阳人,在读博士研究生,研究方向为有限元分析、热-结构耦合分析;

赵宁(1958-),男(汉族),广东广州人,博士,西北工业大学教授,博士生导师,研究方向为优化设计、CAD/CAE/数字仿真及其一体化技术等;

郭辉(1978-),男(汉族),山东潍坊人,在读博士研究生,研究方向为齿轮几何及结构动力学;

贾清健(1984-),男(汉族),陕西西安人,在读博士研究生,研究方向为CAD/CAE,有限元分析。