

新型三元催化器设计及其压力损失数值分析与试验

王 瑜 蒋彦龙* 韩建军

(南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要:在传统三元催化器的基础上,设计了一种新型三元催化器,提高了气流均匀性,降低了系统流阻,提升了系统性能。建立了新型三元催化器数值计算模型,并考察了不同的扩张角、收缩角和来流速度对催化器流动特性的影响。此外,还搭建了三元催化器压力损失测试试验台,验证了数值模拟得出的催化器压力损失随流量的变化趋势与试验测试变化趋势的一致性。试验结果表明,新型三元催化器中的导流板和旁通孔可以减小压力损失,且在设计三元催化器需要考虑压力损失的影响时,FLUENT 数值模拟仿真计算可以提供一定的帮助。

关键词:新型三元催化器;压力损失;扩张角;收缩角;来流速度;数值模拟;试验

中图分类号:TQ021.8 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2016.01.020

Numerical Analysis and Experiment of Pressure Loss of Designed New Three-way Catalyst Convertor

WANG Yu JIANG Yanlong* HAN Jianjun

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract:Based on traditional three-way catalyst convertor, a new type of three-way catalyst convertor was designed which can improve the flow uniformity and reduce the system flow resistance so as to improve the system performance. Then numerical model of this new type of convertor was established as well as the influence of different expansion angle, convergence angle and inlet flow rate to flow characteristics of the convertor was investigated. Moreover, pressure loss testing experimental bench of three-way catalyst convertor was set up to demonstrate the consistency of variation trend of pressure loss with flow rate under numerical simulation and experiment. The results indicate that air deflector and by-pass port of new catalyst convertor can reduce pressure loss while FLUENT can provide reference value when the influence of pressure loss should be considered during catalyst convertor design period.

Key words:new type three-way catalyst convertor; pressure loss; expansion angle; convergence angle; inlet flow rate; numerical simulation; experiment

1 引言

随着我国汽车数量的日渐增大^[1],其对环境的危害也越来越明显。汽车尾气污染是我国大气的主要污染源之一,因此必须采取必要措施控制汽车尾气排放。三元催化装置是安装在汽车排气系统中最重要的机外净化装置,可通过氧化和还原作用将汽车排放的有害气体 CO、HC 和 NO_x 转变为无毒无害的 N₂、H₂O 和 CO₂,是非常有效的尾气污染后处理措施。

然而三元催化器的安装必然会增大排气阻力,引起汽车尾气排气性能参数的变化。排气阻力的增大会导致排气被压缩形成压力波反传回发动机,无形中增大了发动机的背压^[2]。发动机的背压升高,引气量随之减少,导致腔内燃料燃烧不充分,这样必

然会影响发动机的性能。所以在不影响汽车其他性能的前提下,减小尾气排放系统的压力损失是目前学者们研究的方向^[3-7]。

传统催化器的压力损失较大,载体中心流速不均匀,而且长期使用后传统三元催化器的载体会被一些污染颗粒堵塞,从而造成排气不畅,背压升高,排气管温度急剧上升^[8]。为了减轻载体堵塞所造成的不良影响,本文设计了一种新型的三元催化器,增加了旁通孔、导流管和导流板。正常情况下,大部分汽车尾气流经催化器载体排向大气,少量从旁通孔排至大气中;如果载体发生堵塞,大部分气流则通过旁通孔排至大气,从而减小了背压增大对汽车带来的损害。在催化器设计的基础上,基于有限体积法模拟得出催化器内部压降,并搭建试验台与模拟结果进行对比。

2 新型三元催化器设计

本文在传统三元催化器的基础上,设计一种新

2015-07-20 收稿,2015-08-11 接受,2016-02-25 网络发表

* 通讯作者, E-mail: jiang-yanlong@nuaa.edu.cn

型的三元催化器,如图 1 所示。新型三元催化器的载体容积大小和传统的三元催化器相同或者相近,在此基础上优化分析其他因素对催化器的影响。

传统和新型三元催化器载体容积 V_1 、 V_2 分别为

$$V_1 = (\frac{D}{2})^2 \pi L$$

(1)

$$V_2 = (\frac{R_1}{2})^2 \pi L - (\frac{R_2}{2})^2 \pi L$$

(2)

式中, D 代表内腔内径; L 代表载体长度; R_1 、 R_2 分别代表载体内径和外径。

传统催化器和新型催化器的载体容积相近,但是传统三元催化器的催化方式是轴向催化,而新型催化器催化方式是径向催化,轴向催化局限于容腔内径尺寸、载体的位置,气流往往集中在载体轴向的中心位置,而径向催化时,单位气流通过载体的有效面积大大增大,不仅提高了单位面积的催化效率,而且提高了气流的均匀性,有利于减小流阻。虽然对于同样容量的载体,新型三元催化器整体尺寸会有所加大,但是总体性能有较大的提升。新型催化器和传统催化器对比如表 1 所示。

表 1 传统三元催化器和新型三元催化器对比

催化器类型	载体种类	载体孔密度	催化方式	载体容积	载体结构
传统	金属	200 目/in ²	轴向	0.001846m ³	圆柱形
新型	金属	200 目/in ²	径向	0.001812m ³	圆筒形

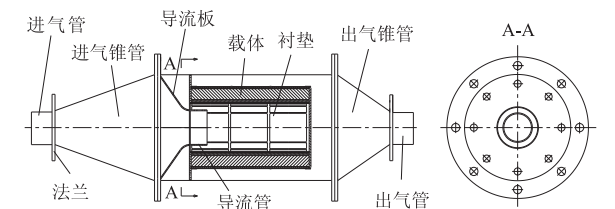


图 1 新型三元催化器结构

影响新型三元催化器压力损失的因素较传统三元催化器要复杂得多,主要包括:沿程压力损失、渐扩管局部阻力损失、载体内部压力损失、渐缩管局部阻力损失,还有水击现象造成的局部阻力损失和类似于弯管的局部阻力损失等。

新型三元催化器单位重量流体的沿程压力损失 $h_f^{[9]}$ 、渐扩管局部阻力损失 h_{j1} 和渐缩管局部阻力损失 h_{j2} 分别为

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g}$$

(3)

$$h_{j1} = \zeta \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

(4)

$$h_{j2} = \zeta_2 \frac{v_2^2}{2g}$$

(5)

载体内部压力损失可以整理为

$$\Delta P_3 = f(\text{Re}, v, \zeta, \mu, \rho)$$

(6)

整合可得新型三元催化器总的压力损失:

$$\Delta P = \rho g(h_f + h_{j1} + h_{j2}) + \Delta P_3 = f(v^2, \text{Re}, \mu, \zeta, \rho)$$

(7)

式中, μ 为粘性系数, ζ 为管道表面粗糙度, ρ 为催化器内气体密度。

综上所述,新型三元催化器的整体压降与气流平均速度的平方、雷诺数、粘性系数、管道表面粗糙度以及气体密度有关。另外,进气和出气锥管角度、内腔导流管的长度和内径、旁通孔的面积和个数、滤壁和微粒层的厚度、新腔的容量还有载体内腔的容量等都将会影响载体的流阻。

3 数值模拟

3.1 模型及网格

对新型催化器进行三维建模和划分网格,分析不同结构和不同流量对催化器流动特性的影响。催化器结构模型和网格划分见图 2、3。

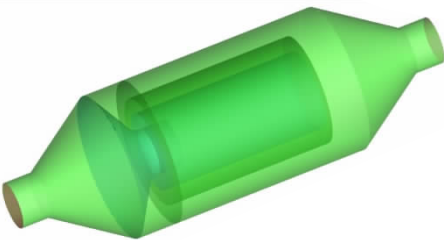


图 2 新型三元催化器结构模型

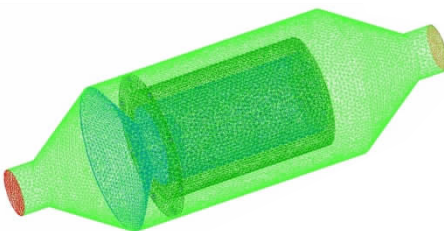


图 3 新型三元催化器网格

3.2 边界条件

假定催化器入口气流是均匀的,入口条件设定为速度入口,气流密度 1.225 kg/m³,气流温度 500 K,入口速度包括 10、25、45、60 m/s,湍流动能和湍流扩散率定为 6%,水力当量直径选取 0.06 m;出口边界设定为压力出口,默认出口为大气压。壁面选用无滑移绝热壁面。载体段多孔介质设定与传统三元催化器设定相同。采用 SIMPLE 压力耦合方程组的半隐式方法,选用 $\kappa - \varepsilon$ 湍流模型^[10-12]。

3.3 计算结果与分析

3.3.1 不同结构参数下的压力损失

1)不同扩张角

扩张角角度分别为 25°、35°、45°、55°、65°，收缩角角度为 35°，导流角度为 55°，导流管长度 20 mm，来流速度 $V=60\text{ m/s}$ ，来流温度 $T=500\text{ K}$ ，气流密度 $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$ 。

新型三元催化器 X-Z 截面压力云图如图 4 所示。由图 4(a)-图 4(e) 及表 2 可以看出,新型三元催化器的压力损失随扩张角增大呈现先减小后增大的变化趋势。根据式(2)可知,一般情况下,扩张角的增大会影响扩张段的前后截面比,使局部阻力系数增大,从而增大局部阻力系数,增大催化器整体压力损失,但是本文新型三元催化器在结构中添加了导流板和导流管,导流板和导流管的出现可以减小

局部的湍流程度,在一定程度上减少压力损失,所以扩张角从 25°扩张至 35°时,压力损失是减少的,但是导流板和导流管减少压力损失的程度有限,随着扩张角的增大,局部阻力系数迅速升高,导流板和导流管起的的减压作用变小,催化器的压力损失逐渐增大。

表 2 不同扩张角时新型三元催化器的压力损失

扩张角(°)	25	35	45	55	65
压力损失(Pa)	10047.6	9829.2	10373.2	10765.5	11018.7

2)不同收缩角

收缩角角度分别为 25°、35°、45°、55°、65°，扩张角角度为 35°，导流角度为 55°，导流管长度 20 mm，来流速度 $V=60\text{ m/s}$ ，来流温度 $T=500\text{ K}$ ，气流密度 $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$ 。

新型三元催化器 X-Z 截面压力云图如图 5 所示。由图 5 和表 3 可以发现,随着收缩角的增大,新型三元催化器的压力损失呈现先减小后上升的变化

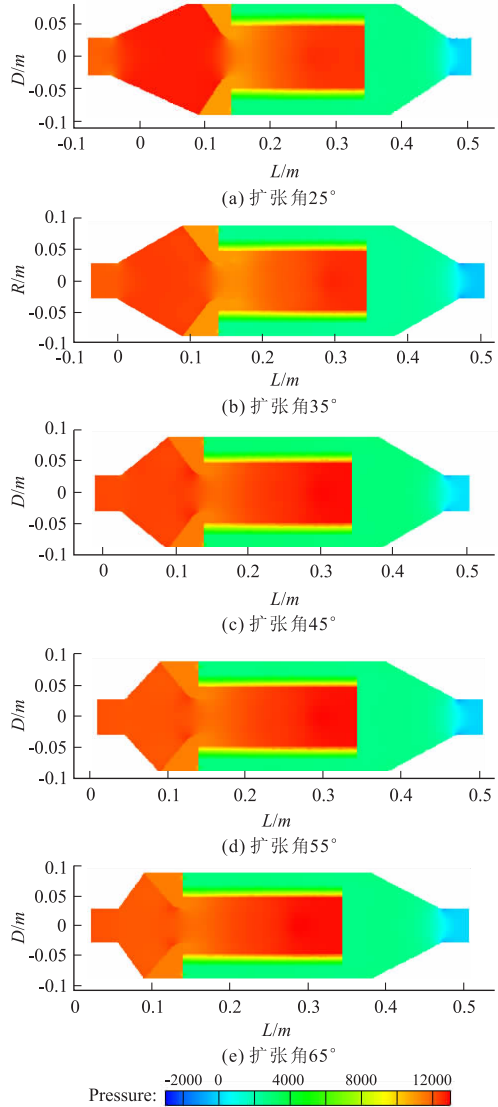


图 4 不同扩张角时新型催化器的压力分布

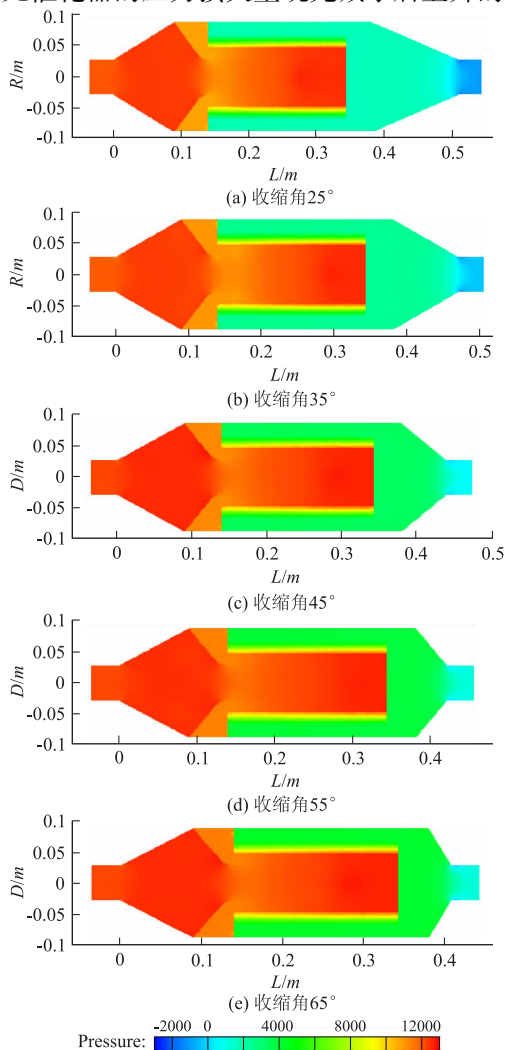


图 5 不同收缩角时新型催化器的压力分布

趋势。和上文中的不同扩张角的压力损失变化一样,导流板和导流管起到了减少压力损失的作用。收缩角和扩张角对压力损失影响的对比关系如图 6 所示。

表 3 不同收缩角时新型三元催化器的压力损失

收缩角(°)	25	35	45	55	65
压力损失(Pa)	9980	9829.2	9869.4	9950.1	10018.7

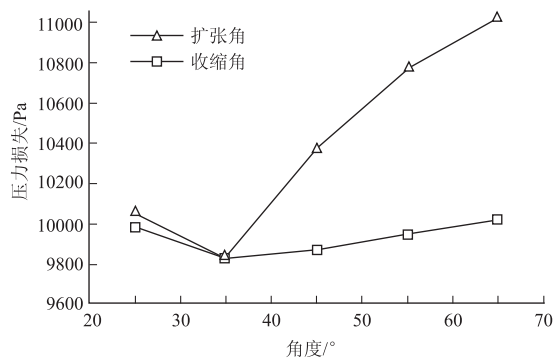


图 6 不同扩张角、收缩角时新型催化器的压力损失对比

从图 6 可以看出:1)随着扩张角和收缩角角度的增大,压力损失都是先下降后上升。这是由于存在导流板和导流管的原因,它们在一定程度上减小了催化器的压力损失。2)从图 1 可以知道,气流从入口段进入,经过导流板和导流管到达催化器内部,接着催化器内部的气体穿过载体至载体和壳体间的空隙,然后扩散至收缩段。由于气流是从载体和壳体间扩散至收缩段而不是沿着气流来流的方向直接排到收缩段,收缩角的增大只会影响气流扩散的速度,所以扩张角对新型三元催化器的压力损失的影响要大于收缩角的影响。

3.3.2 不同来流速度下的压力损失

维持收缩角为 35°,扩张角分别为 25°、35°、45°、55°、65°,导流板角度 55°,导流管长度 20 mm,改变来流速度,来流速度分别为 10 m/s、25 m/s、45 m/s、60 m/s,来流温度 $T = 500\text{ K}$,气流密度 $\rho = 1.225\text{ kg/m}^3$ 。不同来流速度下的压力损失对比如表 4 所示。

表 4 不同扩张角在不同来流速度下的压力损失对比

扩张角角度	压力损失(Pa)			
	来流速度(m/s)			
	10	25	45	60
25°	296.3	1468.8	5874.1	10047.6
35°	305.12	1350.1	5759.3	9829.2
45°	320.95	1500.1	6033.5	10373.2
55°	332.2	1565.3	6123.3	10725.5
65°	376.14	1605	6425.4	11018.7

不同扩张角在不同来流速度下的压力损失对比

如图 7 所示。由上文新型催化器整体压力损失公式(7)表明,其他参数一定的情况下,载体内的气流速度是影响压力损失的关键因素。由图 7 可以看出,几种不同结构的新型三元催化器的压力损失均随流量的增加而增大,这与理论分析是相同的。

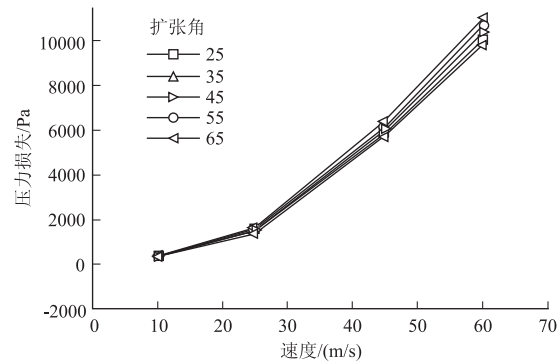


图 7 不同扩张角的新型三元催化器压力损失随来流速度变化对比

4 试验

4.1 试验系统

如果采用真实的发动机排气作为试验气流,既不容易控制,耗资又较大,且上文中对三元催化器压力损失进行的数值计算也是以忽略催化器内部载体催化反应为前提的。所以在试验条件有限的情况下,本试验使用压缩空气代替发动机排气。

三元催化器试验系统装置主要包括风机变频器、离心风机、管道控制阀门、涡街流量计、压力传感器、压差传感器、三元催化器试验件和热电偶等。试验系统如图 8 所示,试验气体由高压离心风机引进至管道,管道内的气流流量的大小通过涡街流量计显示,然后反馈给风机变频器,通过调节风机变频器以获得测试所需要的气流流量。热电偶和压力传感器插在涡街流量器的后面,用来测定试验气流的初始温度和压力。压差传感器连接线分别装在三元催化器试验件的入口端和出口端。为减小噪音,在试验件出口端加装消音箱。系统末端插入热电偶。管道和三元催化器试验件通过法兰盘连接。

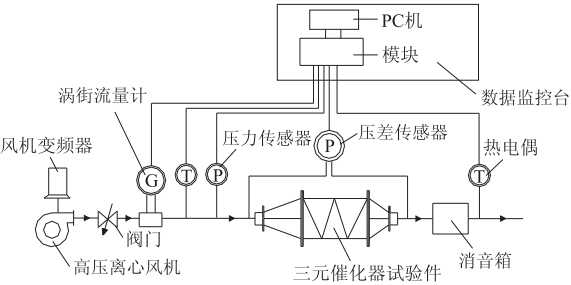


图 8 三元催化器压力损失测试系统示意图

4.2 试验结果与分析

由图 9 可以看出,对于新型的三元催化器,压力损失并不是随着扩张角的增加而不断增大,当催化器扩张角为 35°时,压力损失最小。试验结果与 3.3.2 节中的模拟结果对比压力损失变化趋势是一致的,压力损失均随流量的增大呈现出类似指数形式的上升。在 3.3.2 节的数值模拟中,不同来流速度对应的管道流量如表 5 所示。

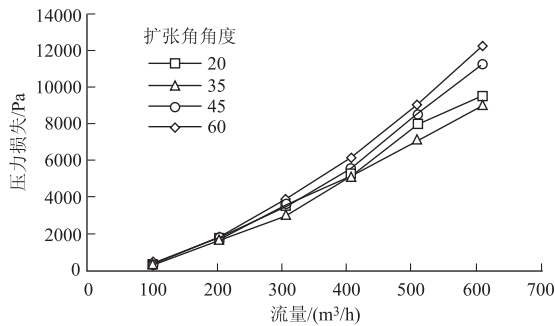


图 9 不同扩张角的新型三元催化器压力损失随流量变化对比

表 5 气流来流速度与管道流量对照表

来流速度 (m/s)	10	25	45	60
管道流量 (m³/h)	101.5	260	456	610.8

由图 10 可以看出,上文中通过数值模拟的方式得出催化器的压力损失随流量的变化趋势与试验测试催化器的压力损失随流量的变化趋势基本相符。催化器的压力损失随流量增大呈现出类似于指数形式的上升。所以设计三元催化器需要考虑压力损失的影响时,FLUENT 模拟仿真计算可以提供一定的帮助。

鉴于试验手段和仪器的限制,试验所得结果必然和真实结果存在一定的误差。一般试验用相对误差 Er 表示,如式(8,9)所示。

$$D = |X - x| \tag{8}$$

$$Er = \frac{D}{|X|} \tag{9}$$

式中, X 表示真值; D 是绝对误差。

本文数值模拟中的流量为 101.5、260、456 和 610 m³/h,将所得压力值和试验压力值带入式(9),分别计算相对误差,最后再对相对误差取平均,获得最终的相对误差。本文中模拟仿真和试验的相对误差见表 6。综合表 6 的相对误差值得到,新型三元催化器的仿真结果与试验结果的相对误差为 11.88%。查阅各种论文^[13-15],一般理论计算和试验值对比误差在 20% 内均为合格,且本文试验误差主要是由于离心风机气流的不稳定性,随着流量的

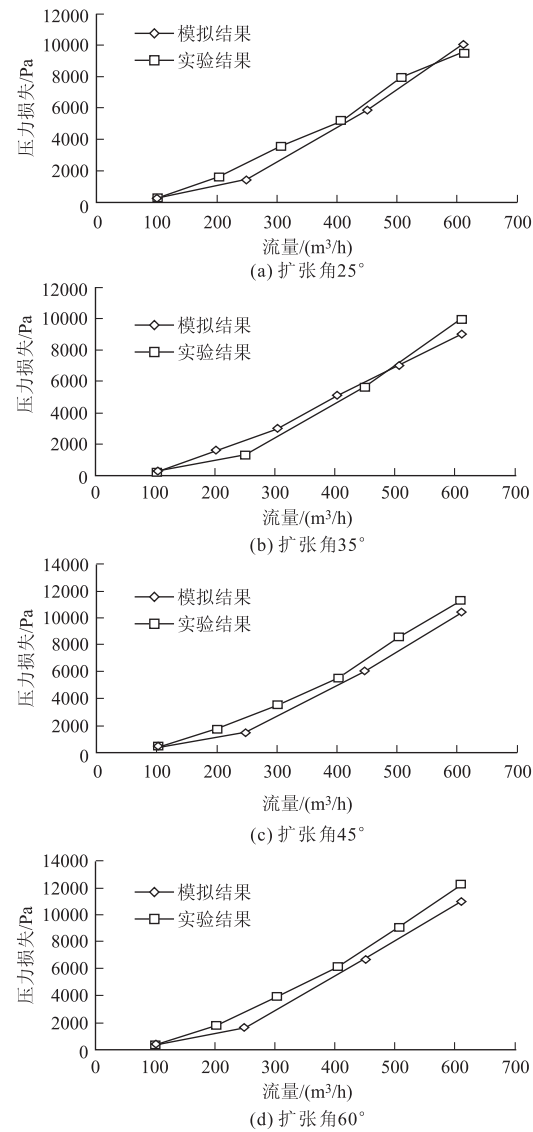


图 10 不同扩张角时三元催化器模拟结果和试验结果压力损失对比

增大,气流逐渐稳定,误差不断减小,说明本文采用 FLUENT 对催化器进行压力损失的分析是可行的。

表 6 新型三元催化器仿真与试验相对误差

流量 (m³/h)	扩张角角度 (°)			
	25	35	45	60
101.5	16%	13.1%	11.42%	9%
260	12.3%	11.3%	15.6%	10.5%
456	10.7%	14.5%	15.2%	17.6%
610	5.3%	9.97%	7.87%	9.9%
平均误差	11.07%	12.21%	12.52%	11.75%

文中试验误差主要有:系统误差和过失误差。系统误差主要为测量仪器本身的不准确性。本试验利用离心风机压缩空气作为试验气流,气流的不稳定性是导致读数不准确的主要原因。过失误差主要有:风机流量调节不准确;在系统未完全稳定的状态

下记录数据。

5 结论

本文设计了一种新型三元催化器,并基于 FLU-ENT 软件进行仿真计算和优化分析。最后,搭建了测试三元催化器压力损失的试验台,对新型三元催化器进行了压力损失试验。具体结论如下:

1)导流板可以起到减小压力损失的作用,所以新型三元催化器随着催化器扩张角和收缩角的增大,压力损失并不是一味的增大,而是先略有下降,之后才迅速上升,在 35°时压力损失降到最低;

2)扩张角对新型三元催化器的压力损失的影响要大于收缩角的影响;

3)其他参数一定的情况下,载体内的气流速度是影响压力损失的关键因素;

4)采用 FLUENT 软件对催化器进行仿真计算得到的压力损失随流量变化趋势和试验变化趋势基本一致,仿真计算结果和试验结果的相对误差为 11.88%,若保证试验气流的稳定性其误差还可更小,说明采用计算流体力学软件模拟催化器的流动特性是可行的,这样能够节约试验时间,减少试验的工作量和试验费用。

参考文献

[1]王玉珠.新背景下战略性贸易政策在中国汽车产业的实用性分析[D].天津:南开大学,2010.
[2]冉景煜.加装三元催化器对天然气汽车发动机燃烧影响的数值模拟[D].重庆:重庆大学,2005.

[3]WELTENS H,B RESSLER H,TERRES F,et al. Optimisation of catalytic converter gas flow distribution by CFD prediction[R]. SAE Paper 930 780,1993.
[4]BENJAMIN SF,CLARKON RJ,HAIMAD,N et al. An Experimental and Predictive Study of the Flow Field in Axisymmetric Automotive Exhaust Catalyst Systems[R]. Detroit:SAE International,1996.
[5]JEONG S,KIM T. CFD Investigation of the 3-Dimensional Unsteady Flow in the Catalytic Converter [R]. Detroit: SAE International, 1997.
[6]SIEMUND S,LECLERC J P,SCHWEICH D,et al. Three-way monolithic converter:simulations versus experiments[J]. Chemical Engineering Science,1996,51(15):3709-3720.
[7]WOLLIN J,BENJAMIN S F. A study of the flow performance of ceramic contoured substrates for automotive exhaust catalyst systems [J]. SAE International Journal of Fuels & Lubricants, 1999, 108(8):2014-2021.
[8]龚金科,周立迎,梁昱,等. 三效催化转化器压力损失对发动机性能的影响[J]. 汽车工程,2004,26(4):413-416.
[9]孔珑. 流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
[10]王瑞金,张凯,王刚. FLUENT 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
[11]邓彩华,董亮,陈壁峰,等. 多孔介质流动的直接数值模拟[J]. 武汉理工大学学报,2011,(6):1257-1260.
[12]韩占忠. FLUENT—流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009.
[13]宋金瓯,解茂昭,邓康耀,等. 汽车催化器性能影响因素数值分析[J]. 燃烧科学与技术,2001,7(4):283-287.
[14]王翔,王维城,王栋,等. 汽车尾气催化器温度场的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002. 42(5):669-672.
[15]SILK E A,KIM J,KIGER K. Spray cooling of enhanced surfaces: Impact of structured surface geometry and spray axis inclination [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2006,49(25-26):4910-4920.