

文章编号:1000-5013(2013)04-0371-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2013.04.0371

斜扩张管倾斜角度对催化转化器 流动特性的影响

许建民^{1,2}, 顾立志¹

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;
2. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 采用计算流体动力学模型,利用三维建模软件(UG)对催化转化器进行三维建模,在 Gambit 中进行计算区域网格化和边界条件的定义.用计算流体动力学(CFD)软件 FLUENT 对 4 种不同入口扩张管倾斜角度的催化转化器的速度场、压力场进行三维稳态流动数值模拟.模拟结果表明:催化器入口扩张管倾斜角度对催化转化器的气流分布有很大影响,斜扩张管催化器由于倾斜角的不同,其压力损失也不同,压力损失并不是随着倾斜角的增大而增加,当倾斜角为 30°时的压力损失最小;当斜扩张管的倾斜角小于 40°时,催化器斜扩张管的倾斜角越大,流动均匀性指数越高,流速分布越均匀.

关键词: 催化转化器; 斜扩张管; 倾斜角; 计算流体动力学; 速度场; 压力场

中图分类号: TH 311 **文献标志码:** A

随着车用电喷汽油机的普及,采用三元催化转化器是控制汽油车排放的主要措施之一.由于废气在常规结构催化转化器的扩张管段上会扩散,导致废气流速分布不均匀.催化器载体中心的流速高,使气体流动集中在载体中心区域,导致该区域的流速过快,催化剂利用率低,温度过高;而载体边缘气流速度小,温度又较低.最终使得载体中心区域的催化剂老化加快,而边缘区域的催化剂却得不到充分发挥作用.这样既降低了催化转化器的整体转化效率,又缩短了其使用寿命.另外,由于载体及壳体温度分布的不均匀,导致催化器产生热应力,容易使载体损坏^[1-3].因此,利用计算流体动力学(CFD)软件对催化转化器的内部进行流场分析,进而改善催化转化器的转化效率,加快其起燃特性,延长其使用寿命是非常重要的.根据国内外相关文献得知,斜扩张管催化器内部气流的径向分布状态要好于常规型式催化器.本文建立了斜扩张管催化转化器的计算流体动力学模型,对比研究了 4 种不同倾斜角度的斜扩张管催化器的气流分布特性和压力损失.

1 流动数学模型

1.1 流体控制方程^[4]

质量、动量恒方程^[5]为

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{i,j}) = -\frac{\partial p}{\partial x_{i,j}} + s_i. \tag{1}$$

式(1)中: s_i 为源项,表示催化器载体阻力; $\tau_{i,j}$ 为应力张量.

对于牛顿流,其应力张量为

$$\tau_{i,j} = 2\mu(s_{i,j} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{i,j}) - \overline{\rho u_i u_j}. \tag{2}$$

收稿日期: 2012-10-31

通信作者: 顾立志(1956-),男,教授,主要从事金属切削技术、数字化设计与制造技术的研究. E-mail: gulizhi888@163.com.

基金项目: 福建省教育厅科技计划项目(JB11179); 福建省科技计划重点项目(2012H0034); 福建省泉州市科技计划重点项目(2012Z122)

式(2)中: μ 为分子动力粘性系数; $\delta_{i,j}$ 为 Kroneker 数; $\overline{\rho u'_i u'_j}$ 为雷诺应力张量; $s_{i,j}$ 是流体变形速率张量, $s_{i,j} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$.

1.2 湍流模型^[2]

采用标准的 κ - ϵ 模型计算雷诺应力来推导上述流动控制方程,即

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = -2\mu_t s_{i,j} + \frac{2}{3}(\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k)\delta_{i,j}. \tag{3}$$

式(3)中: μ_t 为湍流粘性系数, $\mu_t = \frac{c_\mu \rho \kappa^2}{\epsilon}$. 其中: κ, ϵ 分别为湍动能和湍能耗散率. 它们的输运控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \mu_j \kappa - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j}) = \mu_t s_{i,j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon - \frac{2}{3}(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \kappa) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \mu_j \epsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) = c_{\epsilon,1} \frac{\epsilon}{\kappa} \{ \mu_t s_{i,j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \kappa) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \} - c_{\epsilon,2} \frac{\epsilon^2}{\kappa} + c_{\epsilon,4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i}. \tag{5}$$

式中: $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$; 各项经验系数 $c_\mu, \sigma_\kappa, \sigma_\epsilon, c_{\epsilon,1}, c_{\epsilon,2}$ 和 $c_{\epsilon,4}$ 分别为 0.09, 1.0, 1.22, 1.44, 1.92 和 -0.33.

1.3 催化转化器载体流动模型^[2-3, 6-7]

把陶瓷蜂窝载体材料作为多孔介质,采用当量连续法进行模拟. 因为载体管道尺寸很小,载体内的气流可以假设为定常不可压层流. 当多孔介质具有非常大的阻力时,可以忽略动量方程的对流项和扩散项. 因此其动量方程可以简化为

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = -K_i u_i, \quad K_i = \alpha_i |V| + \beta_i. \tag{6}$$

式(6)中: K_i 为渗透率,与当地气流速度 $|V|$ 大小成正比; α_i, β_i 均为经验系数,在周向和径向取为 10^5 , 即认为气流只有轴向流动,其他两个方向无质量交换.

2 计算结果分析

2.1 研究对象

研究 4 种载体相同而扩张管倾斜角度不同的催化转化器的内部流场. 4 种催化器的载体直径均为 140 mm,扩张管倾斜角度(θ)分别为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$. 斜扩张管催化转化器的结构示意图,如图 1 所示. 其中: θ 为斜扩展管催化转化器的倾斜角度, θ 为 0° 即为常规催化转化器.

仿真步骤:先采用三维建模软件 UG 对催化器建立三维几何模型;然后,将几何模型导入 Fluent 的前处理软件 Gambit 进行计算流体区域的网格划分和边界条件的定义;最后,利用流体分析软件 Fluent 进行求解.

2.2 边界条件

1) 进口:设催化器气流入口为速度边界条件;入口处的湍动能设定为 $0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,湍流动能尺度设定为 2 mm. 2) 出口:设为压力出口,且初始表压力设置为 0. 3) 壁面:设壁面处为无滑移壁面条件.

2.3 流场分析

4 种不同入口扩张管倾斜角度的催化器气流分布的速度矢量图,如图 2 所示. 从图 2 中可知:入口扩张管角度为 30° 时气流速度矢量最为光顺,说明气流流动最为顺畅. 当扩张管倾斜角度为 $10^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 时,在载体前端均产生了较强的涡流,其中扩张管角度为 40° 时形成的涡流最明显. 涡流的出现说明在催化器前端出现明显的气流分离,气流分离越明显,气流损耗的能量越大,产生的排气背压越大.

2.4 气流分布均匀性对比

载体内流场分布是否均匀,对催化器的催化效率和使用寿命有很大影响,故常采用流动均匀性指数来评价流场分布特性^[8-9]. γ 为流动均匀性指数^[10],即有

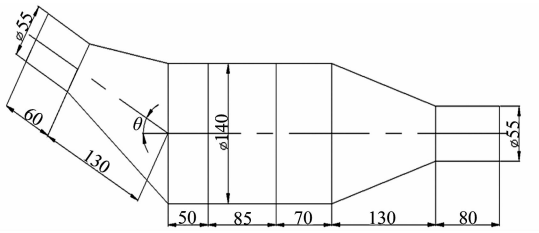


图 1 斜扩张管催化转化器的结构示意图(mm)
Fig.1 Schematic diagram of catalytic converter with oblique diffuser (mm)

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(v_i - v_{av})^2}}{v_{av}}. \tag{7}$$

式(7)中: n 为载体管道数; v_i 和 v_{av} 分别表示 i 管道内的速度大小和载体前端截面上的平均速度。

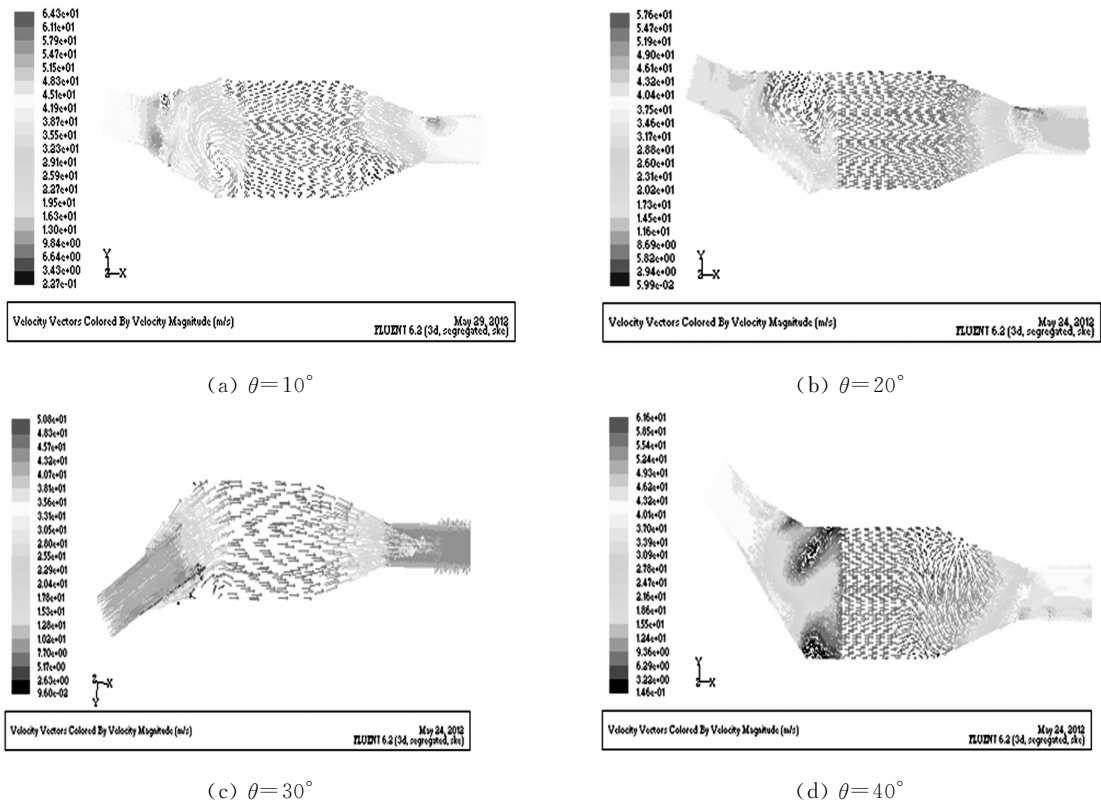


图 2 催化器流场的速度矢量图

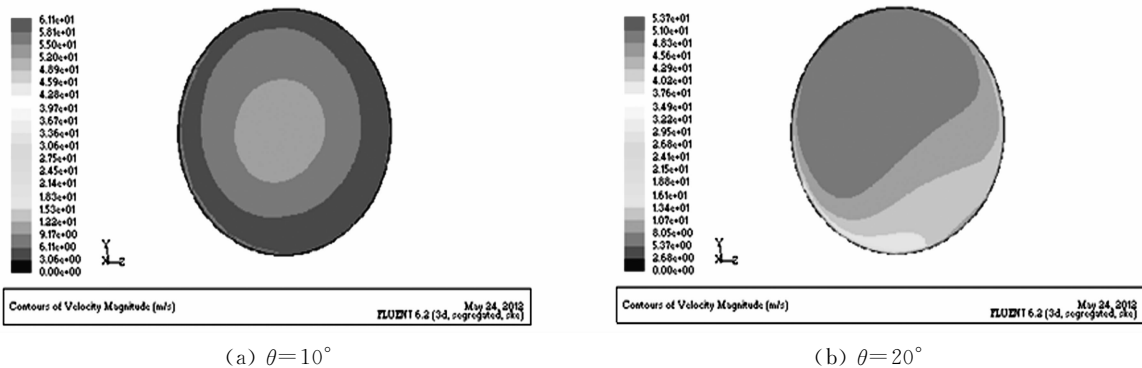
Fig. 2 Velocity vector of the flow field for catalytic converters of expansion tube

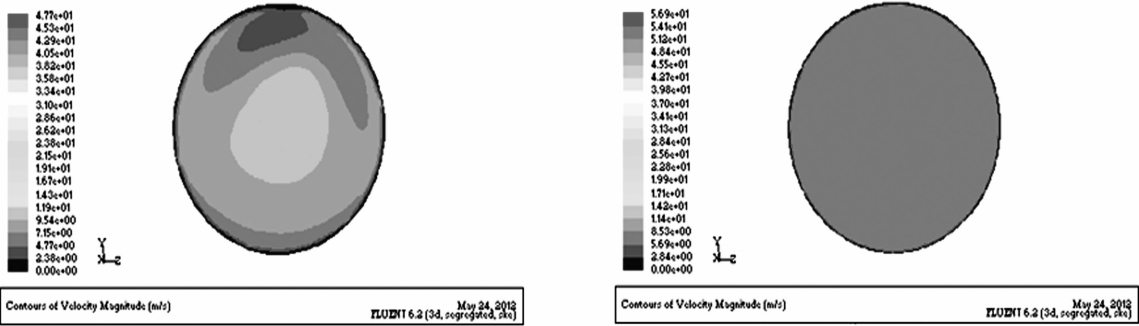
流动均匀性指数在 0 和 1 之间变化, 流场均匀性指数越大, 表示气流分布越均匀, 1 为理想的均匀流。当扩张管倾斜角度为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 时, 对应催化转化器的流动均匀性指数分别为 0.721, 0.793, 0.885, 0.945。由此可知: 对于同一催化转化器载体, 扩张管倾斜角度增加, 经过载体时气流会往周边区域扩散, 这样催化转化器内的气流分布更加均匀。

不同扩张管倾斜角度的催化转化器载体前端气流速度分布云图, 如图 3 所示。由图 3 可知: 当扩张管倾斜角度为 10° 时, 载体中间出现明显的气流高速区, 周边速度明显减小, 气流速度从中心到周边形成明显的速度梯度, 这种明显的速度梯度会使中心催化剂的老化加速; 当扩张管倾斜角度为 20° 时, 在催化器载体前端出现一边速度大, 一边速度小的情况; 当扩张管倾斜角度达到 40° , 载体前端气流速度几乎相等, 流动均匀性指数接近于 1。

2.5 压力分布

不同扩张管倾斜角度的催化转化器压力分布云图, 如图 4 所示。从图 4 可知: 催化转化器入口端比



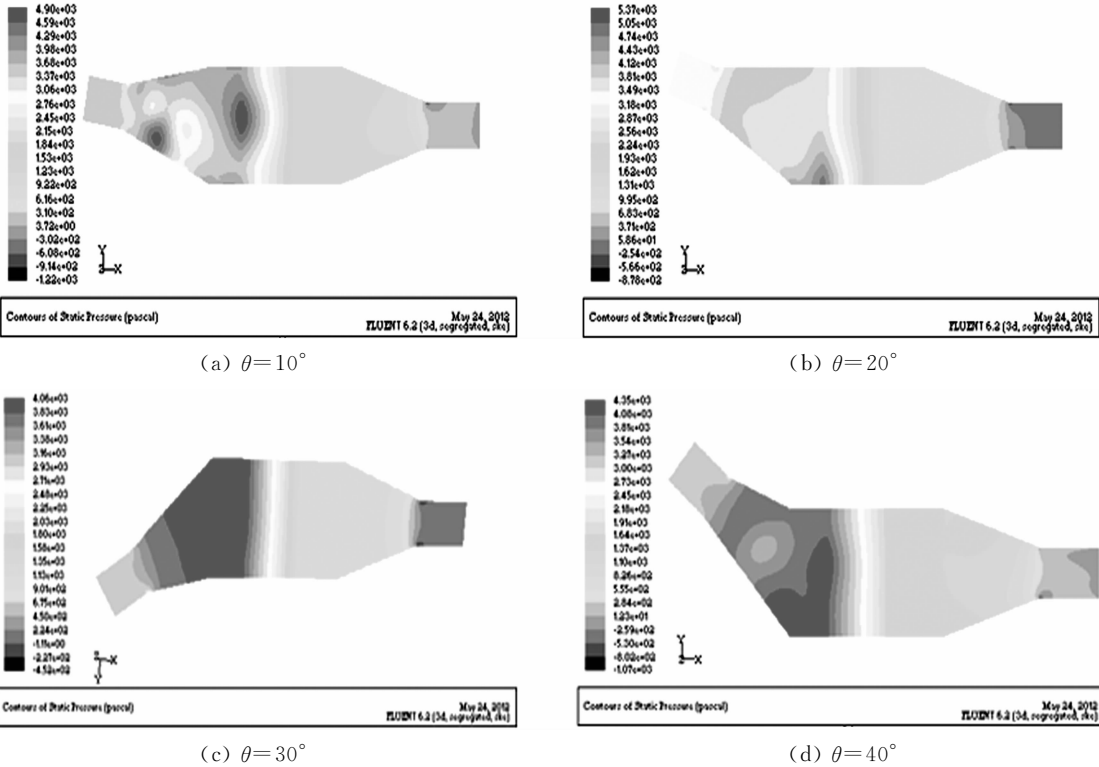


(c) $\theta=30^{\circ}$ (d) $\theta=40^{\circ}$

图 3 催化转化器载体前端气流速度分布云图

Fig. 3 Airflow velocity contours of catalytic converter front for different expansion tube tilt angles

出口端气流压力大很多,说明催化器载体对流经的气流产生很大阻力,并且压力云图成压力梯度分布.



(a) $\theta=10^{\circ}$ (b) $\theta=20^{\circ}$

(c) $\theta=30^{\circ}$ (d) $\theta=40^{\circ}$

图 4 催化转化器压力分布云图

Fig. 4 Pressure contours of catalytic converter for different expansion tube tilt angles

不同扩张管倾斜角度的催化转化器压力损失变化图,如图 5 所示.从图 5 可知:10°,20°,30°,40°倾斜角的斜扩张管催化器的压力损失(p)分布为 1.80,1.64,1.55,1.62 kPa.扩张管倾斜角度为 10°,20°时,由于倾斜角小,气体在流经催化器时主要集中在载体中间区域,在边缘部位产生涡流造成较大的能量损失;倾斜角为 30°和 40°时,由于倾斜角增加,在壁面会产生强涡流造成不同程度的能量损失^[11];倾斜角为 30°时载体压力损失值最小.因此可知,载体压力损失并不是随着入口扩张管倾斜角的增加而增大的,而是倾斜角在 30°附近时是一个转折点,呈现两头高中间低的趋势.由此要使斜扩张管催化器的压力损失尽量小,斜扩张管催化器的入口扩张管角度应选择在 30°附近.倾斜角较小时,入流方向与扩张管壁的夹角大,容易造成气流分离,使压力损失加大;倾斜角太

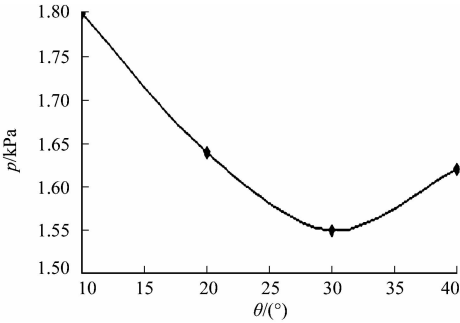


图 5 压力损失变化曲线图

Fig. 5 Variation graph of pressure loss

大,入流方向与扩张管壁的夹角小,容易造成气流分离,使压力损失加大;倾斜角太

大,扩张管的流通区域减小,速度增加,压力损失也随之增大.由以上分析可知,气流压力损失的变化规律与气流分布均匀性指数的不一样.

3 结论

- 1) 不同倾斜角的斜扩张管催化器在载体前端都会出现不同程度的气体分离产生涡流,造成同一截面内流速不一致的现象.
- 2) 相同载体的斜扩张管催化器由于倾斜角的不同压力损失不一样,压力损失不是随着倾斜角的增大而增加,倾斜角为 30°附近时的压力损失最小.
- 3) 当斜扩张管的倾斜角小于 40°时,倾斜角越大,流动均匀性指数越高,流场分布越均匀.

参考文献:

[1] 梁呈.汽油车催化转化器流场研究与结构优化设计[D].长沙:湖南大学,2003:12-18.

[2] 帅石金,王建昕,庄人隽.CFD 在车用催化转化器结构优化设计中的应用[J].汽车工程,2000,22(2):129-133.

[3] 帅石金,王建昕,庄人隽.斜扩张管催化器流场三维数值模拟和结构优化设计[J].燃烧科学与技术,2001,7(3):298-301.

[4] 刘军.汽车排气催化转化装置气流特性分析[J].车用发动机,2001,134(4):25-28.

[5] 方瑞华,苏清祖.车用催化器载体蜂窝孔内气流分析[J].汽车工程,2001,23(2):124-126.

[6] 陈明华,司传胜.基于 CFD 的车用催化转化器的结构优化设计[J].中国制造业信息化,2006,23(17):71-77.

[7] 赵继业,陈觉先,朱国朝,等.利用 CFD 分析催化转化器不同设计因素的影响[J].小型内燃机与摩托车,2001,30(3):23-28.

[8] 陈晓玲,张武高,黄震.催化器载体前端造型对其流动特性的影响[J].上海交通大学学报,2007,41(4):537-540.

[9] 修岩,何立.端面造型载体催化器结构优化设计[J].机械设计与制造,2009(3):42-44.

[10] WELTENS H,BRESSLER H,TERRES F,et al.Optimisation of camlytic convener gas flow distribution by CFD prediction[J].Detroit:SAE International Press,1993:51-131.

[11] 付海明,尹峰.褶型空气滤清器捕集效率及压力损失[J].华侨大学学报:自然科学版,2009,30(6):650-655.

Influence of the Tilt Angle of Oblique Expansion Eube on Flow Characteristics in Automotive Catalyst Converter

XU Jian-min, GU Li-zhi

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: In this article, computational fluid dynamics (CFD) model is used, three-dimensional model of catalytic converters is created by UG, calculation of the regional grid and boundary conditions are defined in Gambit. Three dimensional numerical simulation about velocity field and pressure field of steady flows in the catalytic converters for four different inlet tube tilt angles is performed by using computational fluid dynamic software Fluent. The simulation results show that the entrance expansion tube tilt angle of the catalytic converter has a significant impact on the catalytic converter gas flow distribution. The pressure loss of the catalytic converter with oblique expansion pipe is changing with the angle of inclination. The pressure loss is not increased with the increasing angle of inclination. When the tilt angle is 30°, it has the minimum pressure loss. When the oblique inclination angle of the expansion tube is less than 40°, the catalytic converter oblique expansion tube tilt angle becomes larger, the flow uniformity index becomed higher, and the velocity distribution becomes more uniform.

Keywords: catalytic converters; oblique expansion tube; tilt angle; computational fluid dynamics; velocity field; pressure field