

文章编号:1000-582X(2012)04-001-06

# 汽油机歧管式催化转化器流固耦合热应力分析

李以农,王 雷,柳承峰,宗德媛

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

**摘 要:**采用流固耦合的方法计算了某汽油机歧管式催化转化器结构热应力状态与振动特性。首先,计算了歧管式催化转化器结构的内流场和外流场,得到了内外壁面的温度与压力分布;进一步利用有限元的方法计算了歧管式催化转化器结构的热应力状态和振动特性。计算结果表明,歧管式催化转化器结构在入口法兰区域热应力过大,容易产生应力集中,是最容易损坏的区域;另外,排气歧管和催化转化器连接处,与螺栓固定点的距离较大,热变形较大。据此,进行了结构改进,并与原结构进行了相应的分析对比,结果表明改进后的歧管式催化转化器较原结构在最高温度及最大热应力、振动特性等方面均有所改善。

**关键词:**流固耦合;汽车发动机歧管;催化转化器;温度场;热应力

**中图分类号:**TK402

**文献标志码:**A

## Fluid-structure thermal simulation of gasoline engine manifold catalytic converter

LI Yi-nong, WANG Lei, LIU Cheng-feng, ZONG De-yuan

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University,  
Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** The thermal stress and vibration characteristic of original structure of gasoline engine manifold catalytic converter are calculated with the fluid-structure thermal simulation. The heat transfer boundary conditions, such as the temperature of fluid boundaries and stress distribution, are calculated. Then, the thermal stress and vibration characteristic of original structure of manifold catalytic converter are calculated with Finite Element Analysis technology. According to the results, the thermal stress is excessive in entrance flange area. It is easy to produce the thermal stress concentration and is damaged easily in this area. In addition, the thermal deformation is large in the junction area between exhaust manifold and catalytic converter. Finally, the improved structure is presented according to the calculation results. The corresponding analysis and comparison show that the improved structure is better than the original structure in the highest temperature, the maximum thermal stresses and the vibration characteristic.

**Key words:** fluid-structure interaction ; automobile engine manifolds ; catalytic converters; temperature fields; thermal stress

收稿日期:2011-08-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875270);教育部重点项目(108108)

作者简介:李以农(1961-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事汽车系统动力学与控制、振动噪声控制等研究,  
(Tel) 023-65106094;(E-mail) ynli@cqu.edu.cn。

为了解决汽车冷启动引起的排放问题,快速提高三元催化器的工作温度,使催化转化器最大限度地发挥催化剂效能<sup>[1]</sup>,催化转化器的位置向靠近发动机位置移动,形成了歧管式催化转化器。这种歧管式催化转化器的良好性能,使其成为目前应用最广泛的车用汽油机催化转化器的结构形式。

由于歧管式催化转化器的位置紧靠发动机,一方面,使其长期受高温气体的侵蚀,工作热负荷大,热应力高;另一方面,催化转化器直接受到发动机的大强度振动激励,工作环境极其恶劣。因此,快速准确的对其进行热应力和振动特性的计算分析,对歧管式催化转化器的结构设计与改进有着重要意义。

国外对催化转化器的数值计算研究较早。Cybulski<sup>[2]</sup>用固相温度模型计算了辐射温度分布曲线,估计了有效热传导率和热传递系数。ZhejiLiu等<sup>[3]</sup>对尾气管段做了热传递模型。Grigorios等<sup>[4]</sup>考虑了气固对流传热、壁内热传导以及固相热容的影响,对薄壁通道内的热传递进行了数值模型。Jianxin Wang等<sup>[5]</sup>建立了包括热传递、质量传递和化学反应的多维模型,在整个流场内进行了求解。Horng等<sup>[6]</sup>研究了冷启动过程中加热能和加热点对催化剂转化特性的影响。Tsinoglou等<sup>[7]</sup>研究了催化转化器内气流分布的瞬态模型。

近年来,我国对催化转化器的内流场及其影响因素进行了较多的分析研究。帅石金等用当量连续法建立了蜂窝载体的流体力学模型,并用计算流体力学(CFD)软件对整个催化转化器的内流场进行了稳态流动数值模拟<sup>[8]</sup>。陈晓玲等使用CFD的方法,对桑塔纳轿车催化转化器内部流动特性进行了分析<sup>[9-10]</sup>。孙金讯与刘彪等分别研究了催化转化器扩张角和载体参数对流动特性的影响<sup>[11-12]</sup>。然而,国内对歧管式催化转化器的结构热应力与耐久性鲜有研究。

笔者利用 ANSYS Workbench 软件,采用了一种流固耦合热应力分析的方法,模拟了汽油机歧管式催化转化器的热应力状态和振动特性,并进行了结构改进。

## 1 流固耦合传热基本原理

耦合分析是指考虑两个或多个物理场之间相互作用后对研究对象进行的数值模拟。如考虑流体和固体之间互相作用,求解流场运动与结构变形之间互相影响的流固耦合分析。而考虑流体速度场与温度场变化引起的结构热应力变化就是典型的流固耦合热应力分析问题。

对于流体与固体之间的对流换热问题,热边界

条件是由热量交换过程动态地加以决定而不能预先规定的<sup>[13]</sup>。流固耦合传热计算的关键是实现流体与固体或交界壁面处的热量传递,可采用方程(1)描述,即用能量守恒方程联接实体的 Fourier 热传导方程和流体的对流换热控制方程

$$K_{\text{cond}} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{wf}} = q^{\text{conv}} = h_{\text{conv}} (T_f - T_w) \quad (1)$$

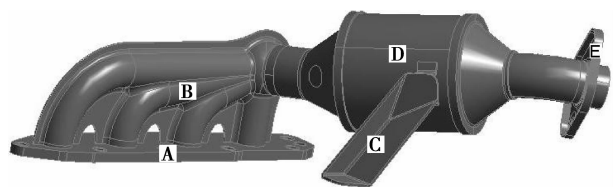
式中: $K_{\text{cond}}$ 为固体的导热系数; $h_{\text{conv}}$ 为局部对流换热系数; $T_f$ 为流体温度; $T_w$ 为壁面温度。

流固耦合热应力分析是建立在流固耦合传热基础上的。考虑流固耦合传热问题,对汽油机歧管式催化转化器施加传热和力学边界条件,建立温度场的计算模型,并计算出结构温度场,而后以温度场为单元载荷计算结构热应力分布。

## 2 计算模型

### 2.1 三维模型

所研究的某车型歧管式催化转化器模型如图 1 所示,由入口法兰盘、排气歧管、支撑、催化转化器和出口法兰盘四部分组成。发动机各缸排除的废气经由 4 个排气歧管直接进入催化剂载体部分。载体为陶瓷蜂窝状,蜂窝通道由边长为 1 mm 的正方形小孔组成,通道壁厚为 0.25 mm,载体孔隙率为 400 孔/in<sup>2</sup>。排气歧管与催化转化器由 409 L 铁素体不锈钢材冲压焊接而成<sup>[14]</sup>。



A——入口法兰盘;B——排气歧管;C——支撑;  
D——催化转化器;E——出口法兰盘

图 1 歧管式催化转化器物理模型

### 2.2 内流场 CFD 计算模型

内流场控制方程采用可压缩  $N-S$  方程<sup>[15]</sup>,湍流模型采用标准的  $k-\epsilon$  模型<sup>[16]</sup>,强度为 5%。管壁为光滑、非渗透性的壁面,没有滑移,平均对流换热系数为 50 W/(m<sup>2</sup>·K),外界温度为 500 °C。与载体接触的内壁面为绝热。四个歧管入口处速度均匀分布,而且沿轴线方向流动,径向和周向速度为零。进口处气流质量流量为 0.08 kg/s,温度为 750 °C,出口压力为 0.16 MPa。

把载体设为多孔介质,用当量连续法<sup>[17]</sup>进行模拟,载体通道内的雷诺数通常为  $Re = \frac{\rho d v}{\mu} < 1\,000$ ,

因此,通道内的流动可看作是层流。当多孔介质具有很大的阻力时,可以忽略动量方程的对流项和扩散项,这时动量方程就简化为

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = -k_Q |u| |u_i|。 \quad (2)$$

式中: $k_Q$ 为二次阻力系数, $k_Q=650 \text{ kg/m}^{-4}$ ;  $u$ 为气流进入载体时的速率; $u_i$ 为*i*方向的流速。为了保证通过载体的流动为层流流动,多孔介质区域的外表面定义为“滑动”壁面。

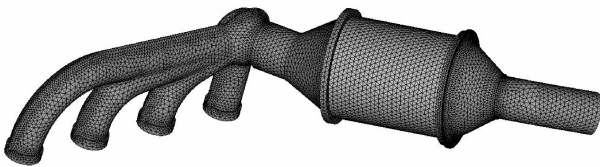


图2 歧管式催化转化器内流场计算网格

图2为歧管式催化转化器内流场计算网格,单元类型为四面体,节点数为27 481,单元数为116 099。

### 2.3 外流场 CFD 计算模型

外流场控制方程也采用可压缩  $N-S$  方程<sup>[15]</sup>,湍流模型采用标准的  $k-\epsilon$  模型<sup>[16]</sup>,强度为5%。外流场计算模拟实验台架上的风扇冷却过程,图3为歧管式催化转化器外流场计算网格,单元类型为六面体与四面体的混合网格,节点数为65 864,单元数为326 414。

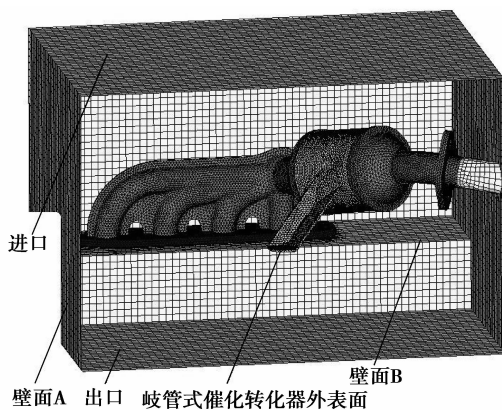


图3 歧管式催化转化器外流场计算网格

歧管式催化转化器外流场计算的边界条件:进口为风机风道的出口,进口气流质量流量为  $2.5 \text{ kg/s}$ ,温度为室温  $300 \text{ K}$ 。壁面A为光滑、非渗透性的壁面,温度也为  $300 \text{ K}$ 。壁面B外界温度为  $365 \text{ K}$ ,对流换热系数为  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。歧管式催化转换器外壁面,平均对流换热系数也为  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,外

界温度  $623 \text{ }^\circ\text{C}$ 。出口静压为  $0.1 \text{ MPa}$ 。

### 2.4 歧管式催化转化器结构有限元模型

#### 2.4.1 温度场计算模型

歧管式催化转化器传热为稳态导热问题,一般假设零件为常物性并无内热源,其控制方程为<sup>[18]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0。 \quad (3)$$

其中, $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$ 为沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的热传导系数, $T$ 为温度。

热边界条件如图4所示,结构与催化剂载体之间有隔热垫圈,所以设此部分的结构内壁面为绝热。其余结构与流体之间对流换热,对流换热系数与温度由流体计算结果插值得到。

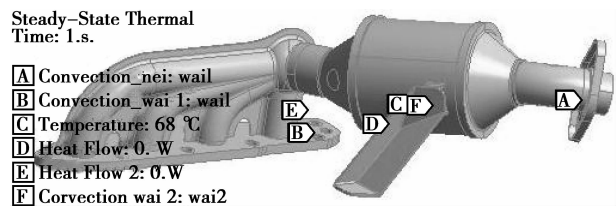


图4 歧管式催化转化器热边界条件

该歧管式催化转化器内流场外壁面温度分布,如图5所示。由于歧管式催化转化器与发动机气缸排气口直接相连,故其内流场整体温度较高,温度损失较小。因为载体与结构之间有隔热垫圈,所以其相应区域的温度较高,歧管式催化转化器外流场内壁面温度分布,如图6所示,流速较大的地方,散热效果较好,温度较低。



图5 歧管式催化转化器内流场外壁面温度分布



图6 歧管式催化转化器外流场内壁面温度分布

歧管式催化转化器结构有限元模型,如图7所示。为了保证计算精度,采用六面体划分网格,共产生313 648个节点,162 347个单元。

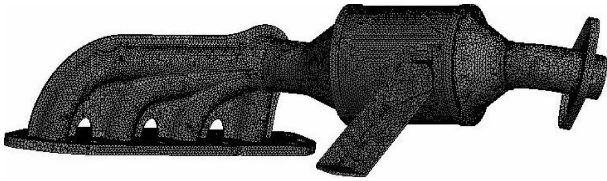


图 7 歧管式催化转化器结构有限元模型

2.4.2 热应力计算模型

在计算出温度场后,以温度场为单元载荷计算结构热应力。其基本方程为

$$\{\delta\} = [K]\{R_i\}. \quad (4)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{[B]\{\delta\} - \{\epsilon_0\}\}. \quad (5)$$

式中,  $[K]$  为总体刚度矩阵;  $[D]$  为弹性矩阵;  $[B]$  为应变矩阵;  $\{R_i\}$  为总体载荷矩阵;  $\{\sigma\}$  为节点应力矩阵。

力边界条件,如图 8 所示。歧管式催化转化器两端的法兰和中间支架由螺栓固定,施加位移约束。壁面受到内、外部气流的压力作用,同样由流体计算结果插值得到。

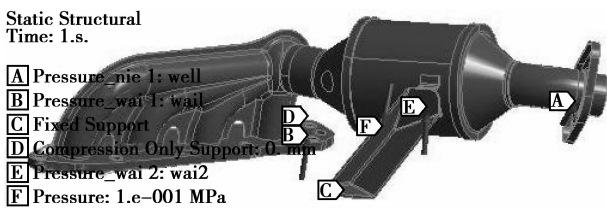


图 8 歧管式催化转化器力边界条件

由流体计算结果,得到该歧管式催化转化器内流场外壁面的压力分布,如图 9 所示。从入口到出口,其内流场压力逐渐降低,尤其是在催化转化器的载体区域,压力降低明显。歧管式催化转化器外流场内壁面的压力分布,如图 10 所示。流速较小的地方,相应的流体压力较大。



图 9 歧管式催化转化器内流场外壁面的压力分布

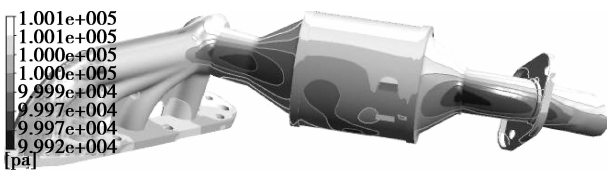


图 10 歧管式催化转化器外流场内壁面的压力分布

3 材料性能参数

研究的某歧管式催化转化器的材料钢号 (GB/T 122-2007) 为 022Cr11Ti, 其性能参数见表 1。

表 1 歧管式催化转化器材料性能参数

参数名称	参数值	温度 $T/^\circ\text{C}$
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	7.85	
泊松比 $P$	0.28	
比热容 $C/(\text{J} \cdot (\text{Kg} \cdot \text{K})^{-1})$	434	
弹性模量 $E/\text{GPa}$	202	20
	200	100
	189	300
	167	400
	123	750
热传导率 $\lambda/(\text{w} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	51.08	20
	48.99	200
	42.71	400
	35.59	600
	25.96	800
热膨胀系数 $\alpha \times 10^5 / \text{K}$	1.266	20
	1.266	200
	1.347	400
	1.441	600
	1.264	800
力学性能 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\geq 275^{[19]}$	
力学性能 $\sigma_0/\text{MPa}$	$\geq 415^{[19]}$	

4 计算结果与分析

由第二节中的温度场和热应力计算模型,进一步得到歧管式催化转化器的温度场、热应力以及振动特性。图 11 为歧管式催化转化器的温度场,最高温度为  $625.6^\circ\text{C}$ , 偏高, 出现于排气歧管气流交汇处的内表面。由于高温气体的交汇压缩, 促使气体温度升高, 从而此处温度较高。另外, 由图 5 可知, 催化剂载体部分的气体温度较高, 但由于垫圈的隔热作用, 使与垫圈接触部分的温度较低。中间支撑部分与热源距离较大, 相对散热面积也很大, 温度较低。



图 11 原歧管式催化转化器温度场

歧管式催化转化器的热应力及热变形结果如图 12-13 所示。从图可知,最大应力为 518 MPa,出现于排气歧管与入口法兰盘的连接处。此区域为结构过渡区域,属于较脆弱的部分,很容易产生应力集中,是最容易损坏的区域。另外,排气歧管和催化转化器连接处,与螺栓固定点的距离较大,热变形较大,达到 2.4 mm,如图 13 所示。

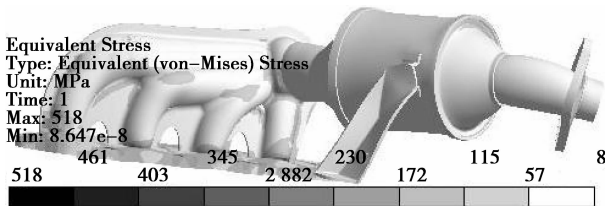


图 12 原歧管式催化转化器热应力分布图

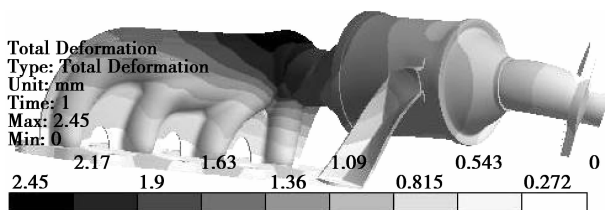


图 13 原歧管式催化转化器热变形分布图

在上述约束与应力状态下,对此歧管式催化转化器进行约束模态分析。歧管式催化转化器约束模态第一阶固有频率为 893 Hz。

根据上述结算结果,歧管式催化转化器在排气歧管与入口法兰盘的连接处出现了明显的应力集中。因此,把法兰盘入口直径由 37 mm 改为 33 mm,使其与排气歧管的管径相同,从而增大了排气歧管与入口法兰盘之间的焊接面。然后,由相同的方法得到改进后的歧管式催化转化器的温度场、热应力和振动特性。图 14 为改进后的歧管式催化转化器的温度场,最高温度 614.9 °C,较原结构有所降低,但温度梯度分布基本相同。

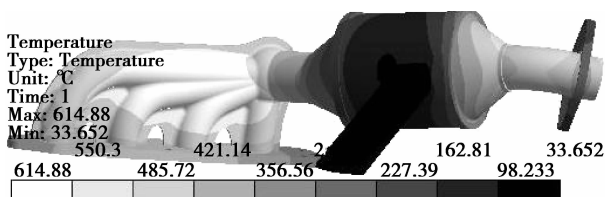


图 14 改进后的歧管式催化转化器温度场

改进后的歧管式催化转化器的热应力与热变形分布情况,如图 15 和图 16 所示,其最大应力为 397 MPa,出现在排气歧管的入口法兰处,由此处的温度较高导致。原结构在排气歧管与入口法兰盘连接处的应力集中被消除。改进后的歧管式催化转化器的热变形大小(最大热变形为 2.34 mm)和分布与原结构基本相同,如图 16 所示。

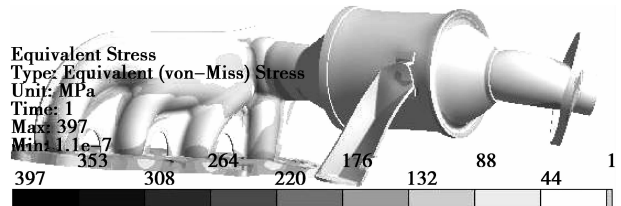


图 15 改进后的歧管式催化转化器热应力分布图

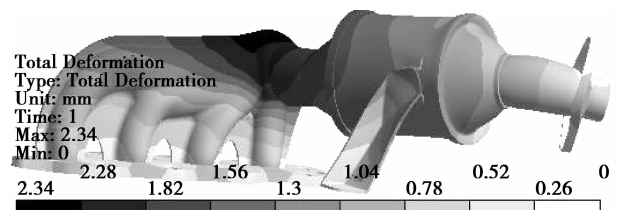


图 16 改进后的歧管式催化转化器热变形分布图

改进后歧管式催化转化器约束模态第一阶固有频率为 910 Hz,较原结构均有一定提高。由理论可知,固有频率提高,刚度增大,动变形降低。从而改进结构比原结构具有更好的动态特性。

由上述分析可知,改进后的歧管式催化转化器在最高温度、最大热变形、一阶固有频率方面较原结构略有改善,而在最大热应力方面,改善较为明显。

## 5 结 论

1) 提出了一种利用 ANSYS Workbench 软件对汽油机歧管式催化转化器进行流固耦合热应力分析的方法。

2) 计算了原歧管式催化转化器的温度场,最高温度出现在排气歧管气流交汇处的内表面。

3) 原歧管式催化转化器在排气歧管与入口法兰盘的连接处出现应力集中,热应力较大,容易损坏。

4) 改进后的歧管式催化转化器在最高温度及最大热应力、振动特性等方面均有所改善。

## 参考文献:

- [1] SALASC S, BARRIEU E, LEROY V. Impact of manifold design on flow distribution of a close-coupled catalytic converter[C]// Proceedings of the SAE 2005 World Congress & Exhibition, April 11-14, 2005, Detroit, MI, USA. [s. l.]: SAE International Technical Papers, 2005: 2005-01-1626.
- [2] CYBULSKI A, MOULIJIN J A. Modeling of heat transfer in metallic monoliths consisting of sinusoidal cells [J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(1): 19-27.
- [3] LIU Z J, HOFFMANN A L, SKOWRON J F, et al. Exhaust transient temperature response [C]// Proceedings of the International Congress & Exposition, February 1995, Detroit, MI, USA. [s. l.]: SAE International Technical Papers, 1995: 950617.
- [4] KOLTSAKIS G C. Warm-up behavior of monolithic reactors under non-reacting conditions [J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(17): 2891-2899.
- [5] SHUAI S J, WANG J X. Unsteady temperature fields of monoliths in catalytic converters [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 100(1-3): 95-107.
- [6] HORNG R F, CHOU H M, HSU T C. Effects of heating energy and heating position on the conversion characteristics of the catalyst of a four-stroke motorcycle engine in cold start conditions [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45: 2113-2126.
- [7] TSINOGLOU D N, KOLTSAKIS G. C, MISSIRLIS D K, et al. Transient modeling of flow distribution in automotive catalytic converters [J]. Applied Mathematical Modeling, 2004, 28(9): 775-794.
- [8] 帅石金, 王建昕, 庄人隽. 车用催化转化器内气体的流动均匀性[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(5): 99-102.  
SHUAI SHI-JIN, WANG JIAN-XIN, ZHUANG REN-JUN. Gas flow uniformity in automotive catalytic converters[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(5): 99-102.
- [9] 陈晓玲, 张武高, 黄震. 车用催化转化器内部流动的数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6): 918-922.  
CHEN XXIAO-LING, ZHANG WU-GAO, HUANG ZHEN. The numerical simulation of the internal flow in automotive catalyst converter [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(6): 918-922.
- [10] 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.  
CHEN XXIAO-LING, ZHANG WU-GAO, HUANG ZHEN. The influence of front shaped monolith on the internal flow in the automotive catalyst converter[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(4): 537-540.
- [11] 孙金迅, 左承基. 天然气脱硫催化器扩张角对流场的影响[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2007, 30(10): 1299-1302.  
SUN JIN-XUN, ZUO CHENG-JI. Effect of the inlet conical angle on the flow field of catalytic converters for gas desulfurization[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2007, 30(10): 1299-1302.
- [12] 刘彪, 梁昱, 周立迎, 等. 催化转化器载体对流场及压力损失的影响[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 31(1): 17-20.  
LIU BIAO, LIANG YU, ZHOU LI-YING, et al. The effects of monolith on the flow field and pressure loss in catalytic converter[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2004, 31(1): 17-20.
- [13] 李迎. 内燃机流固耦合传热问题数值仿真与应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 39-45.
- [14] TARUTANI Y, MIYAHARA M, HASHIZUME T, et al. Heat resistant stainless steels for the exhaust system of automobile [J]. Sumitomo Metals, 1993, 45(5): 92-104.
- [15] 董非, 范秦寅, 姜树李, 等. 内燃机流-固-热耦合数值模拟的研究[J]. 汽车工程, 2009, 31(2): 146-160.  
DONG FEI, FAN QIN-YIN, JIANG SHU-LI, et al. A research on fluid-solid-heat coupling simulation for internal combustion engines [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(2): 146-160.
- [16] 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.  
SHUAI SHI-JIN, WANG JIAN-XIN, ZHUANG REN-JUN. Application of CFD to the optimal design of automotive catalytic converters [J]. Automotive Engineering, 2000, 22(2): 129-133.
- [17] ZYGOURAKIS K. Transient operation of monolith catalytic converter; a two-dimensional reactor model and the effects of radially nonuniform flow distributions [J]. Chemical Engineering Science, 1989, 44(9): 2075-2086.
- [18] YANG W L, CHEN Y, ZHENG X L. Simulation of coupling heat transfer of component system in ICE combustion chamber [J]. European Journal of Mechanical and Environmental Engineering, 2003, 48(4): 219-224.
- [19] 林慧国, 瞿志豪, 茅益明. 袖珍世界钢号手册[M]. 第 4 版. 北京: 机械工程出版社, 2009.