

# 基于动力学仿真的喷油泵可靠性计算方法

宫继儒<sup>1,2</sup>, 陈国强<sup>1,2</sup>, 孙久洋<sup>1,2</sup>, 冯勇<sup>1,2</sup>, 黄天一<sup>1,2</sup>

1. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 261061;

2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

**摘要:**为精准评估柴油机喷油泵的可靠性,提出一种喷油泵动力学计算方法,通过 AVL Excite 软件建立某柴油机用喷油泵动力学模型,综合考虑转速波动、油压、零部件刚度等因素的影响,对衬套油膜厚度、凸轮轴强度、输出转矩进行动力学分析,并与试验结果进行对比。结果表明:使用该方法计算得到的凸轮轴衬套油膜厚度和凸轮轴强度与实际故障情况相吻合;仿真计算得到的喷油泵输出端转矩与试验结果的平均峰值相对误差约为 5%,设计的喷油泵模型可以用于喷油泵动力学计算及可靠性评估。

**关键词:**喷油泵;可靠性;凸轮轴;衬套;疲劳强度

**中图分类号:**TK422

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2026)01-0050-06

**引用格式:**宫继儒,陈国强,孙久洋.基于动力学仿真的喷油泵可靠性计算方法[J].内燃机与动力装置,2026,43(1):50-55.

GONG Jiru, CHEN Guoqiang, SUN Jiuyang, et al. A calculation method for the reliability of a fuel injection pump based on dynamic simulation[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2026, 43(1): 50-55.

## 0 引言

燃油喷射系统是柴油机的核心部件,其性能直接影响柴油机的技术革新和产品升级换代。随着柴油机技术的不断进步,燃油喷射系统对喷油泵可靠性的要求越来越高,受转速增大、泵端压力升高等因素的影响,喷油泵的可靠性问题越来越突出<sup>[1-2]</sup>。喷油泵可靠性涉及凸轮轴强度、衬套润滑、凸轮磨损等多方面因素,属于复杂的动力学问题,凸轮型线、设计尺寸、齿轮驱动特性、泵端压力等参数都对喷油泵的可靠性产生显著影响。目前多数喷油泵生产企业对喷油泵可靠性的评估仍停留在经验公式评估阶段,既难以保证计算精度,又难以有效指导设计过程,因此,有必要开发一种高效、科学的喷油泵动力学及可靠性的评估方法。

本文中以某柴油机喷油泵为例,通过 Excite 软件平台建立喷油泵动力学模型,并综合考虑齿轮驱动、曲轴转速波动等因素的影响,对凸轮轴强度、衬套润滑、驱动转矩等进行动力学仿真分析,将各项计算结果与喷油泵实际故障情况进行对比分析,为喷油泵可靠性评估和正向设计提供参考。

## 1 分析对象及故障信息

### 1.1 喷油泵参数

某柴油机喷油泵的主要运动件结构如图 1 所示,包含传动齿轮、凸轮轴、滚轮体总成、柱塞偶件等结构,喷油泵主要参数如表 1 所示。

收稿日期:2025-10-24

基金项目:国家自然科学基金项目(52222604;T2341001)

第一作者简介:宫继儒(1995—),男,山东潍坊人,工程硕士,工程师,主要研究方向为内燃机 NVH 仿真分析,E-mail: gongjiru@weichai.com。

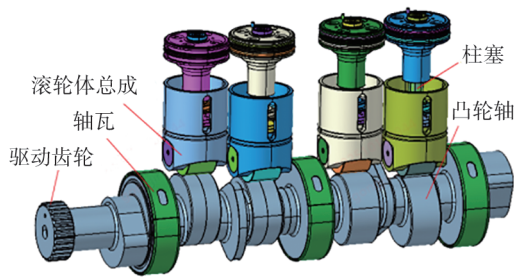


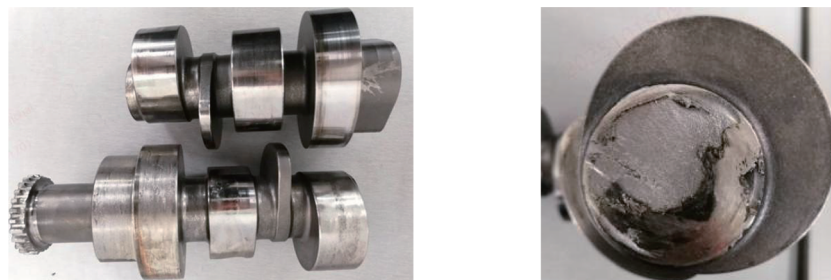
图 1 喷油泵结构

表 1 喷油泵主要参数

柱塞直径/mm	滚轮体总成质量/g	滚轮半径/mm	柱塞腔容积/mm <sup>3</sup>
14.5	1 264	23	3 800
出油阀腔容积/mm <sup>3</sup>	出油边界压力/MPa	工作转速/(r·min <sup>-1</sup> )	
8 982	220	3 050	

### 1.2 喷油泵故障信息

该喷油泵的主要故障为:凸轮轴疲劳断裂、轴瓦与轴之间的异常磨损,故障件外观如图 2 所示。由图 2 可知:凸轮轴的圆角区域产生疲劳裂纹,逐步扩展至整个截面产生疲劳断裂,为疲劳失效形式,且凸轮轴与轴瓦接触面有明显磨损痕迹。



a) 凸轮轴磨损外观

b) 凸轮轴断裂截面

图 2 凸轮轴故障件外观

## 2 喷油泵动力学模型

喷油泵是由齿轮进行传动、凸轮轴进行驱动的机械结构,其工作过程决定了在进行动力学建模时应考虑齿轮转速波动、凸轮型线、零部件质量及其刚度属性、油腔压力等因素。本文中采用 Excite 软件建立喷油泵动力学模型,并通过齿轮动力学以及喷油泵性能仿真计算驱动端的转速波动及泵端压力边界。

Excite Timing Drive 软件广泛应用于内燃机行业,如配气机构动力学学校核、齿轮传动系统动力学学校核等。喷油泵与配气机构的工作原理比较相似,仅具体结构存在差异,可使用 Excite Timing Drive 软件进行喷油泵动力学仿真,但需要根据实际结构差异构建适用于喷油泵的动力学模型<sup>[3-5]</sup>。

### 2.1 模型建立

基于 Excite 软件平台搭建的喷油泵动力学计算模型如图 3 所示。

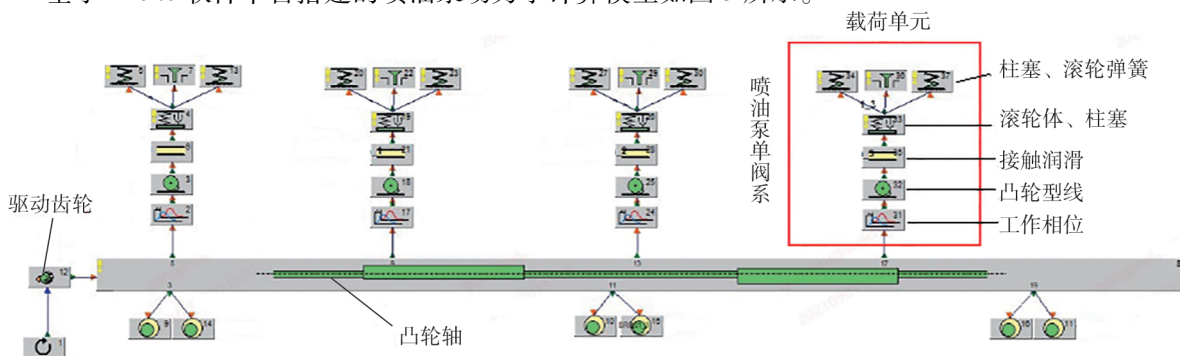


图 3 喷油泵动力学全阀系计算模型

建模时,凸轮轴、滚轮体、柱塞等零部件等效刚度、质量信息通过有限元计算和实测结果作为输入。凸轮轴建模时需考虑凸轮、平衡块偏心的影响。

喷油泵动力学仿真分析应考虑传动齿轮转速波动的影响。通过 Excite 软件搭建的齿轮动力学模型如图 4 所示,该模型中主要包括配气机构、凸轮轴及齿轮传动系统,同时考虑支撑刚度、负载转矩波动、缸压波动、进排气压力波动、齿轮侧间隙、气门间隙等因素的影响<sup>[6-7]</sup>。

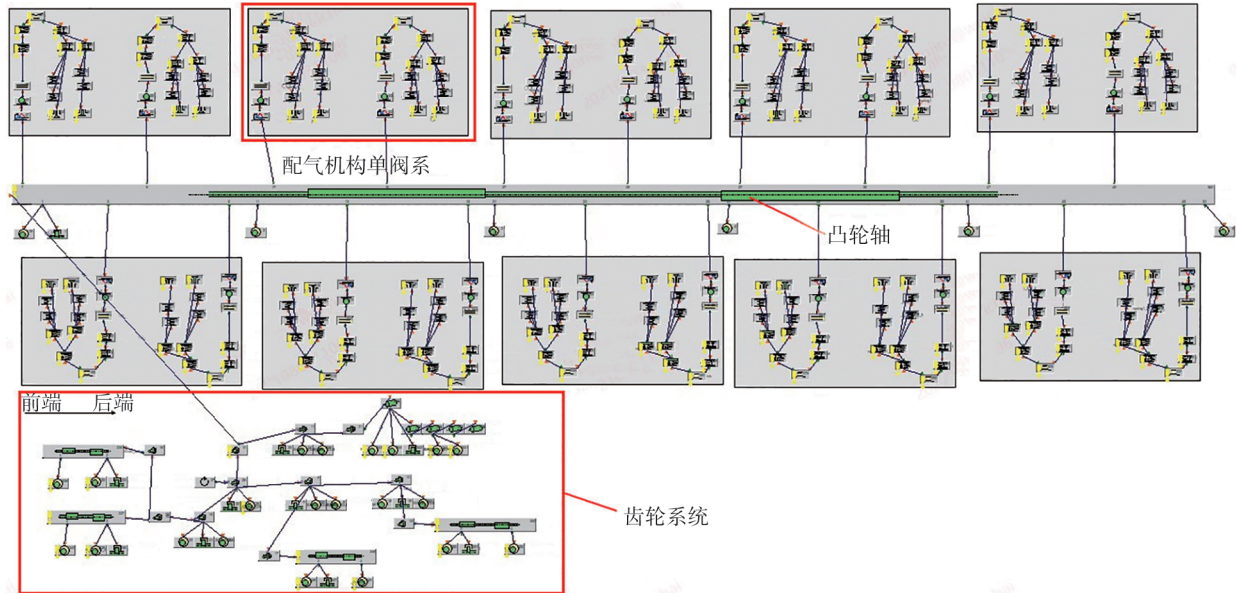


图 4 齿轮动力学模型

## 2.2 模型输入

通过齿轮动力学仿真得到的喷油泵齿轮的转速波动如图 5 所示。根据计算要求,依据传动比关系,将周期性的转速波动信息转换为对应的喷油泵凸轮轴转角作为系统输入。设计过程中的经验公式难以对泵端油压变化进行有效预测,为计算接近实际的工作载荷,通过液压仿真对喷油泵单阀系统进行分析<sup>[8-10]</sup>,提取的柱塞腔压力曲线如图 6 所示。

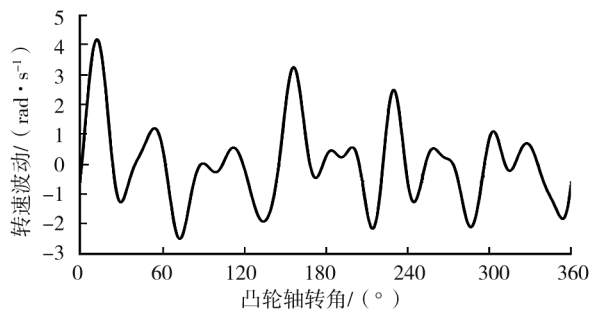


图 5 转速波动

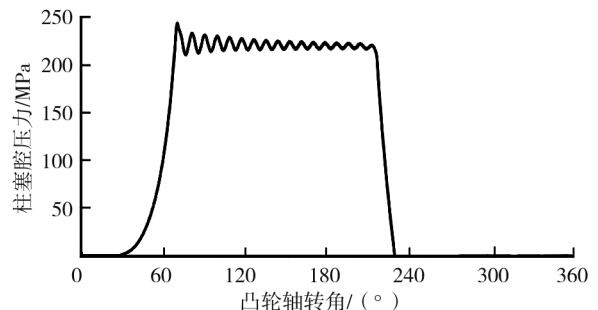


图 6 凸轮转角-柱塞腔压力曲线

## 3 仿真结果评估

针对该机型喷油泵试验中出现的凸轮轴衬套磨损、凸轮轴断裂故障,需将相应故障的仿真结果与实际情况进行对比验证;喷油泵的驱动转矩是齿轮传动系统设计的关键输入参数,可以综合体现整个喷油泵运动件的动态效应,通过对比分析仿真模型的输出转矩与实际测试转矩,能够全面反映仿真模型与实际系统的误差,是评估仿真模型合理性和准确性的重要依据。

### 3.1 凸轮轴衬套磨损

油膜厚度是轴瓦承载能力和磨损风险的综合体现。在一维动力学模型中常用轴瓦油膜厚度评估衬套磨损。根据工程经验,要求轴瓦的最小平均油膜厚度大于  $1\ \mu\text{m}$ 。动力学计算过程中,以靠近驱动端的衬套编号为1,并依顺序向远端递增编号<sup>[11-13]</sup>,在考虑齿轮传动系统有、无齿轮转速波动两种工况下对比分析齿轮衬套油膜厚度。

该凸轮轴衬套的直径为  $90\ \text{mm}$ ,宽度为  $24\ \text{mm}$ ,其平均配合间隙为  $0.092\ \text{mm}$ ,动力学仿真计算的衬套平均油膜厚度如表2所示。由表2可知:在不考虑齿轮转速波动的情况下,衬套1、3油膜厚度满足要求,但衬套2的油膜厚度较小,存在异常磨损的风险;在考虑齿轮转速波动的情况下,衬套1、2油膜厚度较小,转速波动对衬套3油膜厚度的影响不大,衬套1的油膜厚度比不考虑转速波动时的变化较大,由满足要求变为不满足要求。实际故障中,衬套1、2发生了异常磨损,仿真结果与试验故障现象相吻合。衬套2磨损的原因为本身设计问题以及转速波动的共同影响,由于衬套1靠近驱动端,受齿轮传动系统转速波动的影响较大,在优化改进时需从衬套结构设计及转速波动方面着手。

表2 衬套油膜厚度计算结果

工况	衬套1油膜厚度/ $\mu\text{m}$	衬套2油膜厚度/ $\mu\text{m}$	衬套3油膜厚度/ $\mu\text{m}$
不考虑转速波动	1.135	0.987	1.211
考虑转速波动	0.988	0.806	1.223

### 3.2 凸轮轴强度

由于试验过程中喷油泵凸轮轴断裂,提取动力学分析中凸轮轴的受力作为疲劳强度计算提供边界条件,并将计算结果与实际情况进行对比。

凸轮轴材料为18CrNi8(屈服强度为  $785\ \text{MPa}$ ,抗拉强度为  $1\ 180\ \text{MPa}$ ),凸轮轴断裂位置的直径为  $40\ \text{mm}$ ,表面粗糙度  $R_z = 1\ \mu\text{m}$ 。

凸轮轴强度计算步骤为:首先,从喷油泵动力学计算结果中提取凸轮轴断裂位置两端在整个旋转周期内6个自由度的位移及角位移;其次,对凸轮轴进行有限元强度计算,得到旋转周期内的应力;最后,基于一个周期内的应力计算凸轮轴疲劳强度。凸轮轴断裂位置的疲劳强度计算结果如图7所示。由图7可知:断裂位置圆角处的疲劳安全系数偏低,仅为  $0.918$ (理论上不发生疲劳断裂的安全系数限值为  $1.000$ ,实际工程设计中疲劳安全系数应在此基础上预留一部分余量)。仿真计算结果与试验结果趋势相吻合。

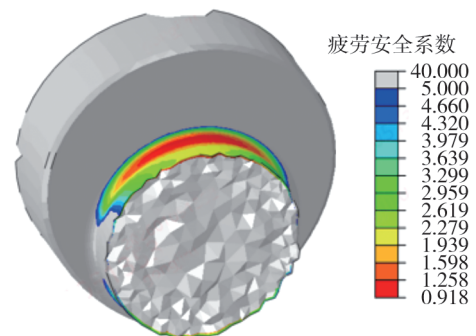


图7 凸轮轴疲劳强度

### 3.3 驱动转矩

输出端转矩的确定是喷油泵设计和匹配中的关键环节:一方面,驱动转矩是整个喷油泵运动件动态效应的综合体现,通过对比分析仿真模型输出转矩与测试转矩,可以从整体上反映仿真模型与实际模型的相对误差;另一方面,喷油泵是齿轮系统中负载较大且转矩波动较剧烈的一个附件,其转矩测量的准确性直接影响齿轮传动系统的校核结果,获取准确的喷油泵驱动转矩是精准评估齿轮系性能的前提。但在工程实践中,受开发阶段前期无测试样机、测试系统误差、结构限制无法测量、测试台架与发动机运行工况不符等各种客观条件的影响,导致无法精准测量喷油泵转矩,甚至可能无法测量,且传统的公式计算方法无法对复杂的动力学因素进行准确计算。因此,通过仿真手段获取精准的喷油泵转矩具有重大实际意义<sup>[14-15]</sup>。

仿真计算得到的喷油泵输出端转矩与实际测试转矩对比曲线如图8所示。由图8可知:由该仿真方

法得到的转矩与试验结果吻合较好,两条曲线整体趋势基本一致,平均转矩峰值相对误差在5%之内,峰值误差不超过10%。在测试时转矩峰值为不稳定指标,受刚度、阻尼、测试误差等因素的影响较大,在仿真及实测转矩曲线整体趋势及平均峰值相当的水平下,无需关注个别奇异点,因此本文中仿真转矩可以满足工程中的实际需求。

通过 Excite 软件建立喷油泵动力学模型,考虑齿轮驱动、曲轴转速波动等因素的影响,根据动力学计算结果进一步计算凸轮轴强度、衬套润滑、驱动转矩等,将各项计算结果与喷油泵实际故障情况进行对比分析,计算结果与故障情况吻合,验证了该方法对喷油泵可靠性评估的可行性,该方法可用于后续喷油泵可靠性评估。

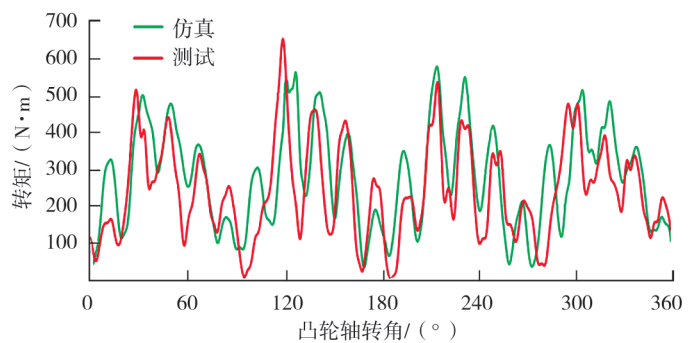


图8 输出端转矩对比

## 4 结束语

基于某柴油机喷油泵,通过 AVL Excite 软件构建了喷油泵动力学仿真模型,将仿真得到的结果与实际测试结果进行了对比,表明仿真结果与测试结果基本吻合,本文中提出的喷油泵仿真计算方法可以满足工程实践的需要。

1) 仿真计算得到凸轮衬套油膜厚度,结果显示:靠近驱动端的衬套以及中间衬套油膜厚度较小,远离驱动端衬套则较安全,与实际测试结果相符。

2) 仿真计算得到实际凸轮轴断裂轴段的位移曲线,并基于该曲线进行疲劳强度校核,结果显示:该处疲劳强度不满足要求,存在断裂风险,仿真结果与实际情况相吻合。

3) 仿真计算得到喷油泵输出端的转矩曲线与试验测试数据对比,结果显示:仿真数据与测试数据吻合较好,整体趋势基本一致,峰值误差在可接受范围内。

### 参考文献:

- [1] 张明刚. 船用柴油机供油凸轮型线设计与校核的研究[D]. 北京:中国舰船研究院,2018.
- [2] 张萌. 船用柴油机燃油凸轮机构动力学及失效分析[D]. 西安:西安理工大学,2015.
- [3] AMBAYE G A, LEMU H G. Dynamic analysis of spur gear with backlash using ADAMS[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 38(5): 2959-2967.
- [4] 陈程. 基于 AVL EXCITE 的配气机构动力学研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [5] 靳玉刚. 高速汽油机配气机构分析及优化[D]. 长沙:湖南大学,2014.
- [6] 薛爽,毕玉华,贾德文,等. 曲轴转速波动对某柴油机正时齿轮系动力学特性的影响[J]. 现代电子技术,2014, 37(10): 35-38.
- [7] 刘正义,林定笑. 渐开线直齿轮副的动态输出特性分析[J]. 机电技术,2011, 34(6): 24-27.
- [8] 王建平. 基于 HYDSIM 的高压共轨喷油系统的仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
- [9] 徐建新. 共轨燃油系统高压油泵若干关键问题研究[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
- [10] 毛范海. AD 型喷油泵燃油喷射系统计算机建模和仿真分析研究[D]. 大连:大连理工大学,2003.
- [11] 石峰. 某发动机减速机匣分油衬套异常磨损问题研究[J]. 新技术新工艺,2021(6): 65-69.
- [12] 宋阳. 油膜轴承衬套磨损及界面应力场研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2021.
- [13] NETTER J D, HERMIDA J C, CHEC P C, et al. Effect of microseparation and third-body particles on dual-mobility crosslinked hip liner wear[J]. The Journal of Arthroplasty, 2014, 29(9): 1849-1853.
- [14] 倪成群,崔国旭,张雁桥,等. 柴油机高压共轨系统高压油泵驱动扭矩仿真研究[J]. 车用发动机,2010(3): 43-49.
- [15] 凌建群,张兆明. 柴油机用高压喷油泵驱动扭矩的计算[J]. 现代车用动力,2003(4): 25-29.

## A calculation method for the reliability of a fuel injection pump based on dynamic simulation

GONG Jiru<sup>1,2</sup>, CHEN Guoqiang<sup>1,2</sup>, SUN Jiuyang<sup>1,2</sup>, FENG Yong<sup>1,2</sup>, HUANG Tianyi<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

**Abstract:** In order to accurately assess the reliability of the diesel injection pump, a method of dynamical calculation of the injection pump is proposed, and a dynamical model of a diesel injection pump through AVL Excite software is developed. Taking into account the impact of factors such as fluctuations in speed, fuel pressure, the stiffness of the components, a dynamic analysis is conducted on the thickness of the liner oil film, the strength of the camshaft, and the output torque, and the simulation results are compared with the test results. The results show that the camshaft bushing oil film thickness and camshaft strength calculated using this method correspond to the actual failure condition, the relative error of the simulated calculated output torque of the injection pump is approximately 5% relative to the average peak of the test results, and the design of the injection pump model can be used to calculate the dynamics of the injection pump.

**Keywords:** fuel injection pump; reliability; camshaft; bushing; fatigue strength

(责任编辑:刘丽君)

(上接第44页)

products of  $\text{NH}_3$  over ASC are analyzed. By introducing inhibition factors related to  $\text{NO}$  concentration in the reactions of  $\text{NH}_3$  oxidation to  $\text{N}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  to distribute the  $\text{NH}_3$  oxidation pathways, an ASC kinetic model is established and simulated, and verified by bench tests. The simulation results show that when the reaction temperature is lower than  $350\text{ }^\circ\text{C}$ , the main products of  $\text{NH}_3$  oxidation are  $\text{N}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$ ; the volume fraction of generated  $\text{N}_2\text{O}$  reaches the maximum at  $250\text{ }^\circ\text{C}$ . When the reaction temperature exceeds  $350\text{ }^\circ\text{C}$ , the selectivity of  $\text{NH}_3$  oxidation products increasing  $\text{NO}_x$  emission. Reactor tests and bench tests indicate that the ASC kinetic model can predict the volume fraction of  $\text{NO}_x$  and  $\text{N}_2\text{O}$  downstream of ASC, and the prediction error is no less than  $\pm 10\%$  for  $\text{NH}_3$  oxidation conversion rate. The model can accurately reflect the experimental characteristics of ASC.

**Keywords:** diesel engine aftertreatment; ASC;  $\text{NH}_3$  oxidation; volume fraction of  $\text{NO}_x$ ; volume fraction of  $\text{N}_2\text{O}$

(责任编辑:胡晓燕)

(上接第49页)

the rear end face of the DPF, reaching  $715\text{ }^\circ\text{C}$ . The inconsistency of radial temperature indicate uneven combustion inside the DPF. During active regeneration process under drop to idle (DTI) operating conditions, the internal temperature of the DPF rises rapidly, reaching up to  $1\ 034\text{ }^\circ\text{C}$ . When the soot loading exceeds  $4\text{ g/L}$ , the internal temperature of the DPF increases linearly and rapidly with the soot loading. A higher DOC light-off rate causes the internal temperature of the DPF to rise rapidly in a short period of time. When the light-off rate is  $6.5\text{ }^\circ\text{C/s}$ , the internal temperature of the DPF reaches  $1\ 076\text{ }^\circ\text{C}$ . DTI operating conditions during active regeneration process, higher soot loading, and a higher DOC light-off rate are the main factors that increase the thermal risk during DPF regeneration, which must be reasonably controlled in practical applications.

**Keywords:** DPF; ash; active regeneration; DTI

(责任编辑:臧发业)