

DPF 载体环裂故障分析

杨海龙^{1,2}, 辛欣², 郑志强², 杨永春^{1,2}, 刘斌^{1,2}, 刘阳^{1,2}, 刘波^{1,2}

1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为解决柴油机颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)载体环裂故障,以2台编号分别为A、B的柴油机为试验对象,柴油机A在全球统一瞬态试验循环(world harmonized transient cycle, WHTC)工况下积碳后进行再生试验和降怠速(drop-to-idle, DTI)再生试验,分析不同积碳循环和不同再生设定温度下DPF内部各测点的温度变化;对柴油机B进行热冲击试验和WHTC工况下无积碳再生试验,分析再生过程中DPF内部各测点的温度变化。试验结果表明:碳载量分布不均匀和再生设定温度较高是导致DPF载体环裂故障的主要原因。通过控制DPF再生起燃速度,将再生设定温度由600℃降至560℃,碳载量控制在4.5 g/L以内,在有阶梯再生的情况下,DPF内部温度峰值和温度梯度均正常,可降低DPF载体环裂风险,提高DPF使用的可靠性。

关键词:柴油机; DPF; 载体环裂; 再生温度; 碳载量

中图分类号:TK421⁺.5

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)03-0008-06

引用格式:杨海龙,辛欣,郑志强,等. DPF 载体环裂故障分析[J]. 山东交通学院学报,2022,30(3):8-13.

YANG Hailong, XIN Xin, ZHENG Zhiqiang, et al. Fault analysis on ring crack of DPF carrier[J]. Journal of Shandong Jiaotong University,2022,30(3):8-13.

0 引言

发动机排气污染物是空气污染的源头之一,为减轻环境污染,国家对发动机排放标准要求日趋严格^[1-4]。为满足排放法规的要求,柴油机排气后处理技术日渐增多,主要包括柴油机氧化催化剂(diesel oxidation catalyst, DOC)、柴油机颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)、选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)等^[5-10]。

DOC使柴油机尾气中的HC、CO和可溶性有机物(soluble organic fraction, SOF)与O₂在低温条件下进行氧化反应,转化为CO₂和H₂O,并将尾气中的NO氧化为NO₂^[11-13],可提高SCR的转化效率,同时为DPF被动再生提供足够的NO₂,提高DPF的被动再生效率;DOC还可以氧化缸内后喷燃油,提高出口的排气温度,使DPF内部发生主动再生,清除DPF内的积碳^[14-16]。

柴油机尾气流经DPF时,尾气中的颗粒物(particulate matter, PM)被捕集留在过滤体上,较清洁的尾气排入SCR进一步净化,DPF的捕集效率超过95%^[17-18]。DPF捕集到一定数量的PM后,排气背压高,影响发动机的动力,因此需清除PM,保持排气管的畅通。消除DPF内累积PM的过程称为DPF再生,再生方式分主动再生和被动再生:主动再生是控制发动机后喷燃油,燃油在DOC的作用下氧化放热,为DPF主动再生提供所需热量,主动再生的温度为560~650℃,高温将DPF内的积碳氧化为CO₂;被动再生是尾气中的NO在DOC的作用下氧化为NO₂,DPF将NO₂作为氧化剂氧化PM生成CO₂,NO₂又被还原为NO^[19-20]。

DPF再生过程中过高的再生温度或热疲劳均将导致DPF载体产生裂纹,使DPF的过滤性下降甚至失效。DPF载体裂纹是柴油机后处理技术面临的一个较大问题,在实际配机使用过程中,出现过DPF载

收稿日期:2021-11-08

基金项目:山东省重点研发计划项目(2020GXGC011004)

第一作者简介:杨海龙(1988—),男,山西怀仁人,工程师,主要研究方向为柴油机性能一致性控制技术,E-mail: yanghail@weichai.com。

柴油机 A 在 WHTC 工况进行积碳,当模型碳载量为 3.5 g/L 时,进行稳态点强制再生。再生过程中,DPF-1 内部各热电偶的温度测试结果如图 4 所示。由图 4 可知:沿 DPF-1 中轴线从前端到后端各测点温度依次升高,测点 13 温度最高,为 $725 \text{ }^\circ\text{C}$;测点 9~12、14 温度均较高,且外环温度高于中心温度,最高为 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在试验过程中,监测到 DOC 后端面 HC 的体积分数为 0.02% ,低于设计要求 ($\leq 0.15\%$),可知再生时 HC 泄漏量较少不会导致 DPF 内部产生高温现象,高温主要由积碳燃烧引起,且越靠近后端温度越高。

2.1.2 降怠速(drop-to-idle,DTI)再生试验

DPF-2 的热电偶布置如图 5 所示。由图 5 可知:DPF-2 内部共布置 13 个测点,编号 1~13,均布置在载体中轴线上,其中测点 5、13 分别布置在前、后端面,测点 6、8 分别布置在离前、后端面 10 cm 处,测点 7 在中心位置,测点 1~4、9~12 布置在测点 7 前、后,每间隔 1 cm 布置 1 个。

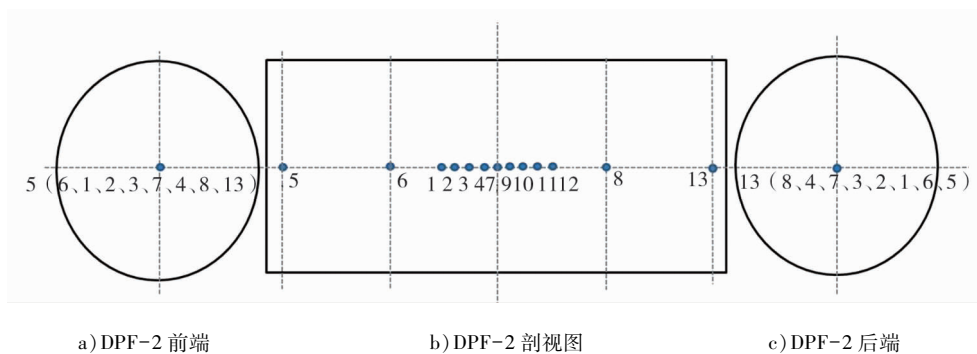


图 5 DPF-2 内部热电偶布置示意图

柴油机 A 在 WHTC 工况下进行积碳,当模型碳载量为 4.5 g/L 时,进行 DTI 再生试验,得到 DPF-2 各测点温度如图 6 所示。由图 6 可知:DTI 过程中,DPF-2 上游温度、测点 5 温度缓慢下降,DPF-2 内部温度快速升高,测点段 6~7 (DPF 前半段) 达到的最高温度基本一致,测点段 8~13 (DPF 后半段) 温度依次升高,测点 13 的最高温度为 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

DTI 试验中 DPF-2 内部温度梯度如图 7 所示。由图 7 可知最大温度梯度为 $76.6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{cm}$ 。

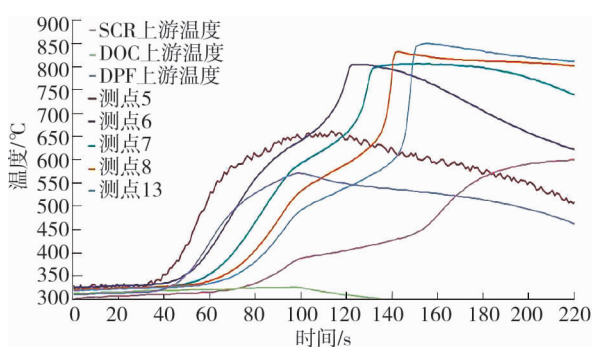


图 6 DTI 试验中 DPF-2 内部各测点温度

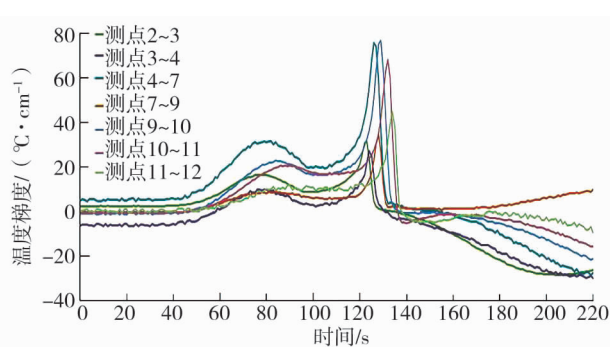


图 7 DTI 试验中 DPF-2 内部温度梯度

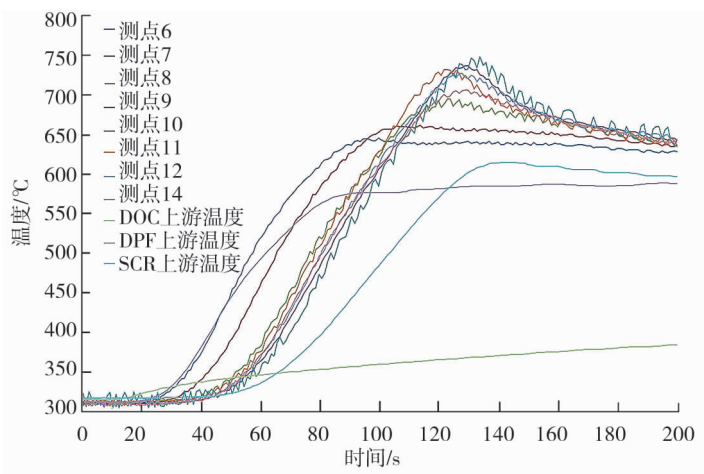


图 4 DPF-1 再生过程中各测点温度

柴油机 A 在不同的积碳循环下进行积碳,当碳载量为 3.5 g/L 时进行稳态工况下的再生试验,DPF 内部最高温度如表 1 所示。由表 1 可知:不同积碳循环下达到同样的碳载量,再生时 DPF 内部最高温度不同,说明不同积碳循环下,DPF 的碳载量分布不同。

表 1 不同积碳循环下 DPF 内部最高温度

积碳循环模式	碳载量/(g·L ⁻¹)	DPF 内部最高温度/°C
无循环	0	630
循环 1	3.5	750
循环 2	3.5	870
循环 3	3.5	690
循环 4	3.5	660

对柴油机 A 进行同碳载量,不同再生设定温度的再生试验,结果如表 2 所示。由表 2 可知:同碳载量下,不同的再生设定温度导致 DPF 再生最高温度不同,再生设定温度为 560 °C 时,DPF 可再生成功,再生最高温度较低。

表 2 不同再生设定温度下 DPF 内部再生最高温度

再生设定温度/°C	实际温度/°C	碳载量/(g·L ⁻¹)	DPF 再生最高温度/°C
600	590	3.5	750
580	553	3.5	621
570	557	3.5	616
560	556	3.5	602

对柴油机 A 进行碳载量为 3.3 g/L, DOC 温升速度分别为 3.5 °C/s 的再生试验,发现 DPF 再生最高温度分别为 750、721 °C,可知 DOC 的温升速度对 DPF 再生过程的温度影响不大。

2.1.3 原因分析

通过分析柴油机 A 的试验可知:1) DPF 内部产生高温的主要原因是碳载量分布不均匀和再生设定温度较高;2) DPF 内部温度梯度产生的原因是 DPF 再生起燃过程和再生结束后断油产生温度梯度。

通过对柴油机 A 的再生试验,再生设定温度为 600 °C,碳载量控制在 3.5 g/L 以内,在有阶梯再生的情况下,最高温度和温度梯度均正常;再生温度设定为 560 °C 时也可再生成功,且再生最高温度较低,风险较小。

2.2 柴油机 B 的 DPF 载体环裂原因分析

2.2.1 热冲击试验

对柴油机 B 的 DPF 进行 80 次冷热冲击试验,试验前、后 PM 的循环质量和颗粒物数量 (particel number, PN) 均满足法规要求,剖开后无裂纹产生。

2.2.2 WHTC 工况下无积碳再生试验

DPF-3 的热电偶布置与图 3 相同。对柴油机 B 进行 WHTC 无积碳再生试验。再生过程中,DPF-3 各测点温度如图 8 所示,DPF-3 中轴上各测点温度基本一致,最高温度为 675 °C,满足设计要求。DPF-3 无积碳再生径向温度梯度如图 9 所示,DPF-3 径向温度梯度变化较小,满足设计要求。

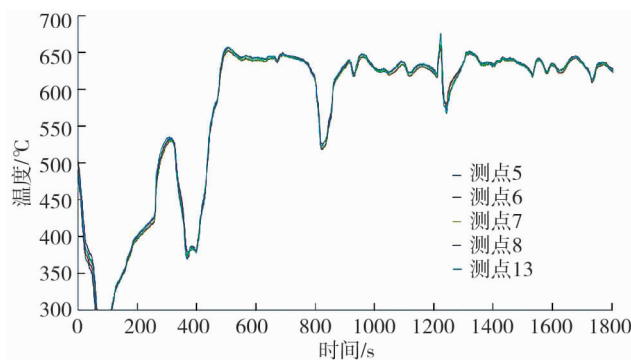


图 8 DPF-3 无积碳再生过程中各测点温度

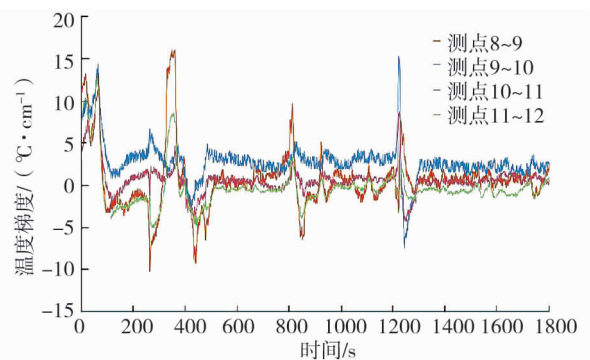


图 9 DPF-3 无积碳再生径向温度梯度

2.2.3 原因分析

通过分析柴油机 B 的试验可知 DPF 内部温度梯度形成的原因为:1) DPF 再生过程中温度升高;2) DPF 再生过程中出现最高温度,形成温度梯度;3) 再生结束后断油,形成温度梯度;4) 行车再生过程中的

后喷燃油突断导致温度突降,形成温度梯度。

设定柴油机B的再生温度为600℃,碳载量控制在4.5 g/L以内,在有阶梯再生的情况下,最高温度和梯度均正常,风险较小。

3 结语

基于台架试验分析柴油机DPF载体环裂现象及产生原因,采用带热电偶的DPF测试其再生过程中内部温度的变化,探究DPF载体环裂的原因。柴油机A的DPF出现载体环裂的主要原因是再生过程中出现高温,温度梯度较大,导致DPF载体环裂;基于排除法,推测柴油机B的DPF出现载体环裂现象的原因为热疲劳。

可通过以下方法降低DPF载体环裂故障率:1)DPF再生起燃过程中控制起燃速度,减小温度梯度;2)再生结束后阶梯断油,减小温度梯度;3)再生温度由600℃降至560℃。

参考文献:

- [1] 魏雄武. 柴油机微粒捕集器再生技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
WEI Xiongwu. The research of diesel particulate filter regeneration technology[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [2] 刘金武, 龚金科, 谭理刚, 等. 直喷柴油机碳烟生成和氧化历程的数值研究[J]. 内燃机学报, 2006, 24(1): 42-49.
LIU Jinwu, GONG Jinke, TAN Ligang, et al. Numerical study on soot formation and oxidation processes in a direct injection diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(1): 42-49.
- [3] 张延峰, 宋崇林, 成存玉, 等. 车用柴油机排气颗粒物中有机组分和无机组分的分析[J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10(3): 197-201.
ZHANG Yanfeng, SONG Chonglin, CHENG Cunyu, et al. Analysis of the organic and inorganic components in the emission particulates from diesel engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004, 10(3): 197-201.
- [4] 朱剑明, 彭代勇. 世界能源现状与内燃机的发展机遇[J]. 内燃机工程, 2011, 32(2): 81-84.
ZHU Jianming, PENG Daiyong. Current world oil situation and development opportunities for IC engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(2): 80-84.
- [5] 郝志明, 傅立新, 贺克斌, 等. 城市机动车排放污染控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [6] 龚金科. 汽车排放及控制技术[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [7] 李兴虎. 汽车环境保护技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [8] 李兴虎. 汽车环境污染与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [9] 程晓章, 陈康, 查小辉. SCR/DOC+DPF+SCR后处理系统对重型柴油机性能及排放的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(1): 23-26.
CHENG Xiaozhang, CHEN Kang, ZHA Xiaohui. Effect of SCR/DOC+DPF+SCR post-processing system on performance and emission of heavy duty diesel engine[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2019, 42(1): 23-26.
- [10] 高新文. DOC+POC在直列泵柴油机上的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
GAO Xinwen. Application research on DOC+POC matching mechanical-line pump diesel engine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [11] 汪卫东. 现代柴油车排放及其控制技术综述[J]. 柴油机设计与制造, 2005, 14(1): 1-4.
WANG Weidong. Overview of emission control and reduction technologies of vehicle equipped with diesel engine[J]. Design & Manufacture of Diesel Engine, 2005, 14(1): 1-4.
- [12] 苏岭, 周龙保, 蒋德明, 等. 柴油机排气后处理技术的现代进展[J]. 内燃机学报, 2003(1): 1-4.
SU Ling, ZHOU Longbao, JIANG Deming, et al. Recent development of aftertreatment of diesel emissions[J]. Internal Combustion Engines, 2003(1): 1-4.
- [13] LEE J H, PARATORE M J, BROWN D B. Evaluation of Cu-based SCR/DPF technology for diesel exhaust emission control[J]. SAE International Journal of Fuels & Lubricants, 2008, 1(1): 97-101.

- [14] 胡帅,孙泽. 柴油机 DPF 特性测试评价[J]. 汽车实用技术,2018(22):98-100.
HU Shuai, SUN Ze. Diesel engine DPF characteristic test evaluation[J]. Automobile Technology, 2018(22):98-100.
- [15] NGUYEN H N Y, MOHAMED M H, PETIT C. Catalytic diesel particulate filter evaluation of parameters for laboratory studies[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2004, 49:127-133.
- [16] 刘希波. 改善柴油/甲醇组合燃烧废气质量的研究[D]. 天津:天津大学,2010.
LIU Xibo. Study on emissions reduction of diesel/methanol compound combustion engine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [17] 王伟,杜传进. 车用柴油机四效催化转化装置的研究与进展[J]. 交通科技, 2006(1):82-84.
WANG Wei, DU Chuanjin. Research and development of four-way catalyst on automotive diesel engine[J]. Transportation Science & Technology, 2006(1):82-84.
- [18] JOHNSON J H, BAGLEY S, GRATZ L D, et al. A review of diesel particulate control technologies and emissions effects [J]. SAE Transactions, 1994(103):210-244.
- [19] 刘吉林. 柴油机颗粒过滤器设计与优化[D]. 北京:北京航空航天大学,2012.
LIU Jilin. Design and optimization of the diesel particulate filter[D]. Beijing:Beihang University, 2012.
- [20] 于功志. 柴油机红外再生微粒捕集器试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2003.
YU Gongzhi. Experimental study on infrared regenerative particulate catcher for diesel engine[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.

Fault analysis on ring crack of DPF carrier

*YANG Hailong^{1,2}, XIN Xin², ZHENG Zhiqiang², YANG Yongchun^{1,2},
LIU Bin^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, LIU Bo^{1,2}*

1. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weifang 261061, China;

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

Abstract: To solve the ring crack fault of diesel particulate filter (DPF) carrier, two diesel engines numbered A and B respectively are taken as test objects. Regeneration test and drop-to-idle (DTI) test of diesel engine A after carbon deposition are carried out under the working condition of world harmonized transient cycle (WHTC), which are used to investigate the temperature change of various measuring points within DPF for different carbon deposition cycles and regeneration set temperatures. Regeneration test without carbon deposition under the working condition of WHTC and thermal shock test of diesel engine B are carried out, which are used to analyze the temperature change of various measuring points within DPF during the process of regeneration. The test results show that the uneven distribution of carbon load and high regeneration set temperature are the main reasons for the ring crack of DPF carrier. By controlling the ignition rate of DPF regeneration, the calibration value of regeneration set temperature can be decreased from 600 °C to 560 °C, and the carbon load can be controlled within 4.5 g/L. In the case of stepped regeneration, the internal temperature peak and temperature gradient of DPF are normal, which can reduce the risk of ring cracking of DPF carrier and improve the service reliability of DPF.

Keywords: diesel engine; DPF; ring crack of carrier; regeneration temperature; carbon load

(责任编辑:郭守真)