

非道路国四柴油机后处理系统加速耐久试验设计

李健巍, 孙志江, 杨起, 李嵩, 郑碧莹, 苏国梁, 张希杰, 谢成芬

潍柴动力空气净化科技有限公司, 山东 潍坊 261000

摘要: 为保证在精准考核的前提下缩短非道路国四后处理系统可靠性考核的时间, 设计加速耐久试验, 将后处理系统的加速耐久试验与整车系统的耐久试验相关联, 从热应力疲劳和振动疲劳两方面对非道路后处理系统的可靠性进行加速考核, 并以某推土机为例进行试验验证。试验结果表明: 设计的试验损伤不低于实际工作全寿命损伤, 热疲劳和振动疲劳加速试验可以有效缩短验证时间, 提高开发效率。

关键词: 非道路国四柴油机; 后处理系统; 热疲劳; 振动疲劳; 损伤; 耐久

中图分类号: TK427

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2024)05-0058-06

引用格式: 李健巍, 孙志江, 杨起, 等. 非道路国四柴油机后处理系统加速耐久试验设计[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(5): 58-63.

LI Jianwei, SUN Zhijiang, YANG Qi, et al. Design of accelerated durability test of aftertreatment system for a non-road CHINA IV diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(5): 58-63.

0 引言

非道路移动机械用柴油机国四排放标准的实施推动我国非道路移动机械排放污染控制迈向新阶段。后处理系统是非道路柴油机满足国四排放标准的关键。相比满足道路国五与国六排放标准的后处理系统, 满足非道路国四排放标准后处理系统的实际工作环境十分恶劣, 特别是振动与温度方面, 因此对非道路国四柴油机后处理系统耐久性的要求更高。目前, 对于非道路后处理系统的考核通常是对拖拉机、装载机等进行实际的严格耐久作业, 作业一定时间后若整车系统无故障发生或者故障间隔低于一定时间, 视为通过耐久试验。该方法可靠性高, 但是试验周期长, 成本高, 且通常由整车生产厂家完成, 不利于零部件供应商的产品开发与改进验证, 开发周期浪费严重。

如果将柴油机后处理系统的加速耐久试验与整车系统的耐久试验相关联, 可以在不降低考核精确性的基础上, 缩短开发周期, 降低开发成本。由于温度与振动对后处理系统可靠性的影响较大, 因此, 本文中针对温度变化导致的热疲劳与振动导致的振动疲劳, 设计非道路后处理系统加速耐久试验, 在保证考核精确性的前提下, 缩短后处理系统可靠性考核周期, 提高开发效率。

1 热疲劳

非道路车辆在工作过程中发动机排温与道路车辆差异较大。非道路车辆的工作过程可以分解为不断重复的单个循环, 例如, 推土机的工作过程为行走推土—空载后退—行走推土—空载后退, 装载机的工作过程为前进装载—后退—前进卸载—后退, 发动机排温与工作循环同步发生高温、低温的周期性变化, 波动较大。道路车辆正常行驶时, 发动机的排温数据变化平稳, 波动较小。

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2022CXGC020311)

第一作者简介: 李健巍(1985—), 男, 辽宁鞍山人, 工程师, 主要研究方向为内燃机设计、制造及技术管理, E-mail: lijianwei@weichai.com。

后处理总成的封装结构基材为不锈钢,高温与低温的周期性变化导致材料或者结构部件的疲劳,工程上称为材料或结构的热疲劳。

热应力是由材料温度变化引起的应力,与温差正相关。热应力^[1]

$$F = KE\alpha\Delta_T, \quad (1)$$

式中: K 为材料的约束系数, N/m ; E 为材料弹性模量, Pa ; α 为线膨胀系数, $^{\circ}C^{-1}$; Δ_T 为材料温差, $^{\circ}C$ 。

热疲劳的本质是温度变化导致材料或结构尺寸发生变化,由于边界约束的限制,这种变化引发了循环变化的内部应力;在循环应力的作用下,材料或结构内部产生疲劳裂纹,最终导致失效。热疲劳为应力疲劳,与普通的应力疲劳原理基本相同,工程上遵循 Miner 准则。应力与寿命对应的关系可以由 Basquin 公式^[2]确定:

$$\frac{\Delta_s}{2} = s'_f (2N_f)^b, \quad (2)$$

式中: Δ_s 为循环应力幅值, MPa ; b 为疲劳强度指数; s'_f 为疲劳强度系数, MPa ; N_f 为疲劳寿命,表示材料在破坏前经历的循环次数。

根据式(1)(2),可以通过增大温差提高循环应力幅值,减少循环次数的方式加速热疲劳进程,缩短试验时间。由于式(1)中的温差为壳体材料温差,而实际上控制后处理装置壳体的温度较为困难,因此选择气流温度作为控制参数,考虑到一定的安全因数 f ,可以得到加速耐久试验的温差 Δ_n 、加速耐久试验的循环次数 N_i 、整车实际测试温差 Δ_{Tp} 、实测温差下整车全寿命循环次数 N_p 的关系:

$$\frac{N_i}{N_p} = f \left(\frac{\Delta_{Tp}}{\Delta_n} \right)^b. \quad (3)$$

应力幅值相同时,非对称循环应力下的疲劳损伤随着平均应力的增大而增加^[3-4],因此在实际试验中,根据式(3)计算得到的加速耐久试验的平均温度应不低于实际整车测试的平均排温。

通过增大温差提高循环应力幅值可以将后处理系统全寿命周期的热应力循环压缩到几千次甚至更少即可达到与实际情况相同的损伤,从而缩短试验过程。

2 振动疲劳

非道路车辆后处理系统在工作过程中受到的激励主要来自于路面产生的激励、发动机产生的激励、工作系统产生的激励三部分。与之相比,道路车辆后处理系统在工作过程中所受激励不包括工作系统的激励。

研究后处理系统所受路面激励时,非道路车辆需区分轮式车辆与履带式车辆,轮式车辆后处理系统所受路面激励频率主要集中在几十赫兹以内^[5],而履带式车辆后处理系统受到的路面激励频率更低。柴油发动机的转速一般较低,发动机缸数通常为4~8缸,考虑到高阶模态的影响,由发动机振动导致的后处理系统的激励频率可以达到几百赫兹。不同非道路车辆工作系统工作时对后处理系统产生的激励的不同,主要激励频率也有所差异。

非道路车辆的工作过程具有很强的循环性,特别是装载机、挖掘机、推土机等工程机械。以单个工作循环为基础,采集单个循环中的工作激励,将振动疲劳试验与非道路车辆的严格耐久试验或实际工作中的振动进行有效关联,可以正确评估非道路车辆全寿命周期内的损伤与耐久性。

非道路车辆的工作过程还具有专一性与重复性,不同工作场地的工作内容以及受到的激励差异较小。因此,采集非道路车辆工作状态的振动信息,在频域上进行加速耐久试验的方式考核非道路车辆全寿命周期内的损伤与耐久性合适的。

非道路车辆后处理系统受到的路面激励为典型随机振动激励,发动机在固定转速下的工作激励具有明显的正弦特征,但实际作业时,发动机转速随功率需求的变化而变化,发动机的工作激励不再是单一频率正弦波,因此,振动加速耐久试验应采用宽频下的随机振动方式^[6-9]。

3 加速耐久试验设计与验证

3.1 排温及振动信息采集

非道路后处理系统的路谱采集基于实际作业工况进行,将采集到的路谱信息分解为单循环中的温度循环与振动循环。根据这些数据分析得到加速耐久试验中的热冲击循环条件及循环次数、振动试验的加速试验功率谱密度(power spectral density, PSD)谱与加速时间。

以某推土机为例设计非道路国四后处理系统加速耐久试验,该推土机的后处理系统材料为4系钢材。采集推土作业中后处理系统前进气口的排温与底座振动数据,排温与振动数据采集位置分别如图1、2所示,采集得到的排温、振动数据分别如图3、4所示,图4中 g 为自由落体加速度。

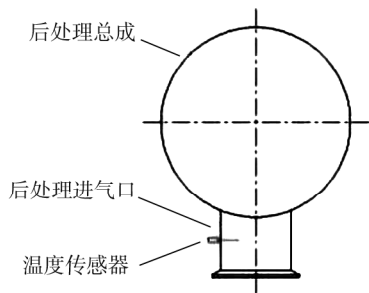


图1 后处理前排温数据采集位置示意图

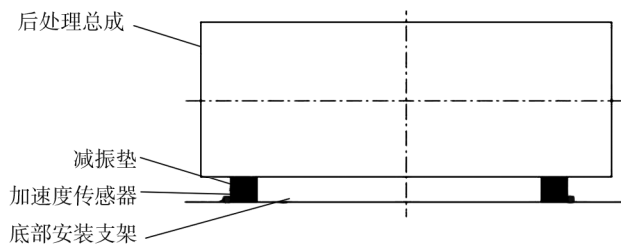


图2 加速度数据采集位置示意图

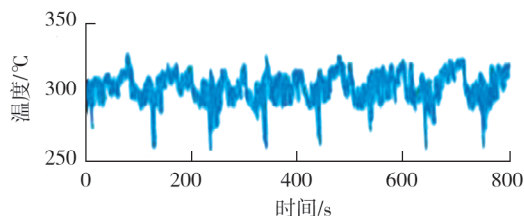


图3 某推土机工作中的发动机排温曲线

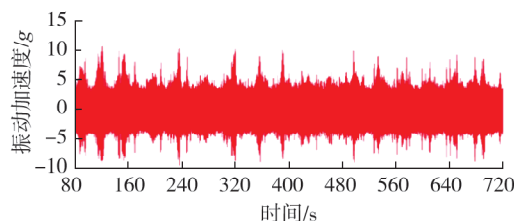


图4 推土机工作中受到的 y 向时域振动激励

由图3可知:推土机单个工作循环的平均温度为295℃,工作循环的温差为70℃。

3.2 热疲劳加速耐久试验

试验步骤为:1)检查采集得到的排温数据,去除毛刺;2)计算温度循环的温差、平均温度;3)计算单循环时间和产品全寿命周期下的温度循环次数;4)根据式(3)计算加速试验的温度循环温差与循环次数,但应保证加速耐久试验的平均循环温度不得低于车辆实际工作中的平均温度,避免试验中的热疲劳损伤低于实际计算的热疲劳损伤。

依据式(1)~(3)分析推土机后处理系统的热疲劳情况。式(3)中的疲劳强度指数 b 根据由实际测试得到,4系钢材的疲劳强度指数一般为3~6。根据燃烧器可以实现的温度范围和推土机工作的平均温度,确定加速耐久试验的平均温度以及试验温差,根据要求的安全因数 f ,确认加速耐久试验的循环次数。对于该型推土机的后处理系统,假定要求安全因数 $f=1.5$ 。实际热疲劳情况和最终设计的加速耐久试验条件如表1所示。

表1 实际热疲劳情况与设计的加速耐久试验条件

项目	平均温度/℃	循环温差/℃	全寿命循环次数
实际工作	295	70	352 942
加速试验	300	500	1 455

对该推土机装配的后处理系统样件进行台架热疲劳加速试验,后处理系统台架布置如图5所示。由于实际工作的平均温度为295℃,设定后处理系统气体温度为50~550℃,平均温度为300℃,气体质量流量固定,共进行1455个试验循环。试验完成后对后处理样件进行气密性检测与外观检测。气密性检测结果显示后处理样件气体泄漏量较低。后处理样件拆检后未发现开裂等损伤失效,不影响后处理样件的功能,试验通过。在 $f=1.5$ 的要求下,计算热疲劳加速耐久试验的损伤比为0.66,与实际工作的损伤比一致,设计的热疲劳加速耐久试验条件能够真实反映推土机后处理系统热疲劳情况。

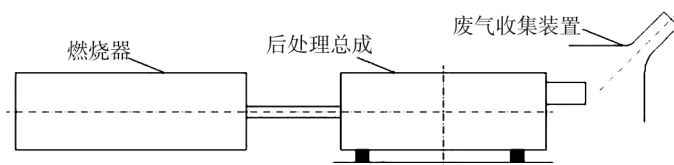


图5 后处理样件台架布置

3.3 振动疲劳加速耐久试验

1) 检查采集得到的振动信号,确认信号的一致性。

2) 对信号进行滤波、去毛刺,得到有效信号。

3) 计算单个或者多个循环的疲劳损伤谱(fatigue damage spectrum, FDS)与整车工作中的冲击响应谱(shock response spectrum, SRS),冲击谱为工作中该方向的最大加速度或者位移响应谱。

宽频下FDS的计算式为:

$$S(f_n) = f_n t \frac{D^m}{C} \left[\frac{Q G_z}{2(2\pi f_n)^3} \right]^{\frac{m}{2}} \Gamma \left(1 + \frac{b}{2} \right), \quad (4)$$

式中: f_n 为固有频率,Hz; t 为持续时间,s; D 为刚度系数,N/m; Q 为动态放大因子; m 、 C 为材料疲劳参数; G_z 为绝对加速度, g ; Γ 为与加速度相关的伽玛函数。

根据采集的推土机工作中受到的振动激励信号,计算得到疲劳损伤谱如图6所示。

4) 根据单循环或者多循环的疲劳损伤谱,计算全寿命周期的疲劳损伤谱,从单循环损伤计算全寿命损伤谱遵循累积损伤原则。

假定推土机的设计寿命为6000h,根据累积损伤原则计算后处理总成的全寿命周期损伤谱,结果如图7所示。

5) 根据推土机全生命周期损伤谱,计算每个频率下的加速度功率密度,然后将所需频率合成为考核用PSD谱。加速度功率密度的计算式^[10]为:

$$G(f_n) = \frac{2(2\pi f_n)^3}{Q} \left[\frac{f_n C \sum S(f_n)}{f_n^b t_{eq} \Gamma \left(1 + \frac{b}{2} \right)} \right]^{\frac{2}{b}}, \quad (5)$$

式中: t_{eq} 为加速时间,s。

对振动数据进行处理,根据全寿命周期疲劳损伤谱考核用,加速耐久100h的考核用PSD谱如图8所示。

6) 校核考核用PSD谱,确认加速时间是否合适。PSD谱合适的判断方法为:比较根据原时域激励产生SRS与加速度的PSD激励产生的最大冲击响应(equivalent response spectrum, ERS),若ERS不超过SRS的1.5倍认为加速时间合适,允许部分ERS超出SRS的1.5倍,但若超过倍数过

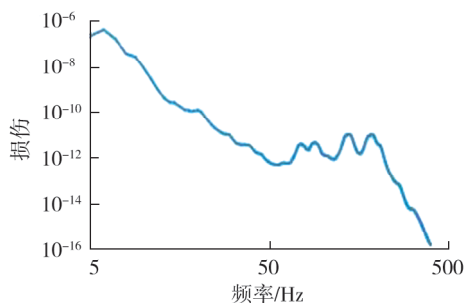


图6 推土机10个工作循环下的损伤谱

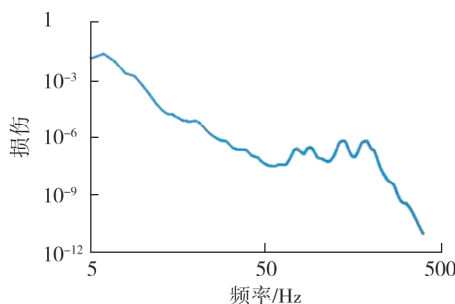


图7 推土机全寿命周期的损伤谱

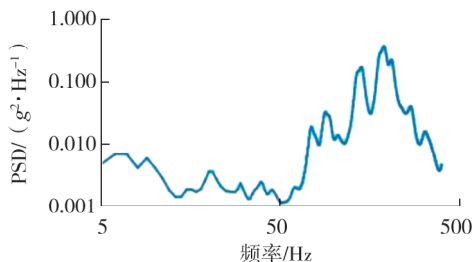


图8 加速耐久100h的PSD谱

多,可能引起试验的失效模式与实际使用的失效模式的差异性增加,影响试验考核效果。

采用图7中的PSD谱对后处理总成进行疲劳损伤仿真分析,结果如图9所示。由图9可知:最大损伤约为0.041,远低于1,安全系数较高,试验失效风险低。加速耐久100 h后,对比原始数据产生的SRS与PSD谱产生的ERS,结果如图10所示。由图10可知:大部分ERS小于SRS的1.5倍,全部低于SRS的2倍,加速耐久时间合理,考核用PSD谱有效。

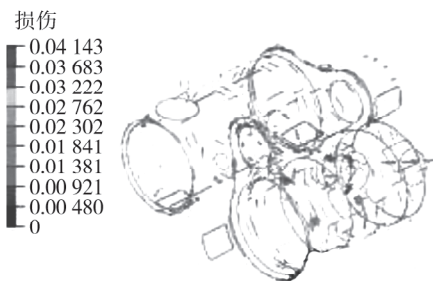


图9 采用PSD谱的损伤仿真结果

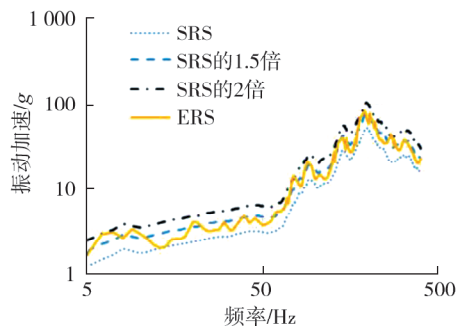


图10 SRS与ERS对比

为验证振动疲劳加速耐久试验的准确性,进行后处理系统样件台架试验,样件在台架上的布置如图11所示。试验中模拟整车工作中的气体排温与流量,维持恒定的气体输入,振动台按照设定的考核PSD谱加载加速度激励,试验持续时间为100 h。试验结果显示后处理样件的损伤同产品在全寿命周期损伤一致。对后处理样件进行气密性检测,气体泄漏量较低,不影响后处理样件的功能。

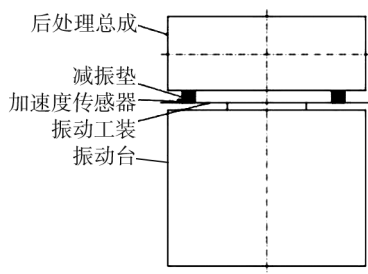


图11 后处理样件在振动疲劳试验台上的布置

4 结束语

热应力与振动是造成非道路用后处理系统失效的主要原因。热疲劳和振动疲劳加速耐久试验分别从温度变化和振动导致的疲劳两方面进行考核,根据计算,试验损伤不低于实际工作全寿命损伤,热疲劳和振动疲劳加速试验可以有效缩短验证时间,提高开发效率。

参考文献:

- [1] 安达胜之,坂本欣也,菅野一仁,等. 机械公式活用手册[M]. 杨晓辉,白彦华,徐方超,译. 北京:科学出版社,2011: 60-63.
- [2] 段红燕,唐国鑫,盛捷,等. 一种新型的疲劳强度预测模型[J]. 上海交通大学学报,2022,56(6):801-808.
- [3] 丁遂栋. 结构钢光试验样非对称循环疲劳极限的估算[J]. 机械强度,1997,19(1):45-47.
- [4] 董聪,董树利,刘建华. 非对称荷载下疲劳强度临界值的统一公式[J]. 工程力学,2001(2):92-98.
- [5] 克里斯蒂安·拉兰内. 随机振动[M]. 3版. 李志强,译. 北京:国防工业出版社,2021:2-10.
- [6] 陈丽霞. 复合激励下两种类型电动汽车的行驶平顺性分析[J]. 机械研究与应用,2024,37(1):123-127.
- [7] 吴业强,何锋,占刚,等. 工程车辆驾驶室振动特性分析及悬置优化[J]. 现代机械,2017(4):35-39.
- [8] 程准,王俊,鲁植雄. 基于MATLAB/Simulink和ADAMS的拖拉机建模与振动仿真分析[J]. 农业现代化研究,2016, 37(2):395-401.
- [9] 万久远,熊耀志,韦顺宜,等. 随机振动试验方法准确性研究及其在工程机械中的应用[J]. 工程机械,2020,51(8): 25-31.
- [10] 崔京宝,严家武. 基于PSD谱的SCR box频域加速耐久试验[J]. 车用发动机,2011(5):84-88.

Design of accelerated durability test of aftertreatment system for a non-road CHINA IV diesel engine

LI Jianwei, SUN Zhijiang, YANG Qi, LI Song, ZHENG Biying,
SU Guoliang, ZHANG Xijie, XIE Chengfen

Weichai Power Emission Solutions Technology Co., Ltd., Weifang 261000, China

Abstract: In order to shorten the reliability assessment time of non-road CHINA IV aftertreatment system under the premise of accurate assessment, an accelerated durability test is designed to link the accelerated durability test of the aftertreatment system with the durability test of the entire vehicle system. The reliability test of the non-road aftertreatment system is accelerated from the aspects of thermal stress fatigue and vibration fatigue, and is verified by testing a bulldozer as an example. The experimental results show that the designed test damage is not lower than the actual working life damage. Thermal fatigue and vibration fatigue acceleration tests can effectively shorten the verification time and improve development efficiency.

Keywords: non-road CHINA IV diesel engine; aftertreatment system; thermal fatigue; vibration fatigue; damage; durability

(责任编辑:臧发业)

.....
(上接第 57 页)

relative humidity, and stack working temperature on the performance of the cell is analyzed. The results indicate that the model has high accuracy and meets the requirements. With the increase of gas flow rate, working temperature, and working pressure, the output performance of the battery first increases and then decreases. As the relative humidity of the gas increases, the output performance of the battery gradually improves. When the stoichiometric ratio of the anode and cathode of the battery is 1.4 and 2.0, the relative humidity of both anode and cathode gases is 100%, the working temperature is 70 °C, and the working pressure is 250 kPa, the output performance of the battery is good.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; polarization characteristic; running parameter

(责任编辑:臧发业)