

基于小波包的二甲醚发动机复合燃烧爆震能量分析

李帅博,尹发辉,胡文帅,侯军兴*

郑州航空工业管理学院航空宇航学院,河南 郑州 450046

摘要:为更好地检测判别二甲醚发动机复合燃烧爆震,试验研究复合燃烧中正常燃烧和爆震燃烧时缸内压力在各个频带的小波包能量分布,确定爆震燃烧时缸内压力的敏感频带,分析不同平均有效压力、不同发动机循环爆震燃烧时缸内压力在各个频带的小波包能量和能量熵分布。结果表明:正常燃烧时,缸内压力升高,加速度的波动幅值和各频带的小波包能量均很小;爆震燃烧时,缸内压力升高,速度波动幅值显著增大,波动时刻提前,各频带的小波包能量不同程度增大,爆震敏感频带频率为7.50~8.75 kHz的小波包能量显著增大;爆震燃烧时,不同平均有效压力、不同循环发动机缸内压力各频带的小波包能量、能量熵的分布规律相似,燃烧状态决定了小波包能量分布和能量熵分布,平均有效压力和循环对其分布无影响。

关键词:二甲醚;复合燃烧;爆震;小波包;能量熵

中图分类号:TK46

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)04-0001-06

引用格式:李帅博,尹发辉,胡文帅,等.基于小波包的二甲醚发动机复合燃烧爆震能量分析[J].内燃机与动力装置,2023,40(4):1-6.

LI Shuaibo, YIN Fahui, HU Wenshuai, et al. Knock energy analysis of compound combustion in a DME engine based on wavelet packet[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(4):1-6.

0 引言

当前碳达峰、碳中和已成为国际社会的共识,交通能源低碳绿色转型迫在眉睫,清洁代用燃料-先进燃烧方式是缓解发动机燃料短缺和环境污染的方式之一^[1-3]。二甲醚是一种清洁含氧燃料,发动机燃用二甲醚可以实现零碳烟排放和较低的 NO_x 排放^[4-5]。复合燃烧是一种清洁燃烧方式,包括均质充量压燃(homogeneous charge compression ignition, HCCI)燃烧和直接喷射(direct injection, DI)喷雾燃烧,通过优化复合燃烧中HCCI燃烧、DI燃烧的比例,可以拓展HCCI运行范围,进一步降低发动机排放。目前,复合燃烧的研究主要集中在燃烧特性和排放特性方面。柴油/甲醇复合燃烧的相关研究发现,预喷油量增加,缸内压力峰值显著增加,HC、CO等排放降低, NO_x 排放增加;喷射时刻提前,超细颗粒在颗粒中所占比例增大^[6-7]。醇醚燃料复合燃烧研究发现,甲醇的高汽化潜热使燃烧初期的缸内温度降低,燃烧相位后移^[8]。HCCI燃烧在复合燃烧中所占比例过高时,易发生爆震燃烧^[9-11]。目前,对爆震研究主要针对火花点火发动机爆震^[12-14]。对HCCI、汽油压燃(gasoline compression ignition, GCI)和火花点火等不同燃烧模式的爆震特性研究发现,不同燃烧模式的爆震具有不同的统计学特征,但是现有的爆震研究中很少涉及到复合燃烧爆震^[15]。

本文中在一台二甲醚发动机上进行复合燃烧爆震特性研究,利用小波包变换对正常燃烧、爆震燃烧工况下缸内压力信号进行3层小波包分解,得到不同频率范围的缸内压力子信号,确定正常燃烧、爆震燃

收稿日期:2023-04-04

基金项目:河南省高等学校重点科研计划项目(22A470010);河南省高校大学生创新创业训练计划项目(202210485056)

第一作者简介:李帅博(2002—),男,河南商丘人,主要研究方向为智能车辆设计与控制,E-mail:269565468@qq.com

*通信作者简介:侯军兴(1977—),男,河南安阳人,工学博士,教授,主要研究方向为新能源动力系统研究,E-mail:hounjunxing@126.com。

烧时缸内压力在各个频率范围的子信号的小波包能量,进而确定爆震的敏感频带;分析平均有效压力和循环对爆震燃烧时缸内压力在各个频率范围的子信号的小波包能量和能量熵的影响规律,为检测判别复合燃烧爆震、提高发动机性能提供参考。

1 试验装置与分析方法

将一台二甲醚压燃发动机改造为二甲醚 HCCI-DI 复合燃烧发动机,开展二甲醚 HCCI-DI 复合燃烧试验,试验装置包括 HCCI 燃烧和 DI 燃烧 2 部分:1) HCCI 燃烧部分。二甲醚经过蒸发器蒸发,进入混合器,在混合器里与新鲜空气混合均匀后进入发动机气缸内进行 HCCI 燃烧。2) DI 燃烧部分。二甲醚经过过滤器过滤,再经过低压泵和高压泵加压,由高压喷油器喷射在气缸内进行 DI 燃烧。复合燃烧试验装置示意如图 1 所示。

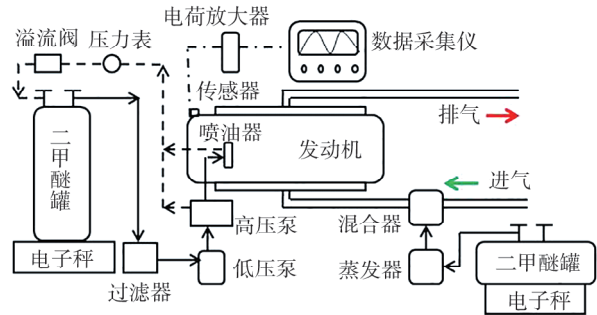


图 1 复合燃烧试验装置示意图

为了研究二甲醚复合燃烧爆震特性,试验中调节不同的 HCCI 燃料的质量流量 q_m ,使之出现正常燃烧和爆震燃烧工况。不同工况的缸内压力由数据采集系统采集,包括压力传感器、电荷放大器和数据采集仪,采样频率为 20 kHz。

采集的缸内压力存储到计算机进行小波包分解,分解示意图如图 2 所示。由图 2 可知:选用 db5 作为小波基,对正常燃烧和爆震燃烧工况下的缸内压力进行 3 层小波包分解,得到 8 个子信号分量 $S_{3,0}$ 、 $S_{3,1}$ 、 $S_{3,2}$ 、 $S_{3,3}$ 、 $S_{3,4}$ 、 $S_{3,5}$ 、 $S_{3,6}$ 和 $S_{3,7}$,每个子信号分量包含的频率成分不同,其频率范围逐渐由低到高,分别为 0~1.25 kHz、1.25~2.50 kHz、2.50~3.75 kHz、3.75~5.00 kHz、5.00~6.25 kHz、6.25~7.50 kHz、7.50~8.75 kHz 和 8.75~10.00 kHz。

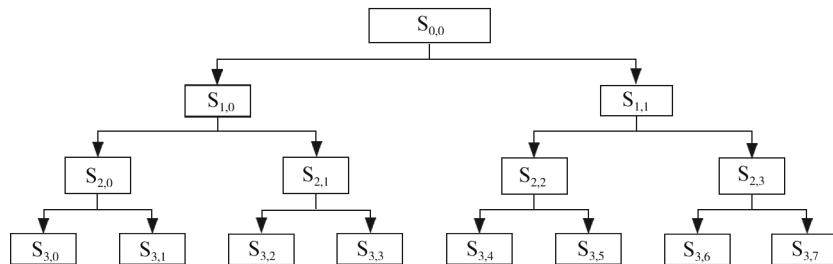


图 2 小波包分解示意图

2 试验结果与分析

2.1 不同燃烧状态的缸内压力小波包分解

发动机转速为 1 500 r/min,平均有效压力为 0.2 MPa,调节 HCCI 燃料质量流量 q_m 分别为 0.77、1.22 g/s,使燃烧状态分别为正常燃烧和爆震燃烧。正常燃烧和爆震燃烧的缸内压力 p 和压力升高加速度 a_p 如图 3、4 所示。

由图 3、4 可知: $q_m = 0.77$ g/s 时,缸内压力曲线比较光滑,没有出现压力振荡,缸内压力峰值为 5.57 MPa;缸内压力升高加速度曲线波动幅值很小,最大波动幅值仅为 0.53 MPa/(°)²; $q_m = 1.22$ g/s 时,缸内压力增加,缸内压力曲线在上止点附近出

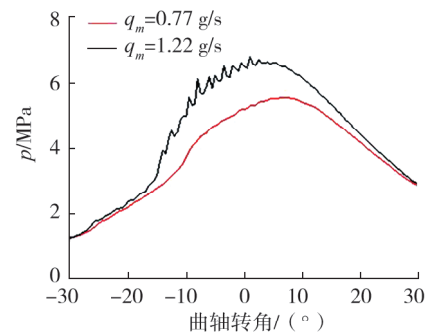


图 3 正常燃烧和爆震燃烧的缸内压力

现锯齿状振荡,缸内压力峰值为 6.81 MPa;缸内压力升高加速度曲线波动幅值显著增大,波动时刻前提,最大波动幅值为 $2.70 \text{ MPa}/(\text{°})^2$,最大压力升高加速度为 $1.75 \text{ MPa}/(\text{°})^2$,其相位为上止点前曲轴转角 6.5° 。

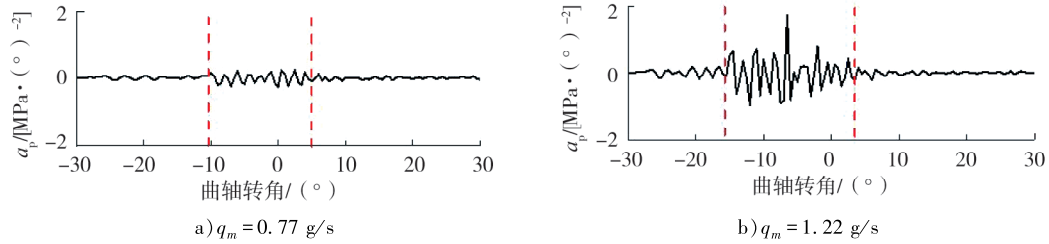


图4 正常燃烧和爆震燃烧的压力升高加速度

q_m 分别为 0.77 g/s 和 1.22 g/s 时,正常燃烧和爆震燃烧的缸内压力小波包分解图 5、6 所示。

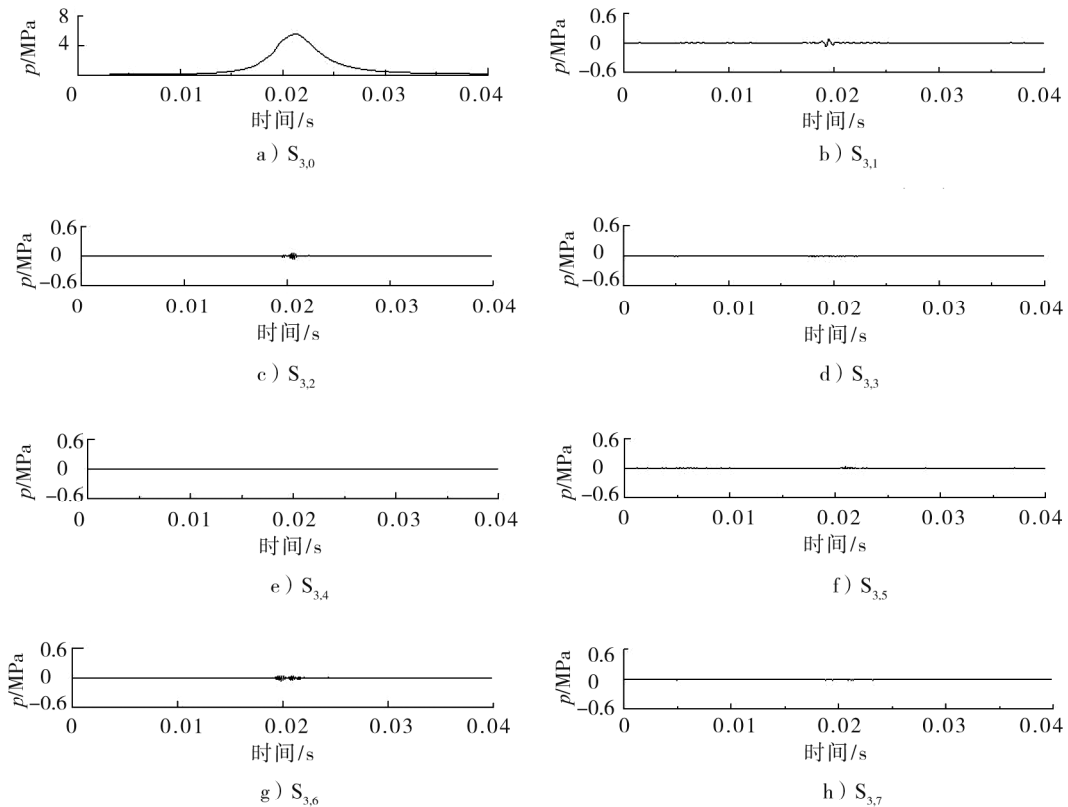
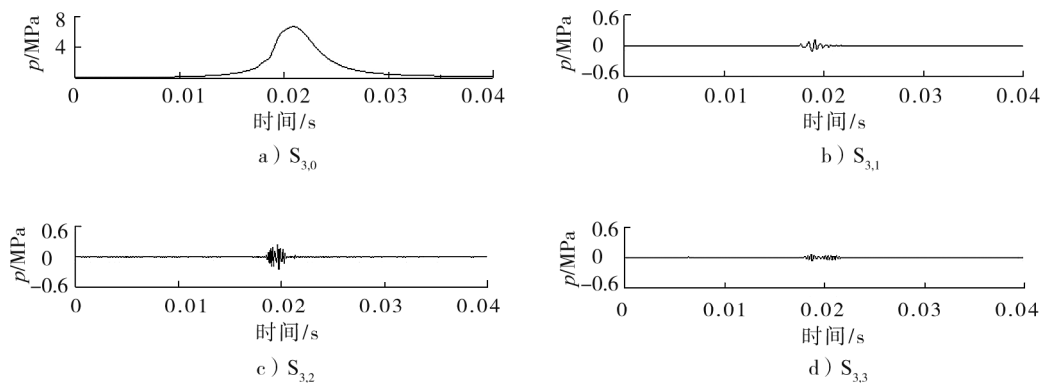


图5 $q_m = 0.77 \text{ g/s}$ 时正常燃烧的缸内压力小波包分解



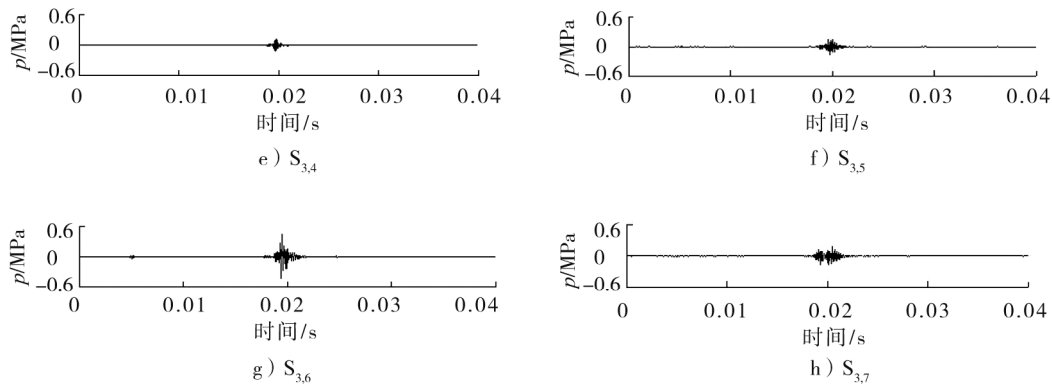


图6 $q_m = 1.22$ g/s 时爆震燃烧的缸内压力小波包分解

由图5、6可知:缸内压力信号经小波包分解后得到的8个分量 $S_{3,0} \sim S_{3,7}$ 中,分量 $S_{3,0}$ 的缸内压力曲线形状与原始缸内压力一致; $q_m = 0.77$ g/s 正常燃烧时,分量 $S_{3,1} \sim S_{3,7}$ 没有出现压力振荡,压力幅值均很小; $q_m = 1.22$ g/s 爆震燃烧时,分量 $S_{3,1} \sim S_{3,7}$ 的压力振荡幅值显著增大,各分量出现了不同程度的压力振荡。

2.2 基于小波包能量熵的爆震燃烧分析

发动机转速1500 r/min,平均有效压力为0.2 MPa, q_m 分别为0.77 g/s 正常燃烧和1.22 g/s 爆震燃烧时,缸内压力的小波包能量分布如图7所示。由图7可知:正常燃烧时缸内压力各分量的小波包能量均很小;爆震燃烧时缸内压力各分量的小波包能量出现不同程度增大,其中分量 $S_{3,6}$ 的小波包能量显著增大,说明该分量包含爆震燃烧压力振荡的主要能量,分量 $S_{3,2}$ 、 $S_{3,7}$ 能量增加也较明显。

为验证 $q_m = 1.22$ g/s 爆震燃烧时,分量 $S_{3,6}$ 是否包含爆震燃烧压力振荡的主要能量,对该工况下不同发动机循环的缸内压力进行了小波包分解,求解各分量的小波包能量。

小波包能量熵是缸内压力能量分布有序度的标识,描述能量分布的变化。进一步考察不同循环的缸内压力各分量小波包能量和能量熵分布情况,第1个循环 C_1 、第10个循环 C_{10} 、第20个循环 C_{20} 、第30个循环 C_{30} 的缸内压力各分量小波包能量和能量熵分布如图8、9所示。

由图8可知:爆震燃烧时, C_1 、 C_{10} 、 C_{30} 的缸内压力各分量小波包能量分布情况相似,分量 $S_{3,6}$ 的小波包能量最大,分量 $S_{3,2}$ 、 $S_{3,7}$ 的较大,各分量的小波包能量分布没有因为循环的不同而发生改变。由图9可知:爆震燃烧时, C_1 、 C_{10} 、 C_{20} 、 C_{30} 的缸内压力各分量小波包能量熵分布情况相似,分量 $S_{3,2}$ 、 $S_{3,6}$ 、 $S_{3,7}$ 的小波包能量熵较大,能量分布有序度,不同循环各分量的小波包能量熵分布相似。

进一步考察平均有效压力对正常燃烧和爆震燃烧缸内压力小波包能量的影响。发动机转速为1500 r/min,平均有效压力为0.1 MPa, q_m 分别为0.98 g/s 正常燃烧和1.26 g/s 爆震燃烧时,缸内压力的小波包能量分布如图10所示。由图10可知:正常燃烧时缸内压力各分量的小波包能量均很小;

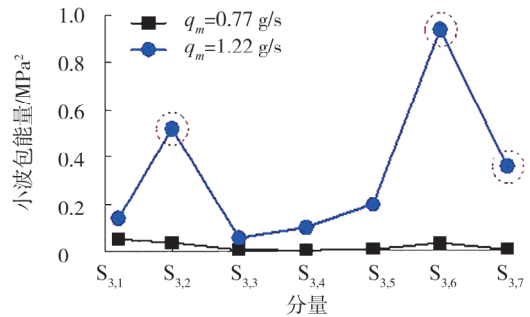


图7 正常燃烧和爆震燃烧的缸内压力小波包能量分布

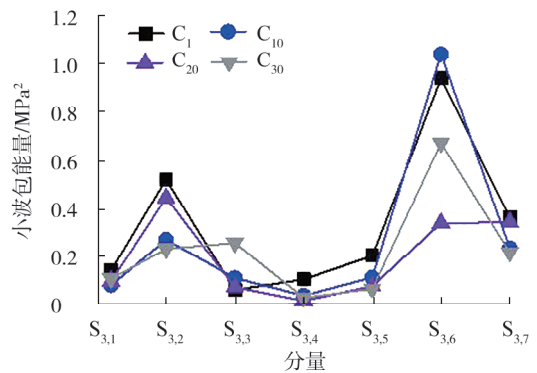


图8 各循环爆震燃烧时缸内压力小波包能量分布

爆震燃烧时缸内压力分量 $S_{3,6}$ 的小波包能量显著增大,与图8中平均有效压力为0.2 MPa时小波包能量分布规律类似。

发动机转速为1500 r/min,平均有效压力为0.1 MPa, q_m 为1.26 g/s 爆震燃烧时, C_1 、 C_{10} 、 C_{20} 、 C_{30} 的缸内压力各分量小波包能量和能量熵分布如图11所示。由图11a)可知,平均有效压力为0.1 MPa 爆震燃烧时,除 C_{10} 时分量 $S_{3,7}$ 的小波包能量最大外, C_1 、 C_{20} 、 C_{30} 的缸内压力各分量小波包能量中仍然是分量 $S_{3,6}$ 的最大,不同平均有效压力下,各循环的小波包能量均为分量 $S_{3,6}$ 的最大。由图11b)可知:爆震燃烧时, C_1 、 C_{10} 、 C_{20} 、 C_{30} 的缸内压力各分量的小波包能量熵分布情况相似,与图9平均有效压力为0.2 MPa时小波包能量熵分布规律相似。这说明不同平均有效压力、不同循环对小波包能量和能量熵的分布没有影响,燃烧状态是影响各分量小波包能量和能量熵分布的关键因素。

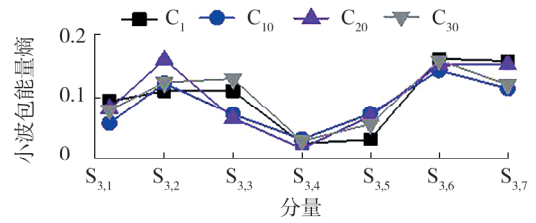


图9 各循环爆震燃烧时缸内压力小波包能量熵分布

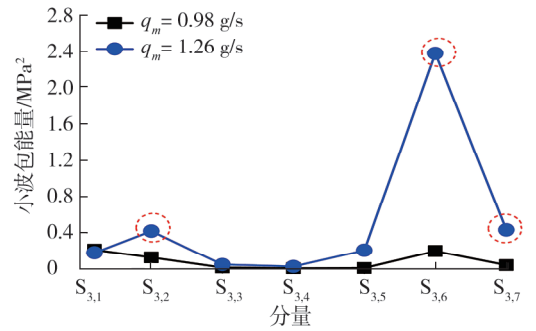
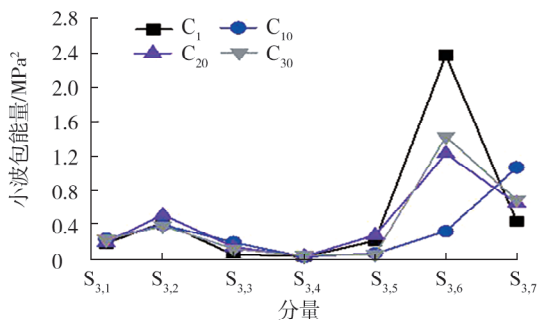
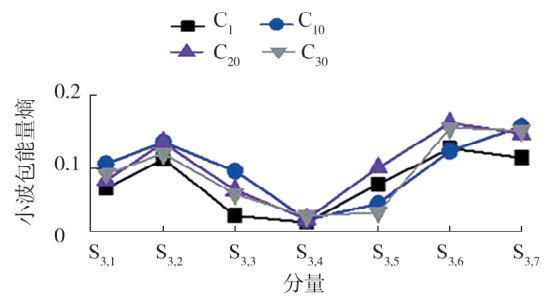


图10 正常燃烧和爆震燃烧的缸内压力小波包能量分布



a) 各循环的小波包能量



b) 各循环的小波包能量熵

图11 各循环爆震燃烧时缸内压力小波包能量和能量熵分布

3 结论

试验研究了二甲醚发动机复合燃烧中正常燃烧、爆震燃烧时缸内压力各个频带的小波包能量,确定了爆震的敏感频带,进一步分析了不同平均有效压力、不同循环爆震燃烧时缸内压力各分量小波包能量和能量熵的分布规律,得到如下结论。

1) 正常燃烧时,缸内压力升高加速度波动幅值和缸内压力各分量的小波包能量均很小。爆震燃烧时,缸内压力升高加速度波动幅值显著增大,波动时刻前提,各分量的小波包能量不同程度增大,其中分量 $S_{3,6}$ 的小波包能量显著增大,其所在的频带是爆震敏感频带。

2) 爆震燃烧时,不同平均有效压力、不同循环缸内压力各分量的小波包能量、能量熵的分布规律相似,均为分量 $S_{3,2}$ 、 $S_{3,6}$ 、 $S_{3,7}$ 的小波包能量熵较大。

3) 燃烧状态决定了缸内压力在各个频带的小波包能量分布和能量熵分布,平均有效压力、循环对各个频带的分布规律无影响。

参考文献:

[1] 帅石金,王志,马骁. 碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术[J]. 汽车安全与节能学报,2021,12(4): 417-439.

- [2] 余浩,谭建勋,张志强,等. 面向碳达峰碳中和的内燃机技术概述[J]. 内燃机与配件,2021(16):181-182.
- [3] 纪常伟,辛国,汪硕峰,等. 零碳及碳中和燃料内燃机应用进展[J]. 北京工业大学学报,2022,48(3):273-291.
- [4] HOU J X,WEN Z H,JIANG Z Q, et al. Study on combustion and emissions of a turbocharged compression ignition engine fueled with dimethyl ether and biodiesel blends[J]. Journal of the Energy Institute,2014,87(2):102-113.
- [5] 黄锦耀,严诗伦,陈朝阳. EGR对二甲醚HCCI发动机燃烧特性的影响[J]. 郑州大学学报(工学版),2018(1):24-28.
- [6] 危红媛,姚春德,潘望. 预喷油量对DMCC发动机燃烧和排放的影响[J]. 内燃机学报,2018,36(5):401-407.
- [7] 陈超,姚春德,窦站成. 喷射时刻对柴油甲醇复合燃烧发动机颗粒物排放的影响[J]. 环境科学学报,2017,37(5):1894-1901.
- [8] 吴子龙,朱建军,苏志伟,等. 醇醚燃料组合燃烧模式下发动机燃烧特性研究[J]. 机械设计与制造,2018(11):120-123.
- [9] 侯军兴,杨海鹏,郑路. 二甲醚发动机复合燃烧压力振荡特性研究[J]. 车用发动机,2022(4):36-40.
- [10] WANG Y, GUO C L, WANG P, et al. Numerical investigation on knock combustion in a diesel-dimethyl ether dual-fuel engine[J]. Energy and Fuels,2019,33(6):5710-5718.
- [11] HOU J X, LIU J W, WEI Y Q, et al. Experimental study on in-cylinder pressure oscillations of homogenous charge compression ignition-direct injection combustion engine fueled with dimethyl ether [J]. Journal of Energy Resources Technology,2016,138(5):052211.
- [12] 王志,龙岩,王建昕. 增压汽油机中早燃和超级爆震的研究进展[J]. 汽车安全与节能学报,2015,6(1):17-29.
- [13] 张剑,刘昌文,毕凤荣,等. 基于双谱的汽油机爆震特征提取与强度评价[J]. 振动. 测试与诊断,2017,37(4):717-722.
- [14] 林国星,杨建国,淳良. 基于小波变换和 Hilbert 变换的汽油机爆震边缘诊断[J]. 内燃机学报,2019,37(4):351-358.
- [15] 王利民,华剑雄,卫海桥. 不同燃烧模式的爆震特性及爆震强度评价方法[J]. 内燃机工程,2021,42(1):76-84.

Knock energy analysis of compound combustion in a DME engine based on wavelet packet

LI Shuaibo, YIN Fahui, HU Wenshuai, HOU Junxing*

School of Aerospace Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China

Abstract: In order to better detect the engine knock of compound combustion, the wavelet packet energy distribution characteristics of the in-cylinder pressure with normal combustion and knocking combustion in DME compound combustion are studied experimentally, and the sensitive frequency band of knocking combustion is determined. The wavelet packet energy and energy entropy distribution of cylinder pressure in various frequency bands under different average effective pressures and different engine cycles of detonation combustion are analyzed. The results show that the fluctuation amplitude of in-cylinder pressure rise acceleration and wavelet packet energy during different frequency band are very small with normal combustion. During knocking combustion, the fluctuation amplitude increases significantly, the beginning timing of fluctuation advances. The wavelet packet energy of each frequency band increases, especially that of the energy of wavelet packets with detonation sensitivity frequency bands ranging from 7.50 to 8.75 kHz increases significantly. During knocking combustion, the distribution characteristics of wavelet packet energy and energy entropy in each frequency band are similar with different brake mean effective pressure and different engine cycles. The combustion state determines the wavelet packet energy distribution and energy entropy distribution, and the effects of the brake mean effective pressure and engine cycle on the distributions are no obvious.

Keywords: dimethyl ether; compound combustion; knock; wavelet packet; energy entropy (责任编辑:刘丽君)