

基于 GT SUITE 的活塞组件摩擦功仿真分析及参数敏感性研究

徐跃强 徐政 陈明 张小虎

(上海汽车集团股份有限公司技术中心/上海市汽车动力总成重点实验室, 上海 201804)

摘要: 本文以发动机分解摩擦功试验工况为模拟基础, 利用 GT SUITE 软件建立了活塞组件摩擦功预测的仿真模型并与测试结果对比, 基本验证了模拟方法的有效性。此外还对影响活塞组件摩擦功的几个设计因素进行了参数敏感性研究, 分析结果表明, 润滑油, 轴颈尺寸, 活塞环弹力, 活塞质量等均对活塞组件摩擦功有一定影响。

关键字: GT SUITE、活塞组件、摩擦功、润滑油、轴颈直径、油环弹力、活塞质量

Abstract: This article describes a Piston group FMEP (friction mean effective pressure) prediction simulation method which is based on engine friction teardown test. According to compared with test data, it is validated that this simulation method is credible. Some studies have been done and the simulation results show that oil type, pin journal diameter, oil ring tension force, piston mass are the important factors for piston group FMEP.

Key Words: GT SUITE, Piston Group, FMEP, Oil type, pin journal diameter, oil ring tension force, piston mass

1. 引言

近年来, 随着排放和油耗法规的日趋严格, 根据最新的国家强制标准《乘用车燃料消耗量限值》和《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》要求, 预计到 2020 年, 乘用车平均油耗需降至 5 升/100km。为满足这一严苛的限值要求, 发动机设计优化尤其是减摩方面的优化是其中非常重要的方向之一。

为了详细了解发动机各主要部件的摩擦学特性, 最直接的方法就是对各零部件开展摩擦学性能测试, 其中包括零部件级的实验测量和整机级的分解摩擦功测试等。虽然测试原理较为简单, 但测试过程中对设备精度等要求很高, 整个实验过程耗时耗力。随着 CAE 技术的不断发展, 通过 CAE 计算来初步预测各零部件的摩擦功水平成为可能, 未来可成为发动机摩擦功测试与减摩研究的良好补充。

活塞组件(含活塞总成及连杆大、小头轴承)摩擦功是发动机整机摩擦功中的最大部分, 占比可达 30%~40%。因此对活塞组件的开展深入的减摩研究意义重大。本文探索了一种可行的活塞组摩擦功预测的模拟方法, 通过 GT SUITE 软件模拟发动机分解摩擦功试验的工况, 与实测数据对比及关键因素的参数敏感性分析, 能为后续发动机活塞组件减摩提供指导和参考^[1~2]

2. 发动机分解摩擦功试验

倒拖法是目前行业中测试整机机械摩擦功的主要方法。为得到各个零部件的摩擦功水平, 需对整个发动机零部件进行逐个拆解。过程相对复杂, 概况起来有如下几点:

- 1) 电机驱动倒拖发动机, 测试转速一般从怠速到高速 6000rpm 左右;
- 2) 严格控制水温 and 机油温度。一般进行多组不同温度下的测试, 其中 90℃ (水温和油温均控

制在 90℃) 下的结果最为重要。

3) 倒拖测试过程中, 在去掉活塞连杆组件前, 需同时测量各缸的瞬态缸压, 计算泵气损失。

4) 分解摩擦功测试时, 首先测量整机的总摩擦功, 然后逐一拆解各子系统, 同时测量剩余部分的摩擦功, 二者相减便可得出每个子系统的摩擦功。

5) 一般整机摩擦功会分解为几部分: 活塞组件(含活塞总成及连杆大头轴承)、曲轴(主轴承及油封)、凸轮轴及其驱动机构、气门机构及挺柱、机油泵、水泵、附件系统等^[3~5]。

3. 活塞组件摩擦功仿真分析

活塞组件摩擦功是活塞环, 裙部, 连杆小头, 连杆大头等各部分摩擦功的总和。作为发动机整机摩擦功中占比最大的一部分, 降低该部分的摩擦功对整机摩擦功水平的下降非常重要。

3.1 仿真模型与方法

为了准确模拟分解摩擦功试验中活塞组件部分的总摩擦功, 根据实际测试工况建立了对应的活塞组摩擦功预测分析模型。概况起来一般需要如下参数:

- 1) 活塞相关参数, 如环的尺寸, 张力, 形状, 裙部形状, 质量等;
- 2) 连杆结构参数, 如质量, 长度, 质心位置等;
- 3) 轴承结构参数, 如直径, 宽度, 间隙等;
- 4) 曲轴结构参数, 如曲柄臂参数, 质量, 质心等
- 5) 机油属性参数, 温度控制在 90℃, 恒定;

发动机通常采用 FMEP 来表征摩擦功水平。单位 bar。实际仿真中需要将各部分的摩擦功计算值(单位 W)转化为 FMEP。转化公式如下:

$$p_{me} = \frac{300 \times \tau \times P_m}{V_s \times i \times n} \quad (1)$$

其中: p_{me} —表征摩擦功的有效压力, 单位 bar; P_m —仿真计算各部分的总摩擦功, 单位 kW;
 V_s —单缸容积, 单位 L; n —发动机转速, 单位 r/min; τ —冲程数; i —气缸数;

3.2 仿真结果与试验对比

以某小型四缸汽油机为例, 按照上述方法建立活塞组件摩擦功预测仿真模型, 计算得到活塞各组成部分的摩擦功。图 1 为该发动机活塞组件摩擦功试验与仿真结果对比。

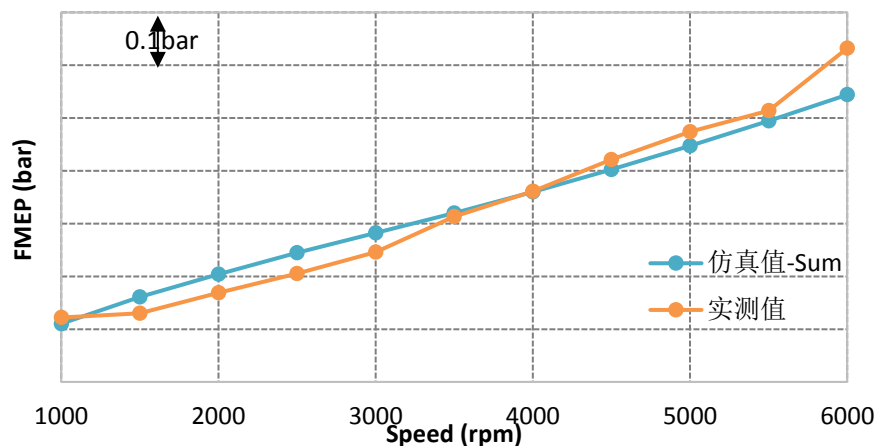


图1 活塞组件摩擦功仿真与试验对比

从图1可以看出,随着转速的升高,活塞组件摩擦功呈增加趋势,线性规律较为明显。仿真与测试结果的趋势一致,除个别点外,整体误差在10%左右。基本验证了基于GT SUITE的仿真分析结果的有效性。可用于后续对活塞组件摩擦功的继续研究。

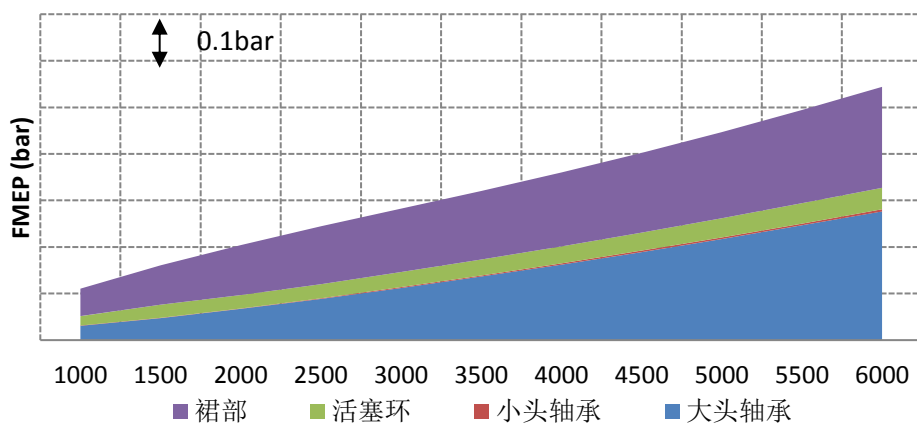


图2 活塞组件摩擦功各组成部分的分布情况

活塞组件的总摩擦功一般可由以下几部分组成:活塞环,活塞裙部,连杆大头,连杆小头等。图2为该发动机活塞组件摩擦功各部分占比情况。从图2可以看出,连杆大头轴承和活塞裙部在整个活塞组件摩擦功的占比最高,约占41%和46%左右。活塞环摩擦功占比约为12%左右。连杆小头摩擦功占比最低,仅占约1%左右。而且不同转速下,各部分的占比还不太相同。低速段,活塞裙部占比更高;但高速下,连杆大头的占比更大。

4. 活塞组件摩擦功参数敏感性分析

为了进一步研究活塞组件摩擦功的影响因素,为活塞组件减摩提供参考。开展了一些设计因素的参数敏感性研究。

4.1 润滑油对活塞组件 FMEP 的影响

润滑油对摩擦的影响至关重要。近年来,随着减摩压力越来越大。低粘度机油的应用日趋广泛。图2为采用两种不同粘度润滑油后,仿真计算得到的活塞组件摩擦功对比。

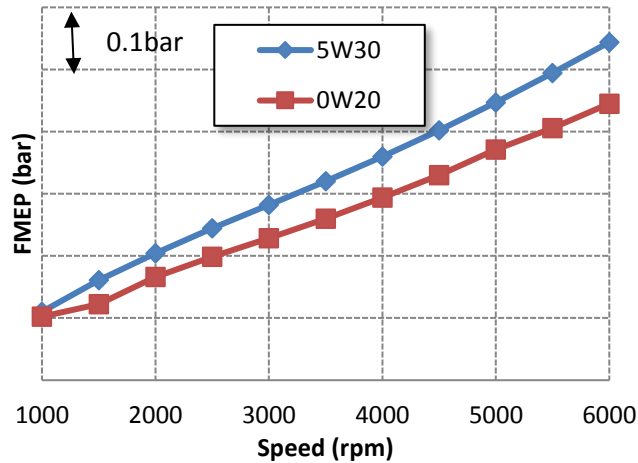


图3 不同润滑油下的活塞组件总摩擦功对比

从图 3 可以看出：润滑油对活塞组件摩擦功的影响非常明显。低粘度润滑油的摩擦功相较高粘度润滑油，其摩擦功整体下降约 18%左右。

4.2 连杆轴颈直径对活塞组件 FMEP 的影响

除润滑油外，轴承直径也是轴承摩擦功的重要参数之一。从图 2 中我们已经清楚，连杆大头轴承的摩擦功占比可达活塞组件总摩擦功的四成。因此对于连杆轴承摩擦功的减摩研究就显得非常关键。目前随着技术的发展，发动机开发中曲轴轴颈等关键设计参数越来越小。而连杆轴颈直径改动值仅影响到连杆，较主轴颈改动所带来的影响小，因而被大家作为主要的减摩研究方向来研究。

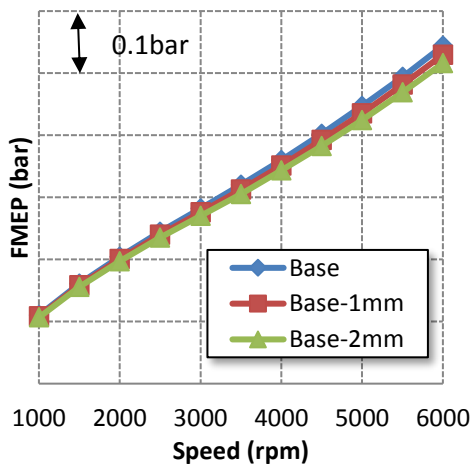


图4 不同连杆轴颈直径下的活塞组件总摩擦功对比

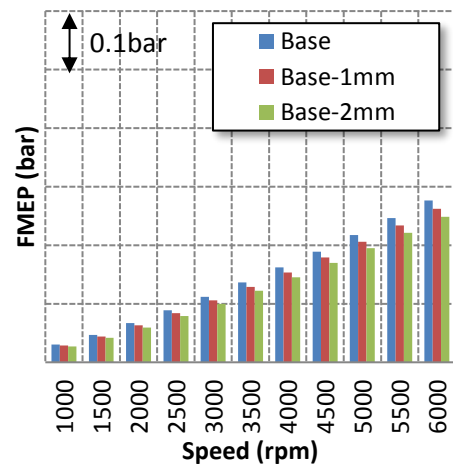


图5 连杆轴承本身摩擦功变化对比

从图 4、5 中可以看出，随着连杆轴颈直径的减小，连杆轴承的摩擦功逐渐减小，从而活塞组件总的摩擦功水平也随之降低。大致水平约为连杆轴承直径每降低 1mm，连杆轴承摩擦功下降约 5.5%左右，导致活塞组总摩擦功下降约 2.2%左右。

4.3 活塞环弹力对活塞组件 FMEP 的影响

活塞环是发动机中非常关键的零件之一，分气环和油环。气环主要起密封，导热作用，而油环主要起刮油，布油作用。一般汽油发动机中，有两道气环，一道油环，其中油环的弹力最大。由于活塞环会在气缸内部高速往复滑动，因此会引起环与缸套间的摩擦、磨损。图 2 的仿真结果显示，整个

转速范围内，活塞环所引起的摩擦功可占活塞组件总摩擦功的百分之十几。目前在发动机设计开发中，低弹力活塞环的应用越来越普遍。图 6 对油环弹力大小对活塞组件摩擦功的影响进行了初步研究。

从图中可以看出，活塞环弹力下降，对活塞组件总摩擦功的影响不太大。在低转速有一点影响，高速下基本一致。图 7 为活塞环不同弹力下，活塞环本身摩擦功的对比，从对比结果可以看出，活塞环弹力对摩擦功的影响主要集中在低速，转速越低越明显。中高转速后，活塞环弹力的影响较小。

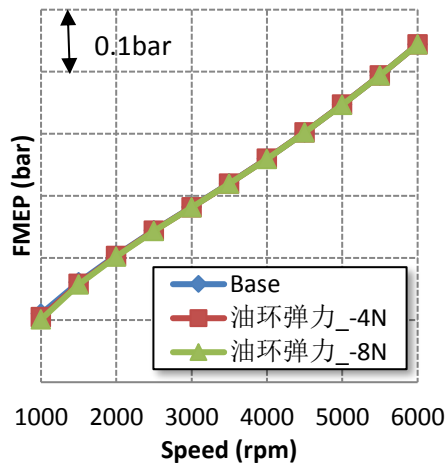


图 6 不同活塞环弹力下的活塞组总摩擦功对比

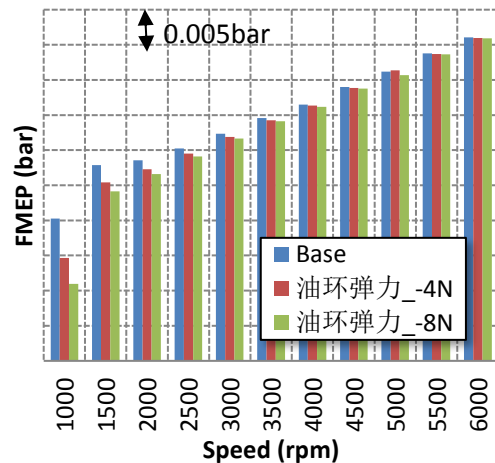


图 7 活塞环本身摩擦功变化对比

4.4 活塞质量对活塞组件 FMEP 的影响

发动机往复质量主要包括活塞总成质量和连杆小头质量两部分。其中活塞总成质量占主要。对直列四缸发动机而言，二阶往复惯性力是发动机产生振动的主要激励源。为了尽量减小发动机的振动。开发过程中均是期望尽量降低往复质量。此外往复质量的下降对活塞组总摩擦功也有一些影响，具体如图 8 所示：

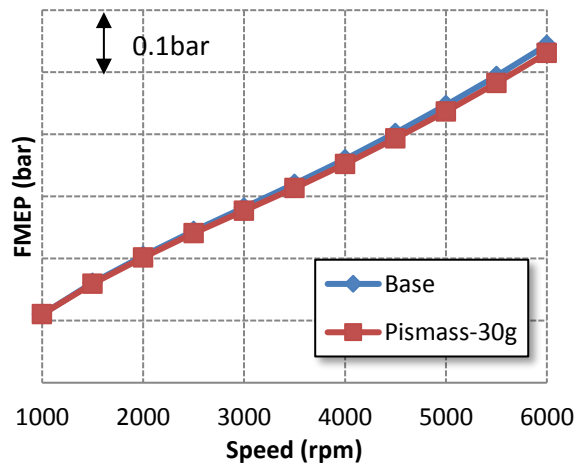


图 8 活塞质量对活塞组总摩擦功的影响

从图 8 中可以看出，低速段，活塞质量对活塞组件总摩擦功的影响不大。高速时，随着活塞质量下降，摩擦功略有下降。

5. 结语

本文通过研究发动机分解摩擦功试验的具体方法,探索了该工况下的活塞组件摩擦功的仿真方法。以某小型 4 缸汽油机为例,计算并对比了活塞组件总摩擦功,对影响活塞组件设计过程中的一些关键因素进行了参数敏感性研究,针对分解摩擦功的模拟工况,有以下结论:

- (1) 在模拟分解摩擦功的实验工况下,活塞组件摩擦功的仿真结果与测试结果,二者趋势一致,整体误差在 10%左右,基本验证了分析方法的有效性。
- (2) 活塞组总摩擦功中,占比最大的是活塞裙部和连杆大头轴承,其次是活塞环,连杆小头轴承的占比很低。
- (3) 润滑油对摩擦功的影响非常明显,机油粘度越低,摩擦功越小。通过对比研究发现,0W20 机油下的活塞组件总摩擦功可下降约 18%。
- (4) 减小连杆颈直径是目前较为常见的一种降摩擦的方式。从对比结果可以看出,随着轴颈直径的下降,摩擦功逐渐降低。大致来看,每下降 1mm,连杆轴承本身摩擦功下降约 5.5%左右,活塞组总摩擦功下降约 2.2%左右。
- (5) 活塞环弹力对活塞组摩擦功的影响主要集中在低速段,高速段的影响较小。
- (6) 往复质量对活塞组摩擦功有一定影响,且主要体现在高速段。

6. 参考文献

- [1] 周龙保 等. 内燃机学[M].第 2 版. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [2] 袁兆成. 内燃机设计[M].第二版. 北京:机械工业出版社, 2012.
- [3] 刘磊, 黄小兵. 发动机摩擦功测试浅谈[J].内燃机, 2016(3).
- [4] 叶年业, 穆建华 等. 自然吸气汽油机摩擦功对比试验研究[J]. 车用发动机, 2013(2).
- [5] 赵礼飞等. 某柴油机活塞组件的低摩擦研究[J]. 内燃机, 2019(1).