

机油灰分的形成过程分析与研究

姜新军, 郑国世

(东风康明斯发动机有限公司, 湖北 襄阳 441004)

摘要: 机油灰分是影响机油更换周期和发动机可靠性的重要因素之一。围绕机油灰分的测量方法、生成机理、灰分形成和发动机结构的关系等几个方面, 分析了发动机运行过程中影响机油灰分形成速率的主要因素, 为改善机油灰分形成速率提供了理论依据。

关键词: 机油灰分; 生成机理; 喷油结束点

中图分类号: TK421+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)01-0011-04

Oil Soot Analysis & Research from Diesel Engine

Jiang Xinjun, ZhengGuoshi

(Dongfeng Cummins Engine Co., Ltd., Hubei Xiangyang 441004)

Abstract: Soot level in the engine lubricating oil is an important factor influencing the oil change interval and engine reliability. Analysis and research were carried out on the main factors influencing the formation rate of oil soot, including soot measurement method, the soot formation mechanism and the relationship between soot formation and combustion components configuration. The conclusions provide reference for the improvement of engine oil soot formation rate.

Keywords: oil soot; formation rate; end of injection

0 引言

随着发动机技术的发展, 发动机升功率不断提高, 对排放与噪声污染的要求也愈来愈高。发动机燃油系统由泵管嘴系统发展到高压共轨系统, 燃油喷射压力也由最初的泵端压力 50 MPa 提高到共轨压力 160 ~ 240 MPa, 以满足更高的功率和排放水平要求。升功率的提高必须增加燃油消耗量, 不带氮氧化物后处理装置, 而又要满足排放指标时, 则必须进一步延迟喷油, 两者结合导致喷油结束点严重滞后, 如此, 机油中灰分的含量成为一个显著的问题。本文从几个不同的发动机结构及测量数据分析入手, 探讨柴油机中机油灰分生成率的规律, 为发动机性能和可靠性的进一步开发提供理论依据。

1 机油灰分的测量原理

为了得到某个发动机的灰分形成特性, 可以测量机油中灰分随时间的变化, 从而得到灰分含量变化的趋势。通常是测量较短的一段时间, 来计算较长时间后的灰分含量, 特别是在有大量的运行点需要测量时, 这种方法效果明显。

传统的测量方法是, 进行 250 h 稳态发动机台架试验, 每 25 h 取一次机油样, 对每个样品进行实验室分析, 典型的误差大约在 0.5% (灰分绝对含量)。对这些数据做线性回归, 得到发动机在该运行工况下 250 h 的机油灰分生成特性, 如图 1 所示。这种测量方法只适用于对一个已经定型的产品完成灰分生成特性采集; 另一方面, 这种测量方法需要相当长的时间。

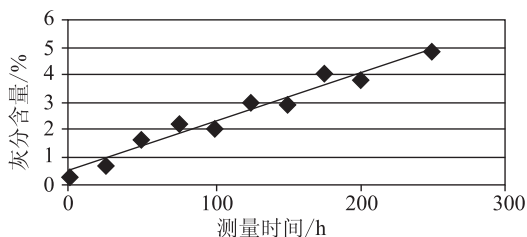


图 1 传统灰分测量方法

为了更快捷和准确地得到灰分生成特性,开发了一种光学灰分浓度测量设备,它能在任何时刻分辨极小的灰分浓度变化,能做到每 6 s 测量一次,这样就很容易得到灰分含量在短时间内的变化。发动机在某个稳态工况运转时,机油中灰分的生成可以被线性化为时间的函数,灰分的生成特性由测量精度和测量点的个数来决定。光学测量设备点和点之间的测量波动可以做到质量浓度的 0.000 2%。采集更多的测量点能够提高灰分生成特性的测量精度,对稳态工况,测量时间可以增加至 45 min,以增加测量点之间的时间间隔,从而得到更高的测量精度。有数据显示,当时间增加到 45 min 时,多点测量数据经过线性化得到的灰分生成率数据线性扩展到 250 h 后,变差小于 0.05% (灰分绝对含量)。根据 45 min 测量数据等效计算的 250 h 灰分生成率的数据,可以通过机油样品在热重分析仪上的测量结果来验证。也可以用热重分析仪测量的样品来标定灰分生成特性测量设备。

光学灰分浓度测量设备的基本结构包括一套和发动机连接的机油循环装置,如图 2 所示。发动机运行时,机油被采集到测量设备中,完成测量后再返回到发动机油底壳中,该设备能产生 0.5 ~ 20 μm 的红外光,光束通过连续采样的机油,测量到的光强变化和机油中灰分的含量有对应关系,通过计算机分析,可以实时得到机油中灰分含量变化的趋势。这种测量方法中,被测量的机油没有发生任何物理或者化学上的变化,机油完全可以返回发动机重复使用。

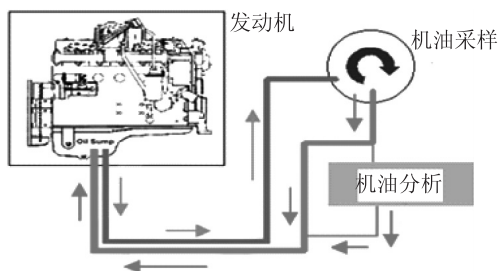


图 2 光学灰分浓度测量原理示意图

2 机油灰分的形成规律

2.1 喷油结束点和机油灰分形成的关系

灰分是在气缸套上形成的,由活塞环刮到曲轴箱中,从而进入机油中。在发动机工作循环中,在燃烧上止点附近,喷油器喷出高压燃油,大部分燃油落到活塞顶面和燃烧室内,而一部分燃油则落在气缸套上,活塞越过上止点后下行,喷油器继续喷油,原来落在活塞顶面的燃油落到气缸套上,这种情况一直发生,直到喷油结束。由于气缸套外壁冷却液的存在,气缸套内壁温度较低,落在气缸套上的燃油不能充分燃烧,从而形成灰分。在发动机的后续循环中,活塞环将灰分带入机油中。研究表明,灰分的形成和喷油器喷油结束点时活塞的位置显著相关,喷油器燃油喷射特性和活塞的位置关系如图 3 所示。

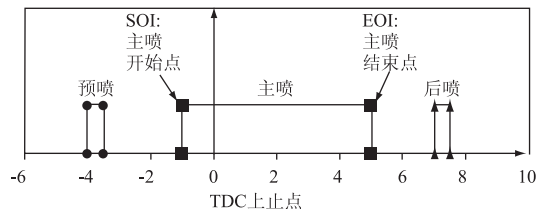


图 3 电控柴油机燃油喷射原理示意图

有两个发展趋势导致灰分成为发动机开发中必须注意的问题。

一个是排放法规对氮氧化物排放要求日益严格。以车用为例,由车用国二阶段要求小于 $7.0 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 严格到车用国三阶段要求小于 $5.0 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 。而氮氧化物的排放量和喷射始点密切相关,为了减少氮氧化物排放量,必须将喷射始点后推(喷油延迟);同时,燃烧效率下降导致要得到同样的功率需要喷射更多的燃油,两个因素叠加,喷射结束点显著延迟。当到车用国四阶段氮氧化物排放要求小于 $3.5 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$,并且采用外置冷却废气再循环技术(EGR)时,同样存在喷射结束点显著延迟的问题,从而增加气缸内灰分的形成,也就增加了灰分进入机油中的机会。这种喷射结束点随排放水平提高而后推的情况仅在发动机只采用机内净化氮氧化物时发生,当发动机带 SCR 后处理系统降低氮氧化物排放时,由于发动机机内净化时氮氧化物排放限制稍低些,机油灰分得到改善。

另一个趋势是发动机扭矩提升。提升发动机扭矩并降低最大扭矩转速,可以为车辆带来燃油经济性的好处。同样的发动机燃烧系统,当要求发动机

发出更高扭矩时每个循环必须喷出更多的燃油，需要更多的时间，在相同或者更低的发动机转速下，喷射结束点也会显著后推。

4.5 L 电控柴油机是一种直列式四缸四冲程直喷式四气门结构，燃烧室设计在活塞顶上，喷油器中置在燃烧室上方，匹配电控高压共轨燃油系统。在满足氮氧化物排放小于 $5.0\text{ (g}\cdot\text{(kW}\cdot\text{h)}^{-1}\text{)}$ 的开发中，得到喷射结束点和灰分的关系，如图 4 所示。由此可见，如果以灰分增加率达到 5% 为标准，发动机喷射结束点在上止点之后 33° ，灰分的增加率开始急剧上升。由于数据的采集没有区分喷射始点、喷油量和喷油压力，因此可以认为是在常用工况范围之内，这些因素都不影响灰分的生成率。

同样可以得到 8.9 L 电控柴油机(直列式六缸，其余同 4.5 L 机)喷射结束点在上止点后 27° ，灰分的增加率开始急剧上升，如图 5 所示。

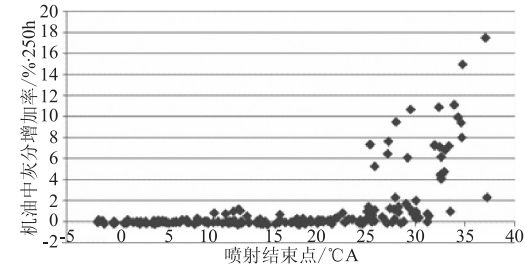


图 4 4.5 L 电控柴油机喷射结束点和灰分关系

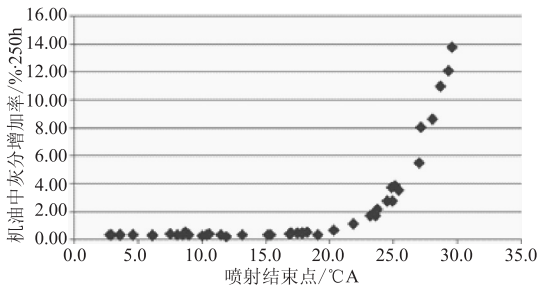


图 5 8.9 L 电控柴油机喷射结束点和灰分关系

2.2 机油灰分生成和喷油器喷油锥角的关系

针对上述 4.5 L 和 8.9 L 两种直列式电控柴油机机型，分析喷油器锥角和发动机结构的关系。通过几何结构计算，寻找 4.5 L 和 8.9 L 电控柴油机灰分生成率的共同点。表 1 是部分发动机结构参数，用来计算发动机在某个曲轴转角时，对应喷油器喷雾轴线在活塞顶面落点的圆半径及其变化率(如图 6 所示)。

油束轴线落点半径计算公式：

$$r_a = (h + h_2 - h_1 - H - (R \cos \alpha + \sqrt{L^2 - (R \sin \alpha)^2})) \cdot \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (1)$$

在曲轴转角 $0^\circ \sim 53^\circ$ 间分析了两个机型燃油喷射结束时落点直径和缸径的比值和比值增加率(图 7)。可以看出，比值的增加率更有相似性。

表 1 发动机结构参数

参数名称	4.5 L 柴油机	8.9 L 柴油机
气缸孔直径 D/mm	107	114
主轴承孔到缸盖顶面距离 h/mm	322.978	362
曲柄半径 R/mm	62	72.25
连杆孔中心距 L/mm	192	216
活塞压缩高度 H/mm	69.385	74.245
喷油器孔锥角 $\beta/(\circ)$	140	142
喷油嘴凸出量 h_1/mm	0.25	0.25
气缸垫安装厚度 h_2/mm	1.5	1.5
燃烧室凹坑口直径 d_k/mm	67.9	80.3
燃烧室节流口直径 d_l/mm	58.1	64.8

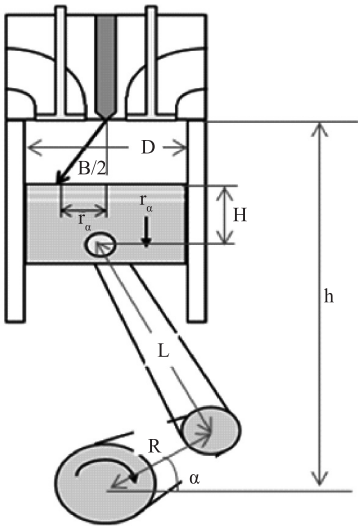


图 6 喷油器喷雾轴线在活塞顶面落点

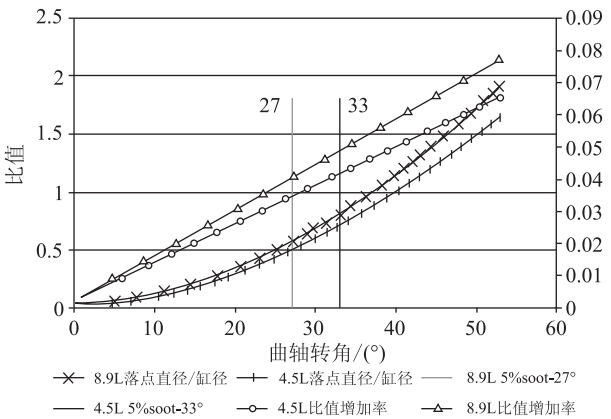


图 7 4.5 L 和 8.9 L 型机燃油油束落点直径和缸径的比值与比值增加率和曲轴转角关系

在考察活塞燃烧室对油束的影响时，继续分析喷射结束时的落点直径和活塞燃烧室凹坑开口直

径、燃烧室节流口直径的比值,结果如图 8 所示。

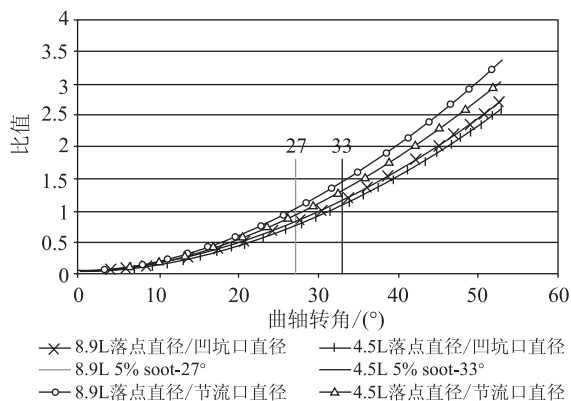


图 8 4.5 L 和 8.9 L 型机燃油束落点直径和活塞燃烧室凹坑开口直径、燃烧室节流口直径的比值和曲轴转角关系

以上图 7 和图 8 中标出了 8.9 L 电控柴油机 5% 灰分生成率点的曲轴转角 27° 和 4.5 L 电控柴油机 5% 灰分生成率点的曲轴转角 33° 的两条直线,这两条直线和对应曲线的相交点数据汇总如表 2 所示。

表 2 机油灰分形成规律比较

参数名称	4.5 L-5% 灰分 -33°	8.9 L-5% 灰分 -27°	比值
落点半径/mm	38.02	32.33	1.176
落点半径增加率	0.041 7	0.040 4	1.032
落点直径/缸径	0.710 6	0.567 3	1.252
落点直径/凹坑口直径	1.119 8	0.805 4	1.390
落点直径/节流口直径	1.308 0	0.998 0	1.310

从表 2 中第四列比值可以发现,两者的共同点在于落点半径增加率,即当落点半径与缸径的比值增加率达到了 0.04%/ (°) 时,两者数据较为一致。而活塞燃烧室开口及其形状的分析没有找到共同点。

这一结论有其合理性,落点半径与缸径的比值增加率表达了动力缸结构的动态特性和油束的流动有直接关系。同时还可以认为,相对于缸径而言,活塞燃烧室对灰分的生成影响不显著,这一点也说明灰分主要是在油束达到气缸壁时形成的。

这一结论也有不够完善的地方,首先喷油器喷孔数量、喷油器流量、喷油压力这三个重要因素没有包括进来,它们直接影响油束的贯穿距离;其次,喷孔锥角和燃烧室会对烟度造成影响,而烟度增加时,燃烧室内燃气会通过活塞环之间的间隙将

灰分带到机油中去,这也是需要考虑的。

2.3 6.7 L 电控柴油机机油灰分生成率改善

6.7 L 电控柴油机是一种直列式六缸四冲程直喷式四气门结构,燃烧室设计在活塞顶上,喷油器中置在燃烧室上方,匹配电控高压共轨燃油系统。在满足氮氧化物排放小于 $4.0 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 的开发中,优化喷油器喷孔张角为 127° 。然后对曲轴转角 $0^\circ \sim 53^\circ$ 做数据分析,结果如图 9 所示。5% 灰分生成率点的曲轴转角延迟到 47° ,即 6.7 L 电控柴油机机油灰分生成率得到改善,优于 4.5 L 电控柴油机的 33° 。

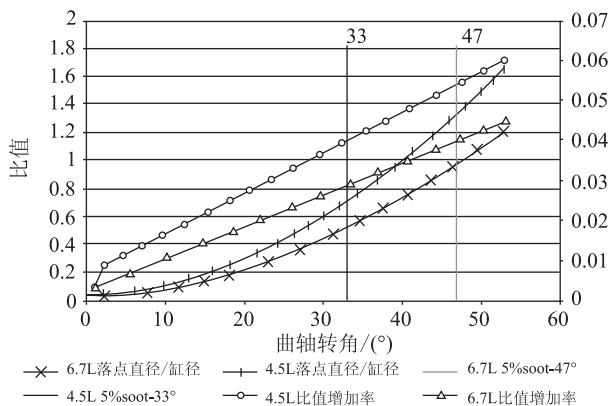


图 9 4.5 L 和 6.7 L 型机燃油束落点直径和缸径的比值及比值增加率和曲轴转角关系

3 结 论

- (1) 机油灰分与喷油结束点关系密切,当喷油结束点超过一定值时,机油灰分增加率急剧上长;
- (2) 活塞燃烧室对机油灰分的生成影响不显著;
- (3) 机油灰分主要是在喷油油束达到气缸壁时形成的;
- (4) 喷油器喷孔张角对机油灰分的生成影响较大。

参考文献

- [1] 张卓,高峻,郑国世,等. 车用电控柴油机润滑油更换里程研究[J]. 汽车科技,2012(5):23-25.
- [2] 杨连生. 内燃机设计[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981.