船用柴油机第一道活塞环岸积碳的微观形貌和孔隙特性的相衬显微 CT 研究

张旭升^{①②}, 彭冠云^①, 杜国浩^①, 江国和^②, 孙秀成^②, 邓彪^①, 谢红兰^①, 吴志军^③, 肖体乔^{①*}

① 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204;

② 上海海事大学商船学院, 上海 201306;

③ 同济大学汽车学院, 上海 201804

* E-mail: tqxiao@sinap.ac.cn

收稿日期: 2014-04-14; 接受日期: 2014-06-23

中国博士后科学基金(批准号: 2013M541571)资助项目

摘要 大型二冲程船用柴油机具有热负荷高、燃用重油、润滑油参与燃烧及其变质、颗粒物排放高等特点, 直接或间接地导致其燃烧室内更为明显的积碳现象, 同时积碳层的构成和特性会显著影响柴油机的输出动力性能和排放特性. 采用我国第三代同步辐射装置—上海光源的 X 射线相衬显微 CT 技术, 对第一道活塞环岸积碳样品进行了三维无损显微成像. 通过定量数字图像处理, 对积碳层的微观特性和孔隙分布特性进行了分析研究. 结果表明, 活塞环上部积碳厚度基本在 1.0 mm 左右, 仅为缸套和活塞间距的一半, 但是其表面形态显示出与缸套强烈的摩擦磨损痕迹, 这说明该部位的积碳会明显破坏缸套的滑油分布. 同时积碳内外表面裂纹密集, 而中部裂纹较疏松, 积碳内外表面的裂纹形成机理存在显著差异. 从孔隙连通性来看, 几乎所有的裂缝都是相通的, 计算得到的总的孔隙率在 10.9%~12.8% 之间. 并且连通的裂纹中存在交汇的孔洞结构, 这些孔隙结构可能对燃气产生吸附和解吸的作用.

关键词

积碳
孔隙特性
同步辐射
相衬显微 CT
船用柴油机

1 引言

船用柴油机燃烧室内少量燃油和润滑油的不完全燃烧及其变质, 在合适的条件下会在燃烧室壁面形成碳化物的堆积, 并且是不可避免的^[1]. 随着积碳层的进一步发展, 将会改变柴油机工作参数(压缩比升高, 缸内温度增加等)和部件的工作性能(喷嘴积碳), 后果直接导致柴油机输出动力性能和排放特性的恶化. 由积碳层引起的绝热效应和压缩比升高, 进

一步可能导致氮氧化物(NO_x)的排放升高^[2]; 积碳层是一种多孔介质, 其对 HC 等有害排放物具有吸附和解吸的作用, 从而会在低压的排气阶段引起 HC 排放的增加^[3]. 同时积碳层表面潜在的高温“热点”, 会引起燃烧过程的提前, 引起敲缸^[4]. 另外积碳会填充缸盖和活塞顶之间的余隙, 也可能造成敲缸现象^[5].

关于柴油机积碳的研究较多集中于燃烧室内部的积碳, 包括活塞顶和缸盖内表面^[6]. 但是在柴油机

引用格式: 张旭升, 彭冠云, 杜国浩, 等. 船用柴油机第一道活塞环岸积碳的微观形貌和孔隙特性的相衬显微 CT 研究. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 953–960
Zhang X S, Peng G Y, Du G H, et al. Investigation on the microstructure and pore characteristics of carbon deposit on the piston top land of marine diesel engine using synchrotron X-ray microtomography (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 953–960, doi: 10.1360/N092014-00126

运行过程中, 活塞环处总是会出现明显的积碳堆积. 活塞环岸(piston top land)的积碳, 会对缸套发生“抛光作用”(bore polishing), 从而导致磨损加剧和滑油消耗增加^[7,8]. 鉴于活塞环岸处的积碳会显著影响柴油机的运行, 所以此处积碳的特性以及积碳的形成过程一直备受科学界和工业界的关注.

早在 20 世纪 80 年代, 有关活塞环处积碳的研究已经发现, 积碳形成机理中关键的影响因素是润滑油的氧化变质, 而金属起到一定的催化作用^[9,10]. Kim 等人^[11]对汽油机和柴油机的第一道活塞环槽处的积碳进行了研究. 对于汽油机来说, 润滑油的氧化和环槽温度是活塞环槽处积碳的主导因素. 但是对于非直喷柴油机来说, 积碳的形成主要取决于滑油中碳颗粒的含量, 同时环槽温度也是关键的影响因素. Diaby 等人^[12]对活塞环槽内部积碳的较新的研究表明, 燃油对积碳的贡献几乎不存在, 此处的积碳主要是由润滑油变质引起的. 同时积碳中存在的金属元素进一步加速了润滑油的变质, 起到了催化剂的作用. 扫描电镜的形态学研究表明, 此处积碳层的表面形貌被抛光并呈现大量的裂缝, 积碳多由 1 μm 以下的颗粒聚集形成的. 除了实验研究外, 仿真模拟的研究表明活塞环组件内部的润滑油蒸汽运动以及活塞环岸缝隙内部的气体流动也会对积碳的形成和碳颗粒的沉积产生影响^[13-15].

从以上的文献回顾可以看出, 针对活塞环处积碳的研究较少, 已有的研究表明, 活塞环处的积碳与润滑油的变质密切相关, 其在活塞缸套间隙内的分布特性则决定了积碳抛光作用的大小. 另外活塞环处积碳的结构组成呈现明显的孔隙分布, 孔隙率的大小则决定了积碳的疏松程度. 同时孔隙的分布也可能存在润滑油的渗吸或燃气吸附的现象, 所以活塞环岸处积碳的形态学研究就具有重要的科学意义和研究价值. 但目前的研究仅限于二维的结构分析, 而且研究报道极少, 并没有针对积碳层的三维微观结构和孔隙特性的研究报道. 近些年来, 同步辐射 X 射线相衬显微断层成像技术已经在很多领域实现了成功应用^[16-18]. 其通过利用 X 射线透过样品后携带的位相信息对样品内部结构进行无损三维成像, 同时空间分辨率已经可以达到亚微米级.

本文正是利用我国上海光源同步辐射 X 射线相衬显微断层成像技术, 对活塞环岸处的积碳样品进行了成像, 借助计算机三维重构软件和图像定量特征

提取, 对积碳层微观特性和孔隙特性进行了分析研究.

2 实验

2.1 积碳样品的获取

积碳样品是从一台大型二冲程低速船用柴油机(6S35ME-B9, MAN B&W)台架上获得的, 此柴油机的部分参数如表 1 所示. 实验前活塞组件表面按照标准程序进行抛光处理. 实验中柴油机运转在额定转速(142 r/min)的 80% 负荷下, 冷却水温度、排气温度等运转参数一切正常, 稳定运转约 100 h. 待柴油机冷却后, 将柴油机缸盖取下, 并把活塞组件吊出. 为了获得完整的积碳样品, 并且不影响积碳的结构, 采用刀片从第一道环上部的积碳边缘缓慢地将大块的积碳整体撬下, 再根据实验的需要制取合适大小的样品.

2.2 相衬显微 CT 实验装置

同步辐射是运动速度接近光速的带电粒子, 在电磁场中偏转时, 沿运动的切线方向发出的一种电磁辐射. 第三代同步辐射光源以其高通量、高亮度、高准直性、优良的脉冲时间结构、准相干、偏振及波长可调等不可替代的优点使得 X 射线成像技术获得了革命性的发展^[19]. X 射线相位衬度成像技术, 是利用 X 射线透过样品后携带的位相信息对样品内部结构成像, 对低 Z 材料仍有较好的衬度. 该技术与 CT 理论相结合, 能获得弱吸收样品内部结构的二维或三维图像, 是研究弱吸收样品的强有力工具^[20]. 上海光源是 1 台高性能的中能第三代同步辐射光源, 可以同时提供高强度、高稳定性的同步辐射光. 其中的 X 射线成像及生物医学应用光束线站(BL13W1)是上海光源首期建成并已向用户开放的 7 条线站之一, 图 1

表 1 柴油机参数

参数	数值
型号	6S35ME-B9 (MAN B&W)
冲程数	2
缸径×行程(mm×mm)	350×1550
气缸数	6
最大持续功率	3570 kW/142 r/min
燃油喷射系统	电控喷射
其他	增压中冷和机械式排气阀

图 1 同步辐射 X 射线同轴相衬显微 CT 实验装置示意图
1, 白光狭缝; 2, 单色器; 3, 单色光狭缝; 4, 电离室; 5, 多自由度转台; 6, 积碳样品; 7, 散射晶体; 8, 透镜; 9, 反射镜; 10, 探测器; 11, 基础平台

所示为此线站的示意图. 表 2 是该光束线站的主要性能指标. 线站采用同轴法, 能实现对低 Z 材料 X 射线相衬成像, 具有亚微米级的空间分辨率. 根据具体实验的要求, 可通过白光狭缝和单色光狭缝来调节束斑尺寸.

2.3 图像采集和处理

实验中显微 CT 数据采集和图像分析在上海光源 BL13W1 光束线站进行. 积碳样品的厚度不超过 2 mm, 样品的长宽控制在探测器的最大测量范围以内. 实验选择的 X 射线能量为 20 keV, 采用 2 倍的镜头和高分辨探测器(2048×2048, pco2000, PCO, AG, Kelheim, Germany), 空间分辨率 3.7 μm , 探测器到样品距离 15 cm. 获取的图像用 PITRE 软件进行切片重构, 三维结构显示选用 Amira 软件进行分析.

2.4 孔隙定量分析

图 2(a)所示为实验中获取的一幅重构的切片图,

图中较亮的方形区域为积碳层, 外部的灰色区域为重构后的背景, 积碳层内部黑色的线条和点即为需要分析的孔隙. 二维处理: 对切片(图 2(a))的外围边界提取, 同时去除样品表面黏附的颗粒, 得到图 2(b). 随后采用局部阈值分割的方法, 将裂纹和孔隙特征进行提取, 得到图 2(c); 三维处理: 采用 ImageJ 软件中 3D Object Counter 模块对所有断层进行连通性计算, 将缝隙和孔洞分离开, 从而进一步获得定量的统计数据.

3 结果与讨论

3.1 积碳三维结构

图 3 所示为重构后的积碳样品的三维立体图和表面结构. 最上方的图为三维结构, 中间图为竖直布置时积碳的前后表面, A 图对应的是左侧面的结构, 简称 A 面; B 图对应的是右侧面的结构, 简称 B 面. 从积碳样品本身的结构以及内外表面的光滑程度, 可以判定 A 面为紧贴活塞表面的面(较为平整、光滑), B 面为面向缸套的面(划痕、凹凸感), 忽略由于积碳磨损导致的厚度不均匀, 积碳层的厚度在 1 mm 左右. 缸套和活塞的设计间隙是 2 mm, 所以由对称性可知, 积碳仅仅填充了间隙的一半. 左侧面的凹凸不平主

表 2 X 射线成像及生物医学应用光束线站的主要性能参数

参数	数值
光束线站	BL13W1
插入件	扭摆器(Wiggler)
光子能量范围	8~72.5 keV
能量分辨率($\Delta E/E$)	不大于 5×10^{-3}
光子通量密度	6×10^{10} phs/(s·mm ²)@20 keV@Si111

图 2 积碳孔隙定量分析的图像处理过程

图 3 积碳样品重构后的三维渲染图

要是由于积碳与缸套间的接触后, 积碳表面部分破碎损失引起的, 这充分表明积碳层在达到间隙的一半厚度之后, 就会与缸套发生紧密的摩擦接触. FURUHAMA 等研究活塞环岸处的间隙对润滑油消耗的影响发现, 活塞—缸套接触面的紧密接触(刮油效应)会显著增加润滑油的消耗^[21]. 所以积碳层的生长会引起活塞缸套间隙减小, 从而加剧“抛光作用”, 最终影响润滑油的消耗. 右侧面紧邻的一些小颗粒, 是由于在取样时部分粉末样品的黏附引起的, 而实际中该面是比较平滑的. 这主要是因为该层相对于活塞基本不运动, 另外积碳的底层可能粘结的较为紧密^[6].

3.2 积碳近壁面微观特性分析

图 4 所示为沿着垂直于积碳 A-B 面, 即活塞半径方向, 从紧邻 A 面和 B 面的区域和中部各取出 1 张切片. 为了比较不同位置处的裂纹密度, 将裂纹封闭围成的单元面积进行平均统计. 在 A 面, B 面和中间处的裂纹单元的面积分别约为 0.009, 0.032 和 0.32 mm², 靠近 A 面处的裂缝密度比靠近 B 面处的大. 而且从变化上看, 靠近 A 面的裂纹逐渐被填充, 然后进一步形成大裂纹. 靠近 B 面的裂纹则主要是从大裂纹主体衍生出小的裂纹. 这充分表明在两个接触面位置, 存在不同的裂纹形成机理.

积碳 A 面的小裂纹位于积碳的底层, 紧贴活塞壁面, 相对摩擦的可能性较小, 其形成方式可能与积碳堆积的初期变化有关. Cheng^[22]的研究发现积碳早期形成的是一种固态的类似液体凝固后的薄膜层, 该膜在温度较低时由燃油或者润滑油蒸汽凝结形成, 随后进一步发生裂解或聚合反应. 另外随着柴油机

图 4 沿活塞半径方向不同位置的积碳结构切片图

的运转时间的增加, 以及活塞积碳的绝热作用, 活塞温度进一步升高, 可能产生一定的膨胀作用, 从而对积碳底层产生挤压的作用, 形成细小的裂纹区域. 随着积碳层的进一步堆积, 小裂纹被填充, 并且在积碳的整个表面近似均匀地发生, 所以很可能与润滑油蒸汽的覆盖有关, 而碳烟的影响可能不大(缸内浓度不均匀). 积碳 B 面直接与缸套进行摩擦接触, 所以该处密集的裂纹分布直接取决于积碳与缸套间的摩擦接触.

3.3 积碳缝隙连通性

图 5 所示为积碳内部缝隙的网络图. 无论是从纵向还是横向来看, 裂纹的分布都是不均匀的. A 面和

图 5 积碳样品中裂纹的连通性分布图

B 面处裂纹分布较为密集, 但是裂纹的宽度相对较小; 而中间区域的裂纹密度较小, 但此处裂纹的宽度较大, 这些都与图 4 中切片的裂纹分布特性相一致. 虽然积碳的 B 面承受作用力, 但是在积碳堆积形成之后, 其裂纹并没有扩展到积碳中部, 仅仅在靠近表面的一定深度内. 同时裂纹向内扩展厚度也基本一致, 在整个表面分布比较均匀, 这表明可能存在一个积碳摩擦破碎和重新形成的平衡过程, 这与润滑油的氧化变质密不可分. 另外裂纹扩展的有限深度也表明积碳中部应该更加密实, 能承受较强的作用力, 不宜破碎, 这与中部裂纹的分布密度较小也是相吻合的.

图 6 所示为积碳样品的一个切片, 经过阈值分割后的孔隙分布图(图 6(a))和经过连通性计算后得到的裂缝分布图(图 6(b)). 从中可以看出, 切片上除了大裂纹外, 其他还有许多不连续的裂纹, 在 3D 中显示是连通的. 这充分表明从 2D 切片中展示的结构连通性是不完整的, 需要从 3D 的结构来计算.

图 7(a)所示为在积碳样品中获得的孔洞结构, 即若干条红色裂缝汇交的区域. 紫色所示的不规则的三维形状即为将孔洞结构附近区域单独提取出来得到的表面结构图, 可以明显区分出来缝隙和孔洞区域. 此类孔洞属于连通性的孔洞, 空间尺度较大, 但数量较少. 而图 6 中所示的分散分布的孔洞, 则属于非连通性孔洞, 一般空间尺度较小, 数量较多. 图 7(b)所示为在距离 A 面 0.05, 0.5 和 0.85 mm 左右位置的切割图片, 可以看出积碳中的孔洞主要分布在靠近 B 面的一侧(0.85 mm 处), 这表明孔洞形成的原因除了可能的燃气中碳烟的沉积和磨损金属的堆积^[23]

图 6 积碳切片中裂纹的连通性

之外, 还可能是表层磨损脱落后形成的凹坑重新被覆盖和不完全填充形成的.

3.4 积碳内部的孔隙率分析

积碳样品结构的研究结果表明了内部显著的孔隙分布, 进一步借助图像定量特征提取的方法可以获得孔隙分布的定量结果. 样品中的缝隙率定义为连通缝隙的体积与样品总体积之比; 孔洞率为所有孤立孔洞的体积与样品总体积之比. 表 3 所示为不同积碳样品的孔隙率. 其中样品 1 和样品 2 对应的是同一气缸中的不同样品, 样品 3 对应的是不同气缸的样品. 从目前的统计结果可以得出, 活塞环岸处积碳样品中, 连通的缝隙约占体积的 9.6%~11.3%, 孔洞约占总体积的 1.3%~1.7%, 总的孔隙率在 10.9%~12.8%, 其中连通的缝隙是孔隙的主要组成部分. 通过不同气缸中的积碳样品的孔隙率比较, 可以发现船用柴油机稳定运转状态下, 孔隙率的大小比较接近, 从某种程度上也表明积碳在不同气缸中的形成过程也具有相似性.

4 讨论

国内外有关柴油机积碳结构的研究多集中于燃烧室积碳, 结果表明积碳的微观结构呈现多孔介质属性^[24,25], 而且其孔径的尺度基本都在纳米水平, 因此具有较大的比表面积, 其对废气的吸附解吸作用非常明显. 而活塞环槽积碳的结构研究显示, 聚集物的尺寸在微米级别, 但是仅仅限于二维的图片分析^[12]. 另外针对不同燃烧源的积碳物质的研究发现, 除了存在大量的微孔结构外, 微孔结构的体积与积碳的 C/H 比呈线性关系^[26], 这表明微孔结构与含碳物质的冷凝吸附密切相关, 积碳的结构与其堆积过程和化学组成是密不可分的.

关于积碳成分的研究表明, 活塞环岸与燃烧室积碳的化学组成存在明显的差异. 国外的研究发现燃烧室积碳的成分以 C, H, O 为主, 并且含有一些润

表 3 不同积碳样品的孔隙率

积碳样品	缝隙率(%)	孔洞率(%)
1	9.6	1.3
2	11.3	1.5
3	9.8	1.7

图 7 积碳样品中的连通性孔洞结构

滑油添加剂的金属成分, 而且颜色一般呈黄灰色, 主要贡献源来自于燃油^[27]; 而活塞环岸附近活塞环槽处的积碳, 目前的研究表明其主要成分也是碳, 并且含有明显的润滑油添加剂中的金属成分和活塞环、缸套的磨损金属成分, 而且颜色一般为黑色, 其主要的贡献目前认为是润滑油的氧化变质^[12]。

另一方面从参与积碳堆积过程的物质来看, 燃烧室内的积碳与燃烧形成的碳颗粒以及高沸点燃烧产物的冷凝吸附相关, 同时燃烧过程形成的固态颗粒可以小到 2 nm, 聚合凝并后可以到 20~70 nm^[28], 所以其尺度应该在纳米量级。对于活塞环岸处的积碳来讲, 碳烟和润滑油蒸汽的冷凝吸附在积碳初期可能较为重要, 后期当积碳形成一定厚度后, 未完全燃烧的燃气在活塞和缸套的间隙内被节流, 从而进入活塞环岸的废气量减少, 所以碳烟颗粒的沉积逐步减弱。但是积碳却能与缸套上的润滑油直接接触, 所以润滑油的氧化变质应该是主要的贡献源。另外, 缸套表面的磨损金属也始终与积碳接触, 而摩擦金属颗粒的大小尺寸约在 4~45 μm 范围内(<http://www.cashmanequipment.com/bently/publications/appnotes/ap->

p19php), 小尺度的金属颗粒很可能就积累在积碳中, 成为积碳结构的一部分。另外, 与碳烟在活塞环岸处的沉积时间相比, 磨损金属颗粒与积碳的接触时间更长, 尤其是长行程的船用柴油机, 所以积碳结构堆积贡献中金属磨粒的影响也不容忽视, 这也与其化学组成中存在大量的金属成分(Fe, Cu 等)是一致的^[29]。同时, 金属作为润滑油的氧化催化剂, 反过来又加速润滑油的氧化变质, 外加缸套与活塞间的挤压作用, 可能会导致积碳结构进一步致密, 但是是否存在积碳层孔隙与金属成分间的关系, 还有待进一步证实。

由于积碳样品中存在的孔隙可能会在柴油机气缸内压力较高时吸附不完全燃烧的可溶 HC 等废气成分, 随后在排气过程的低压环境中解吸出来, 最终会影响废气的排放^[4]。如果燃烧室内积碳的研究结论对于活塞环岸的积碳也适用的话, 那么除了目前本文发现的微米级的大孔隙外, 还可能在没有观察到的更细微的孔隙, 从而形成更加致密的缝隙网络, 进一步增加燃气吸附的可能性, 所以从更小的空间尺度对活塞环岸处的积碳进行研究仍是需要的。另外, 积碳的堆积反过来会填充部分活塞与缸套间隙, 减

小间隙的宽度,又有可能使 HC 排放降低^[30]. 所以针对活塞环岸积碳对 HC 排放的影响也有待进一步评估.

5 结论

本文采用上海光源的同步辐射 X 射线相衬显微 CT 技术对大型船用二冲程柴油机的活塞环岸处积碳的微观结构和孔隙分布特性进行了定量分析研究. 结果表明,同步辐射 X 射线相衬显微 CT 技术可以实现对船用柴油机积碳样品中微观结构的无损测量. 基于三维结构测量得到的积碳的平均厚度在 1 mm 左右,部分充满活塞和缸套的间隙,明显存在的表面划痕证实了对润滑油的“抛光作用”. 切片的微观结构显示裂纹密度在积碳两表面较大,而中部相对较小,

并且两个表面的裂纹分布也存在较大差异. 靠近活塞壁面的积碳层平整,并且裂纹密度最大,与积碳初期的形成过程有关;而靠近缸套壁面的积碳层裂纹的形成与缸套的摩擦有关,呈现显著的刮擦痕迹. 同时两个表面的裂纹向内扩展的尺度是有限的,也表明积碳堆积到一定厚度后,外表面的刮擦作用基本不会对积碳的内部结构产生影响. 基于定量图像处理的积碳裂纹连通性的计算结果表明,裂纹大部分是连通的. 仅仅从二维切片上得到的裂纹连通性是不完全的,必须从三维的角度对积碳内部连通性进行分析. 连通的裂纹占积碳体积的 9.6%~11.3%左右,而孔洞仅仅占 1.3%~1.7%. 并且连通的裂纹中存在交汇的孔洞结构,这些孔隙结构可能对燃气产生吸附和解吸的作用.

参考文献

- Shu G, Dong L, Liang X. A review of experimental studies on deposits in the combustion chambers of internal combustion engines. *Int J Engine Res*, 2012, 13: 357–369
- Studzinski W M, Liiva P M, Choate P J, et al. A computational and experimental study of combustion chamber deposit effects on nox emissions. SAE Paper 932815. 1993
- Haidar H A, Heywood J B. Combustion chamber deposit effects on hydrocarbon emissions from a spark-ignition engine. SAE Paper 972887. 1997
- Heywood J. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1988
- Moore S M. Combustion chamber deposit interference effects in late model vehicles. SAE Paper 940385. 1994
- Kalghatgi G T. Combustion chamber deposits in spark-ignition engines: A literature review. SAE Paper 952443. 1995
- Welsh M. Considerations for Using Low-sulphur Fuel. Winterthur: Wartsila Corporation Ltd, 2002
- Lakshminarayanan P A, Nayak N S. *Critical Component Wear in Heavy Duty Engines*. Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011
- Alizadeh A, Trimm D L. The formation of deposits from oil under conditions pertinent to diesel engine pistons. *J Chem Technol Biot*, 1985, 35: 291–296
- Zerla F N, Moore R A. Evaluation of diesel engine lubricants by micro-oxidation. SAE Paper 890239. 1989
- Kim J S, Min B S, Lee D S, et al. The characteristics of carbon deposit formation in piston top ring groove of gasoline and diesel engine. SAE Paper 980526. 1998
- Diaby M, Sablier M, Negrate A L, et al. Understanding carbonaceous deposit formation resulting from engine oil degradation. *Carbon*, 2009, 47: 355–366
- Ra Y, Reitz R D, Jarrett M W, et al. Effects of piston crevice flows and lubricant oil vaporization on diesel engine deposits. SAE Paper 2006-01-1149. 2006
- Shell P J B. Relationship between oil consumption, deposit formation and piston ring motion for single-cylinder diesel engines. SAE Paper 920089. 1992
- Tan S M, Ng H K, Gan S. Computational study of crevice soot entrainment in a diesel engine. *Appl Energy*, 2013, 102: 898–907
- 殷宗军, 朱茂炎, 肖体乔. 同步辐射 X 射线相衬显微 CT 在古生物学中的应用. *物理*, 2009, 38: 504–510
- 薛艳玲, 肖体乔, 吴立宏, 等. 利用 X 射线相衬显微研究野山参的特征结构. *物理学报*, 2010, 59: 5496–5507
- 彭冠云, 王玉荣, 任海青, 等. 基于同步辐射 X 射线相衬显微 CT 技术的竹木复合材料胶合界面特征研究. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33: 829–833
- 谢红兰, 邓彪, 杜国浩, 等. 上海光源先进成像技术及应用. *现代物理知识*, 2010, 22: 42–50
- 陈荣昌, 杜国浩, 谢红兰, 等. 上海光源 X 射线成像实验站相位衬度 CT 初步结果. *核技术*, 2009, 32: 241–245

- 21 Furuhashi S, Hiruma M, Enomoto Y. Effect of enlarged piston top-land clearance on loc. Bull JSME, 1986, 29: 2576–2584
- 22 Cheng S S. A micrographic study of deposit formation processes in a combustion chamber. SAE Paper 962008. 1996
- 23 Wiedenhofer J F, Reitz R D. Multidimensional modeling of the effects of radiation and soot deposition in heavy-duty diesel engines. SAE Paper 2003-01-0560. 2003
- 24 Zerda T W, Yuan X, Moore S M, et al. Surface area, pore size distribution and microstructure of combustion engine deposits. Carbon, 1999, 37: 1999–2009
- 25 Zerda T W, Yuan X, Moore S M. Effects of fuel additives on the microstructure of combustion engine deposits. Carbon, 2001, 39: 1589–1597
- 26 Rockne K J, Taghon G L, Kosson D S. Pore structure of soot deposits from several combustion sources. Chemosphere, 2000, 41: 1125–1135
- 27 Ebert L B. Chemistry of Engine Combustion Deposits. New York: Plenum Press, 1985
- 28 Tree D R, Svensson K I. Soot processes in compression ignition engines. Prog Energ Combust, 2007, 33: 272–309
- 29 Singh S K, Agarwal A K, Sharma M, et al. Experimental investigation of the effect of exhaust gas recirculation on lubricating oil degradation and wear of a compression ignition engine. J Eng Gas Turbines Power, 2006, 128: 921–927
- 30 Alkidas A C. Combustion-chamber crevices: The major source of engine-out hydrocarbon emissions under fully warmed conditions. Prog Energ Combust, 1999, 25: 253–273

Investigation on the microstructure and pore characteristics of carbon deposit on the piston top land of marine diesel engine using synchrotron X-ray microtomography

ZHANG XuSheng^{1,2}, PENG GuanYun¹, DU GuoHao¹, JIANG GuoHe², SUN XiuCheng²,
DENG Biao¹, XIE HongLan¹, WU ZhiJun³ & XIAO TiQiao¹

¹ Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;

² Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

³ School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China

It is of significance that massive carbon deposit (CD) is observed in the combustion chamber of large-scale two-stroke marine diesel engine due to high thermal load, poor fuel quality, oil degradation and combustion and high particle emission. The structure and characteristics of CD have great influence on the engine performance and emissions. In this paper, we use synchrotron X-ray microtomography of Shanghai Synchrotron Radiation Facility to visualize the three dimensional structure of CD on the piston top land. Based on the quantitative image analysis, microstructure and pore characteristics of CD are investigated. The results show the CD thickness is around 1mm, half of clearance between cylinder liner and piston. However, the surface structure shows significant friction scratches, which suggests the oil film could be destroyed by the CD. The results of crackle distribution show that intensive crackle is located on the CD surface (inner and outer surfaces), while loosen crackle is found inside the CD. This implies that the crackle formation mechanism is different on the inner and outer surfaces. The analysis of pore connectivity indicated that most of cracks are connected, and the porosity is in the range between 10.9% and 12.8% in present experiments. In addition, small hole connected by cracks and the crackle could have impact on the absorption and desorption of unburnt emissions.

carbon deposit, porosity, synchrotron radiation, X-ray microtomography, marine diesel engine

doi: 10.1360/N092014-00126