

DOI: 10.3901/JME.2017.05.069

再制造发动机积碳形成机理研究*

王 兴^{1,2} 贾秀杰^{1,2} 李方义^{1,2} 杨明斌^{1,2} 张 健^{1,2} 孙一航^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院 济南 250061;

2. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室 济南 250061)

摘要: 针对汽车发动机再制造过程中积碳清洗方法效率低,质量差的问题,从微观角度对积碳形成过程进行分析,从而针对其特点探究合适的清洗方法。通过扫描电镜对积碳的表面和剖面形貌进行观察,分析积碳的分层结构特点和积碳粒子结合的结构特点;利用红外光谱和拉曼光谱对积碳中粒子结合键能进行分析;同时结合能谱分析积碳的组成成分。并且对积碳形成过程中的化学反应和粘附过程进行分析,进而通过熔盐清洗积碳的试验过程,进一步对积碳的形成过程进行验证说明。从微观角度分析了积碳形成的主要过程,得出了积碳形成过程中积碳颗粒的形成原因以及积碳颗粒在高温高压下的成长过程,进而阐述了胶质层和沥青质层的形成过程,并对积碳较难清洗的原因进行了分析,对于合适清洗方法的选择提供了依据。

关键词: 积碳;微观形貌;光谱分析;能谱分析;形成机理

中图分类号: TG154

The Research on Formation Mechanism of Carbon Deposition in Remanufacturing Engines

WANG Xing^{1,2} JIA Xiujie^{1,2} LI Fangyi^{1,2} YANG Mingbin^{1,2} ZHANG Jian^{1,2} SUN Yihang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061;

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: The cleaning method of carbon deposition has the shortcoming of low efficiency and poor quality in the remanufacturing cleaning of the automobile engine. In order to solve the problem, the forming process of carbon deposition is analyzed from microscopic aspect, to explore the suitable cleaning method based on its feature. The morphology of the surface and section of the carbon deposition is observed by scanning electron microscopy, to analyze its hierarchical structure and carbon particles combination features. The characteristic of particles' bond energy is analyzed by using Infrared spectrum and Raman spectra. And combined with spectrum analyzes the composition of carbon deposition, to verify the chemical reaction and adhesion process in the formation process of the carbon deposition. And the formation process of carbon deposition is confirmed furtherly through the molten salt cleaning process experiment of carbon deposition. The main formation process of carbon is analyzed from microscopic aspect, it is concluded the forming reason and forming process in high temperature and pressure of carbon deposition particles, and the formation process of colloid and asphalt layer are stated, and the difficult cleaned reason of carbon is analyzed, to provide a selection basis for the appropriate cleaning method.

Key words: carbon deposition; morphology; spectra analysis; spectra analysis; formation mechanism

0 前言

在发动机的再制造过程中,零部件的清洗占据了重要的地位,是进行再制造检测和修复的前提。作为发动机再制造清洗的重点和难点,积碳成分复

杂,分布范围较广^[1-2],由于缺乏针对再制造清洗的积碳研究工作,现采用的积碳清洗方法存在清洗时间长、劳动强度大,清理不彻底等问题,因此需要根据清洗要求对积碳进行深入研究。

目前,国内外对积碳已开展了相应的研究工作,张正芳等^[3]对积碳在发动机使用过程中的危害进行了描述^[4-6],强调了发动机使用过程中预防积碳产生的必要性;需要根据积碳形成过程中的影响因素,进行针对性的预防,何洁等^[7]首先对积碳的成

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划,2011CB013400)和国家自然科学基金(51375278)资助项目。20160711 收到初稿,20161010 收到修改稿

因进行分析,从发动机结构和使用情况进行分析;进而研究了各个影响因素的作用^[8],总结了润滑油的质量^[9-10]、喷油器的热浸、发动机的运行工况等因素^[11]的作用;从而根据各个因素的特点提出了预防措施^[12-13];以上研究工作主要是从宏观的角度进行的,对积碳进行更加细致的研究还需要从微观角度进行分析,所以,张宏洲等^[14]利用微观分析方法研究了积碳的成分和微观形貌^[15],从微观角度验证了积碳的主要来源^[16-17]及积碳形成过程中的影响因素^[18]。现有的研究工作已取得了一定的成果,但是再制造发动机对清洗的质量要求很高,需要达到新品的标准,积碳作为发动机再制造清洗过程中的难点,对其进行高质量的清洗需要对积碳组成成分的化学性质和结合特点进行了解,因此文中分别通过形貌观察、光谱分析、能谱分析手段从化学组成和黏附过程研究积碳形成过程,并通过清洗过程进行了反向验证,从而根据这些特点选择适合积碳清洗的高效、高质量方法。

1 积碳微观成分分析

1.1 微观形貌分析

气门杆在使用的过程中不断地做往返运动,下半部分处于高温高压环境中,所以,通过图 1 可以看出,气门杆表面的积碳主要集中在气门杆的端面

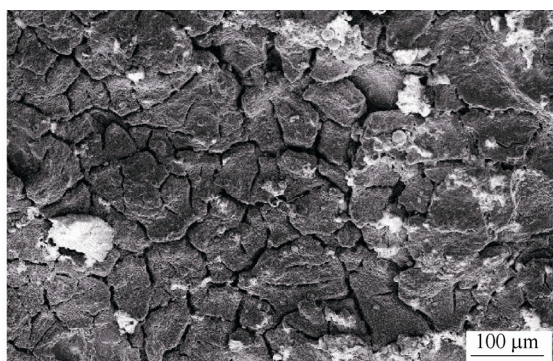
和杆部的下部,呈黑褐色粘稠状,致密无规则地分布在表面。



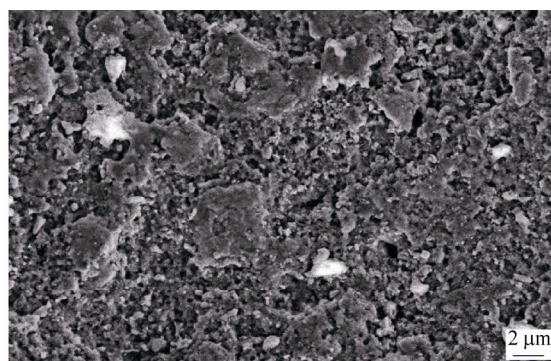
图 1 气门与气缸上的积碳

在不同的放大倍数下观察积碳表面的微观形貌,可以清晰地看出积碳以黑色块状结构为主。在 150 倍的放大倍数下能够观察到积碳表面分布大量的裂纹,以块状结构拼接在一起,尺寸从 20~100 μm 不等。如图 2a 所示,在块状结构及积碳上,仔细观察可以发现其表面凹凸不平,并分布大量小裂纹,表面以零星分布着不规则形状的白色发亮固体,尺寸从 10~100 μm 不等,分布不均匀,结合扫描电子显微镜成像原理可知白色固体主要是金属颗粒。

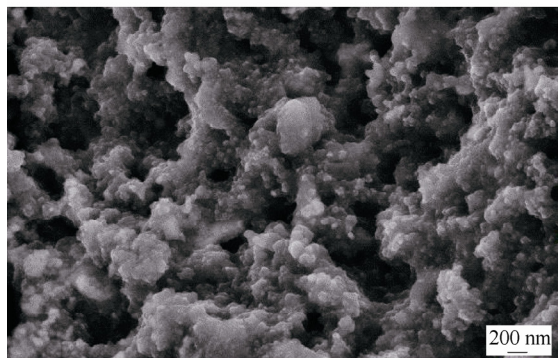
通过进一步地放大,在 3 000 倍下观察微观表面形貌,如图 2b 所示,通过图像可以清楚地看出积碳表面分布着凹坑,均匀地布满表面,但是白色颗粒的分布量减少,且尺寸比凹坑大得多,由此可知



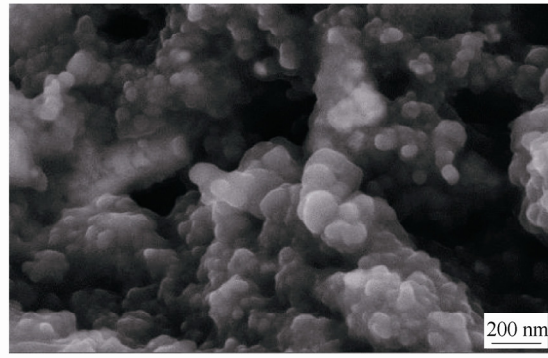
(a) 150 倍积碳形貌



(b) 3 000 倍积碳形貌



(c) 20 000 倍积碳形貌



(d) 50 000 倍积碳形貌

图 2 积碳的微观形貌

在积碳表面分布的金属颗粒尺寸较大,最小的也以微米级存在,大的可达 10^{-1} 毫米级,由此可知积碳表面分布的金属颗粒都以颗粒状存在,可推测金属颗粒是由发动机工作过程中磨损产生。

进一步放大到20 000倍时,通过图2c可以清楚地看到积碳表面的凹坑,尺寸由200~800 nm不等,通过图2d还可以清楚地看到积碳颗粒,尺寸在10~100 nm之间,其互相镶嵌的形态也可以清楚地观察到,可以发现积碳颗粒在表面无规则地堆积在一起,在5 000倍下观察剖面,如图3所示,也可以发现在表面积碳颗粒之间无规则状的、互相镶嵌堆积在一起,在积碳内部也分布有大量的缝隙和孔洞,同表面观察到的凹坑现象一致。由于积碳颗粒的形状各异,且分布无规则,随机在表面沉积镶嵌的过程中就会出现间隙,从而形成凹坑和缝隙。

使用线切割的方法对气门杆进行加工,对切割后的剖面进行观察,为保证积碳表面的完整性,在加工前使用高度尺对积碳进行划线,进一步在5 000倍数下进行观察,如图3所示,积碳呈分层结构,主要包括与基体连接的沥青质层和表面的胶质层,可以清楚地观察到积碳两部分的形貌差异。沥青质层致密紧实,直接与基体表面镶嵌在一起,可以明显地看到与基体连接的分界面,仔细观察可以看到,沥青质层到胶质层逐渐变得稀疏,可以看见两者之间的分界线,但是并不十分明显;胶质层的结构与观察到的表面形貌完全一致,以疏松多孔的结构镶嵌在沥青质层表面。沥青质层致密紧实粘结在基体表面,其形态介于基体与胶质层之间,更接近基体,由此可见沥青质层的紧实程度,可以明显看出沥青质层与基体之间的分界线,两者的结合很紧密,以机械结合方式进行粘结,通过剖面观察发现沥青质层与胶质层之间无明显分界线,只是结合程度不同,因此可推测沥青质层应该是由胶质层在高温高压的环境下压缩紧实而成。

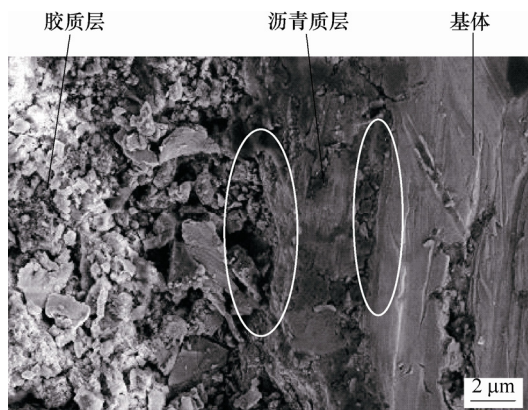


图3 积碳的分层结构

通过对积碳进行表征分析,可以看出积碳表面凹凸不平,由一系列无规则的积碳颗粒互相堆积镶嵌形成,存在许多无规则的凹坑和孔洞,增加了污物的附着机会和捕获能力;并且在积碳的表面分布着许多金属颗粒,来自于发动机运行过程中磨损产生的颗粒。通过剖面的观察发现了沥青质层和胶质层形貌的异同,推测两者之间转化的条件,进而可以分析出积碳清洗过程中的难点主要集中在沥青质层。由积碳的形貌特征分析可知积碳层的厚度较大,一般可达到20~50 μm。

1.2 积碳光谱分析

通过积碳的红外光谱分析可知,积碳化学键分布在 $1\ 700\sim 1\ 350\text{ cm}^{-1}$ 双键区和 $3\ 000\sim 2\ 800\text{ cm}^{-1}$ 氢键区,如图4所示,主要集中在双键区,在特征频率区中其键能最高,通过双键结合的分子稳定性较高;通过拉曼光谱分析可知,积碳的拉曼图谱分布在 $1\ 040\sim 1\ 070\text{ cm}^{-1}$ 和 168 cm^{-1} 附近区域,如图5所示,通过对图谱分析可知,在积碳中结合键分

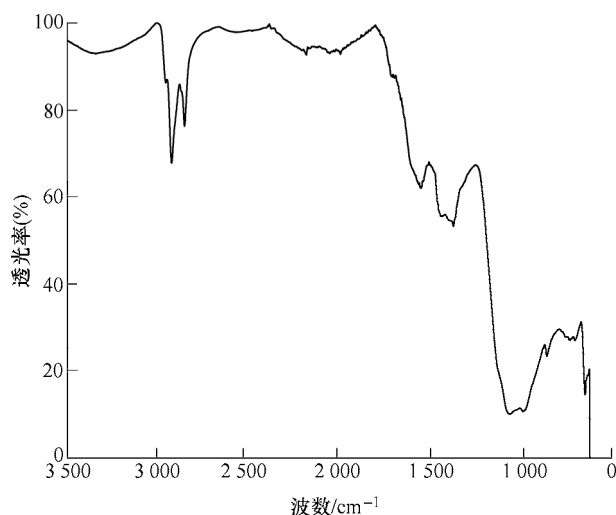


图4 积碳红外分析图谱

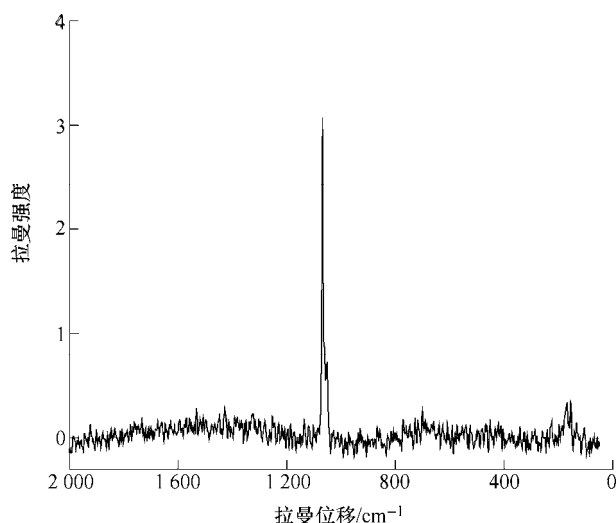


图5 积碳拉曼分析图谱

布范围较广,验证了剖面图中的沥青质层和胶质层形貌不同,双键应该主要是在沥青质层中分布,氢键主要是胶质层中的结合方式;同时也说明了积碳所含物质复杂多样。从积碳的拉曼图谱中可以看出含有 R-S(O)-R 基团和 CH₄ 的卤族取代物,这说明在积碳形成时存在有机物的反应过程。

图谱分析中根据结合化学键的分布特点,验证了胶质层和沥青质层形貌的不同,是结合强度的一种外在表现;同时,积碳中化学键的分布范围较广,结合拉曼图谱中基团可以分析出积碳形成过程中存在有机化学反应,进而形成了复杂多样的物质。

1.3 积碳元素分析

通过图 6 中积碳元素分布情况可知,积碳中元素种类较多,但含量不均匀。O 元素和 C 元素在积碳组分中占据了很大比重,比例均高达 40%以上,其中 C 的含量相对较高,由于发动机燃油由不同的碳氢化合物混合组成,结合光谱图分析出积碳的化学键集中在氢键区,由此可见,在积碳的形成过程中主要发生碳氢化合物的氧化;Fe 元素的含量也相对较高,由此可见,积碳表面的金属小颗粒的确是由发动机运行过程中磨损产生的,含有的其他元素是由于润滑油、抗氧化剂的使用产生的。

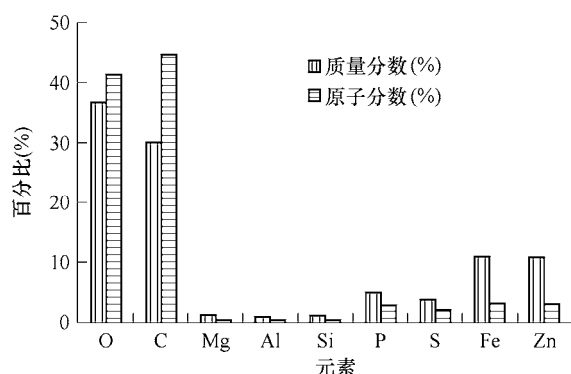


图 6 积碳所含元素及其质量百分比

通过对积碳中成分分析可知,在积碳的形成过程中主要发生氧化反应,其中碳氢化合物的氧化是主要反应,其中金属颗粒可以催化反应进行。

2 积碳形成机理分析

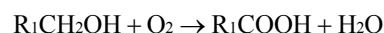
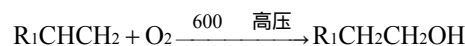
通过积碳的微观形貌以及化学成分的分析可以了解积碳组成成分,以及积碳形成的来源物,分别结合上述分析结果将积碳形成的主要机理进行分析,主要从化学反应和黏附过程进行分析。

2.1 积碳形成的化学反应

通过积碳的能谱分析可知,积碳主要是由碳氢化合物的氧化而成,以及润滑油、抗氧化剂在高温

高压的环境中通过金属颗粒的催化形成,通过对光谱图进行分析可以发现,在积碳的光谱图中存在醇、醛、酮、酸中的特征峰,因此可以推测在积碳的形成过程中碳氢化合物的形成过程。

发动机在运行过程中内部环境在不断的变化,重复 300 ~ 500 升温至 1 500 ~ 1 800 的过程,压强也在升温的过程中随即升高至 20 ~ 200 MPa,通过反应物和生成物以及上述反应环境可以对上述过程的反应原理进行总结:



上式中, R₁、R₂ 分别表示 C 链上烃类基团。

R₁CH₂CH₂OH、R₁COOH、R₁COOCH₂R₂、R₂CH₂CH₂OH 这些物质与红外光谱分析得到的物质相吻合,验证了在积碳形成过程中物质的反应过程符合有机物的反应过程。但是,通过在积碳的形貌观察时发现了积碳是由众多的积碳颗粒互相镶嵌形成,通过积碳的形成环境可以知道,积碳颗粒应该是在发动机工作过程中,反应生成的物质不断在表面沉积,在温度和压强逐渐降低的过程中积碳颗粒停止长大形成小颗粒。

2.2 积碳的黏附过程

通过图 3 的观察可以发现积碳与基体表面之间通过机械方式镶嵌在基体表面,也可以清晰地看到积碳颗粒之间的结合,通过分析出的积碳成分及形成时发生的化学反应过程,从微观角度对积碳黏附过程进行分析。发动机运行过程中燃油在燃烧室燃烧,在表面粘结一些燃油,燃油增加了基体表面的粗糙度,从而增加了污染物附着的机会,利于污染物在燃油表面逐渐沉积,在高温高压的条件下,燃油在空气中进行燃烧形成积碳组成物,反应生成的物质不断沉积,当温度和压力突然降低的瞬间,积碳颗粒停止长大,同时,在高温高压的作用下,积碳颗粒不断地被压缩紧实,互相镶嵌结合在一起。通过发动机不断运行,积碳不断在表面积累、压缩、紧实。紧实之后的积碳就形成了沥青质层,没有充分紧实的积碳就是胶质层。在积碳的粘结过程中磨损产生的金属小颗粒通过静电力被吸附到积碳表面,并随积碳的压缩紧实被牢固在积碳结构中。积碳颗粒在长大过程中具有随机性,所以使积碳颗粒形状各异,并且尺寸分布范围也较广,积碳在表面的黏附过程也具有随机性,导致积碳表面凹凸不平 and 较多孔洞。

没有经过压缩和紧实的积碳,在基体的表面只是通过摩擦力、静电力、分子间作用力进行连接,这是个可逆过程,只有通过紧实过程积碳颗粒才能被永久吸附。

通过从微观角度对积碳形成过程进行分析,验证了积碳形成过程中发生的化学反应和黏附过程,同时验证了沥青质层和胶质层形成过程中条件的差异以及转化条件,解释了两者在形貌和键能之间存在差异的原因。

3 积碳结构验证试验

积碳清洗的过程是积碳形成的逆过程,通过对积碳的清洗过程的形貌和元素分析就可以更加充分的验证积碳形成过程。通过对积碳分析,积碳清洗需要提供充足的能量破坏结合键,且需要化学反应对积碳粒子进行破坏去除,通过现有的积碳清洗效果研究工作,结合积碳特点,选取对积碳清洗效果较好的熔盐清洗方法对积碳形成过程进行验证^[19],根据熔盐清洗积碳的数据^[20-22],清洗 1.5 min 后对积碳表面的污物已经进行了部分清除,但是表面还有积碳覆盖,2.5 min 后大部分污物已被清洗掉,但是仍残留有与基体结合的极少部分,清洗 3.5 min 后积碳基本清洗干净可以看到基体的金属光泽,所以分别对积碳清洗 1.5 min, 2.5 min, 3.5 min 时的形貌和元素分布情况进行分析可以验证积碳形成的过程,以及不同分层的结构特点。

3.1 试验设计

本试验对象采用中国重汽生产的达到服役年限的斯泰尔发动机拆解后的气门杆。通过试验探究本文选取 NaNO_3 , KNO_3 , NaNO_2 , NaOH 混合熔盐体系进行清洗,通过 Minitab 软件分析及试验验证,选取以下熔盐配方^[23]: NaNO_3 : KNO_3 : NaNO_2 =5:4:1。根据对基体的保护和反应的需求选取 NaOH 占比 30%,此时,熔盐的熔点相对较低,在 180℃ 以下,有相对较大的比热容; NaNO_2 含量较低,有利于 NO_2 的分解。在此配方下,经济性比较好,同时清洗效率较高。

熔盐配方: NaNO_3 : KNO_3 : NaNO_2 =5:4:1, NaOH 质量分数为 30%。

试验器材:万用电子炉、高温温度计、烘干箱、精密天平。

试验对象:服役期满的气门杆。

试验过程:按照上述配方在万用电子炉上将混合熔盐进行加热,通过高温温度计进行观察,达到

试验温度后将气门杆投到熔盐中,保持恒温(允许温差在 $\pm 10^\circ\text{C}$),将达到清洗时间的气门杆表面的多余熔盐去除,放到干燥箱中进行干燥处理。

3.2 试验现象与分析

在 280℃ 条件下采用上述配方进行试验,分别对气门杆清洗 1.5 min、2.5 min、3.5 min。

图 7 分别是清洗 1.5 min、2.5 min、3.5 min 后积碳的元素分布,通过清洗 3.5 min 后的元素分析也可以看出铁元素的含量占绝大部分,说明基体已经暴露出来,通过形貌图,如图 8 所示,也可以看出基体表面已经完全显露出来,基本看不到积碳残留,说明该方法对积碳的清洗效果较好,可以还原积碳形成过程。由于清洗后采样区域有所不同,使得元素分布会有一定不同,所以,根据元素的含量变化趋势可以验证积碳形成过程。

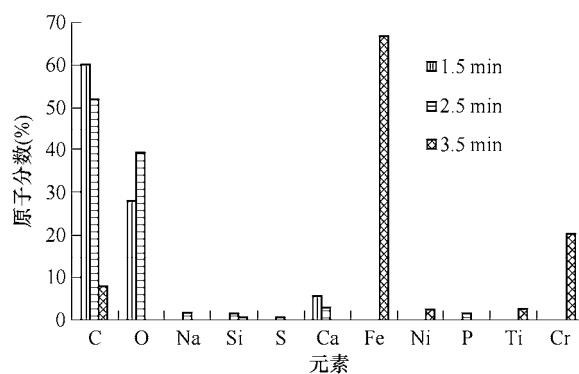


图7 清洗 1.5, 2.5, 3.5 min 后积碳成分

通过图中元素进行分析可知,随着清洗过程的进行氧元素的含量逐渐降低,直至最后消失,但是在清洗过程中可以发现氧元素含量会暂时的增加,这是因为在清洗的过程中高温下暂时氧化造成的,由此可见,积碳中的氧元素主要是在积碳形成过程中氧化过程产生的,验证了积碳形成过程中发生的氧化反应。铁元素含量在清洗的过程中有所下降,这表明在积碳的形成过程中,磨损的金属颗粒在催化反应的同时也会发生部分氧化,并随着积碳的粘附过程进行压缩紧实,但是比例相对较低,因为积碳形成的整个过程都需要金属颗粒的催化作用,大部分金属颗粒需要相对牢固的附着在积碳表面,所以推测金属颗粒应该是以静电力的方式附着在积碳表面进行催化。随着清洗的过程中抗氧化剂和润滑油中成分消失,也证明了在积碳形成过程中这些物质在高温高压下参与了积碳形成的反应。

如图 8 所示,通过对清洗后形貌观察发现,在清洗 1.5 min 后积碳表面还存在积碳颗粒,如图 8a 所示,但是颗粒的粒度小于清洗之前,说明清洗的过程中熔盐和积碳颗粒之间发生反应,进一步的验

证了积碳形成过程中的化学反应过程；通过观察清洗 2.5 min 后的形貌图，如图 8b 和 8e 所示，可以发现积碳表面的粗糙度与之前相比降低很多，说明在

沥青质形成的过程中，压缩紧实的过程将积碳颗粒紧密的压实在了一起，比胶质层的表面更加光滑，这也是沥青质层结合键能更高的原因。

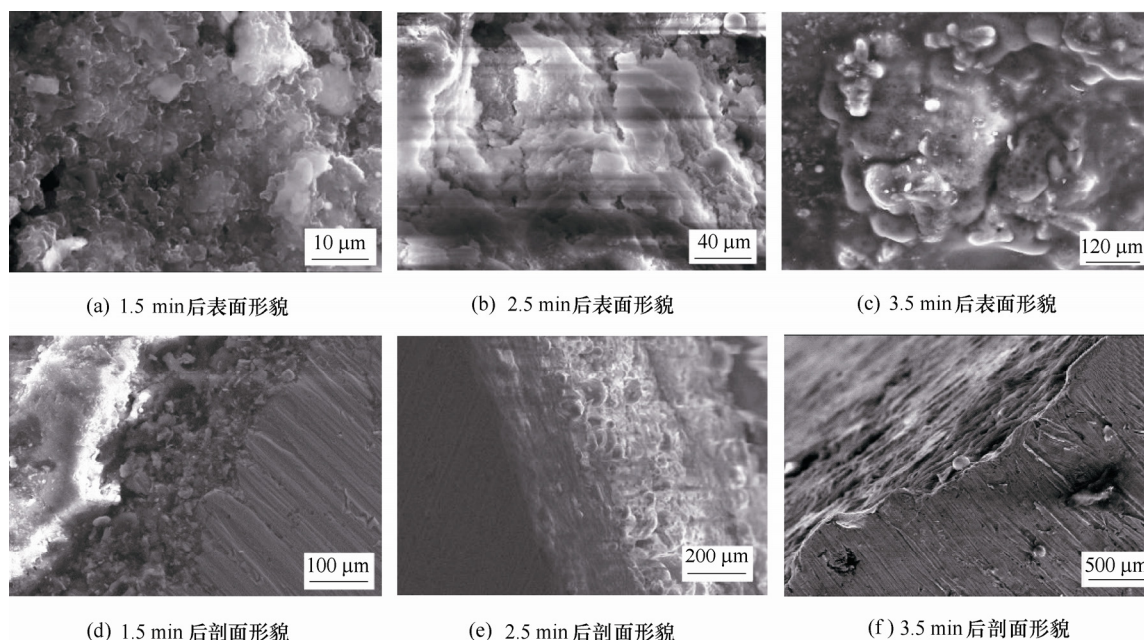


图 8 清洗不同时间后积碳表面和剖面形貌

4 结论

(1) 从微观角度对积碳的形成进行分析，分析出在积碳形成过程中参与反应的主要成分，以及反应的类型，从而明确了积碳组成的特点。

(2) 通过对积碳形貌观察和光谱分析，观察出积碳与基体、胶质层与沥青质层的结合特点，同时观察出积碳表面的形貌特点，分析出积碳结合强度较高的原因，以及清洗过程中的难点。

(3) 通过试验验证了积碳的形成过程，根据积碳的结合特点选择合适的清洗方法，可以对积碳进行高效、高质量的清洗。

参 考 文 献

- [1] 李恩重, 史佩京, 徐滨士, 等. 我国再制造政策法规分析与思考[J]. 机械工程学报, 2015(19): 117-123.
LI Enzhong, SHI Peijing, XU Binshi, et al. Analysis of policies and regulations of china Remanufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015(19): 117-123.
- [2] 姚帅帅, 贾秀杰, 王兴, 等. 发动机气门积碳的熔盐清洗工艺[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 121-126.
YAO Shuaishuai, JIA Xiujie, WANG Xing, et al. Molten salt cleaning process of carbon deposition on engine valve[J]. China Surface Engineering, 2015(04): 121-126.
- [3] 张正芳. 汽车发动机积碳的清理[J]. 四川工业学院学

报, 2002, 21(z1): 64-65.

ZHANG Zhengfang. The cleaning up of unused carbon in automobile engine[J]. Journal of Sichuan University of Science and Technology, 2002, 21(z1): 64-65.

- [4] CACERES D, REISEL J R, SKLYAROV A, et al. Exhaust emission deterioration and combustion chamber deposit composition over the life cycle of small utility engines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2003, 125(1): 3039-3054.
- [5] ZAND A D, BIDHENDI G N, ALIREZA M T, et al. The influence of deposit control additives on exhaust CO and HC emissions from gasoline engines (case study: Tehran) [J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2007, 12(3): 189-194.
- [6] SMITH G C, HOPWOOD A B, TITCHENER K J. Micro characterization of heavy-duty diesel engine piston deposits [J]. Surface & Interface Analysis, 2002, 33(3): 259-268.
- [7] 何杰. 积碳对汽车的影响及其预防方法[J]. 农机使用与维修, 2010(2): 70-71.
HE Jie. The influence of carbon deposition on the car and its prevention methods[J]. Use and Maintenance of Agricultural Machinery, 2010(2): 70-71.
- [8] 张志颖, 杜爱民. 电喷汽油机进气门积碳形成的研究[J]. 交通节能与环保, 2010(1): 39-41.
ZHANG Zhiying, DU Aiming. The research on carbon

- formation of electronic flue gasoline engine inlet valve[J]. Transport Energy Saving and Environmental Protection , 2010(1) : 39-41.
- [9] 董立辉. 润滑油对柴油机颗粒物排放及活塞积碳的影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- DONG Lihui. Effect of lubricating oil on the particles emission and deposits formation in a diesel engine[D]. Tianjin : Tianjin University , 2013.
- [10] DIABY M , SABLIER M , NEGRATE A L , et al. Understanding carbonaceous deposit formation resulting from engine oil degradation[J]. Carbon , 2009 , 47(2) : 355-366.
- [11] 陆军, 姚毅. 柴油发动机积碳的形成与预防[J]. 装备制造技术, 2008(6) : 133-135.
- LU Jun , YAO Yi. Carbon deposition formation of diesel engine and its prevention[J]. Equipment Manufacturing Technology , 2008(6) : 133-135.
- [12] 杨琦. 发动机积碳治理与评价方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- YANG Qi. Research on treatment and assess for carbon deposition in engines[D]. Changchun : Jilin University , 2014.
- [13] 王蕾, 李斌, 高亮. 多点汽油喷射喷油器积碳形成的研究[J]. 汽车技术, 2001(8) : 17-19.
- WANG Lei , LI Bin , GAO Liang. The research on carbon formation of more gasoline injection fuel injector[J]. Automobile Technology , 2001(8) : 17-19.
- [14] 张宏洲, 廖银生, 李传宝. 增压直喷发动机积碳形成机理及对策[J]. 汽车技术, 2013(10) : 30-34.
- ZHANG Hongzhou , LIAO Yinsheng , LI Chuanbao. Generating mechanism of carbon deposit of direct injection engine and countermeasure[J]. Automobile Technology , 2013(10) : 30-34.
- [15] 周建伟, 裴毅强, 张延峰, 等. 直喷汽油机喷油器积碳的特征[J]. 内燃机学报, 2015 , 33(6) : 516-521.
- ZHOU Jianwei , PEI Yiqiang , ZHANG Yanfeng , et al. The characteristics of fuel injector carbon deposition on direct injection gasoline engine[J]. Journal of Internal Combustion Engine , 2015 , 33(6) : 516-521.
- [16] HUSNAWAN M , MASJUKI H H , MAHLIA T M I , et al. Thermal analysis of cylinder head carbon deposits from single cylinder diesel engine fueled by palm oil-diesel fuel emulsions[J]. Applied Energy , 2009 , 86(10) : 2107-2113.
- [17] SINGH S K , AGARWAL A K , SHARMA M. Experimental investigations of heavy metal addition in lubricating oil and soot deposition in an EGR operated engine[J]. Applied Thermal Engineering , 2006 , 26(s 2-3) : 259-266.
- [18] 黄艳斐, 朱岳麟, 熊常健, 等. 航空发动机喷嘴结焦积碳的性质[J]. 北京航空航天大学学报, 2011 , 37(6) : 753-756.
- HUANG Yanfei , ZHU Yuelin , XIONG Changjian , et al. Coking properties of aircraft engines' nozzles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics , 2011 , 37(6) : 753-756.
- [19] 葛顺鑫. 再制造盐浴清洗技术分析与应用[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- GE Shunxin. Analysis and application of remanufacturing salt bath cleaning technology [D]. Jinan : Shandong University , 2014.
- [20] LI J , WU Z. Remanufacturing processes , planning and control[M]// New Frontiers of Multidisciplinary Research in STEAM-H (Science , Technology , Engineering , Agriculture , Mathematics , and Health). Springer International Publishing , 2014 90 : 329-356.
- [21] LONG Y , LI J , TIMMER D H , et al. Modeling and optimization of the molten salt cleaning process[J]. Journal of Cleaner Production , 2014 , 68 : 243-251.
- [22] DIABY M , SABLIER M , NEGRATE A L , et al. Understanding carbonaceous deposit formation resulting from engine oil degradation[J]. Carbon , 2009 , 47(2) : 355-366.
- [23] 聂延艳. 再制造发动机典型污垢的熔盐清洗工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- NIE Yanyan. Research on molten salt washing process of engine typical dirt in remanufacturing [D]. Jinan : Shandong University , 2015.

作者简介: 王兴, 女, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为绿色制造与再制造。

Email : wx1262812261@163.com

贾秀杰(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为绿色制造与再制造。

E-mail : xjjia@sdu.edu.cn