

## 带电粒子薄层活化法用于发动机磨损的在线检测

黄东辉<sup>1</sup>, 王平生<sup>1</sup>, 田伟之<sup>1</sup>, 赵德全<sup>2</sup>, 曹广州<sup>3</sup>, 倪邦发<sup>1</sup>,  
张秀华<sup>1</sup>, 李林<sup>2</sup>, 刘存兄<sup>1</sup>, 张贵英<sup>1</sup>, 李德红<sup>1</sup>

(1. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;

2. 中国铁道科学研究院, 北京 100081; 3. 沧州铁路器材厂, 河北 沧州 061001)

**摘要:** 利用带电粒子薄层活化法, 对一种 ZS1105 型柴油发动机缸套内壁和活塞环镀层的磨损进行了初步检测。实现了在发动机不同运行状态下, 对缸套内壁和活塞环镀层磨损的同时在线测定。在本实验条件下, 基于 300 s 测段本底计数的估计, 本法对汽缸内壁和活塞环镀层的最小测量磨损厚度分别为 9 nm 和 100 nm。

**关键词:** 带电粒子薄层活化; 发动机; 磨损; 在线测定

**中图分类号:** TL816; O657.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7512(2007)04-0219-05

## On-line Wear Measurement of an Engine Using Thin Layer Activation Method With Charged Particles

HUANG Dong-hui<sup>1</sup>, WANG Ping-sheng<sup>1</sup>, TIAN Wei-zhi<sup>1</sup>, ZHAO De-quan<sup>2</sup>, CAO Guang-zhou<sup>3</sup>,  
NI Bang-fa, ZHANG Xiu-hua<sup>1</sup>, LI Lin<sup>2</sup>, LIU Cun-xiong, ZHANG Gui-ying<sup>1</sup>, LI De-hong<sup>1</sup>

(1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-50, Beijing 102413, China;

2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;

3. Cangzhou Railway Equipment Factory, Cangzhou 016001, China)

**Abstract:** Wear of the top compression piston-ring and the cylinder-bore in a ZS1105 diesel engine was simultaneously and on-line measured by using thin layer activation (TLA) method. Under the experimental conditions, the minimum detectable wear thickness was 9 and 100 nm for cylinder-bore and piston-ring in 300 s counting interval, respectively. Some details of the design, operation and experiment results of the wear measurement system are also presented.

**Key words:** thin layer activation; engine; wear; on-line measurement

薄层活化法(Thin Layer Activation, TLA)的基本原理是, 以加速的带电粒子轰击材料表面, 通过核反应生成放射性核素, 经刻度建立起放射性活度与深度的函数关系后, 放射性活度的减低可用于表面层损失厚度的定量测定。

30 多年来, TLA 作为一种高精度高灵敏的

技术, 已广泛用于磨损、腐蚀、溅射等材料表面损失过程的基础和应用研究。TLA 对发动机相关部件磨损的测定<sup>[1-9]</sup> 独具优势, 是一种不可多得的灵敏、高效、在线核分析方法。

柴油发动机的第一道活塞环和缸套内壁是其表面易磨损部件, 对其进行实时的高灵敏度磨

损检测是对柴油机部件改进及进行润滑油系统研发,以及实际运行中防止过度摩擦的关键。而目前相关的文献报道极为稀少和分散<sup>[10]</sup>。本工作拟利用带电粒子薄层活化法,对一种 ZS1105 型柴油发动机缸套内壁和活塞环镀层的磨损进行初步研究,以实现在发动机不同运行状态下,对缸套内壁和活塞环镀层磨损进行同时在线测定。

## 1 实验方法

### 1.1 缸套、活塞环的薄层活化

发动机缸套内壁上死点区域和第一道活塞环的带电粒子活化均在 HI-13 串列加速器实验室三厅左 10 度管道进行。活化反应分别为  $^{56}\text{Fe}(\text{p}, \text{n})^{56}\text{Co}$ ,  $^{52}\text{Cr}(\text{p}, \text{n})^{52}\text{Mn}$ , 入射质子能量  $E = 9 \text{ MeV}$ , 流强  $I = 0.7 \mu\text{A}$ 。缸套和活塞环接受的积分束流分别为 20 和 3 mC, 生成  $^{56}\text{Co}$  和  $^{52}\text{Mn}$  的放射性活度分别约为 750 kBq 和 722 kBq。

缸套内壁和活塞环铬镀层各在两个位置活化,各接受一半束流。

在相同条件下另外活化一套缸套和活塞环,用于刻度。

### 1.2 实验发动机和附属设备

ZS1105 型柴油机(功率为 13.3 kW, 标定转速为 2 200 r/min)、CD10W-40 型润滑油(市售普通型)、WBF7009 型过滤器;山东时风(集团)

有限公司生产;STC 系列三相交流同步发电机;功率 10 kW, 绥化电机机电集团发电设备厂生产;Y904L-4 型三相异步电动机(功率 1.5 kW, 电压 380 V, 转速 1 400 r/min, 电流 3.7 A)、KCB-18.3 齿轮油泵(流量 1.1 m<sup>3</sup>/h, 压力为 1.45 MPa/cm<sup>2</sup>);泊头市齿轮油泵厂;由电流表,电压表及电源、油泵、负载控制开关组成的发动机自制控制面板。

### 1.3 测量系统

测量系统框图示于图 1。系统中润滑油回路中的一个 0.23 L 测量杯置于 HPGe 探测器上。测量油中  $^{56}\text{Co}$  和  $^{52}\text{Mn}$  放射性的 HPGe 伽玛谱仪由相对效率 25%、分辨率 3.0 keV 的 Canberra HPGe 探测器和 Ortec DESPEC-Plus 数字化谱仪组成。

### 1.4 缸套、活塞环磨损的 TLA 法在线实时测定

通过对测量杯中均匀分散于润滑油的气缸壁和活塞环磨损颗粒中的指示核素  $^{56}\text{Co}$  [ $T_{1/2} = 77.23 \text{ d}$ ,  $\gamma$  射线能量 846.8 keV (99.9%)] 和  $^{52}\text{Mn}$  [ $T_{1/2} = 5.59 \text{ d}$ ,  $\gamma$  射线能量 744.2 keV (90.0%)] 的特征全能峰进行连续测定,对不同运行条件下气缸内壁和第一活塞环镀层的磨损进行实时、在线监测研究。

本工作对 5 种运行条件下的磨损进行了实时监测研究:低转速空载 (I);高转速空载 (II);中转速满载 (III);高转速满载 (IV);停机油循环 (V)。相关运行参数列于表 1。

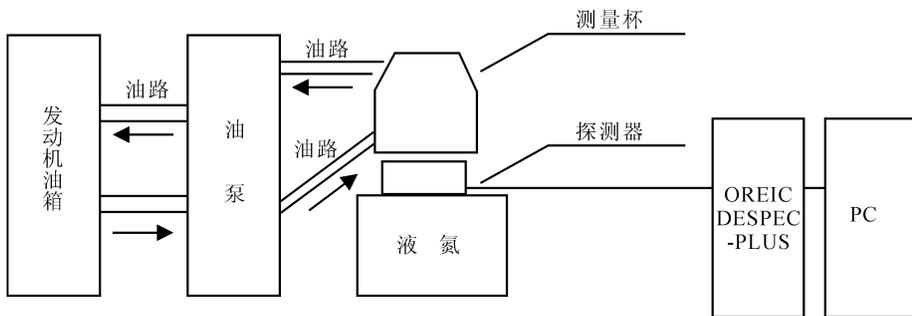


图 1 实验系统框图

表 1 发动机运行参数

运行状态	负载	输出功率/W	U/V	I/A	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	机油温度/℃	冷却水温度/℃
I	0	0	160	0	1 100	57	67
II	0	0	380	0	1 700	62	78
III	满载	4 900	280	17.5	1 460	73	62
IV	满载	3 400	352	16.2	1 700	50	40
V	0	0	0	0	0	50	40

### 1.5 刻度

将各个测段得到的示踪核素<sup>52</sup>Mn 和<sup>56</sup>Co 特征  $\gamma$  射线全能峰计数通过以下步骤转化为相应部件的磨损量:(1)磨损实验前,分别将实验环(和套)与刻度环(和套)在相同几何条件下测量,得出两者总放射性活度比,  $R = A_{exp}/A_{cal}$ ; (2)通过测量油杯和整个润滑系统所盛润滑油的体积,得出两者体积比,  $F = V_{cup}/(V_{cup} + V_{tank})$ ; (3)对刻度环(和套),溶解所有的<sup>52</sup>Mn(和<sup>56</sup>Co)并转至一个和磨损实验相同的测量油杯,并使溶液充满油杯,在和磨损实验相同的测量几何条件下,测定此油杯中的<sup>52</sup>Mn(和<sup>56</sup>Co)的峰计数率,  $C_{tot}'$ ; (4)转化刻度环(和套)的<sup>52</sup>Mn(和<sup>56</sup>Co)峰计数率  $C_{tot}'$  至实验环(和套)相应核素的峰计数率  $C_{tot}$ , 即  $C_{tot} = C_{tot}' \times R$ ; (5)实验条件下,转化各测段测量油杯对应的指示核素<sup>52</sup>Mn(和<sup>56</sup>Co)峰计数率  $C_{int}'$ , 至假定整个润滑系统指示核素均在测量油杯几何条件下的核素的峰计数率  $C_{int}$ , 即  $C_{int} = C_{int}'/F$ ; (6)计算各个测段指示核素的损失份额  $WF$ ,  $WF = C_{int}/C_{tot}$ , 对应的剩余份额为  $RF = 1 - WF$ ; (7)在相同活化条件下建立了铁箔(和不锈钢箔)磨损厚度  $T$  与剩余放射性  $RF$  的刻度函数。利用此刻度函数,由(6)中的  $RF$  得到磨损厚度  $T$ 。

为了对本实验进行质量检验和控制,在与刻度实验相同的辐照条件下,辐照了一个铁块样品和不锈钢块样品。用 10% HNO<sub>3</sub> 进行逐步腐蚀,得到的模拟腐蚀结果;以自制磨床进行逐步

磨损,得到不锈钢(Cr)的模拟磨损结果。

## 2 实验结果

### 2.1 系统刻度

磨损厚度与百分剩余放射性活度的函数由箔叠活化法测定。分别由 Fe 箔叠和不锈钢箔叠得到的 Fe 和 Cr 的磨损厚度与剩余放射性活度的函数曲线示于图 2。根据图 2 函数关系,对 Fe 块样品模拟腐蚀进行 TLA 测量,并与文献计算结果进行比较,结果列于表 2;对不锈钢块模拟磨损样品进行 TLA 测定结果,并与称重法结果进行比较,结果列于表 3。分析表 2 和表 3 结果可知,TLA 薄片刻度曲线所得结果与模拟实验结果以及文献值<sup>[11]</sup>一致(在 5%的不确定度范围内),证明本工作所得刻度函数的可靠性。

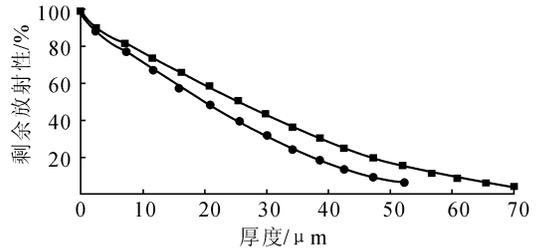


图 2 Fe 和 Cr 的刻度曲线

■——Fe, 847 keV; ●——Cr, 744 keV

### 2.2 各工作条件下发动机环和套的磨损检测

各工作条件下,发动机环和套的磨损曲线分别示于图 3 和图 4。

表 2 铁样品模拟腐蚀的 TLA 结果

剩余放射性/%	实验刻度曲线结果/ $\mu\text{m}$	文献[11]计算结果/ $\mu\text{m}$	偏差/%
100.0	0	0.0	0
96.4	1.85	1.7	4
88.0	6.65	7.1	-5
85.0	8.7	9.2	-5
72.1	15.15	16.8	-5
56.3	25.6	25.5	0
39.2	38.55	38.2	0
27.6	49.2	48.4	1
19.6	58.1	56.5	1
14.0	65.8	63.4	2

表3 不锈钢样品磨损的称重法和 TLA 结果

No	称重法 损失厚度/ $\mu\text{m}$	$^{56}\text{Fe}(n, \gamma) ^{56}\text{Co}$			$^{52}\text{Cr}(n, \gamma) ^{52}\text{Mn}$		
		$^{56}\text{Co}$ 剩余放射性	TLA 损失厚度/ $\mu\text{m}$	偏差/%	$^{52}\text{Mn}$ 剩余放射性	TLA 损失厚度/ $\mu\text{m}$	偏差/%
1	0.000	100.00	0.00	0.00	100.00	0	0.00
2	22.413	57.42	21.35	4.74	48.90	21.31	4.92
3	33.074	39.93	31.92	3.49	29.56	32.25	2.49
4	40.671	26.86	41.92	-3.07	15.83	41.54	-2.14
5	49.189	19.10	48.98	0.42	8.77	48.81	0.77
6	55.315	10.85	57.31	-3.61	3.57	56.69	-2.49

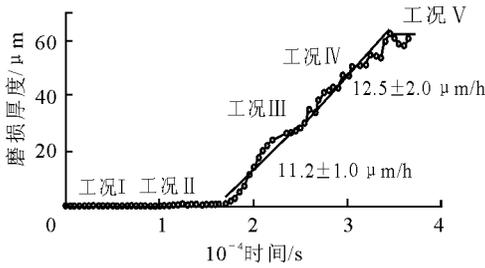


图3 活塞环磨损曲线

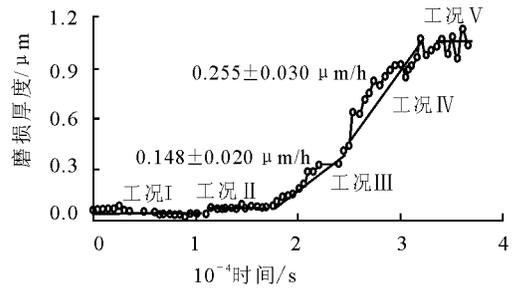


图4 缸套磨损曲线

### 3 讨论

两个活化反应使用的入射质子能量均为 9 MeV。该能量可使 90% 以上的生成放射性核素分布在感兴趣的厚度范围内 (80~100  $\mu\text{m}$ )，且对串列加速器，这也是方便调束的能量。在尽量减少加速器运行时间 (使用较大束流) 的同时保证材料的完好性 (使用较小束流) 这两个互相矛盾的方面，选择了 0.7  $\mu\text{A}$  的束流。这样既避免了由于束流过大可能导致的材料表面损伤，又不至使用太长的用机时间。

本法的关键前提是，磨损颗粒均匀分布在润滑油中。为了保证此前提，本工作使用了高速油泵，使润滑油 10 s 完成一次循环。此外，为确保油循环过程中在测量杯的任何部分无“死区”，采用了平底杯，而非 Schneider<sup>[10]</sup> 使用的钟形杯，尽管此操作会使立体角有一定损失。

由图 3 和图 4 可以看出，发动机在实验所用的有载运行条件下，活塞环比缸套磨损速率约快 50~70 倍。在本实验条件下，基于感兴趣区本底计算，缸套内壁和活塞环磨损的探测限分别为 9 和 100 nm。停机后的测量表明，过滤器上残留的  $^{56}\text{Co}$  和  $^{52}\text{Mn}$  对本实验的影响可以忽略不计。

工况 I (低转速空载) 中，缸套有微小的启动磨损，随后磨损基本没有进一步增加。这些磨损来自新缸套内壁的微小突起。活塞环基本没有磨损迹象，这是由于它的表面远比缸套内壁光

滑。工况 II (高转速空载) 中，缸套有较高水平的启动磨损，随后基本没有进一步增加。它们来自新缸套内壁突起的进一步磨损。活塞环仍基本没有磨损迹象。工况 III (中转速满载) 中，缸套和活塞环有明显的持续磨损，磨损速率分别为 0.148 和 11.2  $\mu\text{m}/\text{h}$ 。工况 IV (较高转速满载) 中，缸套和活塞环有更快的持续磨损，磨损速率分别为 0.255 和 12.5  $\mu\text{m}/\text{h}$ 。工况 V (停机、油循环) 中， $^{56}\text{Co}$  和  $^{52}\text{Mn}$  的峰计数保持基本恒定，无持续上升的“拖尾”，表明这些计数及时反映了缸套和活塞环的磨损情况。润滑油的 10 s 循环周期 (各测段测量时间为 500 s) 使这一无延迟监测得以实现。

### 4 初步结论

作为初步尝试，本工作对活化成核素的放射性剂量作了极保守的控制。安装后，距发动机辐照部件最近距离处的实测剂量率  $< 15 \mu\text{Gy}/\text{h}$ ，昼夜全时接触，实测剂量率仍远低于允许剂量 (200  $\mu\text{Gy}$ )。若示踪核素活度提高 10 倍 (可在最近距离操作 3 h)，使用更效率的探测器 (如，从本实验的 25% 提高到 75%~100%) 和更大体积的油杯 (如，从本实验的 0.23 L 提高到 0.7~1 L) 使总探测效率提高 10 倍，本法灵敏度至少有 100 倍的改善空间，即，套和环分别达到 0.1 和 1 nm 的灵敏度，可以满足更大润滑油体积和更优良机器 (更低磨损速率) 的在线磨损监

测。

带电粒子薄层活化法是一种高灵敏度、非破坏性,可在线监测发动机相关部件磨损的核分析方法。本方法为发动机的自主研发提供了技术支持,具有良好的应用前景。

**致谢:**沧州铁路器材厂的曹振民、文龙和赵永清先生在本实验的发动机安装、调试及运行工作中给予了极大支持,铁道部北京二七机车车辆厂的刘振声先生在实验设计方面给予了极大帮助,北京串列加速器核物理国家实验室全体工作人员为本次实验提供了优质的束流。在此表示衷心感谢!

### 参考文献:

- [1] KONSTANTIOV IO, KRASNOV NN · Determination of the Wear of Machine Parts by Charged Particle Surface Activation[J]. J Radioanal Chem, 1971, 8; 357.
- [2] EVANS R · Radioisotope Methods for Measuring Engine Wear: a Thin Layer Activation for the Measurement of Cam Follower Wear and Its Comparison With a Neutron Activation Method [J]. Wear, 1980, 311; 64.
- [3] CONLON TW · Doping Surfaces With Radioactive Atoms for Research and Industry [J]. Contemp Phys, 1982, 23; 353.
- [4] WALDEMAR Scharf, ANDREZEJ Niewczas · Tr

action Studies of Piston Ring Ring Using an External Radiometric Method With Proton Activation [J]. Nucl Instr Meth, 1987, B22; 57.

- [5] CHOWDHURY DP, JAYATA Chaudhuri · Study of Wear Between Piston Ring and Cylinder Housing on an Internal Combustion Engine by Thin Layer Activation Technique[J]. Nucl Instr Meth, 1989, B42; 375.
- [6] KONSTANTINOV IO, LEONOV AI, MIKHEEV VI · Surface Activation for Wear Profile Studies of Piston Rings[J]. Wear, 1990, 141; 17.
- [7] TOSHIO Kosako, KAZUO Nishimura · Wear Measurement at Depths of Several Tens Micrometers on the Surface of Iron Using a Thin Layer Activation Method by 7 Mev Proton Beam[J]. Nucl Instr Meth, 1989, B40/41; 587.
- [8] TOSHIO Kosako, KAZUO Nishimura · The Thin Layer Activation Technique Applied to the Online Iron Wear Measurement of an Engine Cam Nose[J]. Nucl Instr Meth, 1991, B56/57; 900.
- [9] IVANOV EA, PASCOVICI G, et al · A Nuclear Scanning Method for Estimating Wear Level Non-uniformities [J]. Nucl Instr Meth, 1993, B82; 604.
- [10] SCHNEIDE EW, BLOSSFELD DH · Radiotracer Method for Measuring Real-time Piston-ring and Cylinder-bore Wear in Spark-ignition Engines[J]. Nucl Instr Meth, 2003, A505; 559.

(上接第 218 页)

- [4] LIU S · Integrin  $\alpha_3\beta_3$  Targeted Radiotracers for Tumor Imaging: a Review[J]. Mol Pharm, 2006, 3 (5); 472-487.
- [5] SMITH CJ, GALIB H, SIECKMAN GL, et al · Radiochemical Investigations of  $^{177}\text{Lu}$ -DOTA-8-Aoc-BBN $^{[7-14]}\text{NH}_2$ : an in Vitro/in Vivo Assessment of the Targeting Ability of This New Radiopharmaceutical for PC-3 Human Prostate Cancer Cells[J]. Nucl Med Biol, 2003, 30; 101-109.
- [6] JONG MD, BREEMAN WA, BERNARD BF, et al · [ $^{177}\text{Lu}$ -DOTA $^0$ , Tyr $^3$ ] Octreotate for Somatostatin Receptor-targeted Radionuclide Therapy [J]. Int J Cancer, 2001, 92(5); 628-633.
- [7] BANERJEE S, DAS T, CHAKRABORTY S, et al ·  $^{177}\text{Lu}$ -DOTA-Ianreotide: a Novel Tracer as a Targeted Agent for Tumor Therapy [J]. Nucl Med Biol, 2004, (6); 753-759.

- [8] CREMONESI M, FERRARI M, BODEI L, et al · Dosimetry in Peptide Radionuclide Receptor Therapy: a Review [J]. J Nucl Med, 2006, 47 (9); 1 467-1 475.
- [9] LIU S, THOMAS DH, CHARLES EE, et al · Anaerobic  $^{90}\text{Y}^-$  and  $^{177}\text{Lu}$ -Labeling of a DOTA-Conjugated Nonpeptide Vitronectin Receptor Antagonist [J]. Bioconj Chem, 2003, 4; 1 030-1 037.
- [10] THUMSHIRNG, HERSEL U, GOODMAN SL, et al · Multimeric Cyclic RGD Peptides as Potential Tools for Tumor Targeting: Solid-phase Peptide Synthesis and Chemoselective Oxime Ligation[J]. Chem Eur J, 2003, 9; 2 717-2 725.
- [11] CHEN X, PARK R, SHAHINIAN AH, et al · Pharmacokinetics and Tumor Retention of  $^{125}\text{I}$ -labeled RGD Peptide Are Improved by PEGylation [J]. Nucl Med Biol, 2004, 31; 11-19.