

团 体 标 准

T/CSICE 041-2025

活塞环-气缸套磨损寿命评估方法—— 相对评估法

Wear life prediction method of piston ring-cylinder liner——
relative evaluation method

2025-12-26 发布

2025-12-26 实施

中国内燃机学会 发布

目 录

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 方法概要 2

5 试验设备 3

6 试剂与材料 3

 6.1 活塞环试样 3

 6.2 气缸套试样 4

 6.3 润滑油 4

 6.4 参照活塞环试样和气缸套试样 4

 6.5 试样清理及保存 4

7 试验步骤 5

8 磨损寿命评估 5

9 试验结果稳定性说明 6

10 试验报告 6

附录 A（规范性） 安全和防护措施 7

附录 B（资料性） 活塞环-气缸套磨损寿命评估试验记录表 8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国内燃机学会标准管理部提出。

本文件由中国内燃机学会归口。

本文件起草单位：大连海事大学、中国北方发动机研究所、中船动力研究院有限公司、中国船舶集团有限公司第七一一研究所、常州中车柴油机零部件有限公司等。

本文件主要起草人：王静思、徐久军、沈岩、严志军、黄若轩、袁晓帅、张利敏、巫立民、朱峰、董晶瑾、王传娟、韩毅等。

本文件于2025年首次发布。

活塞环-气缸套磨损寿命评估方法—相对评估法

1 范围

本文件规定了基于活塞环（气环）-气缸套试样级平台试验的磨损寿命评价方法。

本文件适用于道路车辆、农用拖拉机、林业机械、工程机械、机车、船舶等内燃动力装置的活塞环（气环）-气缸套在滑动摩擦条件下的磨损寿命评估。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

ASTM D2625-1994 Standard Test Method for Endurance (Wear) Life and Load-Carrying Capacity of Solid Film Lubricants (Falex Pin and Vee Method)

GB/T 1149.1-2008 内燃机 活塞环 第1部分：通用规则

GB/T 17754-2012 摩擦学术语

GB/T 26497-2022 电子天平

JB/T 13501.1-2018 内燃机 大缸径活塞环 第1部分：通用规则

JB/T 5082.7-2011 内燃机 气缸套 第7部分：平台珩磨网纹 技术规范及检测方法

NB/SH/T6062-2022 柴油机油综合性能的评定 CA6DM3法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

摩擦 friction

两个相互接触的物体，在外力作用下发生相对运动或有相对运动趋势时，接触面之间就会产生一种阻碍相对运动的现象。

[来源：GB/T 17754-2012，2.2]

3.2

滑动摩擦 sliding friction

当一物体沿着另一物体表面滑动时，接触表面之间的摩擦。

[来源：GB/T 17754-2012，4.5]

3.3

摩擦力 friction force

两个相互接触的物体，在外力作用下发生相对运动时，接触面之间发生的阻碍相对运动的力。

[来源：GB/T 17754-2012, 4.16]

3.4

摩擦系数 friction coefficient

摩擦力与作用于摩擦面的法向载荷之比。

[来源：GB/T 17754-2012, 4.18]

3.5

磨损 wear

物体表面相接触并作相对运动时，材料自身表面逐渐损失以致表面损伤的现象。

[来源：GB/T 17754-2012, 5]

3.6

磨损率 wear rate

单位摩擦距离（或者摩擦时间）的磨损量。

[来源：GB/T 17754-2012, 5.2]

3.7

线磨损量 wear line depth

以摩擦表面法向尺寸减少量来计量磨损。

3.8

质量磨损量 wear mass loss

以磨损过程中的质量损失来计量磨损。

3.9

磨损寿命 endurance (wear) life

在特定工况条件下服役失效前的磨损时间。

[来源：ASTM D2625-1994]

3.10

相对评估 relative evaluation

以已知参照对象为基准进行的磨损寿命评估。

4 方法概要

本方法由两个部分构成，一个是加速磨损试验方法，一个是相对评估方法。

活塞环和气缸套的磨损试样从实际使用的活塞环、气缸套零件切取，保证表面状态参数和接触形式不变。在磨损机理与实机正常工作状态一致的前提下，试样加速磨损试验要做到活塞环-气缸套的润滑状态与实际柴油机活塞环上止点附近相近，温度、线速度相近，通过强化载荷来加速磨损，缩短试验周期。当达到规定的磨损时间后，根据不同试样的特征分别采用质量磨损量、线磨损量等来计量气缸套、活塞环试样的磨损程度。

采用上述加速磨损试验方法，分别对已知磨损寿命的参照活塞环或者气缸套，和待评价活塞环或者气缸套，在相同的工况条件下，分别开展加速磨损试验，并分别获得多个磨损结果，分别计算其算术平均值。以参照活塞环或者气缸套磨损量为基准，对待评价活塞环或者气缸套的磨损寿命进行评估，得到与参照活塞环或者气缸套的磨损寿命相比，其磨损寿命大于、小于或者相近的结果。

5 试验设备

磨损试验采用往复式摩擦磨损试验设备，如图 1 所示。

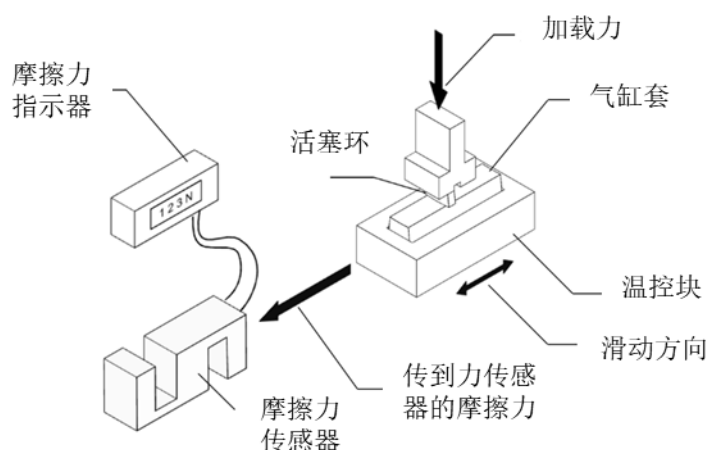


图 1 往复式摩擦磨损试验设备示意图

设备具体参数要求如下。

- 法向力示值相对误差应小于 $\pm 0.5\%$ ，示值重复性相对误差应小于 $\pm 0.5\%$ 。
- 摩擦力示值相对误差应小于 $\pm 1\%$ ，示值重复性相对误差应小于 $\pm 1\%$ 。
- 试样相对滑动速度应接近上止点附近活塞环的实际滑动速度。
- 在室温环境下摩擦表面具有加热到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的能力，温度波动范围 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。
- 具有在活塞环-气缸套接触区域施加 2 MPa 至 80 MPa 比压的能力。
- 实时连续记录摩擦力，采样频率应大于 3 kHz 。
- 润滑油供给流量不大于 5 mL/min ，稳定可控，流量精度 $\pm 1\%$ 。
- 满足活塞环试样和气缸套试样均匀接触的要求。
- 活塞环-气缸套边界摩擦试验参数示例：在试验机的往复运动行程 30 mm 时，活塞环-气缸套稳定磨损阶段的边界摩擦试验参数为比压 50 MPa 、转速 200 r/min 、温度 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、供油量 0.1 mL/min ；在试验机的往复运动行程为 75 mm 时，活塞环-气缸套稳定磨损阶段的边界摩擦试验参数为比压 40 MPa 、转速 150 r/min 、温度 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、供油量 2 mL/min 。

6 试剂与材料

6.1 活塞环试样

活塞环试样需从活塞环零件上切取，舍弃从开口处分别向两侧移动 60° 范围的试样，活塞环试样的圆周方向长度 R 应大于气缸套试样宽度 G 的 1.5 倍，活塞环试样尺寸示意如图 2 所示。图中， R_0 为活塞环径向宽度， R_1 为活塞环试样厚度。

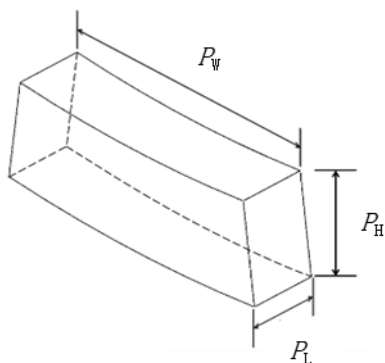


图2 活塞环试样尺寸示意图

6.2 气缸套试样

气缸套试样需从气缸套零件的上止点附近切取，气缸套内表面形貌特征需完好保留，气缸套试样厚度 C_H 可根据试验设备要求进行调整，长度 C_L 为活塞环试样厚度 P_L 的 5 倍以上，宽度 C_W 为活塞环试样厚度 P_L 的 1 ~ 3 倍。气缸套试样尺寸示意如图 3 所示。

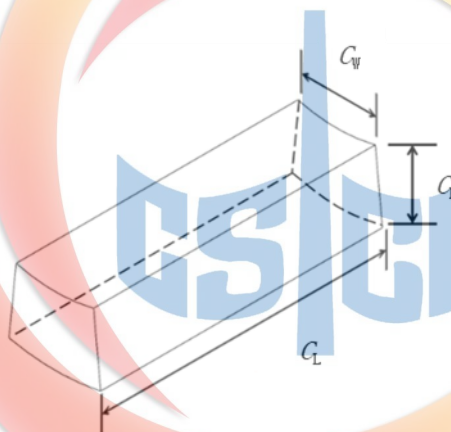


图3 气缸套试样尺寸示意图

6.3 润滑油

在同一批次的活塞环-气缸套磨损寿命对比评估中，应选择同一种润滑油，并与内燃机动力装置活塞环-气缸套摩擦副使用的润滑油相同。

6.4 参照活塞环试样和气缸套试样

参照试样参数要求与待评价活塞环试样（见 6.1）和气缸套试样（见 6.2）参数要求相同。

6.5 试样清理及保存

活塞环和气缸套试样应满足 ISO 16232 清洁度要求（B00）。一般推荐试验前后，所有试样分别在丙酮中用超声波清洗机清洗两次，每次 10 min。

所有试样应保存在密封干燥的环境中。

7 试验步骤

- 试验应在振动加速度 $\leq 1.0 \text{ mm/s}^2$ 、粉尘浓度 $\leq 10 \text{ mg/m}^3$ 的环境中进行。
- 将活塞环试样和气缸套试样分别安装在往复摩擦磨损试验设备的夹具中，活塞环试样圆周方向与气缸套试样宽度方向的中心对正，调整活塞环或者气缸套夹具，使其接触。
- 在气缸套试样表面均匀涂覆润滑油，启动试验机低速运转。
- 启动润滑油泵，向活塞环-气缸套摩擦副供油。
- 启动试验机的加热或者制冷功能，恒定在试验设定温度。
- 调整试验机至目标转速后，逐渐加载至磨合阶段的目标比压。
- 当磨合阶段的摩擦力趋于稳定后，逐步加载到稳定磨损阶段目标比压。
- 在整个试验过程中，实时监测记录摩擦力。达到 24 h 规定试验时间后，停机。

8 磨损寿命评估

通过比较不同活塞环-气缸套配副磨损程度进行磨损寿命评估。用质量磨损量或线磨损量来计量气缸套、活塞环试样的磨损程度，测量试样磨损量前，首先对试样进行宏观表面检测，当试样表面磨损不均匀或严重磨损，进入拉缸状态，则该次试验无效。

(1) 质量磨损量测量方法

试样表面的润滑油清洗干净后，采用按照 GB/T 26497-2022 技术要求和试验方法规定的分析天平（精度至少为 0.0001 g ），在试验前后分别称量试样质量，同一试样称量 3 次取平均值作为该试样的质量磨损量。质量磨损量计算方法见式(1)。

$$M = M_{\text{before}} - M_{\text{after}} \quad (1)$$

式中：

M ——质量磨损量；

M_{before} ——气缸套或活塞环试样在磨损试验前的测量值；

M_{after} ——气缸套或活塞环试样在磨损试验后的测量值。

如果试样组织不够致密，导致润滑油浸入而无法清洗干净，则不宜采用质量磨损量进行评估。

(2) 线磨损量测量方法

采用轮廓仪测量磨损后试样的表面轮廓曲线（ Z 轴方向精度至少满足 $0.1 \text{ } \mu\text{m}$ ），测量区间应包括磨损区和未磨损区。在测得的表面轮廓曲线上，经未磨损区域划一条直线，再在磨损区域的最凹陷位置划一条平行线，如图 4 所示，两直线之间的距离就是该试样的最大线磨损量。在同一试样的不同位置测量 3 次取平均值作为该试样的线磨损量。线磨损量计算方法见式(2)。

$$H = H_{\text{before}} - H_{\text{after}} \quad (2)$$

式中：

H ——线磨损量；

H_{before} ——未磨损区域的台阶高度；

H_{after} ——已磨损区域的台阶高度。

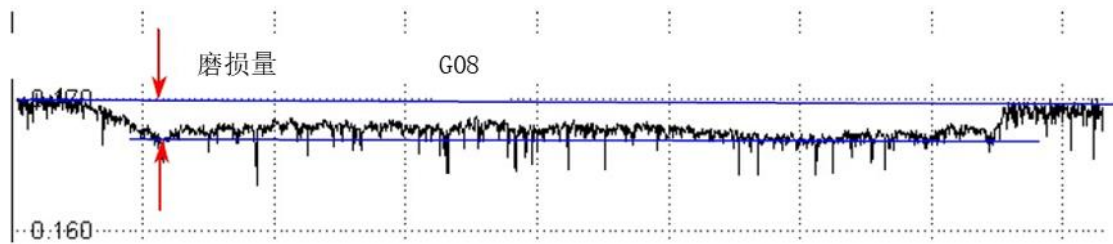


图4 线磨损量测量示意图

(3) 相对磨损寿命评估方法

采用上述加速磨损试验方法，测得已知磨损寿命的参照活塞环的磨损 M_0 或者气缸套的磨损量 H_0 ，再测得待评价活塞环的磨损量 M 或者气缸套的磨损量 H 。通过计算待评价试样与参照试样之间的磨损量差值百分比，则可以进行相对磨损寿命评估。差值百分比 Q 计算方法见式(3)和(4)。

$$Q = (M - M_0) / M_0 \times 100\% \quad (3)$$

$$Q = (H - H_0) / H_0 \times 100\% \quad (4)$$

当 Q 值在 $\pm 10\%$ 范围之内，则待评价活塞环（气缸套）的磨损寿命与参照活塞环（气缸套）的磨损寿命相近。

当 Q 值大于 $+10\%$ ，则待评价活塞环（气缸套）的磨损寿命小于参照活塞环（气缸套）的磨损寿命。

当 Q 值小于 -10% ，则待评价活塞环（气缸套）的磨损寿命大于参照活塞环（气缸套）的磨损寿命。

9 试验结果稳定性说明

本标准可用从同一零件切取的试样进行多次试验，以单次试验结果与算术平均值的偏离程度来表达稳定性。一般要开展5次重复试验，保证至少3个有效试验结果与这3次试验算术平均值相对偏差小于10%。

10 试验报告

试验报告格式参考附录B。

附录 A

(规范性)

安全和防护措施

- A.1 活塞环-气缸套磨损寿命评估试验具有一定的危险性，实验室应制定有关的安全操作规程，采取有效的安全措施，避免造成人体伤害和设备损坏。
- A.2 试验操作人员要经过专门培训。要掌握有关工具的使用方法，具备及时发现和处理试验过程中突发事件的能力。
- A.3 试验设备的所有传动和发热部件应加防护罩。
- A.4 润滑油管线和电源线的布置要井然有序，并经常进行检查和维护。
- A.5 试验设备周围禁放障碍物、润滑油等物品。
- A.6 在试验过程中，操作人员应注意润滑油有无泄漏。发生泄漏时，应立即暂停试验进行处理，处理完成后再进行试验。
- A.7 试验润滑油应在指定地点进行保管。现场巡检中应注意不能有污染和泄漏。
- A.8 以清洗为目的使用易燃溶剂时，应严格遵守预防措施。
- A.9 试验设备配备保护装置，当出现试验设备摩擦力过高、润滑油供油压力过低、试验设备超速等问题时，试验设备能够自动停机。
- A.10 实验室润滑油应进行统一回收保管，不得随意排放或倾倒。
- A.11 实验室应配备干式灭火设备。
- A.12 根据法规采取其他的安全预防措施。

附 录 B

(资料性)

活塞环-气缸套磨损寿命评估试验记录表

表 B.1 基本信息

实验单位		委托单位		试验日期	
试验设备		试验编号		样品编号	
活塞环		气缸套		润滑油	

表 B.2 试验参数

磨损试验	参数名称	数值	磨损试验	参数名称	数值
磨合阶段	转速/($r \cdot \min^{-1}$)		稳定磨损阶段	转速/($r \cdot \min^{-1}$)	
	温度/ $^{\circ}\text{C}$			温度/ $^{\circ}\text{C}$	
	比压/MPa			比压/MPa	
	润滑油量/($\text{mL} \cdot \min^{-1}$)			润滑油量/($\text{mL} \cdot \min^{-1}$)	
	磨合时间/min			磨损时间/min	

表 B.3 试验结果

组数	磨损量 (质量磨损量或线磨损量)	
	参照试样	待评价试样
第1组		
第2组		
第3组		
第4组		
第5组		
平均值		

表 B.4 评估结果

待评价试样与参照试样之间的磨损量差值百分比	评估结论
	参照试样寿命大于待评价试样寿命 <input type="checkbox"/>
	参照试样寿命小于待评价试样寿命 <input type="checkbox"/>
	参照试样寿命与待评价试样寿命相近 <input type="checkbox"/>

注：本试验记录表根据《活塞环-气缸套磨损寿命评估方法—相对评估法》制定，试验结果仅对委托单位的来样负责。

