

团体标准

T/CICEIA XXX-XXXX

氢燃料内燃机耐久试验方法

Hydrogen fuel combustion engine endurance test method

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国内燃机工业协会 发布

目次

前言.....II

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....1

3 术语和定义.....1

4 试验条件.....1

5 试验项目和内容.....2

6 耐久试验数据处理及评定.....6

7 试验报告.....9

附录 A （规范性） 装机测量项目.....10

表 1 性能试验项目.....2

表 2 早燃频率测试准备工况.....3

表 3 工程机械、农用机械及其他用途氢内燃机试验工况.....4

表 4 道路用氢内燃机耐久试验.....5

表 5 船用氢内燃机耐久试验.....5

表 6 发电用氢内燃机耐久试验.....5

表 7 增程式氢内燃机耐久试验.....6

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》的规定起草。

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工业协会提出。

本文件由中国内燃机工业协会标准化工作委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

氢燃料内燃机耐久试验方法

1 范围

本文件规定了氢燃料内燃机耐久试验条件、试验方法、试验数据处理和试验报告的要求。

本文件适用于氢燃料内燃机（以下简称“氢内燃机”）。

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。

GB/T 1147.2 中小功率内燃机 第2部分：试验方法

GB/T 6072.1 往复式内燃机 性能 第1部分：功率、燃料消耗和机油消耗的标定及试验方法 通用发动机的附加要求

GB/T 6072.3 往复式内燃机 性能 第3部分：试验测量

GB 11122 柴油机油

GB/T 15089 机动车辆及挂车分类

GB 17691-2018 重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）

GB/T 18297-2024 汽车发动机性能试验方法

GB/T 19055-2024 汽车发动机可靠性试验方法

GB/T 21404 内燃机发动机功率的确定和测量方法一般要求

GB/T 34542.3 氢气储存输送系统 第3部分：金属材料氢脆敏感度试验方法

GB/T 44723 氢燃料内燃机 通用技术条件

JB/T 12655 柴油机 耐久试验 摩擦副测量方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

氢燃料内燃机 hydrogen internal combustion engines

使用氢气为燃料的内燃机。

3.2

早燃 pre-ignition

由自着火诱发，实际燃烧开始时刻提前于指定燃烧开始时刻，随机发生的异常燃烧现象。

4 试验条件

4.1 氢内燃机产品应按经规定程序批准的产品图样和技术文件制造。零部件和附件应符合有关标准规定。

4.2 装机前应按照 JB/T 12655 规定方法对附录 A 中项目进行测量。

- 4.3 试验前，氢内燃机应按制造厂提供的磨合规范进行磨合。
- 4.4 试验用的氢气燃料应使用 GB/T 44723 中规定的规格或纯度更高的燃料；机油应符合 GB 11122 的规定或者氢内燃机制造厂的规定。
- 4.5 试验用冷却液采用氢内燃机制造厂规定的冷却液，冷却液出口温度应符合制造厂要求。
- 4.6 试验时的环境状况、试验设备精度应符合 GB/T 6072.3 的规定。在进行氢内燃机试验时，环境如偏离基准状况，应按照 GB/T 6072.1 对功率、燃料消耗率等指标进行修正，并在试验报告中予以说明。

5 试验项目和内容

5.1 性能初试试验

5.1.1 通则

氢内燃机性能初试试验项目及试验方法应按照表 1 进行，试验工况应符合氢内燃机制造厂规定。

性能初试结果应按照 6.1 章节进行评定，如性能初试结果评定不通过，则认为氢内燃机不满足耐久试验要求。

表1 性能试验项目

序号	试验项目	试验方法	备注
1	功率试验	按照GB/T 18297-2024进行	除发电和船用氢内燃机进行
2	负荷特性试验	按照GB/T 1147.2进行	仅发电用氢内燃机进行
3	推进特性试验	按照GB/T 1147.2进行	仅船用氢内燃机进行
4	机油消耗量试验	按照GB/T 18297-2024进行	/
5	活塞漏气量试验	按照5.3.2进行	/
6	曲轴箱通风系统未燃氢动态平衡试验	按照5.3.3进行	/
7	早燃试验	按照5.3.4进行	/

5.1.2 活塞漏气量试验

5.1.2.1 试验目的

评估活塞组与气缸套的气体密封性，亦可用于检查这对摩擦副的工作情况。

5.1.2.2 试验条件

试验条件的控制按照章节4的规定。试验前，在油气分离器出气口安装漏气量测试仪器，测量氢内燃机总漏气量封堵曲轴箱与外界交互的一切通道（曲轴箱通风的进出口、油标尺孔以及各种盖罩的结合处等），且曲轴油封密封性能良好（曲轴箱内加0.2 kPa压力，其泄气量不应大于5 L/min）。必要时，曲轴箱与漏气量测量仪器之间可添置冷凝器，所有连接软管内径不小于20 mm，漏气量测量仪的排气口不应受到吹拂。

对于需要从进气管路或外部稳压气源取气调节曲轴箱内氢浓度的氢内燃机，需在对应管路安装气体流量测量装置，测量从外部的补气量。通过计算油气分离器出气口测得漏气量和补气量的差值得到活塞漏气量。

5.1.2.3 试验方法

控制油门全开，在发动机工作转速范围内，顺序地改变转速进行测量。适当地分布8个以上的测量点。

5.1.2.4 测量项目及数据整理

测量项目需包括：发动机转速、扭矩、氢气消耗量、进气压力、进气温度、进气湿度、漏气量、补气量（如有）。并记录机油牌号和粘度。

试验后需绘制发动机全负荷状态下转速-活塞漏气量关系曲线，并记录油门全开时最大活塞漏气量及对应转速。

5.1.3 曲轴箱通风系统未燃氢动态平衡试验

5.1.3.1 试验目的

评估曲轴箱中氢气浓度是否满足安全要求，亦可用于评价活塞组与气缸套摩擦副磨损以及发动机燃烧状态。

5.1.3.2 试验条件

试验条件的控制按照章节4的规定。

5.1.3.3 试验方法

控制油门全开，在发动机工作转速范围内，顺序地改变转速进行测量。适当地分布8个以上的测量点。

5.1.3.4 测量项目及数据整理

测量项目需包括：发动机转速、扭矩、氢气消耗量、进气压力、进气温度、进气湿度、曲轴箱氢浓度。并记录氢浓度传感器安装位置。

试验后需绘制发动机全负荷状态下转速-曲轴箱氢浓度关系曲线，并记录油门全开时最大曲轴箱氢浓度及对应转速。曲轴箱氢浓度应满足制造厂要求和氢安全要求。

5.1.4 早燃试验

5.1.4.1 试验目的

评估发动机的早燃频次。

5.1.4.2 试验条件

试验条件的控制按照第4章规定。

5.1.4.3 试验方法

早燃试验方法如下：

- a) 控制氢内燃机运行边界满足制造厂规定后，按照表2运行早燃试验前的准备工况。

表2 早燃频率测试准备工况

序号	转速 (以额定转速为100%)	扭矩 (以该转速下最大扭矩为100%)	时长 (min)
1	50%	40%	3
2	50%	60%	3
3	60%	60%	3

- b) 试验准备工况运行完成后 3 min 内设定氢内燃机运行早燃试验工况，早燃试验工况根据氢内燃机用途进行选择，不同试验工况分别采集试验数据。
- 1) 道路用氢内燃机：早燃试验工况运行 GB 17691-2018 中的稳态试验循环（WHSC）；
 - 2) 船用、发电用途氢内燃机：早燃试验工况运行额定工况，单组试验时长为 30 min；
 - 3) 工程机械、农用机械及其他用途氢内燃机：早燃试验工况运行额定工况、大扭矩高速工况和大扭矩低速工况，单组试验时长 30 min，每个工况运行 10 min，如表 3 所示。

表3 工程机械、农用机械及其他用途氢内燃机试验工况

序号	转速	负荷率	时长（min）
1	额定转速	100%	10
2	大扭矩区间最高转速	100%	10
3	大扭矩区间最低转速	100%	10

- c) 单组试验完成后氢内燃机回怠速冷却 10 min 停车，结束此组试验。
- d) 氢内燃机按照步骤 a) - c) 再重复进行 2 组试验。
- e) 统计各组试验各工况下的早燃发生频率（ N_1, N_2, N_3 ），同工况下 3 组试验的结果偏差在 30% 以内，则可判定试验数据有效，若试验结果不满足有效性要求，则需要重复步骤 a) - c) 进行试验增加试验组。
- f) 同工况下试验结果偏差计算方法见公式（1）和（2）。

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{3} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{|N - \bar{N}|}{\bar{N}} \leq 30\% \dots\dots\dots(2)$$

式中：

N_1, N_2, N_3 ——各组试验各工况下的早燃发生频率，以百分数（%）表示；

$\bar{N}$ ——三组试验中各工况下的早燃平均发生频率，以百分数（%）表示；

N ——每组试验中各工况下的早燃发生频率，以百分数（%）表示。

单组试验过程中不应中断，如若试验中断，应重新运行准备工况后再从中断的工况开始试验，中断前此工况的运行时间不计入运行总时长。

测量项目需包括发动机转速、扭矩、氢气消耗量、进气压力、进气温度、进气湿度、点火角、缸压，记录氢浓度传感器安装位置。

5.2 耐久试验

5.2.1 传统动力用氢内燃机耐久试验

对于传统动力用氢内燃机产品，需根据用途差异运行不同耐久试验循环。

道路用氢内燃机：耐久试验需使用4台内燃机进行表4中耐久试验项目，交变负荷循环试验、混合负荷试验、额定功率试验以及冷热交变试验按照GB/T 19055-2024中的规定进行，低负荷循环试验按照GB 17691-2018的要求进行WHTC循环。

表4 道路用氢内燃机耐久试验

序号	装机汽车类别 (按GB/T 15089)	氢内燃机I		氢内燃机II	氢内燃机III	氢内燃机IV
		交变负荷循环持续时间 h	混合负荷试验持续时间 h	额定功率试验持续时间 h	低负荷循环持续时间 h	冷热交变试验循环次数
1	汽车最大总质量≤3500 kg	500	-	200	200	3000
2	3500 kg<汽车最大总质量≤12000 kg	-	1000	500	200	5000
3	汽车最大总质量>12000 kg	-	1000	1000	500	8000

船用氢内燃机耐久试验循环按照表5进行，不同工况间转换在5 s内完成，均匀的改变转速及负荷，工况转换时间计入下一工况，每循环历时80 min，耐久总时长1000 h。

表5 船用氢内燃机耐久试验

序号	运行时间 min	转速 r/min	负荷率 %	备注
1	10	怠速	0	过渡时间0 s，每个工况点每次运行10 s，两工况间不断切换运行直至运行时长满10 min
			100	
2	20	标定转速	100	-
3	20	90%标定转速	75	90%标定转速，推进特性点 $P=Cn^3$
4	10	系泊大扭矩转速	100	-
5	10	怠速	0	过渡时间0 s，每个工况点每次运行10 s，两工况间不断切换运行直至运行时长满10 min
			100	
6	10	110%标定转速	110	没有超负荷能力要求的，用标定点代替

发电用氢内燃机耐久试验循环按照表6进行，不同工况间转换在5 s内完成，均匀的改变转速及负荷，工况转换时间计入下一工况，每循环历时10 h，耐久总时长1000 h。

表6 发电用氢内燃机耐久试验

序号	运行时间 s	转速 r/min	负荷率 %	备注
1	50	怠速	0	-
2	50	标定转速	0	-
3	10	标定转速	110	-
4	36000	标定转速	100	-

工程机械用氢内燃机需准备3台试验样机分别进行1000 h混合负荷、1000 h额定功率和8000次热冲击试验，试验工况及边界按道路用氢内燃机要求执行。

农业机械及其他用途氢内燃机按照JB/T 11323中规定可靠性试验进行。

5.2.2 混合动力专用氢内燃机耐久试验

混合动力专用氢内燃机可以划分为增程用途和非增程用途两类，非增程用氢内燃机试验工况按照表4进行。增程式氢内燃机在相对固定的工况点发电，其耐久试验循环见表7，不同工况间转换在5 s或者发电机要求的最短时间内完成，均匀的改变转速及负荷，工况转换时间计入下一工况，每循环历时50 min，耐久总时长1000 h。

表7 增程式氢内燃机耐久试验

工况	运行时间 s	转速 r/min	负荷率 %	备注
1	300	怠速	0	水温按照节温器初开温度或者80℃；中冷后气温按照氢内燃机技术条件要求的最低值或者40℃。
2	240	发电工况最高转速	发电的最大负荷	工况点2~5，需循环6次。 1、前3次循环水温按照氢内燃机长时最高工作温度或者100℃；中冷后气温按照氢内燃机技术条件要求的最高值或者60℃。 2、后3次循环水温按照氢内燃机节温器初开温度或者80℃；中冷后气温按照氢内燃机技术条件要求的最低值或者40℃。
3	15	怠速	0	
4	180	标定转速	100	
5	15	怠速	0	

5.3 性能复试

耐久试验完成后，需重复5.1进行性能复试。

5.4 试验过程中检查及维护

试验过程中常规检查及维保项目按照GB/T 19055-2024进行。

每次停车点检需确认氢喷射器和氢气连接管路的密封可靠性。每天试验前对氢喷射器进行保压，保压方法按照如下或者氢内燃机厂要求进行：

- a) 用测功机以 50 r/min 倒拖氢内燃机 3s 使氢气建压；
- b) 停机，关闭氢内燃机燃气切断阀，关闭台架供氢阀，记录下氢内燃机轨压；
- c) 等待 10 min，再次记录下氢内燃机轨压，确认轨压降低速率满足氢内燃机厂要求。

5.5 拆检

试验结束后对氢气专用零部件进行零部件测试，对氢气喷射器和氢气压力调节器的流量特性、响应性和泄漏量进行测试，试验结果应满足图纸或技术要求。通用零部件测量要求同4.2章节，对零部件进行拍照，并关注氢内燃机零部件是否存在异常损伤、磨损等问题；机油油路相关橡胶密封件是否有老化、溶胀等问题。

6 耐久试验数据处理及评定

6.1 性能初试试验数据处理及评定

6.1.1 早燃判别方法

对燃烧分析仪记录的燃烧压力数据进行处理及数据分析，具体流程及方法如下：

- a) 梳理试验过程中各工况各工作循环点火时刻的缸内压力（ P_{IGT} ），统计各工况下点火时刻的缸内压力平均值（ $\overline{P_{IGT}}$ ），多缸氢内燃机应分别统计各缸数据；
- b) 依据表 8 规定，通过该工况下各工作循环点火时刻的缸内压力（ P_{IGT} ）与同工况下点火时刻缸内压力平均值（ $\overline{P_{IGT}}$ ）的相对关系判断是否是早燃；
- c) 统计各工况下各缸早燃发生次数和总工作循环数，算出早燃发生频率，计算方法见公式（3）。

表8 早燃的判别方法

判别方法	判别结果
$P_{IGT} - \overline{P_{IGT}} < \overline{P_{IGT}} \times 2\%$	非早燃
$P_{IGT} - \overline{P_{IGT}} \geq \overline{P_{IGT}} \times 2\%$	早燃

$$X = \frac{N}{M} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中：

X —— 试验工况下的早燃发生频率，以百分数（%）表示；

N —— 试验工况下所有工作缸发生早燃的总次数；

M —— 所有工作缸的总工作循环数。

6.1.2 性能初试评定

性能初试结果按照表9规定进行评定。

表9 性能试验项目及评价方法

序号	试验项目	评价方法
1	功率试验	按照GB/T 18297-2024评价
2	负荷特性试验	按照GB/T 18297-2024评价额定功率
3	推进特性试验	按照GB/T 18297-2024评价额定功率
4	机油消耗量试验	机燃比按照GB/T 44723评价
5	活塞漏气量试验	按照GB/T 19055-2024评价
6	曲轴箱通风系统未燃氢动态平衡试验	应满足氢内燃机厂申报指标以及氢安全要求
7	早燃试验	性能初试不单独进行评价

6.2 耐久试验故障评定

耐久试验关键零部件（机体、气缸盖、气缸套、活塞）不能损坏，次要零部件更换不超过5件次；

6.3 等效里程计算

6.3.1 路谱平均负荷率计算

通过发动机功率试验，得到发动机各转速下的最大扭矩 $T_{\max}(n)$ 。

根据内燃机厂提供的发动机实际运行路谱，得到发动机转速 $n(t)$ 和扭矩 $T(t)$ 的时间序列，采样频率要求 $\geq 1 \text{ Hz}$ 。

则定义发动机瞬时负荷率为公式（2）：

$$L(t) = \frac{T(t)}{T_{\max}(n(t))} \dots\dots\dots (2)$$

发动机路谱平均负荷率为公式（3）：

$$L_{\text{road}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{road}}} (L(t_i) \square \Delta t_i)}{\sum \Delta t_i} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

i ——路谱循环中第 i 个工况点，取值从1到 N_{road} ；

N_{road} ——路谱循环累计工况点数；

Δt_i ——相邻路谱工况间时间间隔。

6.3.2 台架耐久平均负荷率计算

发动机台架耐久循环各工况负荷率为公式（4）：

$$L(j) = \frac{T(j)}{T_{\max}(n(j))} \dots\dots\dots (4)$$

发动机台架耐久平均负荷率为公式（5）：

$$L_{\text{bench}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{bench}}} (L(j) \square \Delta t_j)}{\sum \Delta t_j} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

j ——路谱循环中第 j 个工况，取值从1到 N_{bench} ；

N_{bench} ——台架耐久循环工况数；

Δt_j ——第 j 个台架耐久工况持续时间。

6.3.3 耐久试验加速系数计算

耐久试验加速系数为公式（6）：

$$k = \frac{L_{\text{bench}}}{L_{\text{road}}} \dots\dots\dots (6)$$

6.3.4 耐久试验等效里程计算

耐久试验等效里程/时长为（7）：

$$S_{\text{bench}} = K \cdot t_{\text{bench}} = \frac{k \cdot S_{\text{road}} \cdot t_{\text{bench}}}{t_{\text{road}}} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

K ——耐久试验运行时长与对应实际路谱循环里程或时长转换系数；

S_{road} ——单个路谱循环对应车辆运行里程或发动机运行时长；

t_{road} ——单个路谱循环对应车辆运行时长；

t_{bench} ——耐久试验运行时长；

6.4 性能复试评定

耐久试验后额定功率和最大扭矩劣化率不应超过5%，耐久后额定转速全负时机油/氢气消耗比不能超过0.2%，活塞漏气量不能超出GB/T 19055-2024规定限值，早燃频次劣化率不能超出25%。

6.5 拆检测量结果评定

拆检测量结果评定要求如下：

- a) 热冲击试验后拆检主要热负荷零件（如缸盖、缸垫、气门、活塞、缸套、EGR冷却器）不应存在贯穿裂纹；
- b) 依据JB/T 12655，计算附录A中氢内燃机摩擦副磨损量 δ ，并通过公式（8）评估各零部件使用寿命，寿命应满足内燃机厂要求。

$$S=K \cdot [k_0 \cdot t_0 + (t-t_0)] \cdot \frac{\delta_{max}}{\delta} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

S——摩擦副预估路谱循环寿命；
k₀——初期磨损平均加速系数，不同摩擦副间存在差异，由氢内燃机厂提供，若无明确

确

数据，则寿命评估不考虑初期磨损，通过 $S=K \cdot t \cdot \frac{\delta_{max}}{\delta}$ 评估寿命；

t₀——初期磨损阶段时长，由氢内燃机厂提供；
t——耐久试验时长；
δ_{max}——摩擦副允许磨损极限，由氢内燃机厂提供；

7 试验报告

试验完成后由试验单位根据试验结果编写试验报告，试验报告应包含但不限于以下内容：

- a) 氢内燃机的型号、试验氢内燃机技术参数，格式应符合 GB/T 18297-2024 附录 A 规定，并附加图形、照片及必要的说明；
- b) 测试设备、仪器和仪表的名称、型号、规格、精度等级及制造厂一览表；
- c) 氢内燃机的性能初试参数；
- d) 氢内燃机的性能复试参数劣化率；
- e) 耐久试验前后主要零件尺寸的测量数据、零部件拆检后照片；
- f) 试验结论，根据 d)、e)、f)中的评价结果给出该氢内燃机耐久试验通过或不通过结论；
- g) 耐久试验过程中转速、功率、扭矩、氢耗量、进气压力、进气温度、进气湿度、中冷前后压力温度、涡轮后排温和排压、出水温度、机油压力温度、氢浓度的变化曲线。

附 录 A
(规范性)
装机测量项目

A. 1 装机测量项目

试验氢燃料内燃机耐久试验装机测量项目见表A.1。

表A. 1 装机测量项目

序号	分类	零部件	测量项目
1	非镀层类	气缸套	缸套内径
2		气缸套	缸套上部直线度
3		排气门	进气门杆径直径
4		进气门	排气门杆径直径
5		凸轮轴	凸轮走轴颈直线度
6		气门导管	进气门导管内径
7		气门导管	排气门导管内径
8		连杆	连杆小头衬套直线度
9		连杆	连杆小头衬套内径
10		进气门/座圈	进气门下沉量
11		排气门/座圈	排气门下沉量
12		曲轴	主轴径
13		曲轴	曲轴连杆轴径
14		活塞	活塞销孔直径
15		活塞销	活塞销外径
16		活塞销	活塞销孔内径
17		活塞销	活塞销孔直线度
18		活塞	活塞销孔轮廓
19		摇臂轴	摇臂轴外径
20		摇臂衬套	衬套表面直线度
21		摇臂衬套	衬套表面直径
22	镀层类	主轴上瓦	主轴上瓦壁厚
23		主轴下瓦	主轴下瓦壁厚
24		连杆上瓦	连杆上瓦壁厚
25		连杆下瓦	连杆下瓦壁厚

表A.2 （续）

序号	分类	零部件	测量项目
26	其他	活塞环	闭口间隙
27		活塞环	弹力
28		活塞环	镀层厚度