

团 体 标 准

T/CSAE xx—2025

车用氢燃料内燃机 可靠性试验及评定方法

Methods of reliability test and evaluation for hydrogen internal combustion engine
for vehicles

(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。

20xx-xx-xx 发布

20xx-xx-xx 实施

中国汽车工程学会 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 试验样机 2

5 试验要求 2

6 试验条件 2

7 工作程序 3

8 可靠性评定方法 6

附录 A（规范性）氢燃料内燃机供氢系统气密性试验方法 11

附录 B（规范性）氢燃料内燃机氢气消耗率试验方法 12

附录 C（资料性）记录表格 14

附录 D（规范性）车用氢燃料内燃机故障模式分类表 16

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XX提出。

本文件由中国汽车工程学会标准化工作委员会归口。

本文件起草单位：中国汽车工程研究院股份有限公司、XXX

本文件主要起草人：XXX

车用氢燃料内燃机 可靠性试验及评定方法

1 范围

本文件规定了车用氢燃料内燃机在台架上整机的一般可靠性试验方法及评定办法。

本文件适于道路车辆用的氢燃料内燃机，包括原装机和由柴油机、汽油机以及其他气体机经改进调整后的改装机。其他掺氢燃料内燃机参考执行。

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 1147.2-2017 中小功率内燃机 第2部分 试验方法

GB/T 3634.1 氢气 第1部分：工业氢

GB/T 3634.2 氢气 第2部分：纯氢、高纯氢和超纯氢

GB/T 7607 柴油机油换油指标

GB/T 8028 汽油机油换油指标

GB/T 18297-2024 汽车内燃机性能试验方法

GB/T 19055 汽车发动机可靠性试验方法

GB/T 21404-2022 内燃机 发动机功率的确定和测量方法 一般要求

GB/T 24499 氢气、氢能与氢能系统术语

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

3 术语和定义

GB/T 24499、GB/T 19055 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

氢燃料内燃机 hydrogen internal combustion engine

使用氢气为燃料的内燃机。

[来源：GB/T 24499中氢内燃机的术语描述]

3.2

回火 backfire

氢燃料内燃机（3.1）在进气系统发生燃烧的现象。

3.3

氢脆 hydrogen embrittlement

氢进入金属材料后，局部氢浓度达到饱和时，引起金属塑性下降、诱发裂纹或产生滞后断裂的现象。

[来源：GB/T 24499中氢脆的术语描述]

3.4

故障 failure

凡氢燃料内燃机产品在规定试验条件下和规定时间内，不能完成其规定功能的事件。

4 试验样机

试验样机应符合制造厂的技术条件，所有紧固件应拧紧至规定值，所有间隙调整至规定值，电控系统符合制造厂的规定。同时试验样机应满足GB/T 44723的规定。

5 试验要求

5.1 一般要求

试验所用仪表精度、测量部位及试验数据的计算应按GB/T 18297-2024第4章和第5章的规定。涉氢测量仪器应符合相应防爆要求，并取得防爆合格证。

5.2 安全要求

安全要求应满足以下条件：

- a) 试验室的测试台架应配备氢气泄漏报警装置，在试验台架氢气可能聚积的位置安装至少两个氢气泄漏探测传感器，实时监测氢气浓度。氢气浓度传感器的报警误差应低于氢气爆炸下限的 $\pm 3\%$ 。
- b) 氢气泄漏报警装置与氢燃料内燃机的控制系统连锁：
 - 1) 氢气体积浓度不小于1%时，氢气泄漏报警装置报警，控制系统采取通风策略降低氢气的聚积；
 - 2) 氢气体积浓度不小于2%时，控制系统关闭氢气燃料供给，并控制发动机停机，并采取通风策略降低氢气的聚积。
- c) 其他相关安全要求应满足 GB/T 44723 中相关规定。

6 试验条件

6.1 氢气品质

试验所用氢气应符合氢燃料内燃机制造厂的规定，或按照GB/T 3634.1和GB/T 3634.2中相关规定。

6.2 供氢系统

试验室供氢系统应保证系统过压、防爆、泄露等方面的安全需求，输出满足氢燃料内燃机氢气喷射系统需求（如压力、温度、流量等）的氢气。

6.3 机油

机油牌号、机油温度及粘度按照氢燃料内燃机制造厂的规定。

6.4 冷却液

采用软水或采用发动机制造厂规定的冷却液。冷却液牌号、温度按照发动机制造厂规定。

6.5 环境温度条件

试验应满足在GB/T 21404-2022中规定的标准环境状况要求。

6.6 样机所带附件及调整

6.6.1 进气系统

进气系统应采用装车的标准进气系统或具有相等进气压力的试验室进气系统。

6.6.2 排气系统

排气系统应采用装车的标准排气系统或具有相等阻力（在全速全负荷工况下，与标准排气系统背压相差不大于2kPa）的试验室排气系统。

6.6.3 冷却系统

若样机不带风扇，可用外加吹风机或相应的装置对发动机吹拂，节温器定在全开位置。

6.6.4 其他附件

其余附件可根据GB/T 21404-2022中表1内容进行适当调整。

7 工作程序

7.1 试验前安全检查

试验前应对氢燃料内燃机做必要的安全检查，主要包含以下部分：

- 检查试验室内每个氢浓度传感器的测量数值，保证其值不高于100ppm。
- 检查氢燃料内燃机供氢系统气密性（测试方法见附录A），气密性测试结果需满足制造厂或附录A中要求。

7.2 试验前精密测量

试验前，应对样机进行拆检及精密测量，参考GB/T 19055中的相关规定对氢燃料内燃机相关零部件尺寸、间隙、平面度进行测量。测量记录表见附录C.1

7.3 磨合

7.3.1 正式试验前被测样机可进行必要的磨合，磨合规范按制造厂的技术文件规定。

7.3.2 样机磨合总时间不超过45h。

7.4 性能初试

在进行可靠性试验前，应对样机的主要性能进行检验，符合要求后方可进行可靠性试验。性能初试的项目及方法规定应符合表1。性能初试试验记录表见附录C.2

表1 氢燃料内燃机性能检验项目及方法

序号	检验项目	检验方法	评定依据
1	起动性能试验	GB/T 18297-2024 8.1	企业标准或技术文件
2	功率试验	GB/T 18297-2024 8.3	企业标准或技术文件
3	机械损失功率试验	GB/T 18297-2024 8.7	企业标准或技术文件
4	活塞漏气量试验	GB/T 18297-2024 8.10	企业标准或技术文件
5	机油消耗率试验	GB/T 1147.2-2017 附录B	企业标准或技术文件
6	氢气消耗率试验	见附录B	企业标准或技术文件

7.5 可靠性试验

可靠性试验分为负荷试验、冷热冲击试验和额定功率试验。三项试验应分别在三台同样的氢燃料内燃机上进行，每台氢燃料内燃机单独进行一项试验循环工况。

7.5.1 负荷试验循环工况

负荷试验按照图1及表2规定的工况在试验台架上连续运行。各工况间的过渡时间不大于20s，均匀的改变转速及功率。每循环历时60min，共500个循环，运行持续时间500h。

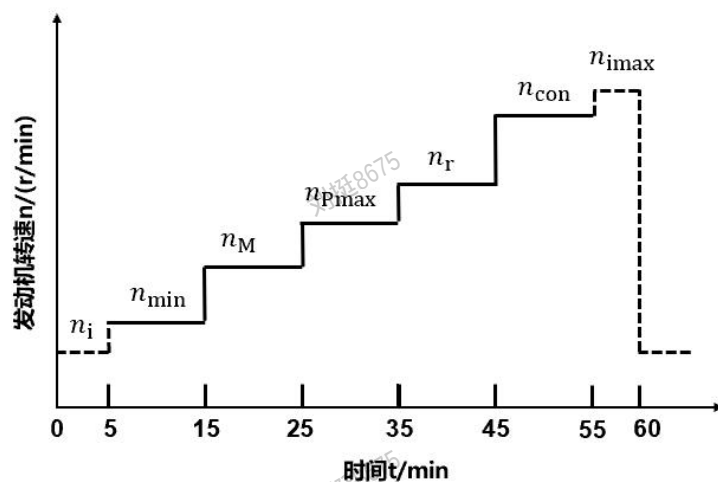


图1 负荷试验循环工况规范示意图(实线表示节气门全开)

表2 负荷试验循环工况

工况序号	转速	负荷/%	工况时间/min	说明
1	怠速 n_i	0	5	—
2	最低全负荷转速 $n_{\min}$	100	10	—
3	最大净扭矩转速 n_M	100	10	增压发动机为最大净扭矩转速范围的中间转速
4	最大爆发压力转速 n_{pmax}	100	10	缸内爆发压力最大时的转速
5	额定转速 n_r	100	10	—
6	最高持续转速 n_{con}	100	10	—
7	最高空载转速 n_{imax}	0	5	—

7.5.2 冷热冲击试验循环工况

按照图2及表3规定的工况在试验台架上连续运行冷热冲击试验,不同工况间转换在15s内完成,均匀地改变转速及负荷,转换时间计入下一工况,每循环历时6min,共3000循环,运行持续时间300h。

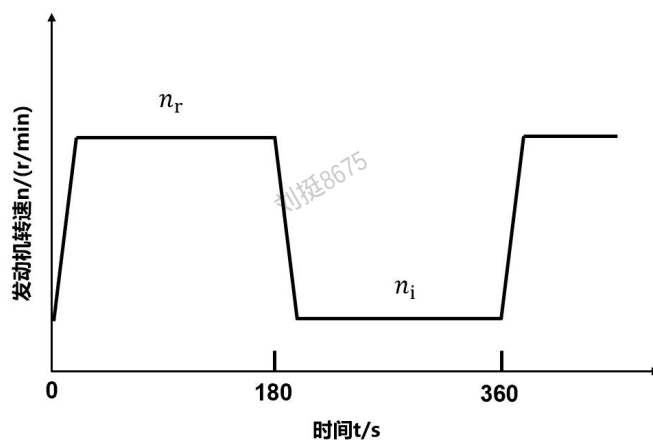


图2 冷热冲击试验循环工况规范示意图

表3 冷热冲击试验循环工况

工况序号	转速	负荷/%	工况时间/s	说明
1	怠速 n_i →额定转速 n_r	100	15	开始升温, 采用冷热冲击专用设备, 能实现外循环强制加热
2	额定转速 n_r	100	165	冷却液温度升至 $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, 温度稳定时间不低于60s
3	额定转速 n_r →怠速 n_i	0	15	开始降温, 采用冷热冲击专用设备, 能实现外循环强制降温
4	怠速 n_i	0	165	冷却液温度降至 $30^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, 温度稳定时间不低于60s

7.5.3 额定功率试验循环工况

额定功率试验按照图3和表4规定的工况在试验台架上连续运行, 不同工况间转换在15s内完成, 均匀地改变转速及负荷, 转换时间计入下一工况, 每循环历时30min, 共400循环, 运行持续时间200h。

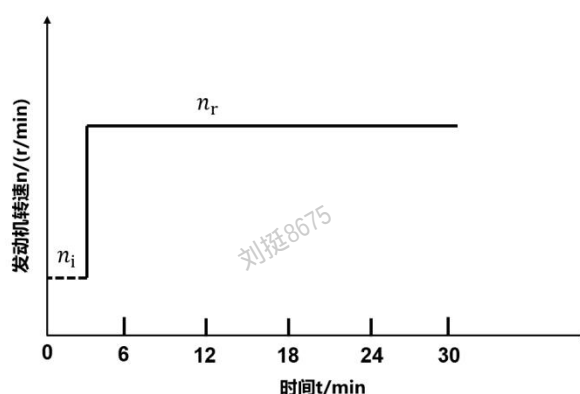


图3 额定功率试验循环工况规范示意图

表4 额定功率试验循环工况

工况序号	转速	负荷/%	工况时间/min
1	怠速 n_i	0	3
2	额定转速 n_r	100	27

7.5.4 试验过程中的检查及维护

检查及维护参照表5中规定的周期和内容进行。每次检查维护结束后继续运行的最初1h内, 允许排除因维护拆装不慎造成的漏油、漏水和漏气。

表5 氢燃料内燃机检查周期及维护内容

检查周期	维护内容
随时	1) 通过仪表和上位机等随时检查氢燃料内燃机运行数据, 若相关数据超出限值范围, 根据实际故障严重程度, 发出警报或紧急停车, 进行处理和维修。 2) 通过试验室安全监控系统随时检查供氢系统及室内氢气浓度等关键参数, 若发现异常应立即排查, 必要时停机检查并采取措施。 3) 判断有无异常燃烧情况(爆震、回火及早燃等)出现, 若有应立即采取措施消除。 4) 监听试验过程中的运行异响, 必要时停机检查并采取措施。

表5（续）

检查周期	维护内容
每1h	1) 在1h内适时记录以下关键参数：环境压力、温度及相对湿度；氢气流量、压力及温度；发动机转速及扭矩；机油压力及温度；防冻液温度；进气管压力及温度；排气压力及温度；活塞最大漏气量；曲轴箱压力及氢气浓度；尾排氢气浓度；运行持续时间。记录表参见附录。 2) 将上述数据以运行持续时间为横坐标记录在监督曲线上。
每24h	1) 停机静置15min，用量杯加机油准确地至油标尺上限，所加机油的重量用来计算该24h平均机油/氢气消耗比，并画在监督曲线上。 2) 检查发动机向内向外漏油、漏水和漏气情况。如管道开裂、连接处漏气、机油失效、缸筒内进水等问题。保持发动机及周围的清洁，以便及时发现泄露。 3) 巡视发动机并检查紧固件、连接件及管路，尤其是软管。检查皮带张紧情况，必要时张紧。 4) 检查所有液面高度。
每96h	1) 停机静置15min，更换机油及机油滤芯。对使用后的机油取部分油样，对油样进行分析，按照GB/T 7607或GB/T 8028及其他后续相关的国家标准对机油指标（运动粘度、含水量、酸值、金属含量等）进行评定。 2) 更换机油及机油滤芯。 3) 检查并调整氢气喷射压力、泄露情况。
每192h	1) 检查气门间隙及气门下沉量，并将其间隙调整至规定值。 2) 清洗或更换机油滤清器滤芯及空气滤清器滤芯，必要时更换纸质滤芯。 3) 检查火花塞电极及瓷体，若有严重烧蚀及裂纹，更换火花塞。

7.6 性能复试

可靠性试验结束后，重复7.4进行性能复试。复试性能指标与初试性能指标进行比较（数据比较记录表见附录C.2）。

7.7 试验后拆检及精密测量

试验结束后，按照附录A对供氢系统进行气密性试验，如有泄露，查明供氢系统氢气泄露零部件。气密性试验结束后，应对样机进行拆检及精密测量。检查各主要零部件的磨损和损坏情况。应精密测量下列零件尺寸：活塞、活塞环、活塞销、气缸套、气门导管、气门座、连杆衬套、连杆轴瓦及主轴瓦、曲轴轴颈、凸轮和凸轮轴颈、凸轮轴衬套等。拆检及相关测量记录表见附录C.1。

8 可靠性评定方法

8.1 可靠性的评定原则

- 8.1.1 在氢燃料内燃机可靠性试验中，原则上以零部件的故障模式来描述氢燃料内燃机的故障。
- 8.1.2 难以用零部件的故障模式来描述，或无法确认是某一零部件发生故障时，可以用整机的故障模式来描述。
- 8.1.3 误用故障及由此而引起的从属故障不作统计，但应如实详细记录。
- 8.1.4 由于维修保养不善或为排除某一故障而引起另一零部件损坏，则该零部件损坏不纳入可靠性评定。

8.2 故障分类与记录

- 8.2.1 根据故障的危害程度及消除故障的难易程度，将故障分为四类，分类原则见表6。
- 8.2.2 在可靠性试验过程中，对所发生的故障，按附录D进行分类。故障模式分类表中未包括的故障可参照附录A同类型故障模式判定，若无同类型故障模式，可按表6规定原则进行分类和扣分。试验结束后，所有按故障分类纳入统计评分计算。

- 8.2.3 如某一故障导致关联性故障发生，则以所导致的一系列关联故障中最严重的一项划分类别。
- 8.2.4 在记录故障时，只统计本质故障的次数和类别。若由此引起的从属故障，该故障次数不统计，但故障类别应按其所造成的最严重后果的故障来判定。
- 8.2.5 如某一故障导致同时并发三项或三项以上严重故障，则判为致命故障。
- 8.2.6 如发生致命故障，则判为氢燃料内燃机可靠性不合格。
- 8.2.7 定期维护保养中发生的严重故障和一般故障，记录故障类别时应降低一档故障类别，即分别记为一般故障和轻微故障。
- 8.2.8 可靠性试验故障记录表见附录C.3。
- 8.2.9 故障分析表见附录C.4。

表6 故障分类原则

故障类别		分类原则	故障危害系数
1	轻微故障	一般不导致停机，不需要更换零件并可在短时间内排除的故障，如非重要部位的紧固件松动等。	1
2	一般故障	发动机性能参数下降超过波动要求，不需要更换主要零部件并可用随机工具在短期内排除的故障，如非主要件损坏、三漏、内部紧周件松动等。	10
3	严重故障	影响正常运转，主要零部件损坏或主要性能超出劣化率指标要求，需更换主要零部件方能修复的故障，如氢燃料消耗率超过规定限值，气缸套、活塞、活塞环等损坏需换件或严重三漏等。	50
4	致命故障	危及运转安全，引起主要部件报废，或对周围环境造成严重危害的故障，室内氢气浓度值超标、连杆断裂、飞轮碎裂及曲轴和机体等重要零部件报废等。	不规定故障危害系数，直接扣100分

注：主要零部件指对产品主要性能有直接、明显影响的零件，如氢气喷射器、火花塞、活塞等。

8.3 评定指标与计算方法

氢燃料内燃机可靠性评定指标采用基本指标加无故障性综合评分。只有在满足可靠性的基本指标的基础上，才能进行无故障性综合评分。若不能达到基本指标，则判定整机可靠性不合格。试验中更换的零部件未达到设计的寿命，则该零部件可靠性不合格。

8.3.1 基本指标评定

8.3.1.1 运行时间

为使可靠性有一致的评定基础，在没有重大的结构损坏的前提下，允许更换少量的零部件。运行持续时间需达到7.5.1中的规定，才进行可靠性评定。

8.3.1.2 首次故障前平均工作时间MTTF

首次故障前平均工作时间MTTF，基础指标应不低于48h，计算方法按公式（1）：

氢燃料内燃机出现首次故障时的累积工作时间的平均值，单位为小时（h）。

$$MTTFF = \frac{1}{r} [\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)T_0] \cdots \cdots (1)$$

式中：

r ——发生首次故障（不计轻度故障）的台数；

t_i ——第 i 台样机发生首次故障时的累积工作时间，单位为小时（h）；

n ——试验样机台数；

T_0 ——试验结束时间，单位为小时（h）。

8.3.1.3 平均故障间隔时间MTBF

平均故障间隔时间MTBF，基础指标需不低于24h，计算方法按公式（2）：
相邻两次故障之间的平均工作时间，单位为小时(h)。

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n t_{c,i}}{r_a} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$t_{c,i}$ ——第*i*台样机的累积工作时间，单位为小时(h)；

r_a ——试验期间（包括磨合和性能试验期间）样机发生故障的（不计轻度故障）总数。

8.3.2 整机性能稳定性评定

经过规定的可靠性试验运行后，整机性能复试时，性能指标可能发生变化，通过性能参数的劣化程度来对整机性能稳定性进行扣分并参与可靠性评分计算。扣分规定见表7。

劣化率的大小表明劣化程度，计算式为：

$$\text{劣化率} = \frac{\text{初试数值} - \text{复试数值}}{\text{初试数值}} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

表7中第1、2项中劣化率为负值时不扣分。

表7中第3、4项中劣化率为正值时不扣分。

启动时间、机油消耗率应满足厂商规定，若不满足，归类为严重故障。

表7 性能复试劣化扣分表

序号	项目名称	参数	劣化率（对应故障类别）		
			≥3%	≥5%	≥10%
1	功率试验	额定功率	一般故障	严重故障	致命故障
2	功率试验	最大扭矩	一般故障	严重故障	致命故障
3	机械损伤功率试验	机械损失功率(额定转速)	轻微故障	一般故障	严重故障
4	氢气消耗率试验	氢气消耗率	轻微故障	一般故障	严重故障

注：最大活塞漏气量不超过GB/T 19055-2024附录A A.1.5中的限值要求，若超过，需查明原因，并进行相应评定和扣分。

8.3.3 运行安全性评定

在可靠性试验进行过程中，通过监测发动机关键位置的氢气浓度变化来对运行安全性进行扣分并参与可靠性评分计算。氢气体积浓度不小于1%时，归类为严重故障；氢气体积浓度不小于2%时，归类为致命故障。

8.3.4 零部件评定

8.3.4.1 裂纹/断裂评定

按照GB/T 19055中附录A对零部件裂纹或断裂的严重程度进行分类和评定。

表8 裂纹/断裂评定扣分规定

序号	程度	形貌	故障分类
1	轻微裂纹	通过探伤仪或用10倍的放大镜才能发现	无故障
2	中等裂纹	肉眼可见	轻微故障
3	较大裂纹或断裂	尺寸较大的裂纹或断裂	一般故障
4	严重裂纹或断裂	关键部位的大裂纹或断裂	严重故障

表8（续）

注：由机械交变应力引起的疲劳裂纹或断裂，主要发生在连杆、曲轴、缸体、油底壳、齿轮及支架等零部件上；由燃

烧或摩擦产生的热疲劳裂纹或断裂，主要发生在缸盖、活塞、喷嘴、排气歧管及增压器等零部件上。由氢脆引起的疲劳裂纹或断裂，主要发生在高压氢气管路、氢气共轨、氢气喷射器、进排气门等与氢气接触部件。

8.3.4.2 沉积物评定

分析油底壳、罩盖、缸盖上表面、活塞、进气门和凸轮等表面上的沉积物、油泥及漆膜，评定油料品质和零部件工作状态的关系。按表9对零部件表面的沉积物进行分类。

表9 沉积物评定扣分规定

序号	程度	形貌	故障分类
1	轻微沉积物	几乎看不到沉积物	无故障
2	中等沉积物	有明显的沉积物，量少，未占满间隙	轻微故障
3	较严重沉积物	沉积物较多，几乎占满间隙	一般故障
4	严重沉积物	占满间隙	严重故障

8.3.4.3 摩擦表面评定

主要摩擦副表面的一般磨损、粘着磨损及磨料磨损的严重程度，按表10进行故障分类。

表10 摩擦表面磨损扣分规定

摩擦表面磨损分类	程度	形貌		故障分类	
一般磨损	轻微磨损	不可测出，可见加工痕迹或光亮		无故障	
	轻度磨损	勉强可测量		轻微故障	
	中度磨损	可测量		一般故障	
	严重磨损	有深度磨损或局部过量磨损		严重故障	
粘着磨损		擦痕	材料转移		
	轻微擦伤	表面变颜色，局部光亮或少量擦痕	无	无故障	
	中度擦伤	擦痕多处，面积较大，感觉有深度	表层材料转移	轻微故障	
	粘着	擦痕分布宽面深	次表层材料转移	一般故障	
	严重粘着	大面积粘着和撕裂	材料撕裂转移	严重故障	
磨料磨损		划痕数量	划痕深度	用指甲或铅笔感觉	
	轻微划痕	很少	很浅	无	无故障
	轻度划痕	少量	较浅	不易	轻微故障
	中度划痕	中等数量	较深	略有	一般故障
	严重划痕	很多	深	有	严重故障

8.3.4.4 氢脆评定

按照GB/T 34542.3中规定对与氢气接触的关键零部件的金属材料（如进排气门、活塞、活塞环、曲轴等）进行氢脆敏感性测试。若氢脆敏感度系数不大于2，则材料氢脆不敏感；若氢脆敏感度系数不小于2，则材料氢脆敏感，归类为严重故障。

8.3.4.5 机油评定

按照GB/T 7607或GB/T 8028及其他后续相关的国家标准中对机油指标（运动粘度、含水量、酸值、金属含量等）进行评定。

8.3.5 无故障性综合评分

试验期间，如果样机发生致命故障，则该产品的无故障性综合评分值为不及格，不在计算其Q值。在未发生致命故障时，按公式（4）计算其无故障性综合评分值：

$$Q = 100 - \frac{(MTBF)_0}{nT_0} \sum_{i=1}^{r_a} K_i E_i \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$(MTBF)_0$ ——氢燃料内燃机产品规定的MTBF目标值，单位为小时（h）；

K_i ——第*i*个故障的故障危害系数。

各类故障的故障危害系数规定如下：

严重故障： $K_1=50$ ；

一般故障： $K_2=10$ ；

轻度故障： $K_3=1$ ；

E_i ——第*i*个故障的时间系数。计算公式如下：

$$E_i = \sqrt{\frac{2T_0}{T_0+T_i}} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

T_i ——第*i*个故障发生时样机累积工作时间，单位为小时（h）。

当计算结果 $Q < 0$ 时，以零分计； $r_a = 0$ 时， $Q = 100$ 。

附录 A
(规范性)

氢燃料内燃机供氢系统气密性试验方法

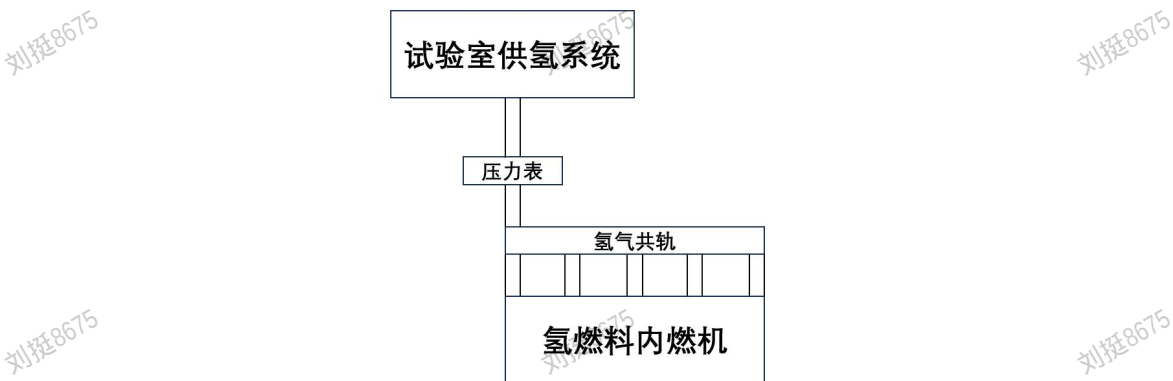
A. 1 试验条件要求

将氢燃料内燃机置于环境温度下，静置时间不少于 2h，使氢燃料内燃机处于冷机状态。

A. 2 试验方法

按照下列程序进行气密性试验。

- a) 将试验室供氢系统出口与氢燃料内燃机共轨进口通过适当的管道进行紧密连接，连接管道中间需包含压力表，压力表的位置宜尽量靠近氢气共轨（如下图所示）。



图A. 2 气密性试验管道连接

- b) 将试验室供氢系统出口压力设定为氢燃料内燃机喷射系统正常工作压力的 1.05 倍到 1.1 倍，压力稳定后关闭试验室供氢系统的出口阀门，保压 24h，记录压力下降值。
- c) 试验数据记录表参见附录 C. 5。
- d) 在以下情况下需立即停止试验（即供氢系统气密性不合格），并对供氢系统内氢气进行排空处理：
- 1) 压力表每小时压力下降值大于初始工作压力的 0.5%；
 - 2) 室内任意一个氢气传感器监测浓度大于 0.1%Vol；
 - 3) 其他明显的氢气泄露迹象（例如：气体泄露声音等）。

注 1：先使用氦气、氮气或两者混合物进行气密性预试验，第二步再使用氢气介质进行试验。

注 2：气密性试验过程中，供氢系统到氢气喷嘴之间的所有阀门均需开启。

附录 B

(规范性)

氢燃料内燃机氢气消耗率试验方法

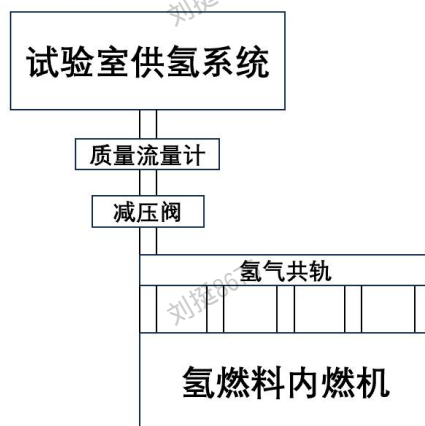
B.1 试验条件要求

氢燃料内燃机氢气消耗率试验条件要求如下：

- 将氢燃料内燃机置于环境温度下，静置时间不少于 2h，使氢燃料内燃机处于冷机状态。
- 按 GB/T 6072.1-2008 规定对非标准环境状况下的燃料消耗率进行修正。
- 每个试验循环工况达到制造商规定的稳定状态后，至少测量功率/扭矩、转速、每小时燃料消耗量、进气温度两次，并取平均值作为该工况测量值，扭矩不超过试验转速下最大扭矩的±2%，转速不超过 1%或±10r/min，每小时燃料消耗量的两次测量值相差不超过 2%。
- 试验时冷却介质机油温度按制造商的规定。
- 排气背压控制条件：与制造商规定的排气背压相差不超过±1kPa。
- 试验用氢气应使用符合 GB/T 37244-2018 或制造商要求的氢气。
- 试验数据记录表参见附录 C.6。

B.2 测试设备和测试工况

- 主要测试设备发动机测功机，其中本试验方法采用流量法对氢气消耗进行测量，因此试验室供氢系统需包含质量流量计（质量流量计安装方法见图 B.2）。
- 质量流量计测试精度不低于±0.5%。



图B.2 试验室质量流量计安装示意图

- 按 GB/T 6072.1-2008 规定的标定功率、标定转速或其他专业标准规定的工况进行运转。

B.3 测定时间

连续运转 4h。

B.4 计算方法

如果氢气质量流量计以流量单位记录结果，则氢燃料内燃机堆在某段时间内的实测氢耗量按式 (B.1) 计算：

$$m_{H_2} = \int_{T_1}^{T_2} q_{H_2} \cdot dt \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

m_{H_2} ——氢燃料内燃机实测氢气消耗量单位为克(g)；

q_{H_2} ——氢气流量计实测氢气流量，单位为克每秒(g/s)；

T_1 ——起始时间，单位为秒(s)；

T_2 ——结束时间，单位为秒(s)；

在某段时间内的实测氢气小时消耗量按式 (B.2) 计算，氢气消耗率按式 (B.3) 计算：

$$c_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{t} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

$$g_{H_2} = \frac{c_{H_2}}{P} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

c_{H_2} ——氢燃料内燃机氢气小时消耗量，单位为 g/h；

t ——测试时长，单位为 h；

g_{H_2} ——氢燃料内燃机氢气消耗率，单位为 g/(kW·h)；

P ——运转工况的有效功率，单位为 kW。

附录 C

(资料性)

记录表格

C.1 拆检精密测量记录表

拆检精密测量记录表如表 C.1 所示。

表 C.1 拆检精密测量记录表

试验时间	零部件 1		零部件 2		...	零部件 n	
试验前	参数 1		参数 1		...	参数 1	
	参数 2		参数 2		...	参数 2	
	...		...		...	...	
	参数 X		参数 X		...	参数 X	
试验后	参数 1		参数 1		...	参数 1	
	参数 2		参数 2		...	参数 2	
	...		...		...	...	
	参数 X		参数 X		...	参数 X	

C.2 性能试验记录表

性能试验记录表如表 C.2 所示。

表 C.2 性能试验记录表

序号	检测项目	单位	质量指标	实测结果		劣化率
				初试	复试	
1	起动性能试验	s				
2	功率试验	kW				
3	机械损失功率试验	bar				
4	活塞漏气量试验	L/min				
5	机油消耗率试验	g/(kW·h)				
6	氢气消耗率试验	g/(kW·h)				
...	...	...	...	...	...	...

C.3 可靠性试验故障记录表

可靠性试验故障记录表如表 C.3 所示。

表 C.3 可靠性试验故障记录表

序号	故障时间 h	积累工作时间 h	系统名称	零部件名称	生产厂家	故障模式	故障情况说明	故障类别	故障排除措施
1									
2									
3									
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

C.4 故障分析表

故障分析表如表 C.4 所示。

表 C.4 故障分析表

机型	试验项目	故障时间
故障件名称	厂家	
故障	故障分类	
故障表述		
故障原因分析		

C.5 氢燃料内燃机供氢系统气密性试验记录表

氢燃料内燃机供氢系统气密性试验记录表如表 C.5 所示。

表 C.5 氢燃料内燃机供氢系统气密性试验记录表

序号	试验前压力值 (kPa)	保压时间 (min)	试验压力 (kPa)	压力下降值 (kPa)
1		5		
2		10		
3		15		
4		20		

C.6 氢燃料内燃机氢气消耗率试验记录表

氢燃料内燃机氢气消耗率试验记录表如表 C.6 所示。

表 C.6 氢燃料内燃机氢气消耗率试验记录表

氢燃料内燃机	制造商			测功机	型号		环境状况	压力		燃油牌号			
	型号				编号			干温		机油牌号			
	编号				转速范围			相对湿度		试验地点			
	用途				扭矩范围			大气因子		记录			
					功率范围					校对			
试验工况	转速	扭矩	功率	氢气消耗量		氢气消耗率		进气	排气	机油		冷却水	
	实测	实测	实测	总量	消耗时间	氢气小时消耗量	实测	温度	温度	压力	温度	进水	出水
	单位	RPM	Nm	kW	g	s	g/h	g/(kW·h)	℃	℃	kPa	℃	℃
1													
2													
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

附录 D

(规范性)

车用氢燃料内燃机故障模式分类表

D.1 车用氢燃料内燃机故障模式分类表

表 D.1 车用氢燃料内燃机故障模式分类表(后续根据实际测试调研添加完善)

序号	零部件名称	故障模式	情况说明	故障类别				是否涉氢
氢燃料内燃机				轻微	一般	严重	致命	
				1	2	3	4	
一、整机			合计					
1	整机	飞车	转速失控而飞车, 造成整机报废				√	否
2	整机	明显异响	因装配或调整不当引起, 调整后可正常工作		√			否
3	...	...	...	...	...	...	...	...
二、供氢系统			合计					
1	氢气喷射器	漏气	需更换			√		是
2	氢气管	开裂	需更换			√		是
3	...	...	...	...	...	...	...	...
三、曲轴箱			合计					
1	曲轴箱	氢气浓度高	氢浓度 $\geq 1\%vol$			√		是
2	曲轴箱	油底壳	破裂、变形引起漏油, 需更换			√		否
3	...	...	...	...	...	...	...	...
四、点火系统			合计					
1	发电机	损坏	需更换			√		否
2	火花塞	损坏	击穿或磁芯裂, 需更换		√			否
3	...	...	...	...	...	...	...	...
五、进排气系统			合计					
1	进气歧管	回火	进气压力波动过大			√		是
2	排气歧管	尾排	尾排氢气浓度高			√		是
3	...	...	...	...	...	...	...	...

表 D.1 (续)

序号	零部件名称	故障模式	情况说明	故障类别				是否涉氢
六、润滑系统			合计					
1	润滑油	机油失效	需更换		√			是
2	润滑油泵	损坏	需更换			√		否
3	...	...	...	...	...	...	...	...
七、气缸盖与气缸体			合计					
1	气缸盖	严重漏气	用紧固螺母或更换衬垫的方法不能消除			√		否
2	气缸盖衬套	损坏	动力性明显下降需更换		√			否
3	...	...	...	...	...	...	...	...
八、冷却系统			合计					
1	水泵	损坏	需更换			√		否
2	水管及卡箍	损坏	需更换	√				否
3	...	...	...	...	...	...	...	...
九、起动系统			合计					
1	起动装置	损坏	需更换			√		否
2	起动装置	失效	不换件可修复	√				否
3	...	...	...	...	...	...	...	...
十、配气机构			合计					
1	凸轮轴	断裂	未造成严重后果			√		否
2	气门	严重烧蚀或磨损	需更换			√		否
3	...	...	...	...	...	...	...	...
十一、曲轴			合计					
1	曲轴	断裂	未造成整机报废，需更换			√		否
2	曲轴	弯曲变形	明显弯曲变形，需更换			√		否
3	...	...	...	...	...	...	...	...

表 D.1（续）

序号	零部件名称	故障模式	情况说明	故障类别				是否涉氢
十二、连杆			合计					
1	连杆	变形	需更换			√		否
2	连杆螺栓螺母	扭力不足	明显松动可紧固		√			否
3	...	...	...	...	...	...	...	...
十三、活塞			合计					
1	活塞	烧顶	顶部严重烧蚀， 需更换			√		否
2	活塞环	断裂	未引起严重后果， 需更换			√		否
3	...	...	...	...	...	...	...	...