

ICS 43. 120

T XX

# 团 体 标 准

T/CSAE XXX—XXXX

## 燃料电池发动机环境耦合模拟性能试验方法

Test method for coupling simulation performance of environment of  
fuel cell engines

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国汽车工程学会 发布

刘挺8675

## 目 次

1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 测量参数、单位和准确度 .....	1
5 试验条件及试验要求 .....	2
5.1 燃料电池发动机条件 .....	2
5.2 试验设备条件 .....	2
5.3 试验要求 .....	2
6 试验步骤 .....	2
6.1 模拟低温高海拔试验 .....	2
6.1.1 怠速冷起动特性试验 .....	2
6.1.2 额定功率冷起动试验 .....	3
6.1.3 模拟低温高海拔稳态特性试验 .....	3
6.1.4 模拟低温高海拔加载动态响应试验 .....	4
6.2 模拟高温高湿试验 .....	5
6.2.1 额定功率试验 .....	5
6.3 模拟高温干热试验 .....	6
6.3.1 怠速冷启动试验 .....	6
6.4 气密性试验 .....	6
6.5 绝缘电阻测试试验 .....	7
6.6 数据处理 .....	7
附录 A (资料性) 模拟参数推荐值 补充条款, 引出表 .....	8
附录 B (规范性) 相关计算公式 .....	10
附录 C (资料性) 数据记录表 .....	11

## 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。

本文件由中国汽车工程学会测试技术分会提出并归口。

本文件起草单位：……。

本文件主要起草人：……。

本文件为首次制定。

# 燃料电池发动机环境耦合模拟性能试验方法

## 1 范围

本文件给出了质子交换膜燃料电池发动机在模拟环境耦合条件下性能试验的测量参数、单位和准确度，试验条件及试验要求和试验方法等内容。

本文件适用于质子交换膜燃料电池发动机的性能测试。

## 2 规范性引用文件

下列文件对本文件的应用是必不可少的，凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件，凡是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 20626.1—2017 特殊环境条件 高原电工电子产品 第1部分：通用技术要求

GB/T 24548 燃料电池电动车 术语

GB/T 24549 燃料电池电动汽车安全要求

GB/T 24554—2022 燃料电池发动机性能试验方法

GB/T 25319 汽车用燃料电池发电系统 技术条件

GB/T 37244 质子交换膜燃料电池汽车用燃料氢气

## 3 术语和定义

GB/T 24548 及 GB/T 25319 界定的术语和定义，以及下列术语和定义，适用于本文件。

### 3.1

#### 耦合环境 Coupling environment

耦合环境是指通过环境模拟设备同步模拟温度、湿度、大气压力（海拔），形成相互交互且彼此影响的用以分析燃料电池发动机在复杂条件下性能的测试环境。

## 4 测量参数、单位和准确度

试验测量的参数、单位、准确度和分辨率应符合表1的规定。

表1 测量参数、单位、准确度和分辨率

测量参数	单位	准确度	分辨率
时间	s	±0.1	0.1
电压	V	±0.3%FSD <sup>a</sup> 或±1%rdg <sup>b</sup>	0.1
电流	A	±0.3%FSD 或±1%rdg	0.1
压力	kPa	±2	0.01
温度	°C	±2	0.05
湿度	—	±3%	0.1% RH
质量流量	g/s	≤±1.0%FSD	

<sup>a</sup>FSD: 表示满量程  
<sup>b</sup>rdg: 表示读数

## 5 试验条件及试验要求

### 5.1 燃料电池发动机条件

燃料电池发动机应满足以下要求：

- 燃料电池发动机各系统组成完整；
- 燃料电池发动机有可靠的安全保障系统；
- 燃料电池发动机已按 GB/T 24554-2022 试验项目及顺序要求完成：气密性测试、起动特性试验、额定功率试验、稳态特性试验、绝缘电阻测试等性能试验并检验合格。

### 5.2 试验设备条件

试验设备应满足以下条件：

- 试验用环境舱应具备泄露氢浓度检测及报警装置，并与通风装置联动；
- 试验用环境舱或台架应满足燃料电池发动机所需散热需求；
- 试验用环境舱能模拟海平面大气至设计高度指标以上的压力指标参数并具备压力调节装置；
- 试验用环境舱（或台架）能实现氢空预冷；
- 试验用环境舱温度范围  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，静态温度波动  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；湿度范围： $15\text{RH}\%\sim 95\text{RH}\%$ ；静态湿度波动  $\pm 3\text{RH}\%$ 。
- 试验用环境舱静态压力波动范围： $\pm 1\text{ kPa}$ ，动态压力波动范围： $\pm 2\text{ kPa}$ ；
- 试验设备数据采集频率不低于  $5\text{ Hz}$ ；
- 试验用燃料符合 GB/T 37244 规定要求。

### 5.3 试验要求

试验应符合以下要求：

- 试验前，燃料电池发动机冷却液加注完成；
- 试验前，将燃料电池发动机置于测试环境中，燃料电池发动机准备工作完成，接受起动指令后，可正常起动测试；
- 如燃料电池发动机选用非承压式溢水壶，则溢水壶上方液面符合不同海拔压力要求；
- 燃料电池发动机在测试过程中不应补充冷却液及加湿用水，开始进行测试后，包括在测试过程中，不对燃料电池发动机做出任何改动。
- 试验过程中，燃料电池发动机的起动、加载、降载、停机等均应由试验平台按照制造商提供的通讯协议发送或接收相应指令。

## 6 试验步骤

### 6.1 模拟低温高海拔试验

#### 6.1.1 怠速冷起动特性试验

##### 6.1.1.1 试验步骤

燃料电池发动机应按照以下步骤进行怠速冷起动试验：

- a) 燃料电池发动机进入环境舱后立即按照制造商规定进行一次燃料电池发动机开关机过程，燃料电池发动机应起动至怠速状态（或燃料电池发动机最低功率点），持续时间（含起动）不超过  $5\text{ min}$ ，然后立即关闭燃料电池发动机。
- b) 在每个工况试验前，依据附录 A 工况推荐表中的工况或制造商推荐工况的综合要

求设定环境舱或试验室的温度、压力、湿度，并保证燃料电池发动机在设定的环境中至少放置 12h；

- c) 预处理过程结束后，按照制造商建议的起动操作步骤起动燃料电池发动机；
- d) 燃料电池发动机起动后，在怠速状态（或燃料电池发动机最低功率点）下至少持续运行 10min（保持环境温度为设定值）；
- e) 如果不满足条件 d 或触发环境舱氢浓度传感器警报，应立刻进行检修，在故障排除后重新按照步骤 a) 到 d) 进行试验。
- f) 完成一个低温高海拔工况后，按照制造商规定的方式执行燃料电池发动机停机过程；
- g) 重复步骤 a) 至 f)，直至完成所有况测试。

#### 6.1.1.2 试验数据记录

试验数据记录详见附录 C。

#### 6.1.2 额定功率冷起动试验

##### 6.1.2.1 试验步骤

燃料电池发动机应按照以下步骤进行额定功率冷起动试验：

- a) 燃料电池发动机进入环境舱后立即按照制造商规定进行一次燃料电池发动机开关机过程，燃料电池发动机应起动至怠速状态（或燃料电池发动机最低功率点），持续时间（含起动）不超过 5min，然后立即关闭燃料电池发动机。
- b) 在每个工况试验前，依据附录 A 工况推荐表中的工况或制造商推荐工况的综合要求设定环境舱或试验室的温度、压力、湿度，并保证燃料电池发动机在设定的环境中至少放置 12h；
- c) 预处理过程结束后，按照制造商建议的起动操作步骤起动燃料电池发动机；
- d) 测试平台按照制造商提供的通讯协议发送或接收相应指令，加载到额定功率点后燃料电池发动机在额定功率下至少持续运行 30min。
- e) 如果在 c) 或 d) 操作过程中触发环境舱氢浓度传感器警报，或者不满足条件 c) 或 d)，应立刻进行检修，在故障排除后重新按照步骤 a) 到 d) 进行试验。
- f) 完成一个低温高海拔工况后，按照制造商规定的方式执行燃料电池发动机停机过程；
- g) 重复步骤 a) 至 f)，直至完成所有况测试。
- h) 若在某工况下达不到额定功率，则加载到最高稳定功率。

##### 6.1.2.2 试验数据记录

试验数据记录详见附录 C。

#### 6.1.3 稳态特性试验

##### 6.1.3.1 试验步骤

燃料电池发动机应按照以下步骤进行低温高海拔稳态特性试验测试：

- a) 燃料电池发动机进入环境舱后立即按照制造商规定进行一次燃料电池发动机开关机过程，燃料电池发动机应起动至怠速状态（或燃料电池发动机最低功率点），持续时间（含起动）不超过 5min，然后立即关闭燃料电池发动机。
- b) 在每个工况试验前，依据附录 A 工况推荐表中的工况或制造商推荐工况的综合要求设定环境舱或试验室的温度、压力、湿度，并保证燃料电池发动机在设定的环境

- 中至少放置 12h;
- c) 预处理过程结束后,按照制造商建议的起动操作步骤起动燃料电池发动机,并在怠速工况下保持 10min;
  - d) 测试平台按照制造商提供的通讯协议发送或接收相应指令,使燃料电池发动机加载到预先确定的工况点,推荐怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点), $10\%P_E$ 、 $20\%P_E$ 、 $30\%P_E$ 、 $40\%P_E$ 、 $50\%P_E$ 、 $60\%P_E$ 、 $70\%P_E$ 、 $80\%P_E$ 、 $90\%P_E$ 、 $P_E$ (0m 海拔下的额定功率,以  $P_E$  表示),每个工况点至少稳定运行 3min,每个工况分析数据的时间长度不少于 2min;
  - e) 如果在 c) 或 d) 操作过程中触发环境舱氢浓度传感器警报,或者不满足条件 c) 或 d),应立即进行检修,在故障排除后重新按照步骤 a) 到 d) 进行试验;
  - f) 完成一个低温高海拔工况后,按照制造商规定的方式执行燃料电池发动机停机过程;
  - g) 重复步骤 a) 至 f),直至完成所有工况测试。如在某海拔工况下达不到预先确定的工况点,则加载到最高稳定功率,该工况测试结束。如果在试验过程中试验中断,则试验需重新按照 c) -f) 进行试验。

### 6.1.3.2 试验数据记录

试验数据记录如下:加载响应时间,燃料电池电堆(或燃料电池发动机)电压、燃料电池电堆(或燃料电池发动机)电流、辅助系统(包括空压机、氢循环泵、冷却泵、控制器等部件)电压和电流、氢气流量、空气流量,环境舱内氢气浓度、环境舱内的温度、湿度和压力(绝压)数据记录详见附录C。由此可得到燃料电池堆的极化特性曲线(I-V曲线)、燃料电池堆的功率曲线、燃料电池堆的效率曲线;燃料电池发动机的功率曲线、燃料电池发动机的效率曲线、辅助系统的功率曲线等。

### 6.1.4 加载动态响应试验

#### 6.1.4.1 试验方法

- a) 燃料电池发动机进入环境舱后立即按照厂家规定进行一次燃料电池发动机开机过程,燃料电池发动机应起动至怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点),持续时间(含起动)不超过 5min,然后立即关闭燃料电池发动机。
- b) 在每个工况试验前,依据附录 A 工况推荐表中的工况或制造商推荐工况的综合要求设定环境舱或试验室的温度、压力、湿度,并保证燃料电池发动机在完成设定的环境中至少放置 12h;
- c) 预处理过程结束后,按照制造商建议的起动操作步骤起动燃料电池发动机,并按照制造商的要求,使燃料电池发动机工作加载至一定功率,同时监测燃料电池发动机冷却液的出口温度,当冷却液出口温度达到正常工作温度(该温度由制造商指定),即达到热机状态,之后回到怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点)运行 10s;
- d) 测试平台按照制造商的规定向燃料电池发动机发送加载指令,加载到动态响应的起始功率点,在该功率点至少稳定运行 1min;
- e) 测试平台继续向燃料电池发动机发送加载指令,直至达到动态阶跃的截止点,燃料电池发动机在该功率点至少持续运行 10min;否则试验失败,需重新按照 c) 到 d) 进行试验;
- f) 完成一个低温高海拔工况后,按照制造商规定的方式执行燃料电池发动机停机过程;
- g) 重复步骤 a) 至 f),直至完成所有工况测试。
- h) 取怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点)至燃料发动机额定功率90% 的响应

时间作为评价燃料电池发动机的加载动态响应指标。

#### 6.1.4.2 试验数据记录

试验中测量的数据：动态阶跃响应时间、燃料电池堆（或燃料电池发动机）的电压、燃料电池堆（或燃料电池发动机）的电流、辅助系统的电压、辅助系统的电流、氢气流量、空气流量、环境仓内氢气浓度、环境仓内的温度、湿度和压力（绝压），数据记录详见附录C。

### 6.2 模拟高温高湿额定功率试验

#### 6.2.1 试验步骤

燃料电池发动机应按照以下步骤进行高温高湿额定功率试验：

- a) 燃料电池发动机进入环境仓后立即按照厂家规定进行一次燃料电池发动机开关机过程，燃料电池发动机应启动至怠速状态（或燃料电池发动机最低功率点），持续时间（含启动）不超过 5min，然后立即关闭燃料电池发动机。
- b) 在每个工况试验前，依据附录 A 工况推荐表中的工况或制造商推荐工况的综合要求设定环境舱或试验室的温度、压力、湿度，并保证燃料电池发动机在完成设定的环境中至少放置 12h；
- c) 预处理过程结束后，按照制造商建议的启动操作步骤启动燃料电池发动机，并按照制造商的要求，使燃料电池发动机工作加载至一定功率，同时监测燃料电池发动机冷却液的出口温度，当冷却液出口温度达到正常工作温度（该温度由制造商指定），即达到热机状态，之后回到怠速状态（或燃料电池发动机最低功率点）运行 10s；
- d) 测试平台制造商的规定向燃料电池发动机发送加载指令，加载到额定功率且以该功率持续运行 63 min（加载过程如图 1 所示）；
- e) 以图 1 中有效测量时长 60 min 运行功率的平均值作为燃料电池发动机的额定功率（ $P_E$ ）测量值（以 kW 为单位），额定功率测量值小数点后取 2 位有效数字（采用四舍五入的方法），额定功率标称值为额定功率测量值的整数部分；
- f) 燃料电池发动机在有效测量时长内的输出功率应始终处于 60min 平均功率的 97%~103%之间，否则试验结果无效，需重新按照 a 到 e 进行试验。
- g) 完成一个极端高温高湿工况后，按照制造商规定的方式执行燃料电池发动机停机过程；
- h) 重复步骤 a) 至 g)，直至完成所有工况测试。

#### 6.2.2 试验数据记录

试验中测量的数据：燃料电池堆（或燃料电池发动机）的电压、燃料电池堆（或燃料电池发动机）的电流、辅助系统的电压、辅助系统的电流、氢气流量、空气流量、环境仓内氢气浓度、环境仓内的温度、湿度和压力（绝压），数据记录详见附录 C。

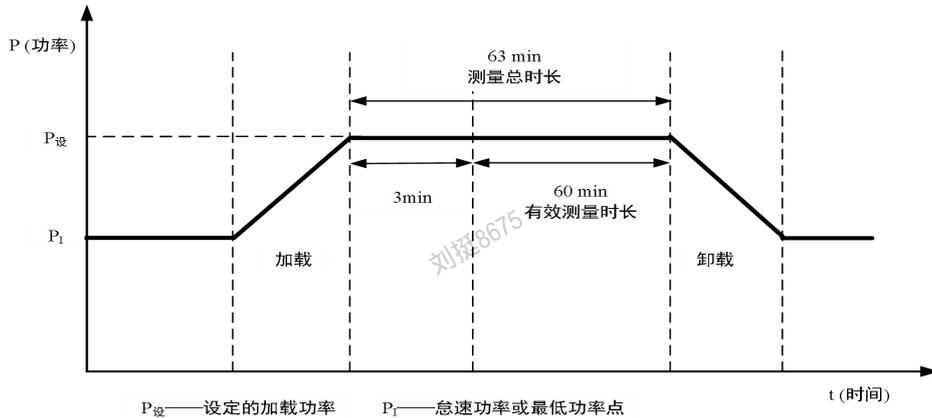


图 1 额功率测量过程示意图

### 6.3 模拟高温干热怠速冷启动试验

#### 6.3.1 试验步骤

燃料电池发动机应按照以下步骤进行高温干热怠速冷启动试验：

- a) 自增湿燃料电池发动机进入环境仓后立即按照厂家规定进行一次燃料电池发动机开关机过程，燃料电池发动机应启动至怠速状态（或燃料电池发动机最低功率点），持续时间（含启动）不超过 5min，然后立即关闭燃料电池发动机，对阴阳极流道就行大流量氮气吹扫，吹扫时间大于 10min。
- b) 在每个工况试验前，依据附录 A 工况推荐表中的工况或制造商推荐工况的综合要求设定环境舱或试验室的温度、压力、湿度，并保证燃料电池发动机在完成设定的环境中至少放置 6h；
- c) 预处理过程结束后，按照制造商建议的启动操作步骤启动燃料电池发动机；
- d) 燃料电池发动机启动后，在怠速状态（或燃料电池发动机最低功率点）下至少持续运行 10min（保持环境温湿度为设定值）；
- e) 如果不满足条件 d) 或触发环境舱氢浓度传感器警报，应立刻进行检修，在故障排除后重新按照步骤 a) 到 d) 进行试验。
- f) 完成一个高温干热工况后，按照制造商规定的方式执行燃料电池发动机停机过程；
- g) 重复步骤 a) 至 f)，直至完成所有况测试。

#### 6.3.2 试验数据记录

试验过程中记录数据如下：启动时间，燃料电池电堆（或燃料电池发动机）电压、燃料电池电堆（或燃料电池发动机）电流、辅助系统（包括空压机、氢循环泵、冷却泵、控制器等部件）电压和电流、氢气流量、空气流量、环境仓内氢气浓度、环境仓内的温度、湿度和压力（绝压），数据记录详见附录 C。

### 6.4 气密性试验

完成6.1、6.2、6.3的环境耦合工况下燃料电池发动机的专项试验后，对燃料电池发动机开展阴极流道、阳极流道及整体气密性试验，试验方法依据GB/T24554—2022 中8.8.2执行。

## 6.5 绝缘电阻测试试验

完成6.1、6.2、6.3的环境耦合工况下燃料电池发动机的专项试验后，在完成6.4气密性试验后，应立即开展绝缘电阻的测试，试验方法依据GB/T24554-2022中8.8.2执行。

## 6.6 数据处理

燃料电池发动机功率、燃料电池发动机效率、燃料电池发动机功率衰减率、按照附录B提供的方法进行试验结果处理。

## 附录 A

(资料性附录)

模拟参数推荐值

补充条款，引出表

表 A.1 模拟低温高海拔耦合设置的环境仓大气压力、温度及湿度等参数推荐值

海拔	大气压力	空气含氧量	温度	相对湿度
m	kPa	%	°C	RH%
3000	70.1	16.15	-30	20
			-40	
			-50	
4000	61.7	14.55	-30	20
			-40	
			-50	
5000	54.0	12.95	-30	20
			-40	
			-50	

不同海拔下对应的大气压力可参考表 A.1 或按照计算公式 (A.1) 计算:

$$P = P_0 \times \left(1 - \frac{0.0065H}{288.15}\right)^{5.256} \quad (\text{A.1})$$

式中: P——不同海拔下对应的大气压力, 单位为千帕 kPa;

$P_0$ ——0m 海拔高度下的大气压力, 单位为 kPa;

H——海拔高度, 单位为 m。

补充条款, 引出表

表 A.2 模拟高温高湿耦合设置的环境仓大气压力、温度及湿度等参数推荐值

海拔	大气压力	空气含氧量	温度	相对湿度
m	kPa	%	°C	RH%
0	101.3	20.95	35	80
				90
				95
0	101.3	20.95	40	80
				90
				95
0	101.3	20.95	45	80
				90
				95

表 A.3 模拟高温干热耦合设置的环境仓大气压力、温度及湿度等参数推荐值

海拔	大气压力	空气含氧量	温度	相对湿度
m	kPa	%	°C	RH%
0	101.3	20.95	35	15
				20
				30
0	101.3	20.95	40	15
				20
				30
0	101.3	20.95	45	15
				20
				30

## 附录 B

(规范性附录)

相关计算公式

### B.1 燃料电池发动机功率

依据 GB/T24554-2022 附录 B.3 计算不同耦合环境下的燃料电池发动机功率。

### B.2 燃料电池发动机效率

依据 GB/T24554-2022 附录 B.4 计算不同耦合环境下的燃料电池发动机效率。

### B.3 不同极限耦合环境下燃料电池发动机功率衰减率

不同极限环境耦合下燃料电池发动机在不同工况下功率衰减率按照公式 (B.4) 计算:

$$k = \frac{P_E - P_H}{P_E} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

k——燃料电池发动机功率衰减率;

$P_E$ ——燃料电池发动机额定功率(由制造商直接给出或由制造商给出测试环境后再台架上直接测得),单位为千瓦(kW);

$P_H$ ——不同极限环境耦合下燃料电池发动机最高稳定功率,单位为千瓦(kW)。

## 附录 C

(资料性附录)

数据记录表

C.1 燃料电池发动机低温高海拔性能测试模拟试验记录表，见表 C.1-C.3。

表 C.1 怠速/额定功率冷起动试验试验数据记录表

测试项目	海拔	温度	电堆电流	电堆电压	发动机电流	发动机电压	起动时间	辅助系统电压	辅助系统电流	氢气流量	空气流量	环境仓内氢浓度	尾排氢浓度	
	m	°C	A	V	A	V	s	V	A	g/s	g/s	%	%	
怠速/额定功率冷起动试验	3000	-30												
		-40												
		-50												
	4000	-30												
		-40												
		-50												
	5000	-30												
		-40												
		-50												

表 C.2 稳态特性试验试验数据记录表

测试项目	工况点	海拔	温度	电堆电流	电堆电压	发动机电流	发动机电压	起动时间	辅助系统电压	辅助系统电流	氢气流量	空气流量	尾排氢浓度	
		m	°C	A	V	A	V	s	V	A	g/s	g/s	%	
稳态特性试验	怠速、10%P E.....	3000	-30											
			-40											
			-50											
		4000	-30											
			-40											
			-50											
		5000	-30											
			-40											
			-50											

表 C.3 加载动态响应试验数据记录表

测试项目	工况点	海拔	温度	电堆电流	电堆电压	发动机电流	发动机电压	响应时间	辅助系统电压	辅助系统电流	氢气流量	空气流量	尾排氢浓度
		m	°C	A	V	A	V	s	V	A	g/s	g/s	%
加载动态响应	怠速状态(或)	3000	-30										

试验	燃料电池发动机最低功率点)~90%P <sub>E</sub>	4000	-40												
			-50												
			-30												
		5000	-40												
			-50												
			-30												
					-40										
					-50										
					-30										

C.2 燃料电池发动机高温高湿性能测试模拟试验记录表，见表 C.4。

表 C.4 额定功率试验数据记录表

测试项目	工况点	温度	湿度	电堆电流	电堆电压	发动机电流	发动机电压	持续时间	辅助系统电压	辅助系统电流	氢气流量	空气流量	尾排氢浓度	
		°C	%	A	V	A	V	s	V	A	g/s	g/s	%	
额定功率试验	P <sub>E</sub>	35	80											
			90											
			95											
		40	80											
			90											
			95											
		45	80											
			90											
			95											

C.3 燃料电池发动机高温干热性能测试模拟试验记录表，见表 C.5。

表 C.5 怠速冷起动试验试验数据记录表

测试项目	温度	湿度	电堆电流	电堆电压	发动机电流	发动机电压	起动时间	辅助系统电压	辅助系统电流	氢气流量	空气流量	环境仓内氢浓度	尾排氢浓度
	°C	%	A	V	A	V	s	V	A	g/s	g/s	%	%
怠速冷起动试验	35	15											
		20											
		30											
	40	15											
		20											
		30											
	45	15											
		20											
		30											