

团 体 标 准

T/CASEI XXXXX—XXXX

低温绝热气瓶静态蒸发率快速测试方法

Rapid testing method for the static evaporation rate of cryogenic insulated
cylinders

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国特种设备检验协会

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 原理	2
5 环境条件	2
6 仪器设备	2
7 试验装置流程	3
8 试验步骤	4
9 数据处理	4
10 试验记录	6
附录 A(资料性附录) 气瓶的标准最大允许蒸发流量	7
附录 B(资料性附录) 节流孔板孔径选择	8
附录 C(资料性附录) 两种常见的压力/时间曲线异常情况及调整措施	10
附录 D(资料性附录) 静态蒸发率检测记录(快速法)	11
附录 E(资料性附录) 氮和甲烷在饱和状态下热力学数据	122

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。

本文件由中国特种设备检验协会（CASEI）提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

低温绝热气瓶静态蒸发率快速测试方法

1 范围

本文件规定了低温绝热气瓶（包括焊接绝热气瓶和汽车用液化天然气气瓶，以下简称“气瓶”）工作压力下的静态蒸发率快速测试方法原理、试验条件、仪器设备、试验装置、试验步骤、数据处理和试验记录等要求。

本文件适用于公称容积150 L~1000 L、公称工作压力0.2 MPa~3.5 MPa（表压，下同）的盛装液氧、液氮、液氩、液态天然气、液态二氧化碳、液态氧化亚氮等介质在役的焊接绝热气瓶和公称容积150 L~1500 L、公称工作压力0.8 MPa~3.5 MPa盛装液化天然气作为汽车燃料箱的可重复充装在役汽车用液化天然气气瓶。

其他气瓶可参照本文件执行。

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 13005 气瓶术语

GB/T 18442.3 固定式真空绝热深冷压力容器 第3部分：设计

GB/T 18443.1 真空绝热深冷设备性能试验方法 第1部分：基本要求

GB/T 18443.5 真空绝热深冷设备性能试验方法 第5部分：静态蒸发率测量

GB/T 34347 低温绝热气瓶定期检验与评定

GB/T 3836.1 爆炸性环境第1部分：设备通用要求

TSG 23 气瓶安全技术规程

3 术语和定义

GB/T 13005、GB/T 18443.1、GB/T 18443.5界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

带压的气瓶 pressurized cylinder

瓶内装有深冷液化气体且气相压力在其公称工作压力及以下的气瓶。

3.2

压力变化率 pressure change rate

单位时间内气瓶压力的变化量，称为压力变化率，单位 kPa/min。

3.3

压力稳定变化 stable pressure variation

气瓶内气体压力大小随时间变化，每间隔10分钟压力变化率偏差不大于10%时，称该压力稳定变化（即压力直线变化）。

3.4

带压自然蒸发流量 pressurized evaporation flow rate

气瓶在50 %~80 %额定充满率下盛装试验介质，带压进行控制压力变化率下的气体排放，当气瓶内深冷介质达到热平衡，且气体压力变化率为零时，该气体排放流量称为气瓶的带压自然蒸发流量，单位为升每分钟或克每分钟（L/min或g/min）。

3.5**带压测试蒸发率 pressurized testing evaporation rate**

以带压自然蒸发流量计算被检气瓶平均24 h内自然蒸发损失的深冷液体质量与气瓶有效容积下深冷液体质量的百分比，单位为百分比每天（%/d）。

3.6**静态蒸发率 static evaporation rate**

带压测试蒸发率换算为标准环境状态下的蒸发率值，单位为百分比每天（%/d）。

3.7**标准最大允许蒸发流量 standard maximum allowable evaporation flow rate**

标准环境状态下，气瓶按 GB/T 34347 中表 1 或表 2 的最大允许静态蒸发率值换算的带压自然蒸发气体质量流量，单位为克每分钟（g/min）。

4 原理

气瓶静态蒸发率快速测试方法检测对象为带压的气瓶，试验过程将其气相空间连续排放并检测压力变化率直至被检气瓶内压力成稳定变化；切换至少两组不同大小的排放流量，连续排放并检测被检气瓶内的压力变化率，获得至少两组压力稳定变化下的压力变化率及排放流量，计算带压自然蒸发流量和带压测试蒸发率，进一步计算出被检气瓶的静态蒸发率。

5 环境条件

- 5.1 试验环境要求应为清洁、通风良好，且有防静电、防明火等措施。
- 5.2 试验现场应设置警戒区域和红色信号标志。
- 5.3 试验现场不应有强电磁干扰和强烈振动、冲击。
- 5.4 环境压力为当地大气压，环境温度范围为0℃~40℃，相对湿度小于85%。
- 5.5 液化天然气作为试验介质时，应设置安全区域，测试场地为室外，通风良好，且不应有可能发生危险的危险源存在。液氮为试验介质时，允许在室内进行，试验气体应导向安全区域。

6 仪器设备**6.1 试验装置基本要求**

- 6.1.1 当试验介质为液化天然气时，仪表应符合GB/T 3836.1相关要求，被检气瓶和测量管路采取必要的防静电措施，且不应产生明火。
- 6.1.2 计量器具及仪表应定期进行检定或校准，并在校验有效期内使用。
- 6.1.3 试验过程中，应采用导气管将试验装置出口端汽化的气体导向指定的安全区域。导气管及各连接件应密封良好，不应泄漏。

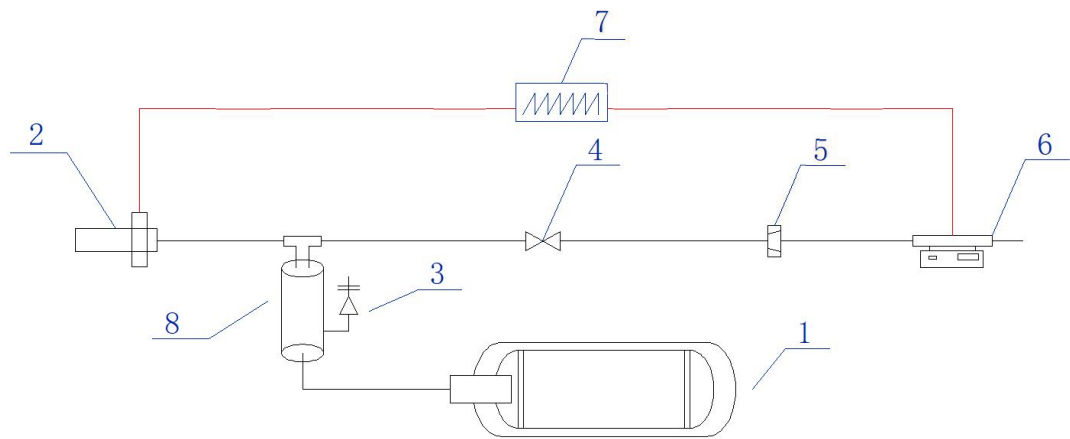
- 6.1.4 被检气瓶的安全泄放装置应符合安全技术规范要求。
- 6.1.5 连接管路、接头的设计压力不低于1.6 MPa，经气密性试验检查无泄漏。
- 6.1.6 缓冲罐容积不小于1 L，设计压力不低于1.6 MPa，材质与试验介质相容。
- 6.1.7 当试验介质为液化天然气时，相关连接管路先使用氮气或惰性气体进行置换。
- 6.1.8 试验装置应能自动记录时间、压力、流量、环境温湿度、环境大气压等试验数据，并实时存储。
- 6.1.9 试验装置的缓冲罐或入口管路应装有安全泄放装置，安全泄放装置的动作压力不高于1.25 MPa。

6.2 测量仪表

- 6.2.1 温度计允许测量误差为±1℃，环境大气压计允许测量误差为±50 Pa，环境湿度计允许测量误差为±5%RH。
- 6.2.2 压力传感器的最大量程不超过1.6 MPa，精度等级应不低于0.05级，试验介质为液化天然气时，应满足GB/T 3836.1中防爆等级IIA类，T1组要求。
- 6.2.3 质量流量计的量程小于等于5 L/min时，精度需达到0.5%；当量程大于5 L/min时，精度需达到1.0%，试验介质为液化天然气时，应满足GB/T 3836.1中防爆等级IIA类，T1组要求。
- 6.2.4 数据采集系统分辨率不低于0.0001，采样频率应不低于200 HZ。

7 试验装置流程

气瓶静态蒸发率快速测试方法试验装置典型流程图见图1。



标引符号说明：

- | | |
|-----------|-------------|
| 1——被检气瓶； | 5——针型阀或节流孔； |
| 2——压力传感器； | 6——质量流量计； |
| 3——安全阀； | 7——数据采集系统； |
| 4——截止阀； | 8——缓冲罐。 |

图 1 静态蒸发率快速测试法试验装置典型流程图

8 试验步骤

8.1 焊接绝热气瓶宜采用液氮作为试验介质，汽车用液化天然气气瓶可采用液氮或液化天然气作为试验介质。

8.2 测试时，被检气瓶的充满率应为50%~80%额定充满率，瓶内压力为0.2 MPa~1.25 MPa，并保持静止状态。

8.3 按图1所示连接被检气瓶与仪器设备，检查各连接处无泄漏。

8.4 根据气瓶公称容积查询附录A，确定被检气瓶的标准最大允许蒸发流量，从附录B中选择合适的节流孔板。

8.5 打开被检气瓶放空阀，启动数据采集系统采集瓶内压力及流量值，时间间隔不超过1 min，并绘制压力/时间、流量/时间曲线；直至压力变化率稳定后，采集并记录瓶内流量、压力和环境温度值，持续时间不少于1 h，作为第一组数据，并依据公式（1）计算 q_1 和 k_1 值，该过程称为第一阶段。

8.6 按附录A，根据被检气瓶的标准最大允许蒸发流量0.2~0.8倍，从附录B中选择对应孔径的节流孔板。

8.7 更换节流孔板，按8.5采集并记录瓶内压力及流量值，依据公式（1）计算 q_2 和 k_2 值，作为第二组数据，该过程称为第二阶段。

8.8 根据第一、第二阶段的数据，计算被检气瓶的带压测试蒸发率和静态蒸发率。

8.9 重复第一、第二阶段的测试并计算静态蒸发率，与此前静态蒸发对比，当静态蒸发率的变化范围小于等于5%时，则记录的数据有效；当静态蒸发率的变化范围大于5%时，参照附录C进行调整。

8.10 8.4和8.6中的节流孔板可以用针阀或流量控制器替代。

8.11 测试过程中的异常情况参照附录C进行调整。

9 数据处理

9.1 带压蒸发流量 q_0

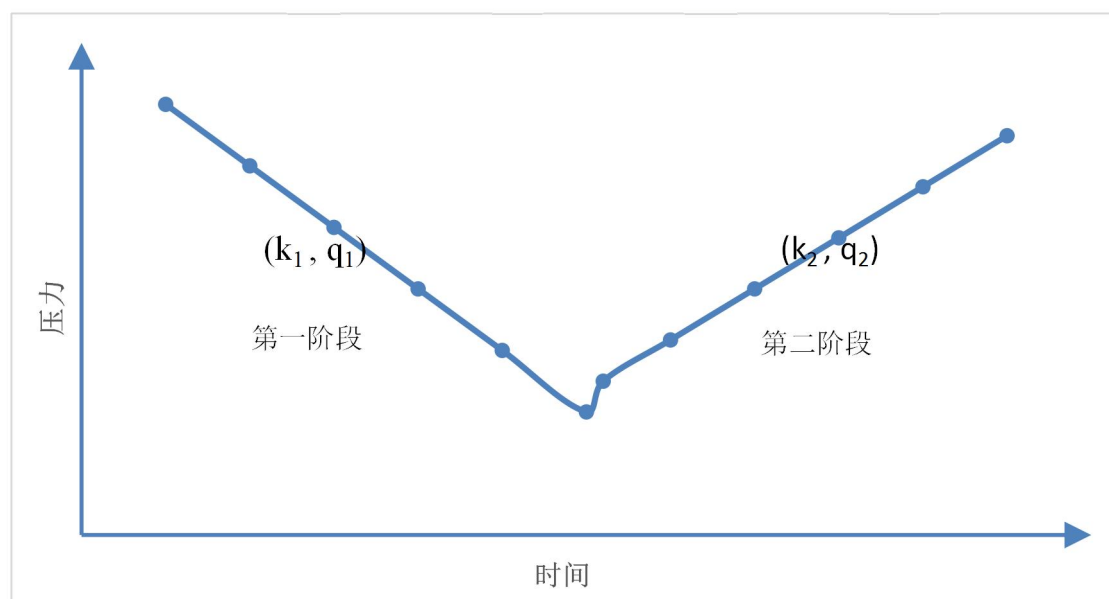


图 2 静态蒸发率快速测试过程的压力/时间曲线

如图2，被检气瓶带压自然蒸发流量 q_0 按公式（1）计算：

$$q_0 = \frac{q_1 \times k_2 - q_2 \times k_1}{k_2 - k_1} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

q_0 —— 被检气瓶带压自然蒸发流量，单位为克每分钟（g/min）；

k_1 —— 第一阶段的压力变化率，不大于10 min计算一次，取平均值，单位为千帕每分钟（kPa/min）；

k_2 —— 第二阶段的压力变化率，不大于10 min计算一次，取平均值，单位为千帕每分钟（kPa/min）；

q_1 —— 第一阶段的排放流量，取平均值，单位为克每分钟（g/min）；

q_2 —— 第二阶段的排放流量，取平均值，单位为克每分钟（g/min）。

9.2 带压测试蒸发率 a_0

被检气瓶的带压测试蒸发率 a_0 按公式（2）计算：

$$a_0 = 1.44 \times \frac{q_0 \times \varphi}{\rho_1 \times V} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中：

a_0 —— 带压测试蒸发率，单位为百分比每天（%/d）；

q_0 —— 被检气瓶带压自然蒸发流量，单位为克每分钟（g/min）；

φ —— 流量计的校正系数，标定时的给定值；

ρ_1 —— 标准大气压（101.325 kPa）下饱和液体的密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；

V —— 被检气瓶的有效容积，单位为立方米（m³）；

1.44 —— 表示质量单位克每分钟转换成单位千克每天的数值，为无量纲。

9.3 静态蒸发率 α_{20}

被检气瓶静态蒸发率 α_{20} 按公式 (3) 计算：

$$\alpha_{20} = \frac{q_0 \cdot h}{h_{fg}} \left(0.7 \times \frac{293.15 - T_s}{T_l - T_2} + 0.3 \times \frac{293.15^4 - T_s^4}{T_l^4 - T_2^4} \right) \dots\dots\dots (3)$$

式中：

a_0 —— 带压测试蒸发率，单位为百分比每天（%/d）；

α_{20} —— 静态蒸发率，单位为百分比每天（%/d）；

h —— 被检气瓶内工作压力下饱和深冷液体的汽化潜热，其取值可查阅附录E：查询被检气瓶内平均压力（按第一阶段和第二阶段平均压力值）下的饱和深冷液体的汽化潜热，单位为千焦耳每千克（kJ/kg）；

h_{fg} —— 标准大气压（101.325 kPa）下饱和液体的汽化潜热，单位为千焦耳每千克（kJ/kg）；

T_s —— 标准大气压（101.325 kPa）下饱和液体的温度，单位为开尔文（K）；

T_l —— 试验时平均环境温度，单位为开尔文（K）；

T_2 —— 被检气瓶内工作压力下深冷液体的饱和温度，其取值可查阅附录E：查询被检气瓶内平均压力（按第一阶段和第二阶段平均压力值）下的深冷液体饱和温度，单位为开尔文（K）。

10 试验记录与试验报告

10.1 试验记录格式可参照附录 D 中的表 D.1。

附录 A

(资料性附录)

气瓶的标准最大允许蒸发流量

气瓶的标准最大允许蒸发流量可参照表 A。

表 A 气瓶的标准最大允许蒸发流量

气瓶类型	公称容积 L	100	150	175	200	300	450	500	>500
汽车用液化天然气气瓶	标准最大允许蒸发流量 (LN ₂) $q \leq (\text{g/min})$	—	5.03	4.87	5.34	7.66	10.99	11.55	27.75
	标准最大允许蒸发流量 (LNG) $q \leq (\text{g/min})$	—	1.47	1.44	1.52	2.20	3.19	3.41	8.18
焊接绝热气瓶	标准最大允许蒸发流量 (LN ₂) $q \leq (\text{g/min})$	3.43	4.58	4.52	4.90	6.91	9.92	10.42	20.84
注： 一、公称容积在相邻两个容积之间的，标准最大允许蒸发流量值用插值法计算。 二、1 个标准大气压 0 摄氏度下氮气体积流量 $q_L = q_0/1.2555$ ，单位为升每分钟；1 个标准大气压 0 摄氏度下甲烷体积流量 $q_L = q_0/0.7175$ ，单位为升每分钟。									

附录 B

(资料性附录)

节流孔板孔径选择

B.1 使用液氮作为试验介质时, 节流孔板孔径选择可参照表B.1。

表 B.1 不同孔径节流孔板在不同入口压力下的气体排放质量流量 (适用于液氮)

名 称	孔径 mm	入口压力值 (MPa)										
		0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
		气体排放质量流量值 (g/min)										
1 号节流孔板	0.05	0.18	0.23	0.29	0.35	0.40	0.46	0.51	0.56	0.62	0.68	0.73
2 号节流孔板	0.10	0.35	0.47	0.58	0.69	0.80	0.91	1.02	1.13	1.24	1.35	1.46
3 号节流孔板	0.15	0.81	1.08	1.35	1.62	1.88	2.15	2.41	2.67	2.93	3.20	3.47
4 号节流孔板	0.20	1.26	1.70	2.13	2.55	2.97	3.38	3.80	4.21	4.63	5.06	5.48
5 号节流孔板	0.25	1.99	2.69	3.37	4.05	4.72	5.39	6.06	6.73	7.40	8.08	8.76
6 号节流孔板	0.30	2.72	3.68	4.62	5.55	6.48	7.40	8.33	9.24	10.16	11.11	12.04
7 号节流孔板	0.35	3.72	5.05	6.35	7.63	8.91	10.19	11.46	12.73	14.00	15.31	16.59
8 号节流孔板	0.40	4.73	6.41	8.07	9.71	11.35	12.97	14.60	16.22	17.85	19.51	21.15
9 号节流孔板	0.45	6.00	8.16	10.27	12.37	14.45	16.53	18.61	20.68	22.76	24.88	26.97
10 号节流孔板	0.50	7.28	9.90	12.47	15.02	17.56	20.09	22.62	25.15	27.67	—	—
11 号节流孔板	0.55	8.83	12.02	15.15	18.25	21.34	24.43	27.51	—	—	—	—
12 号节流孔板	0.60	10.38	14.14	17.83	21.48	25.13	28.76	—	—	—	—	—
13 号节流孔板	0.65	12.21	16.63	20.98	25.29	29.59	—	—	—	—	—	—
14 号节流孔板	0.70	14.04	19.13	24.13	29.10	—	—	—	—	—	—	—
15 号节流孔板	0.75	16.14	22.00	27.76	—	—	—	—	—	—	—	—
16 号节流孔板	0.80	18.24	24.87	31.39	—	—	—	—	—	—	—	—

注: 入口压力在相邻两个压力之间的, 用插值法计算质量流量值。

B.2 使用天然气作为试验介质时，节流孔板孔径选择可参照表B.2。

表 B.2 不同孔径节流孔板在不同入口压力下的气体排放质量流量（适用于天然气）

名 称	孔径 mm	入口压力值（MPa）										
		0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.0	1.10	1.20
		气体排放质量流量值（g/min）										
1 号节流孔板	0.05	0.13	0.17	0.21	0.25	0.29	0.33	0.37	0.41	0.45	0.49	0.53
2 号节流孔板	0.10	0.26	0.34	0.42	0.51	0.59	0.67	0.74	0.82	0.90	0.99	1.07
3 号节流孔板	0.15	0.59	0.79	0.99	1.19	1.38	1.57	1.77	1.96	2.15	2.35	2.54
4 号节流孔板	0.20	0.93	1.25	1.56	1.87	2.17	2.48	2.79	3.09	3.40	3.71	4.02
5 号节流孔板	0.25	1.46	1.98	2.48	2.97	3.47	3.96	4.45	4.94	5.44	5.94	6.44
6 号节流孔板	0.30	2.00	2.71	3.40	4.08	4.76	5.44	6.12	6.80	7.48	8.17	8.85
7 号节流孔板	0.35	2.74	3.71	4.67	5.61	6.55	7.49	8.43	—	—	—	—
8 号节流孔板	0.40	3.49	4.72	5.94	7.14	8.35	—	—	—	—	—	—
9 号节流孔板	0.45	4.43	6.01	7.56	9.10	—	—	—	—	—	—	—
10 号节流孔板	0.50	5.38	7.30	9.19	—	—	—	—	—	—	—	—
11 号节流孔板	0.55	6.52	8.86	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12 号节流孔板	0.60	7.67	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13 号节流孔板	0.65	9.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
注：入口压力在相邻两个压力之间的，用插值法计算质量流量值。												

附录 C

(资料性附录)

两种常见的压力/时间曲线异常情况及调整措施

异常情况之一：

第一阶段中，压力/时间曲线未出现拐点，也未出现下降，可能原因及调整措施：

1. 液位过高造成深冷液体液位漫过气相管排气口，需要适当降低液位；
2. 排放流量过小，第一阶段瓶内深冷液体无法快速达到热平衡，需要更换更大孔径的节流孔板；
3. 气瓶的绝热性能严重不合格，实际静态蒸发率远超标准最大允许排放流量。

异常情况之二：

持续排放超过 6 小时，气瓶内压力仍未达到稳定变化，可能原因及调整措施：

1. 液位过低，环境往瓶内漏热不稳定，需要补充液后再测试；
2. 气瓶公称容积低于本标准适用范围；
3. 气瓶内深冷液体液位偏高且压力偏低，气体排放无法快速达到热平衡，需要增压后再测试，或者采用晃动或振动等方式促进深冷液体快速达到热平衡。

附录 D

(资料性附录)

静态蒸发率检测记录(快速法)

快速法测试静态蒸发率的检测记录格式可参照表D. 1。

表 D. 1 快速法测试静态蒸发率的检测记录

记录编号：

气瓶编号		气瓶有效容积(V), L	
检测前充满率		试验介质	
检测地点			
检测方法	低温绝热气瓶静态蒸发率快速测试方法		
设备型号与编号			
检测结果			
气瓶内压力平均值(P), kPa		第一阶段压力变化率(k_1), kPa/min	第一阶段平均质量流量(q_1), g/min
环境温度平均值(T_1), °C		第二阶段压力变化率(k_2), kPa/min	第二阶段平均质量流量(q_2), g/min
带压自然蒸发质量流量(q_0), g/min		瓶内平均压力下饱和深冷液体汽化潜热(h), kJ/kg	标准大气压下饱和和深冷液体汽化潜热(h_{fg}), kJ/kg
流量计校正系数(ψ)		瓶内平均压力对应的深冷液体饱和温度(T_2), K	标准大气压下深冷液体饱和温度(T_s), K
标准大气压下饱和液体密度(ρ_l), kg/m ³		带压测试蒸发率(a_0), %/d	静态蒸发率(a_{20}), %/d
备注	1. 计算式:		
	2. 物性参数来源: 附录 E		
	3. 其它:		
检 测:		校 核:	
检测过程压力/时间曲线与流量/时间曲线			

附录 E

(资料性附录)

氮和甲烷在饱和状态下热力学数据

E.1 氮在饱和状态下热力学数据见表 E.1。

表 E.1 氮在饱和状态下热力学数据

温度 K	压力 (表压) MPa	液体密度 kg/m ³	汽化潜热 kJ/kg
77.35 ^b	0.101 325	808.61	198.643
83	0.187 94	781.79	190.855
84	0.207 73	776.86	189.386
85	0.229 03	771.87	187.894
86	0.251 92	766.82	186.367
87	0.276 46	761.71	184.804
88	0.302 72	756.54	183.205
89	0.330 78	751.3	181.57
90	0.360 71	745.99	179.896
91	0.392 58	740.62	178.184
92	0.426 46	735.18	176.427
93	0.462 42	729.66	174.626
94	0.500 55	724.06	172.778
95	0.540 9	718.38	170.881
96	0.583 57	712.62	168.935
97	0.628 62	706.77	166.93
98	0.676 14	700.83	164.869
99	0.726 19	694.79	162.75
100	0.778 86	688.79	160.567
101	0.834 22	682.4	158.317
102	0.892 35	676.04	155.997
103	0.953 34	669.55	153.064
104	1.017 3	662.94	151.132
105	1.084 2	656.2	148.576
106	1.154 2	649.31	145.931
107	1.227 5	642.26	143.191
108	1.304	635.04	140.348
注：① ^b 沸点			
② 瓶内压力在相邻两个瓶内压力之间的，热力学数据用插值法计算。			

E. 2 甲烷在饱和状态下热力学数据见表 E. 2。

表 E. 2 甲烷在饱和状态下热力学数据

温度 K	压力 MPa	液体密度 kg/m ³	汽化潜热 kJ/kg
111. 63 ^b	0. 101 325	422. 53	510. 42
120	0. 191 89	410. 05	494. 04
121	0. 205 83	408. 51	491. 93
122	0. 220 52	406. 97	489. 8
123	0. 235 99	405. 41	487. 63
124	0. 252 25	403. 85	485. 42
125	0. 269 33	402. 27	483. 18
126	0. 287 27	400. 69	480. 9
127	0. 306 07	399. 09	478. 59
128	0. 325 78	397. 48	476. 23
129	0. 346 41	395. 86	473. 84
130	0. 368 00	394. 23	471. 4
131	0. 390 56	392. 58	468. 92
132	0. 414 13	390. 93	466. 41
133	0. 438 72	389. 26	463. 84
134	0. 464 37	387. 57	461. 24
135	0. 491 11	385. 87	458. 58
136	0. 518 95	384. 16	455. 87
137	0. 547 93	382. 43	453. 12
138	0. 578 07	380. 69	450. 32
139	0. 609 41	378. 93	447. 46
140	0. 641 96	377. 15	444. 55
142	0. 710 82	373. 54	438. 55
144	0. 784 88	369. 85	432. 33
146	0. 864 36	366. 08	425. 84
148	0. 949 48	362. 22	419. 09
150	1. 040 50	358. 26	412. 04
152	1. 137 60	354. 19	404. 68
154	1. 241 00	350. 01	396. 99
156	1. 351 00	345. 69	388. 94
注：① ^b 沸点			
② 瓶内压力在相邻两个瓶内压力之间的，热力学数据用插值法计算。			

《低温绝热气瓶静态蒸发率快速测试方法》 编制说明(征求意见稿)

一、工作简介

(一) 目的和意义

静态蒸发率是低温绝热气瓶定期检验的一项重要指标。当前唯一有效的测试标准为 GB/T 18443.5 《真空绝热深冷设备性能试验方法第 5 部分 静态蒸发率测量》，尚无其他定量测试方法。GB/T18443.5 标准方法的原理或过程：容器或气瓶卸压至零压力（与大气压一致）并保持排空阀打开，静置 48 小时使得容器内介质达到热稳定状态，之后测量并记录排放气体的流量或质量，以 24 小时（1 日）累积的气体蒸发质量与气瓶额定充满情况下所盛装的深冷液化气体质量的百分比为测试静态蒸发率，转换成标准状态下（20℃、标准大气压）为静态蒸发率值，单位为%/d。

GB/T18443.5 标准方法测试静态蒸发率存在耗时长、成本高的问题。静态蒸发率测试前，气瓶预先充液、卸压和静置，耗时 48 小时以上，还损耗大量的深冷液化气体。以公称容积 450L 的焊接绝热气瓶为例，充满液氮大约 294kg，静态蒸发率测试损耗大约 70kg 液氮，测试后剩余 200kg 液氮只能排放大气，造成很大资源浪费。盛装液氩、液氧等其他介质的焊接绝热气瓶，静态蒸发率测试后，气瓶还需多次清洗与置换，避免气瓶投用后影响气体纯度。车用液化天然气气瓶（简称“车用 LNG 气瓶”）定期检验时，允许天然气作为测试介质，但是静态蒸发率测试前的卸压与静置造成的天然气损耗仍然是一笔不小费用。以 1000L 的车用液化天然气气瓶为例，气瓶从 0.8MPa~1.0MPa 的工作压力卸压至零，至少损耗 100kg 液化天然气。此外，车用 LNG 气瓶定期检验造成车辆停运 4 天~6 天，间接损失远大于天然气排放的损失。由此可见，低温绝热气瓶定期检验依照 GB/T18443.5 进行静态蒸发率测试，综合成本太过高昂，达到用户难以接受的程度。

综上所述，低温绝热气瓶定期检验迫切需要一种成本低、速度快、可定量的静态蒸发率测试方法，GB/T18443.5 更适合作为出厂检验、型式试验或者仲裁方法。本标准推荐的静态蒸发率快速测试方法无需卸压与静置，气瓶充液后在线带压测试，适用于低温绝热气瓶定期检验，尤其适用于车用 LNG 气瓶定期检验，不仅耗时短，气体损耗也非常小。

（二）任务来源

本项目来源于《中国特种设备检验协会团体标准项目任务书》（项目编号：2024004），立项标准名称为《低温绝热气瓶静态蒸发率快速测试方法》，由深圳市质量安全检验检测研究院（已更名为“深圳市特种设备安全检验研究院”）提出，中国特种设备检验协会（以下简称“协会”）归口。

（三）编制过程

1) 起草单位

本标准起草单位：深圳市特种设备安全检验研究院、广东省特种设备检测研究院、广东省特种设备检测研究院东莞检测院、兰州空间技术物理研究所、内蒙古自治区特种设备检验研究院乌海分院、北京市特种设备检验检测研究院、中国特种设备检测研究院、福建省锅炉压力容器检验研究院、大连锅炉压力容器检验检测研究院有限公司、上海市特种设备监督检验技术研究院、重庆市特种设备检测研究院、北京华拓绿能、北京华拓绿能科技有限公司。

2) 主要工作过程

1. 项目预研

2021 年 1 月-2023 年 12 月，深圳市质量安全检验检测研究院（已更名为“深圳市特种设备安全检验研究院”）与广东省特种设备检测研究院、广东省特种设备检测研究院东莞检测院协同开展了“车用 LNG 气瓶快速检测技术”开发研究，广东省特种设备安全科技协同创新中心（广东省科技厅归口管理，项目编号 2021B1111600002）资助研究经费 50 万。静态蒸发率快速检测方法与装置是该项目核心成果之一。

2023 年 10 月 24 日，深圳市质量安全检验检测研究院（已更名为“深圳市特种设备安全检验研究院”）在组织专家对“低温绝热气瓶静态蒸发率快速检测方法”论证，专家组认为：该方法具有创新性，能够在低温绝热气瓶定期检验中实现静态蒸发率快速检测，建议进一步增加样本数量，分析误差原因，明确检测方法的适用条件，以满足国家标准、行业标准获团体标准的申报要求。

2. 建立标准起草组

2024 年 05 月，深圳市质量安全检验检测研究院（已更名为“深圳市特种设备安全检验研究院”）、广东省特种设备检测研究院、广东省特种设备检测研究院东莞检测院、兰州空间技术物理研究所、内蒙古自治区特种设备检验研究院乌海分院、北京市特种设备检验检测研究院、中国特种设备检测研究院、福建省锅炉压力容器检验研究院、大连锅炉压力容器检验检测研究院有限公司、上海市特种设备监督检验技术研究院等组成的标准起草组。

3. 形成标准草案

标准起草组于 2024 年 03 月启动本文件的调研工作，并于 2024 年 04 月底前完成了相关资料的收集和分析工作。起草组经多次组内研讨，确定了标准的框架和主要内容，并于 2024 年 05 月形成了标准草案稿。

4. 完善标准草案阶段

2024 年 5 月初，召开标准启动暨标准文稿研讨会议，标准起草工作组先后召开了多次组内研讨会，对标准草案进行了讨论。根据专家意见，起草组对标准草案内容进行了修改，

2024 年 5 月中旬，部分起草组成员在广东省特种设备检测研究院（国家低温容器质量检验检测中心（广东））针对误差来源问题进行研讨分析。

2024 年 6 月初，部分起草组成员在华南理工大学电力学院针对车用 LNG 气瓶防过充装置进行研讨分析，确立防过充装置的理论分析方案。

2024 年 6 月，部分起草组成员在内蒙古自治区乌海市进行车用 LNG 气瓶不同方法的静态蒸发测试比对。

2024 年 7 月~10 月，牵头单位深圳市质量安全检验检测研究院（已更名为“深圳市特种设备安全检验研究院”）补充了不同充满率对静态蒸发率快速测试结果的影响，增加小容积车用 LNG 气瓶和大容积立式焊接绝热气瓶的静态蒸发率快速试验。

2024 年 11 月底，工作组在福建省南平市召开标准征求意见稿内部研讨会。牵头单位深圳市特种设备安全检验研究院介绍了近一阶段的补充试验内容及结果，以及标准文稿调整与完善内容。工作组对标准的试验条件、检测过程及控制参数进行推演，对 50 余组实际样品比对测试结果（新方法 with GB/T 18443.5 方法比对）结果的偏差程度进行讨论，还对标准文稿（征求意见稿）逐条逐句讨论。

2025 年 1 月底，形成征求意见稿。

5. 征求意见阶段

二、主要内容的确立

（一）编制原则

按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求编写本标准内容。

本标准遵循“科学性、先进性、实用性、统一性”原则，针对低温绝热气瓶

定期检验当前问题和需求，紧贴应用场景，经过理论推导、模拟计算、测试验证、比对测试得到全新方法，新方法 with 现有方法在原理上是统一的，但是在操作上是颠覆的。

（二）主要依据

1. 本标准的制定应依据国家法律法规及行业标准，确保标准的科学性

本标准广泛吸收和采纳了国家标准等文件，主要包括有：国家标准《真空绝热深冷设备性能试验方法 第 1 部分：基本要求》（GB/T18443.1）、《真空绝热深冷设备性能试验方法 第 5 部分：静态蒸发率测量》（GB/T 18443.5）、《固定式真空绝热深冷压力容器 第 3 部分：设计》（GB/T 18442.3）、《低温绝热气瓶定期检验与评定》（GB/T34347）、《焊接绝热气瓶》（GB/T 24159-2022）、《汽车用液化天然气气瓶》（GB/T 34510-2017）、《气瓶术语》（GB/T 13005）、《气瓶安全技术规程》（TSG 23-2021）、《爆炸性环境第 1 部分：设备通用要求》（GB/T 3836.1）。

2. 立足国内气瓶静态蒸发率测量的试验情况和安全要求，以保证标准的先进性和可操作性

在标准编制过程中，不仅要力争条款的先进性，而且更要针对国内当前气瓶静态蒸发率的现场环境、安全要求、技术要求来保证标准的执行、以及使用时的可操作性。

3. 力求条目、术语清楚准确、内容全面

编制标准是一个循序渐进的过程，本标准的制定在考虑当前国家标准的基本要求的同时，也兼顾本标准的特殊性，力求条目、术语清楚准确，内容全面。

（三）主要内容

1. 范围

与《焊接绝热气瓶》（GB/T 24159-2022）的适用范围和《汽车用液化天然气气瓶》（GB/T 34510-2017）的适用范围基本相同。

2. 规范性引用文件

本标准术语主要参考《气瓶术语》（GB/T 13005）、《真空绝热深冷设备性能试验方法 第 1 部分：基本要求》（GB/T 18443.1）、《固定式真空绝热深冷压力容器 第 3 部分：设计》（GB/T 18442.3-2019）、《真空绝热深冷设备性能试验方法 第 5 部分：静态蒸发率测量》（GB/T 18443.5）、《低温绝热气瓶定期检验与评定》（GB/T 34347-2017）、《爆炸性环境第 1 部分：设备通用要求》（GB/T 3836.1）、《气瓶安全技术规程》（TSG 23）。

3. 术语与定义

为了便于理解静态蒸发率快速测试方法的原理、试验步骤，本标准创造了新术语定义，如：“压力变化率”、“压力稳定变化”、“带压自然蒸发流量”、“带压测试蒸发率”、“标准最大允许蒸发流量”等，阐述了静态蒸发率带压测试的特殊状态与操作情况。

其中“标准最大允许蒸发流量”是参考《低温绝热气瓶定期检验与评定》(GB/T 34347) 中表 1、表 2, 计算对应不同容积的气瓶在 0.7MPa 工作压力下静态蒸发率合格时最大带压蒸发流量 (简称标准最大允许蒸发流量)。

4. 原理

气瓶静态蒸发率快速测试方法检测对象为带压的气瓶, 试验过程将其气相空间连续排放并检测压力变化率直至被检气瓶内压力成稳定变化; 切换至少两组不同大小的排放流量, 连续排放并检测被检气瓶内的压力变化率, 获得至少两组压力稳定变化下的压力变化率及排放流量, 计算带压自然蒸发流量和带压测试蒸发率, 进一步计算出被检气瓶的静态蒸发率。

试验过程如下图 1 所示:

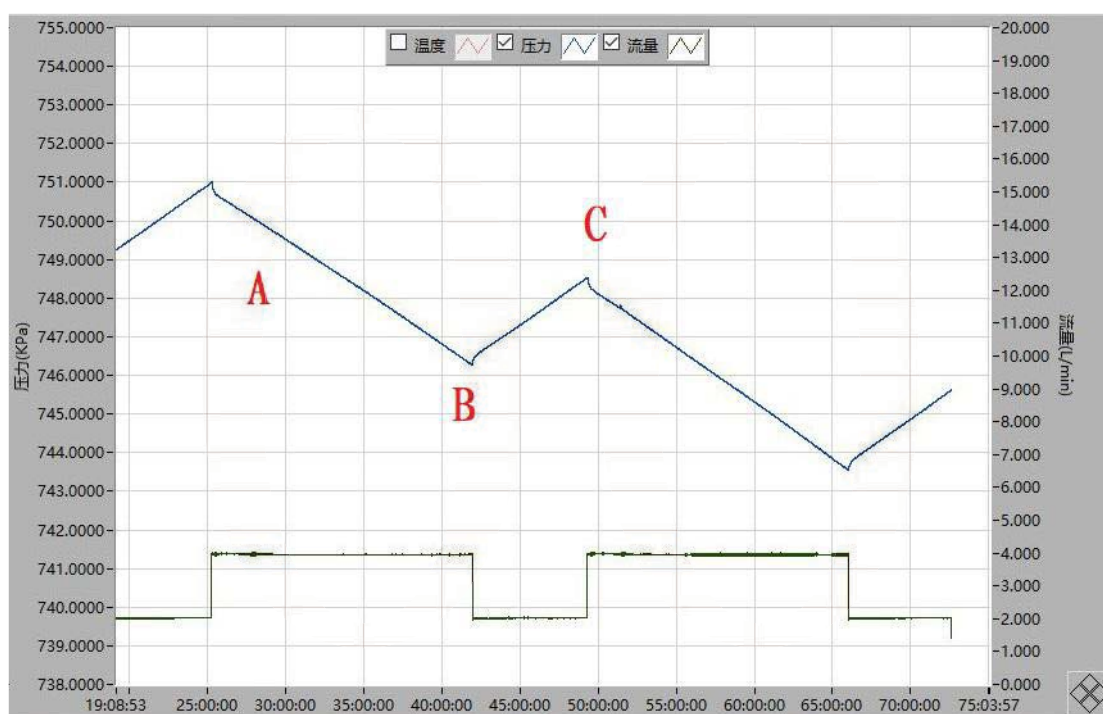


图 1 预设流量排放时压力变化和流量曲线图

5. 试验条件

本标准 5.1~5.4 参照《真空绝热深冷设备性能试验方法 第 1 部分: 基本要求》(GB/T 18443.1) 中的 4.1 环境条件的规定: 4.1.1 试验环境要求应清洁、通风良好, 且有防静电、防明火等措施。4.1.2 试验现场应设置警戒区域和红色信号标志。4.1.3 试验现场不应有强电磁干扰和强烈振动、冲击。4.1.4 环境压力为当地大气压, 温度范围为 $0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$, 相对湿度小于 85%。4.1.5 易燃易爆深冷液体作为试验介质时, 应设置安全区域, 且不应有可能发生危险的危险源存在。

6. 仪器设备

本标准 6.1.1~6.1.2 参照《真空绝热深冷设备性能试验方法

第 1 部分：基本要求》(GB/T 18443.1) 中的 4.2.1.1~4.2.1.2 的规定：4.2.1.1 当试验介质为易燃易爆深冷液体时，被检件和测量管路采取必要的防静电措施，且不应产生明火。

4.2.1.2 仪器设备的性能、量程及精度应满足试验要求。计量器具及仪表应经国家法定计量机构校准或检定合格，并在校验有效期内使用。

本标准 6.1.3

快速法试验过程中，一定流量向气瓶外部排气时，如为密闭空间，则需要考虑排气至安全区域，防止人员窒息；如易燃介质时，宜选择露天进行试验或考虑安全排放等。

本标准 6.1.4 “被检气瓶的安全泄放装置应符合安全技术规范要求。”

由于测试过程有压力增长或下降，为了防止试验过程气瓶发生超压爆破等危险，试验前需要确认气瓶附件如安全阀、压力表等符合安全技术规范要求。

本标准 6.1.5 “连接管路、接头的设计压力不低于 1.6MPa，经气密性试验检查无泄漏。”、本标准 6.1.6 “缓冲罐容积不小于 1 L，设计压力不低于 1.6MPa，材质与试验介质相容。”

快速法测试时，试验压力为 0.2MPa~1.25MPa，故承压管路及承压容器耐压能力应不低于 1.25 倍试验压力。

本标准 6.1.7 “当试验介质为液化天然气时，相关连接管路先使用氮气或惰性气体进行置换”

为防止天然气达到可燃气体爆炸极限，引起安全事故。

本标准 6.1.8

此为保证数据采集的稳定性、准确性、不可更改性。

本标准 6.1.9

测试过程中防止管道超压，造成安全隐患，故设置安全泄放装置，安全泄放装置的动作压力不高于工作压力。

本标准 6.2.1

参照《真空绝热深冷设备性能试验方法 第 1 部分：基本要求》(GB/T 18443.1) 中的 4.2.1.5、4.2.1.6 规定：温度计允许测量误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ；大气压力计允许测量误差为 $\pm 50\text{Pa}$ 。

本标准 6.2.2~6.2.4

本标准 6.2.2

压力变送器量程不低于试验压力，不高于 1.6MPa，精度不低于 0.05 级；如果试验介质为液化天然气时，根据 GB/T 3836.1-2021 中的 4.3 天然气甲烷为ⅡA 类，甲烷燃点为 538℃，为 T1 组要求即可。

GB/T 3836.1—2021

表 2 Ⅱ类电气设备的最高表面温度分组

温度组别	最高表面温度 ℃
T1	≤450
T2	≤300
T3	≤200
T4	≤135
T5	≤100
T6	≤85

图 2 GB/T 3836.1-2021 中 5.3.2.2 最高表面温度分组

本标准 6.2.3

参照质量流量计《真空绝热深冷设备性能试验方法 第 5 部分：静态蒸发率测量》（GB/T 18443.5）中的 5.1 规定：流量计的量程小于等于 5L/min 时，精度需达到 0.5%；当量程大于 5L/min 时，精度需达到 1.0%。

如果试验介质为液化天然气时，根据 GB/T 3836.1-2021 中的 4.3 天然气甲烷为ⅡA 类，甲烷燃点为 538℃，为 T1 组要求即可。

本标准 6.2.4

数据采集系统分辨率（显示精度）不低于 0.0001，采样频率应不低于 200HZ。

8. 试验步骤

本标准 8.2

由于气瓶内深冷液位过高时可能淹没排空口，此时试验排出瓶外是液体而非气体，无法反映气瓶蒸发情况，快速法试验无效，故设定不超过 80%的液位大小，同时液位过低时蒸发情况偏低，故本标准将试验条件中的气瓶液位规定为 50%~80%。

瓶内压力过高时对试验仪器、管路等耐压性构成一定的威胁，同时存在较大的安全隐患，故而设定压力不超过 1.25MPa，同时压力过低通过节流孔调节流量困难。故本标准试验压力设定为 0.2MPa～1.25MPa。

试验时气瓶保持静止，消除动能的影响。

本标准 8.4、8.6

本标准提供一种参考调节流量方式，考虑气瓶容积不相同，定期检验合格流量也不相同，现参考《低温绝热气瓶定期检验与评定》（GB/T 34347）中表 1、表 2，计算对应不同容积的气瓶在 0.7MPa 工作压力下静态蒸发率合格时最大蒸发流量（简称标准最大允许蒸发流量），形成本标准中附录 A 的表 A。

表 A 中计算结果选取气瓶在环境大气压为 1 个标准大气压、环境温度 20℃，气瓶内压力 0.7MPa 时，气瓶静态蒸发率等于《低温绝热气瓶定期检验与评定》（GB/T 34347）中表 1、表 2 的最大值时，相对应的蒸发流量。特别的：表 A 中“>500L”时的结果是选取气瓶公称容积 1000L 作为变量计算的。

表A 汽车用液化天然气气瓶的标准最大允许蒸发流量

气瓶类型	公称容积 L	100	150	175	200	300	450	500	>500
汽车用液化天然气气瓶	标准最大允许蒸发流量 (LN ₂) q ≤ (g/min)	—	5.03	4.87	5.34	7.66	10.99	11.55	27.75
	标准最大允许蒸发流量 (LNG) q ≤ (g/min)	—	1.47	1.44	1.52	2.20	3.19	3.41	8.18
焊接绝热气瓶	标准最大允许蒸发流量 (LN ₂) q ≤ (g/min)	3.43	4.58	4.52	4.90	6.91	9.92	10.42	20.84

注：

一、公称容积在相邻两个容积之间的，标准最大允许蒸发流量值用插值法计算。

二、1个标准大气压0摄氏度下氮气体积流量 $q_L = q_0/1.2555$ ，单位为升每分钟；1个标准大气压0摄氏度下甲烷体积流量 $q_L = q_0/0.7175$ ，单位为升每分钟。

本标准8.6中以附录 B 作为推荐性文件，注明使用节流孔板时不同压力、介质对应流量的数量级。

表B.1 不同孔径节流孔板在不同入口压力下的气体排放质量流量（适用于氮气）

名 称	孔径 mm	入口压力值 (MPa)										
		0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
		气体排放质量流量值 (g/min)										
1号节流孔板	0.05	0.18	0.23	0.29	0.35	0.40	0.46	0.51	0.56	0.62	0.68	0.73
2号节流孔板	0.10	0.35	0.47	0.58	0.69	0.80	0.91	1.02	1.13	1.24	1.35	1.46
3号节流孔板	0.15	0.81	1.08	1.35	1.62	1.88	2.15	2.41	2.67	2.93	3.20	3.47
4号节流孔板	0.20	1.26	1.70	2.13	2.55	2.97	3.38	3.80	4.21	4.63	5.06	5.48
5号节流孔板	0.25	1.99	2.69	3.37	4.05	4.72	5.39	6.06	6.73	7.40	8.08	8.76
6号节流孔板	0.30	2.72	3.68	4.62	5.55	6.48	7.40	8.33	9.24	10.16	11.11	12.04
7号节流孔板	0.35	3.72	5.05	6.35	7.63	8.91	10.19	11.46	12.73	14.00	15.31	16.59
8号节流孔板	0.40	4.73	6.41	8.07	9.71	11.35	12.97	14.60	16.22	17.85	19.51	21.15
9号节流孔板	0.45	6.00	8.16	10.27	12.37	14.45	16.53	18.61	20.68	22.76	24.88	26.97
10号节流孔板	0.50	7.28	9.90	12.47	15.02	17.56	20.09	22.62	25.15	27.67	—	—
11号节流孔板	0.55	8.83	12.02	15.15	18.25	21.34	24.43	27.51	—	—	—	—
12号节流孔板	0.60	10.38	14.14	17.83	21.48	25.13	28.76	—	—	—	—	—
13号节流孔板	0.65	12.21	16.63	20.98	25.29	29.59	—	—	—	—	—	—
14号节流孔板	0.70	14.04	19.13	24.13	29.10	—	—	—	—	—	—	—
15号节流孔板	0.75	16.14	22.00	27.76	—	—	—	—	—	—	—	—
16号节流孔板	0.80	18.24	24.87	31.39	—	—	—	—	—	—	—	—
注：入口压力在相邻两个压力之间的，用插值法计算质量流量值。												

表B.2 不同孔径节流孔板在不同入口压力下的气体排放质量流量（适用于甲烷）

名 称	孔径 mm	入口压力值 (MPa)										
		0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.0	1.10	1.20
		气体排放质量流量值 (g/min)										
1号节流孔板	0.05	0.13	0.17	0.21	0.25	0.29	0.33	0.37	0.41	0.45	0.49	0.53
2号节流孔板	0.10	0.26	0.34	0.42	0.51	0.59	0.67	0.74	0.82	0.90	0.99	1.07
3号节流孔板	0.15	0.59	0.79	0.99	1.19	1.38	1.57	1.77	1.96	2.15	2.35	2.54
4号节流孔板	0.20	0.93	1.25	1.56	1.87	2.17	2.48	2.79	3.09	3.40	3.71	4.02
5号节流孔板	0.25	1.46	1.98	2.48	2.97	3.47	3.96	4.45	4.94	5.44	5.94	6.44
6号节流孔板	0.30	2.00	2.71	3.40	4.08	4.76	5.44	6.12	6.80	7.48	8.17	8.85
7号节流孔板	0.35	2.74	3.71	4.67	5.61	6.55	7.49	8.43	—	—	—	—
8号节流孔板	0.40	3.49	4.72	5.94	7.14	8.35	—	—	—	—	—	—
9号节流孔板	0.45	4.43	6.01	7.56	9.10	—	—	—	—	—	—	—
10号节流孔板	0.50	5.38	7.30	9.19	—	—	—	—	—	—	—	—
11号节流孔板	0.55	6.52	8.86	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12号节流孔板	0.60	7.67	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13号节流孔板	0.65	9.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
注：入口压力在相邻两个压力之间的，用插值法计算质量流量值。												

本标准8.5、8.7、8.8借鉴《真空绝热深冷设备性能试验方法 第5部分静态蒸发率测量》（GB/T 1844.5-2010）中的7.1的规定。

本标准 8.9、8.11

明确测试记录的有效性规定：静态蒸发率的变化范围小于等于5%时有效。以附录 C 作为推荐性文件，注明试验时异常情况的处理方法。

9. 数据处理

本标准 9.1

计算带压蒸发流量：瓶内压力稳定变化（即压力时间关系线段直线变化）时，同一时间区间内压力变化率与平均流量成一次函数。此处只需要求的压力变化率等于零时，对应的流量即为带压蒸发流量。现分别取压力直线下降（第一阶段）和直线上升段（第二阶段）压力、流量参数，进行线性计算，如本标准内公式（1）。

本标准 9.2、9.3

计算带压测试蒸发率和静态蒸发率：参照《真空绝热深冷设备性能试验方法第 5 部分：静态蒸发率测量》（GB/T 18443.5-2010）中的 8.1 和 8.2 进行换算得到静态蒸发率。

10. 试验记录

本标准 10.1、10.2

试验记录/试验报告格式分别可参照附录D中的表 D.1/D.2。

三、解决的主要问题

（一）方法原理的理论基础

低温绝热气瓶瓶内气相空间的气体近似符合理想气体模型，根据理想气体状态方程，气瓶内气体压力变化归因于气相空间的气体新增或减少，计算模型为：

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT_g \Delta M}{V_g} \quad (1)$$

其中， p 为压力，kPa； t 为时间，min； R 为气体常数，8.314 mJ/(mol·K)； V_g 为瓶内气相空间体积，m³； T_g 为气/液分界面的气体温度， ΔM 为单位时间气瓶内新增或减少气体摩尔数，mol/min，瓶内液相介质蒸发气体大于瓶口排放气体时为正，反之为负，计算模型为：

$$\Delta M = \rho_{\text{mol}}^0 * (G_c - G - G_r) \quad (2)$$

其中， ρ_{mol}^0 为瓶内氮气摩尔密度， G_c 为漏热量转换为气体蒸发量对应的质量流量， G 为当前气体排放质量流量， G_r 为蓄热量转换为气体蒸发量对应的质量流量，g/min；液体吸热时， G_r 为正，放热为负。将式（2）代入式（1），可得：

$$(G_c - G - G_r) = \frac{\frac{dp}{dt} V_g}{\rho_{\text{mol}}^0 RT_g} \quad (3)$$

控制两个排放流量 G_1 、 G_2 ，实测两个排放流量下的瓶内压力随时间变化率 $\left(\frac{dp}{dt}\right)_1$ 、 $\left(\frac{dp}{dt}\right)_2$ ，设定气体蒸发或冷凝对应的蓄热量为 G_{r1} ，

G_{r2} ，则式（3）可转化为式（4），则，

$$G_c = \frac{\left(\frac{dp}{dt}\right)_2 G_1 - \left(\frac{dp}{dt}\right)_1 G_2}{\left(\frac{dp}{dt}\right)_2 - \left(\frac{dp}{dt}\right)_1} + \frac{\left(\frac{dp}{dt}\right)_2 G_{r1} - \left(\frac{dp}{dt}\right)_1 G_{r2}}{\left(\frac{dp}{dt}\right)_2 - \left(\frac{dp}{dt}\right)_1} \quad (4)$$

若如下条件同时成立：瓶内液相处于饱和状态，且温度均匀；压力变化在较窄区间；测试时间较短，气相空间变化可忽略，则（5）关系式近似成立：

$$\frac{G_{r1}}{G_{r2}} = \frac{\left(\frac{dp}{dt}\right)_1}{\left(\frac{dp}{dt}\right)_2} \quad (5)$$

式（5）代入式（4），可得：

$$G_c = \frac{\left(\frac{dp}{dt}\right)_2 G_1 - \left(\frac{dp}{dt}\right)_1 G_2}{\left(\frac{dp}{dt}\right)_2 - \left(\frac{dp}{dt}\right)_1} \quad (6)$$

结论：由式（6）可知，在特定条件下，低温绝热气瓶漏热量转化的气体蒸发量可通过排放流量 G_1 、 G_2 以及 $\left(\frac{dp}{dt}\right)_1$ 、 $\left(\frac{dp}{dt}\right)_2$ 计算而得。

（二）方法适用条件的确立与验证

式（5）成立的特定条件是本方法适用条件，即：①在测试过程（大约 5 小时）瓶内气相体积近似不变，这就要求低温绝热气瓶的公称容积不宜太小，根据测试验证，公称容积不宜低于 100L；②测试过程瓶内（大约 5 小时），压力变化区间较小，这就要求低温绝热气瓶绝热性能基本正常，静态蒸发率异常超标将会造成瓶内压力快速增长，造成测试结果的不可靠，还会构成不安全因素；③虽然通过小流量可以排放实现低温绝热气瓶内的液相温度临近饱和温度、液相温度均匀，但是排放前瓶内液相温度不均匀程度会影响测试速度。以450 L 立式焊接绝热气瓶为例，如果液相实际温度低于压力值对应饱和温度超过 10℃，小孔排放实现瓶内液相温度临近饱和且温度均匀需要耗时 20 小时以上。因此，待测气瓶充液后达到在用状态，更有利于静态蒸发率的快速实现。

（三）本标准与 GB/T18443.5 测试比对

不同规格、不同型号的低温绝热气瓶开展静态蒸发率快速测试与国标方法 GB/T18443.5 的比对试验，所得静态蒸发率快速测试结果两次重复测试结果的相对偏差不超过 5%（与 GB/T18443.5 的重复性要求一致），静态蒸发率快速测试结果与 GB/T18443.5 测试结果的偏差值的平均水

平未超过 10%，最大偏差不超过20%，具有较好的一致性。

根据方法原理和试验结果分析，偏差有两个方面来源：压力对气瓶绝热性能的改变、实际测试条件与最佳条件的偏离。本标准与 GB/T18443.5 的最大不同之处是测试时瓶内压力不同，本标准的测试压力接近气瓶工作压力，而GB/T 18443.5 的测试压力为环境气压。在环境温度一致前提下，瓶内压力升高不仅改变了瓶内温度从而改变漏热量，还可能改变真空绝热层的微结构从而改变绝热性能。但是，对于在用气瓶的定期检验而言，本标准的测试结果更能反映气瓶的真实的绝热性能。起草组在预研和标准起草过程中开展了上百次的不同气瓶不同压力下的比对测试，未发现测试压力对静态蒸发率结果有显著影响。

遵循“科学性、先进性、实用性、统一性”原则，本标准并未把测试条件限制在最佳测试条件，因此，测试条件与最佳条件的偏离必然会造成静态蒸发率测试结果与真实结果的偏离，由此产生的误差及允许程度取决于行业实际需求。低温绝热气瓶定期检验旨在排除气瓶的安全风险，静态蒸发率测试的作用在于辨识气瓶经过一个周期使用后绝热性能下降程度，预判下一周期是否还能维持合理范围。本标准可实现静态蒸发率的快速定量测试，且测试结果与 GB/T18443.5 的结果最大偏差未超过 20%，这是一种技术进步，解决了当前行业中的难点和痛点。未来，随着研究的深入和测试技术的进步，这方面的误差必然会逐步缩小，趋于测试结果与真实结果一致。

（四）本标准的其他影响因素分析

1. 车用 LNG 气瓶防过充装置的影响

以气相体积变化为主体考虑，当气瓶充满率为 95%时，限充容器内气体量相当于气瓶上方的气体量的 10%，放过充装置的气相空间对压力变化有一定影响，且不可忽略。当气瓶充满率为 80%时，限充容器内气体量相当于气瓶上方的气体量的 2.5%，可以忽略其体积变化对气瓶压力产生的影响。因此，本标准的最佳充满率为 70%，最小充满率 50%。

起草组选用多个型号、多种规格的车用 LNG 气瓶，分别使用本标准方法和

GB/T 18443.5 开展静态蒸发率测试，二者偏差在 10%以内，验证了防过充装置对快速法的影响可以忽略不计。

四、预期达到的社会效益

本标准推荐的静态蒸发率快速测试方法与当前的国标方法的检测结果有较好的一致性，推广应用后将有利于现有的低温绝热气瓶定期检验中的耗时长、成本高的问题的解决，有利于气瓶用户定期检验积极性的提升，有利于气瓶安全监管的高效实施。

五、标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利问题。

六、采用国际标准的程度，与国际同类标准的对比

未查询到同类国际、国外标准。

七、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

参照《真空绝热深冷设备性能试验方法 第5部分：静态蒸发率测量》（GB/T18443.5-2010）的环境温度对静态蒸发率的影响进行修正。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

本文件制定过程无重大分歧。

九、标准实施的建议

建议本文件作为中国特种设备检验协会团体标准发布，并由中国特种设备检验协会组织宣贯。

十、废止现行有关标准的建议

无。

十一、其他应予说明的事项

本文件为首次发布。

《低温绝热气瓶静态蒸发率快速测试方法》
标准编制工作组