

中华人民共和国国家标准

GB/T 18443.6—2010

真空绝热深冷设备性能试验方法 第6部分：漏热量测量

Testing method of performance for vacuum insulation
cryogenic equipment—Part 6: Heat-leak rate measurement



2010-09-26 发布

2011-02-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

前 言

GB/T 18443《真空绝热深冷设备性能试验方法》分为 8 个部分：

- 第 1 部分：基本要求；
- 第 2 部分：真空度测量；
- 第 3 部分：漏率测量；
- 第 4 部分：漏放气速率测量；
- 第 5 部分：静态蒸发率测量；
- 第 6 部分：漏热量测量；
- 第 7 部分：维持时间测量；
- 第 8 部分：容积测量。

本部分为 GB/T 18443 的第 6 部分。

本部分的附录 A、附录 B 和附录 C 均为资料性附录。

本部分由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本部分起草单位：上海市特种设备监督检验技术研究院、上海市气体工业协会、上海交通大学、查特深冷工程系统(常州)有限公司、山东商业职业技术学院、四川空分设备(集团)有限责任公司、南京航天晨光股份有限公司、上海华谊集团装备工程有限公司、中国特种设备检测研究院。

本部分起草人：汪荣顺、周伟明、徐惠新、舒文华、罗晓明、寿比南、薛季爱、魏蔚、易希朗、王芳、薛小龙、施锋萍、魏勇彪、顾福明、王为国。

本部分为首次发布。

真空绝热深冷设备性能试验方法

第6部分:漏热量测量

1 范围

GB/T 18443 的本部分规定了真空绝热深冷设备漏热量测量的试验原理与方法、试验装置、设备和仪器、试验条件与试验准备、试验步骤、数据处理和试验记录与试验报告等要求。

本部分适用于除储运液氢介质以外的真空绝热深冷压力容器、真空绝热深冷焊接气瓶、真空绝热管及其管件等真空绝热深冷设备的漏热量测量,其他设备可参照执行。

流量计测量法适用于真空绝热深冷压力容器、真空绝热深冷焊接气瓶等真空绝热深冷设备的漏热量测量,表面温度测量法适用于真空绝热管及其管件的漏热量测量。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 18443 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

- GB/T 18443.1—2010 真空绝热深冷设备性能试验方法 第1部分:基本要求
- GB/T 18443.2 真空绝热深冷设备性能试验方法 第2部分:真空度测量
- GB/T 18443.3 真空绝热深冷设备性能试验方法 第3部分:漏率测量
- GB/T 18443.4 真空绝热深冷设备性能试验方法 第4部分:漏放气速率测量
- GB/T 18443.5—2010 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

3 术语和定义

GB/T 18443.1~GB/T 18443.5 确立的以及下列术语和定义适用于本部分。

3.1

漏热量 heat-leak rate

单位时间内从周围环境传递到真空绝热深冷设备储存介质的热量,单位为瓦(W)。

3.2

测试漏热量 test heat-leak rate

真空绝热深冷设备充分冷却,达到热平衡后,单位时间内从周围环境传递到真空绝热深冷设备储存介质的热量,单位为瓦(W)。

3.3

标准环境状态下漏热量 heat-leak rate of standard ambient condition

测试漏热量换算为标准环境状态下的漏热量值,单位为瓦(W)。

4 试验原理与方法

4.1 流量计测量法

试验原理、方法和装置符合 GB/T 18443.5—2010 中 4.2.1 和 4.2.2 的规定。

4.2 表面温度测量法

4.2.1 试验原理与方法

通过测量真空绝热管的外表面温度及对应的环境温度,按大空间自然对流计算漏入真空绝热管的漏热量,按测得的接头空气侧温度与液体温度的差值计算接头的导热漏热量,或建立接头的有限元传热模型求解接头的漏热量。试验装置原理图见图 1。

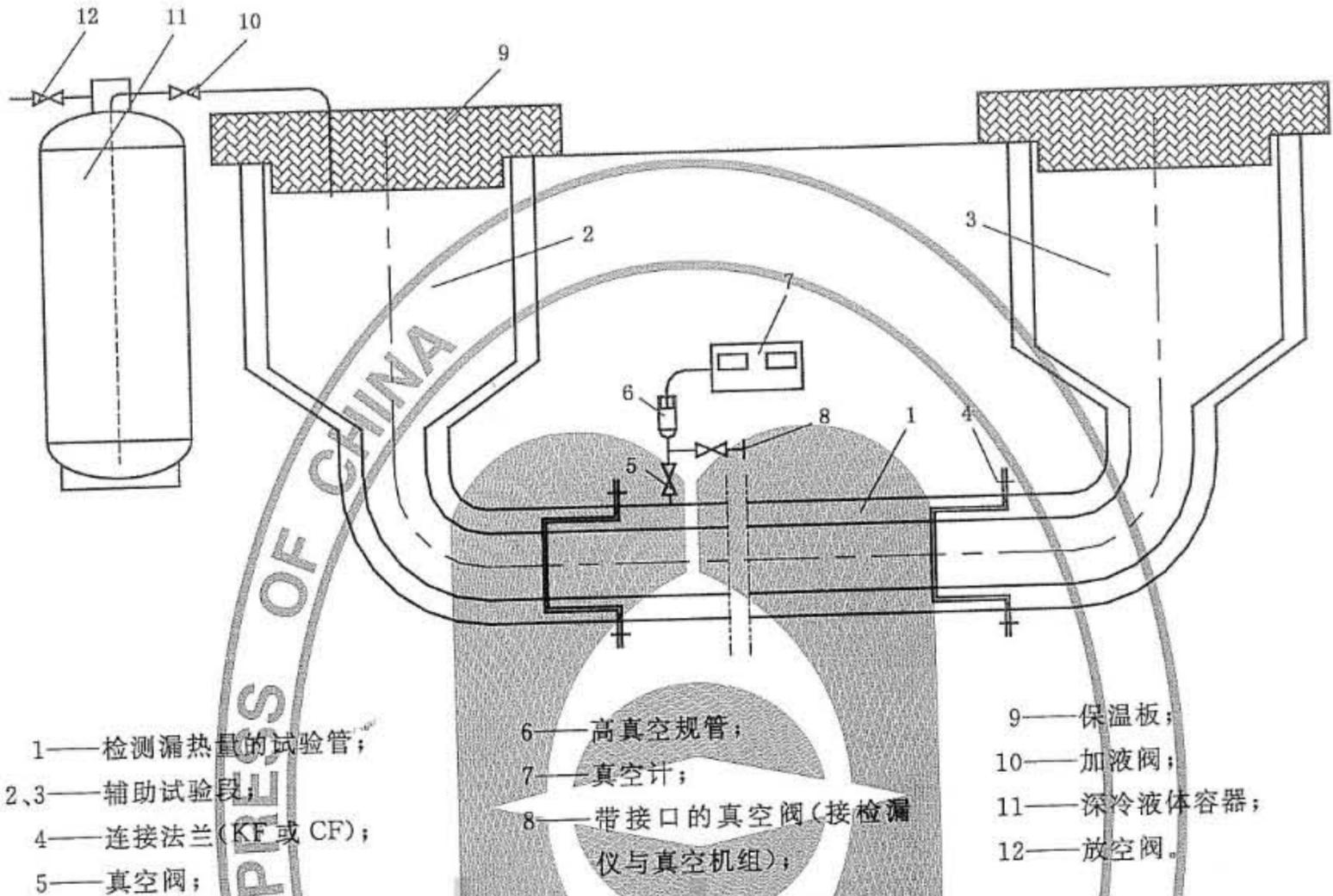


图 1 表面温度法测量装置原理图

4.2.2 当采用易燃介质测量真空绝热管及其管件的漏热量时应有安全措施,否则不应使用表面温度法。

5 试验装置、设备和仪器

5.1 试验装置由检测漏热量的试验管、辅助试验段、连接法兰(KF或CF)、真空阀、高真空规管、真空计、带接口的真空阀(接检漏仪与真空机组)、保温板、加液阀、深冷液体容器、放空阀、热电偶或铂电阻温度计、数据采集仪等组成。

5.2 试验装置、设备和仪器应符合 GB/T 18443.1—2010 中 4.2 的规定,且还应满足以下要求:

- 当流量计的量程小于或等于 5 L/min 时,精度应达到 0.5%;量程大于 5 L/min 时,精度应达到 1.0%;
- 流量计的额定流量应与被检深冷绝热管蒸发的气体流量相适应;
- 应有环境温度、环境大气压力及流量计进口温度和压力测量装置。

6 试验条件与试验准备

6.1 试验条件与试验准备应符合 GB/T 18443.1 的规定。

6.2 采用表面温度法测量时应在避光、自然对流、无风的室内进行。

6.3 被检真空绝热管的有效长度应不小于 5 m,且在中间 3 m 长的外管表面底部均布不少于 6 个温度的测量点。

6.4 辅助试验段的内容积应大于被检真空绝热管内容积的 2 倍,辅助试验段的高度应小于 1.5 m。

7 试验步骤

7.1 流量计测量法

试验步骤、试验过程和数据记录应符合 GB/T 18443.5 中 7.1 的规定。

7.2 表面温度测量法

7.2.1 一般采用液氮作为试验介质,也可采用实际输送的深冷液体作为试验介质。

7.2.2 打开阀门 10,用深冷容器 11 向被检真空绝热管及其管件连续输送深冷液体,直至加满为止。当辅助试验段内液位降至一半时,应重新加液补满,保证被检真空绝热管内充满试验介质液体。

7.2.3 真空绝热管及其管件持续输送深冷液体 24 h 后,方可记录数据。

7.2.4 数据记录应按不大于 10 min 的时间间隔,采集表面及环境温度,直至 1 h 内采集数据的相对误差小于±5%为止。

7.2.5 按附录 A 规定的表格格式填写试验数据或自动采集数据。

8 数据处理

8.1 测试漏热量 Q_0

8.1.1 流量计测量法

8.1.1.1 采用湿式气体流量计测量时,测试漏热量 Q_0 按式(1)计算:

$$Q_0 = G_v \psi \rho_g \left(1 + \frac{\rho_v}{\rho_L}\right) \times \frac{273.15}{T} \times \frac{P}{0.101325} h_{ig} \times 1000 \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

Q_0 ——测试漏热量,单位为瓦(W);

G_v ——蒸发气体体积流量日平均值,单位为立方米每秒(m^3/s);

ψ ——流量计的校正系数,标定时给定值;

ρ_g ——标准大气压(101.325 kPa)、273.15 K 下试验介质的气体密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

ρ_v ——试验环境压力日平均值下试验介质的饱和蒸气密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

ρ_L ——试验环境压力日平均值下试验介质的饱和液体密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

T ——流量计入口温度日平均值,单位为开尔文(K);

P ——流量计入口压力日平均值,单位为兆帕(MPa);

h_{ig} ——流量计入口压力日平均值下饱和液体的汽化潜热,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

8.1.1.2 采用气体质量流量计测量时,测试漏热量 Q_0 按式(2)计算:

$$Q_0 = G_m \left(1 + \frac{\rho_v}{\rho_L}\right) \psi \times h_{ig} \times 1000 \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

Q_0 ——测试漏热量,单位为瓦(W);

G_m ——蒸发气体质量流量日平均值,单位为千克每秒(kg/s);

ρ_v ——试验环境压力日平均值下试验介质的饱和蒸气密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

ρ_L ——试验环境压力日平均值下试验介质的饱和液体密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

ψ ——流量计的校正系数,标定时给定值;

其余同式(1)。

8.1.2 表面温度测量法

8.1.2.1 真空绝热管的测试漏热量 Q_0 应按式(3)计算:

$$Q_0 = h(T_a - T_w) \pi DL \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

Q_0 ——测试漏热量,单位为瓦(W);

T_a ——环境平均温度,单位为开尔文(K);

T_w ——管壁温度的平均温度,单位为开尔文(K),按式(4)计算:

$$T_w = \frac{\sum_{i=1}^n T_{wi}}{n} \dots\dots\dots(4)$$

式中:

$T_{wi}, i=1, 2, \dots, n$ ——壁面的各测量处温度,单位为开尔文(K);

n ——壁面温度测量数量。

D ——管道外径,单位为米(m);

L ——管道长度,单位为米(m);

h ——管道与空气的自然对流换热系数,单位为瓦每平方米开尔文[W/(m²·K)]。

h 按式(5)计算:

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} = 0.48 \times (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots(5)$$

式中:

Nu ——努塞尔特数;

D ——管道外径,单位为米(m);

λ ——空气的导热系数,单位为瓦每米开尔文(W/m·K);

Gr ——格拉晓夫数,按式(6)计算:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TD^3}{\nu^2} \dots\dots\dots(6)$$

式中:

g ——重力加速度,单位为米每秒平方(m/s²);

ΔT ——传热温差, $\Delta T = |T_a - T_w|$,单位为开尔文(K);

ν ——空气的运动黏度,单位为二次方米每秒(m²/s);

β ——空气的热膨胀系数, $\beta = 1/T_m$, T_m 按式(7)计算:

$$T_m = \frac{T_a + T_w}{2} \dots\dots\dots(7)$$

式中:

T_m ——定性温度,单位为开尔文(K);

其余同式(3)。

Pr ——空气普朗特数,可参照附录B查取。

8.1.2.2 真空绝热管接头对的测试漏热量 Q_0 的计算应符合下列要求:

a) 真空绝热管阴阳接头对的漏热量应按式(8)计算:

$$Q_0 = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^2 \left\{ [D_i^2 - (D_i - \delta_i)^2] \lambda_i \frac{(T_{wji} - T_2)}{L_i} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

式中:

Q_0 ——接头对的总漏热量,单位为瓦(W);

D_1 ——阳接头的外管外径,单位为米(m);

D_2 ——阴接头的内管外径,单位为米(m);

δ_1 ——阳接头的外管壁厚,单位为米(m);

δ_2 ——阴接头的内管壁厚,单位为米(m);

T_{wj1} ——阳接头与环境接触的外表面平均温度,单位为开尔文(K);

T_{wj2} ——阴接头与环境接触的外表面平均温度,单位为开尔文(K);

T_2 ——试验时被检件内平均压力对应的深冷液体饱和温度,单位为开尔文(K);

λ_1 ——阳接头的外管材料从 T_{wj1} 到 T_2 温区内的平均导热系数,单位为瓦每米开尔文(W/m·K);

λ_2 ——阴接头的内管材料从 T_{wj2} 到 T_2 温区内的平均导热系数,单位为瓦每米开尔文(W/m·K);

L_1 ——阳接头的外管管长,单位为米(m);

L_2 ——阴接头的内管管长,单位为米(m)。

b) 计算管道其他接头对的漏热量时按实际尺寸的导热结构考虑,温差为实测表面温度与饱和液体温度之差,复杂结构应采用有限元热分析计算。

8.2 标态(标准环境状态)下漏热量 Q_{20} 计算

8.2.1 标态下的高真空多层绝热漏热量 Q_{20} 应按式(9)计算:

$$Q_{20} = Q_0 \left(0.7 \times \frac{293.15 - T_s}{T_1 - T_2} + 0.3 \times \frac{293.15^4 - T_s^4}{T_1^4 - T_2^4} \right) \dots\dots\dots (9)$$

式中:

Q_{20} ——标态下漏热量,单位为瓦(W);

Q_0 ——接头对的总漏热量,单位为瓦(W);

T_s ——标准大气压(101.325 kPa)下深冷液体饱和温度,单位为开尔文(K);

T_1 ——试验时平均环境温度,单位为开尔文(K);

T_2 ——试验时被检件内平均压力对应的深冷液体饱和温度,单位为开尔文(K)。

8.2.2 标态下的粉末或纤维真空绝热漏热量 Q_{20} 应按式(10)计算:

$$Q_{20} = Q_0 \frac{293.15 - T_s}{T_1 - T_2} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

Q_{20} ——标态下漏热量,单位为瓦(W);

Q_0 ——接头对的总漏热量,单位为瓦(W);

T_s ——标准大气压(101.325 kPa)下深冷液体饱和温度,单位为开尔文(K);

T_1 ——试验时平均环境温度,单位为开尔文(K);

T_2 ——试验时被检件内平均压力对应的深冷液体饱和温度,单位为开尔文(K)。

8.2.3 标态下的高真空绝热漏热量 Q_{20} 应按式(11)计算:

$$Q_{20} = Q_0 \frac{293.15^4 - T_s^4}{T_1^4 - T_2^4} \dots\dots\dots (11)$$

式中:

Q_{20} ——标态下漏热量,单位为瓦(W);

Q_0 ——接头对的总漏热量,单位为瓦(W);

T_s ——标准大气压(101.325 kPa)下深冷液体饱和温度,单位为开尔文(K);

T_1 ——试验时平均环境温度,单位为开尔文(K);

T_2 ——试验时被检件内平均压力对应的深冷液体饱和温度,单位为开尔文(K)。

9 试验记录与试验报告

9.1 试验记录格式可参照附录 A。

9.2 试验报告格式可参照附录 C。

附录 B
(资料性附录)

标准大气压(101.325 kPa)下的空气物性数据表

标准大气压(101.325 kPa)下的空气物性数据表可参照表 B.1。

表 B.1 标准大气压(101.325 kPa)下的空气物性数据表

温度 K	密度 kg/m ³	定压比热容 J/(kg·K)	导热系数 10 ⁻² W/(m·K)	动力黏度 μPa·s	运动黏度 mm ² /s	定压膨胀系数 10 ⁻³ /K	普朗特数
243	1.454	1 005.4	2.213	15.71	10.81	4.136	0.714
244	1.448	1 005.4	2.221	15.76	10.89	4.119	0.714
245	1.442	1 005.4	2.228	15.82	10.97	4.102	0.714
246	1.436	1 005.4	2.235	15.87	11.05	4.085	0.714
247	1.430	1 005.4	2.243	15.92	11.13	4.068	0.714
248	1.424	1 005.4	2.250	15.97	11.21	4.051	0.714
249	1.419	1 005.4	2.258	16.02	11.30	4.035	0.714
250	1.413	1 005.4	2.265	16.08	11.38	4.019	0.714
251	1.407	1 005.4	2.272	16.13	11.46	4.002	0.714
252	1.402	1 005.4	2.280	16.18	11.54	3.986	0.714
253	1.396	1 005.4	2.287	16.23	11.63	3.970	0.714
254	1.391	1 005.4	2.294	16.28	11.71	3.954	0.714
255	1.385	1 005.4	2.302	16.33	11.79	3.939	0.714
256	1.380	1 005.4	2.309	16.39	11.88	3.923	0.714
257	1.374	1 005.4	2.316	16.44	11.96	3.908	0.714
258	1.369	1 005.4	2.324	16.49	12.05	3.892	0.714
259	1.364	1 005.4	2.331	16.54	12.13	3.877	0.714
260	1.358	1 005.5	2.338	16.59	12.21	3.862	0.714
261	1.353	1 005.5	2.345	16.64	12.30	3.847	0.713
262	1.348	1 005.5	2.353	16.69	12.38	3.832	0.713
263	1.343	1 005.5	2.360	16.75	12.47	3.817	0.713
264	1.338	1 005.5	2.367	16.80	12.56	3.803	0.713
265	1.333	1 005.5	2.374	16.85	12.64	3.788	0.713
266	1.328	1 005.5	2.382	16.90	12.73	3.774	0.713
267	1.323	1 005.5	2.389	16.95	12.81	3.760	0.713
268	1.318	1 005.5	2.396	17.00	12.90	3.745	0.713
269	1.313	1 005.6	2.403	17.05	12.99	3.731	0.713
270	1.308	1 005.6	2.410	17.10	13.07	3.717	0.713
271	1.303	1 005.6	2.418	17.15	13.16	3.704	0.713

表 B.1 (续)

温度 K	密度 kg/m ³	定压比热容 J/(kg·K)	导热系数 10 ⁻² W/(m·K)	动力黏度 μPa·s	运动黏度 mm ² /s	定压膨胀系数 10 ⁻³ /K	普朗特数
272	1.298	1 005.6	2.425	17.20	13.25	3.690	0.713
273	1.293	1 005.6	2.432	17.25	13.34	3.676	0.713
274	1.289	1 005.6	2.439	17.30	13.43	3.663	0.713
275	1.284	1 005.7	2.446	17.35	13.51	3.649	0.713
276	1.279	1 005.7	2.453	17.40	13.60	3.636	0.713
277	1.275	1 005.7	2.460	17.45	13.69	3.622	0.713
278	1.270	1 005.7	2.467	17.50	13.78	3.609	0.713
279	1.266	1 005.8	2.475	17.55	13.87	3.596	0.713
280	1.261	1 005.8	2.482	17.60	13.96	3.583	0.713
281	1.257	1 005.8	2.489	17.65	14.05	3.570	0.713
282	1.252	1 005.8	2.496	17.70	14.14	3.558	0.713
283	1.248	1 005.8	2.503	17.75	14.23	3.545	0.713
284	1.243	1 005.9	2.510	17.80	14.32	3.532	0.713
285	1.239	1 005.9	2.517	17.85	14.41	3.520	0.713
286	1.234	1 005.9	2.524	17.90	14.50	3.507	0.713
287	1.230	1 006.0	2.531	17.95	14.59	3.495	0.713
288	1.226	1 006.0	2.538	18.00	14.68	3.483	0.713
289	1.222	1 006.0	2.545	18.05	14.77	3.471	0.713
290	1.217	1 006.0	2.552	18.09	14.86	3.459	0.713
291	1.213	1 006.1	2.559	18.14	14.96	3.447	0.713
292	1.209	1 006.1	2.566	18.19	15.05	3.435	0.713
293	1.205	1 006.1	2.573	18.24	15.14	3.423	0.713
294	1.201	1 006.2	2.580	18.29	15.23	3.411	0.713
295	1.197	1 006.2	2.587	18.34	15.32	3.399	0.713
296	1.193	1 006.2	2.594	18.39	15.42	3.388	0.713
297	1.189	1 006.3	2.601	18.44	15.51	3.376	0.713
298	1.185	1 006.3	2.608	18.48	15.60	3.365	0.713
299	1.181	1 006.3	2.615	18.53	15.70	3.354	0.713
300	1.177	1 006.4	2.622	18.58	15.79	3.342	0.713
301	1.173	1 006.4	2.629	18.63	15.89	3.331	0.713
302	1.169	1 006.5	2.636	18.68	15.98	3.320	0.713
303	1.165	1 006.5	2.643	18.73	16.07	3.309	0.713
304	1.161	1 006.5	2.650	18.77	16.17	3.298	0.713
305	1.157	1 006.6	2.657	18.82	16.26	3.287	0.713

表 B.1 (续)

温度 K	密度 kg/m ³	定压比热容 J/(kg·K)	导热系数 10 ⁻² W/(m·K)	动力黏度 μPa·s	运动黏度 mm ² /s	定压膨胀系数 10 ⁻³ /K	普朗特数
306	1.154	1 006.6	2.663	18.87	16.36	3.276	0.713
307	1.150	1 006.7	2.670	18.92	16.45	3.265	0.713
308	1.146	1 006.7	2.677	18.97	16.55	3.255	0.713
309	1.142	1 006.8	2.684	19.01	16.64	3.244	0.713
310	1.139	1 006.8	2.691	19.06	16.74	3.234	0.713
311	1.135	1 006.9	2.698	19.11	16.84	3.223	0.713
312	1.131	1 006.9	2.705	19.16	16.93	3.213	0.713
313	1.128	1 006.9	2.712	19.20	17.03	3.202	0.713
314	1.124	1 007.0	2.718	19.25	17.13	3.192	0.713
315	1.121	1 007.0	2.725	19.30	17.22	3.182	0.713
316	1.117	1 007.1	2.732	19.35	17.32	3.172	0.713
317	1.113	1 007.1	2.739	19.39	17.42	3.162	0.713
318	1.110	1 007.2	2.746	19.44	17.52	3.152	0.713
319	1.106	1 007.2	2.753	19.49	17.61	3.142	0.713
320	1.103	1 007.3	2.759	19.54	17.71	3.132	0.713
321	1.100	1 007.4	2.766	19.58	17.81	3.122	0.713
322	1.096	1 007.4	2.773	19.63	17.91	3.112	0.713
323	1.093	1 007.5	2.780	19.68	18.01	3.103	0.713

附 录 C
(资料性附录)
漏热量检测报告

漏热量检测报告表格可参照表 C.1。

表 C.1 漏热量检测报告

报告编号：_____

试验起止日期		试验前仪器情况	
内容器有效容积 m ³		试验介质	
充液结束时间		充满率	
试验计算开始时间		试验计算结束时间	
平均环境温度 ℃		平均大气压 kPa	
标态下漏热量 W		试验后仪器情况	
备注			

编制：_____ 核对：_____ 审核：_____
