

T/CIEP

中国工业环保促进会团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

高真空多层材料绝热性能测量方法

Measurement Method for Thermal Insulation Performance of High-Vacuum
Multilayer Materials

(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

中国工业环保促进会 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 试验材料	1
5 试验原理	1
6 试验条件与试样准备	4
7 试验步骤	4
8 数据处理	5
参考文献	5

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。

本文件由中国环保工业促进会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

引 言

高真空多层绝热材料的绝热性能是决定深冷容器，特别是液氢、液氦等超低温容器性能的关键因素。GB/T 31480-2015《深冷容器用高真空多层绝热材料》标准中规定的表观导热系数试验方法基于液氮（77 K）工质，无法有效覆盖和评价材料在液氢（20 K）、液氦（4.2 K）等更低温区的绝热性能。

本文件的制定，旨在提供适用于液氢、液氦温区的高真空多层材料绝热性能测量方法，弥补现有标准在超低温测试领域的空白，为相关材料的研究、生产、检验和应用提供统一、可靠的技术依据，以支撑氢能等新兴产业的安全与发展。

高真空多层材料绝热性能测量方法

1 范围

本文件规定了高真空多层绝热材料在液氢至液氮温区的表观导热系数与放气速率测量的试验材料、试验原理、试验条件与试样准备、试验步骤和数据处理。

本文件适用于评估深冷容器用高真空多层绝热材料在超低温条件下的绝热性能。

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 31480-2015 深冷容器用高真空多层绝热材料

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 高真空多层材料 high-vacuum multilayer material

在深冷容器的高真空夹层空间内，由间隔材料和反射屏交替组合而形成的绝热方式。

3.2 表观导热系数 apparent thermal conductivity

在规定测试条件下，单位时间内通过单位厚度的绝热材料传递的热量。

3.3 放气速率 outgassing rate

在规定测试条件下，单位时间内单位质量的材料所放出的气体量。

4 试验材料

本文件规定的测试方法所针对的试验材料为符合 GB/T 31480-2015中第4章至第6章要求的高真空多层绝热材料，包括卷状产品或被状产品。

试验材料通常由反射屏（如铝箔、镀铝聚酯薄膜）与间隔材料（如玻璃纤维纸、玻璃纤维布、化学纤维纸、合成纤维筛网）交替组合而成的基本单元构成，其结构与原材料种类应符合GB/T 31480—2015中第4章和第5章的规定。

本文件特别适用于评估上述材料在**液氢（20 K）至液氮（4.2 K）等超低温温区**应用的绝热性能。

5 试验原理

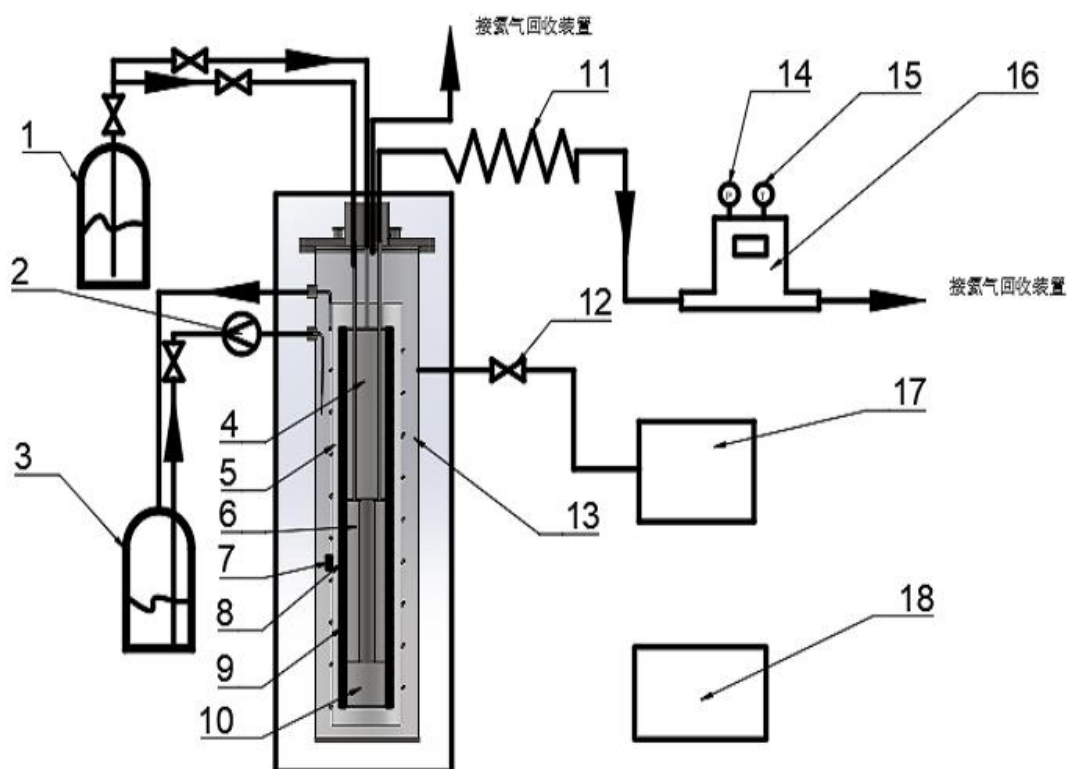
5.1 表观导热系数测试

5.1.1 蒸发量热法

5.1.1.1 测试方案

本方法采用基于蒸发量热原理的测试系统。该系统核心为一个置于高真空环境中的圆柱形量热器。量热器内筒作为冷边界，可充注低温液体（如液氮）；外筒或独立的温度控制屏作为热边界。被测绝热

材料缠绕于内筒外壁。通过精确测量为维持内筒低温液体在饱和状态下蒸发所需补偿的热量（即蒸发气体的质量流量），结合已知的几何尺寸和温差，计算得到材料的表观导热系数。试验装置原理图见图1。



说明：

- | | | |
|----------|-------------|--------------|
| 1——液氮杜瓦； | 7——热端温度传感器； | 13——外腔体； |
| 2——液氮泵； | 8——冷端温度传感器； | 14——压力传感器； |
| 3——液氮杜瓦； | 9——被测样品； | 15——温度传感器； |
| 4——上保护段； | 10——下保护段； | 16——气体质量流量计； |
| 5——液氮冷屏； | 11——升温器； | 17——真空机组； |
| 6——测试段； | 12——真空阀； | 18——气压计。 |

图 1 蒸发量热法量热器原理图

5.1.1.2 试验装置组成

蒸发量热法量热器主要由量热器、真空系统、流量测量系统、温度测控系统等组成。

- 量热器包括：保护段加排液口、测量段加排液口、量热器内筒、量热器外筒、上保护段、测量段、下保护段、外腔体、液氮冷屏、被测绝热材料；
- 真空系统包括：真空机组、真空阀、真空计、真空规；
- 流量测试系统包括：升温器、压力计、温度计、气体质量流量计；
- 温度测控系统包括：冷边界温度测量点、热边界温度测量点、温控装置。

5.1.1.3 边界条件要求

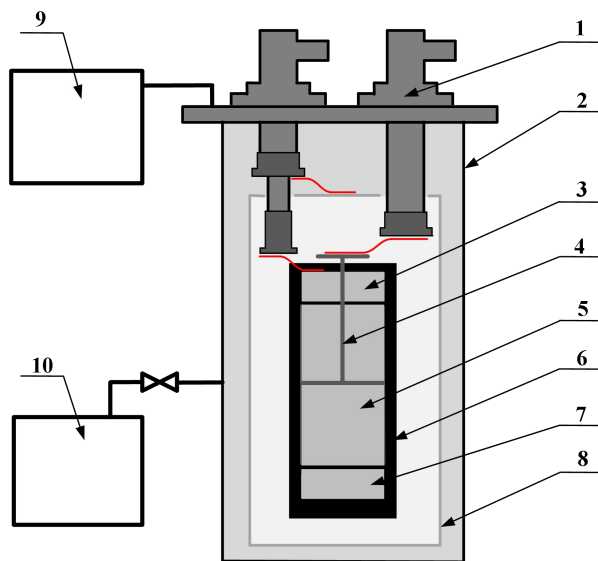
- 真空系统：应能维持测试夹层真空度优于 1×10^{-3} Pa；
- 低温工质与冷边界：采用液氮（沸点约4.2 K）或液氢（沸点约20.2 K）作为工质，冷边界温度控制范围通常为 (4.2 ± 1) K（液氮）或 (20.2 ± 1) K（液氢）；
- 热边界：通常由液氮屏（约77 K）或可控温屏提供，热边界温度控制精度宜在 ± 2 K以内；
- 流量测量系统：当气体质量流量计的量程小于或等于5 L/min时，精度应达到0.5%；量程大于5 L/min时，精度应达到1.0%；

e) 温度测量系统：用于测量冷、热边界的温度，测量误差冷边界宜不大于 ± 0.1 K，热边界宜不大于 ± 0.5 K。

5.1.2 热传导法

5.1.2.1 测试方案

本方法采用基于稳态热补偿原理的测试系统。该系统核心是通过绝热材料的热通量与流经导热杆的热通量相同。测试腔通过低热导的支撑杆与冷源（如制冷机）连接，构成冷边界。测试腔或辐射屏外为热边界。被测绝热材料安装于测试腔外壁与热边界之间。通过独立标定支撑杆在不同温度稳态下的热通量，结合已知的几何尺寸和通过绝热材料的温差，计算得到材料的表观导热系数。试验装置原理图见图2。



说明：

- | | | |
|----------|----------|------------|
| 1——制冷机； | 5——测试腔； | 9——数据采集系统； |
| 2——真空腔； | 6——被测样品； | 10——真空系统； |
| 3——上保护腔； | 7——下保护腔； | |
| 4——支撑杆； | 8——辐射屏； | |

图2 热传导法量热器原理图

5.1.2.2 试验装置组成

热传导法量热器试验装置主要由数据采集系统、真空系统、量热腔体等组成。

- 量热腔体包括：真空罩、测试腔、上保护腔、下保护腔、被测绝热材料、液氮冷屏；
- 真空系统包括：真空机组、真空阀、真空计、真空规；
- 数据采集系统包括：冷边界温度测量点、热边界温度测量点、温度计、温控仪。

5.1.2.3 边界条件要求

- 真空系统：应能维持测试腔体真空度优于 1×10^{-3} Pa；
- 冷边界：通常由制冷机提供，温度控制范围可为 (20 ± 0.2) K或更低；
- 热边界：温度控制范围可为 $(77 \sim 300)$ K，控制精度宜在 ± 0.5 K以内；
- 热流标定：需具备对支撑杆传热量进行精确标定的能力；
- 温度测量系统：用于测量冷、热边界的温度，测量误差宜不大于 ± 0.1 K。

5.2 放气速率测试

材料的放气速率测试按GB/T 31480—2015中附录B规定的方法执行。其原理为定容变压法，通过测量试样在高真空、一定温度条件下单位时间内放出的气体量所引起的压力变化来计算放气速率。试验温度可根据材料应用场景协商确定，并在报告中注明。

6 试验条件与试样准备

6.1 试验环境条件

- a) 环境应清洁、干燥、无尘，具备防静电、防明火措施；
- b) 试验现场应无强电磁干扰、强烈振动和冲击；
- c) 环境压力为当地大气压，环境温度范围宜为0~40℃，相对湿度应小于85%；
- d) 测试系统电气接地应可靠，接地电阻应小于3Ω。

6.2 试样准备

- a) 取样：从同批次、同规格的样品中随机截取具有代表性的试样；
- b) 尺寸与形状：试样尺寸应与所选测试方法的量热器或测试腔相匹配。对于缠绕式测试，试样宽度应大于测量段长度至少5mm，长度应确保能缠绕至规定层数并留有搭接余量；
- c) 单元数与层密度：试样总单元数推荐为30层。缠绕或安装时应保证层间均匀、平整，无严重褶皱或变形，并记录实际的缠绕层数或单元数；
- d) 清洁与干燥：试样表面应洁净，无油污、汗渍、手印等污染物。试样应在(105±5)℃的烘箱内烘干处理(24±0.5)h，然后在干燥环境中冷却至室温备用；
- e) 状态记录：记录试样的原始状态，包括材料结构、层数、尺寸等。

7 试验步骤

7.1 表观导热系数测试

7.1.1 试样安装

- a) 在量热器内筒（蒸发量热法）或测试腔（热传导法）的指定位置可靠布置冷边界温度传感器；
- b) 将准备好的试样按规定方法（如缠绕、包裹）安装到测试位置上，确保试样与冷边界接触良好、均匀；
- c) 在试样最外层与冷边界测温点对应位置布置热边界温度传感器；
- d) 将安装好试样的部件小心置入外筒或真空腔体内，确保密封可靠。

7.1.2 系统抽真空与降温

- a) 启动真空系统，对测试夹层或腔体进行抽真空；
- b) 当真空度优于 1×10^{-2} Pa后，开始对系统进行降温；
 - 蒸发量热法：向液氮冷屏充注液氮，然后缓慢向量热器内筒加注液氮（或液氩）直至充满，并确保测试段冷边界温度达到设定范围；
 - 热传导法：依次或同时开启保护腔和测试腔的制冷机，缓慢降温，使冷、热边界温度达到设定范围；
- c) 在整个测试过程中，应维持测试区域的真空度优于 1×10^{-3} Pa。

7.1.3 稳态判定与数据采集

- a) 持续监测系统状态，当冷、热边界温度及蒸发流量（蒸发量热法）或标定热流（热传导法）在连续1小时内变化均小于其平均值的±5%时，可认为系统达到热稳定状态；
- b) 系统达到稳态后，开始正式数据采集。至少连续记录1小时内的以下数据：
 - 蒸发量热法：蒸发气体质量流量 q_m ，冷边界温度 T_c ，热边界温度 T_h ，以及用于流量计读数修正的环境压力、气体温度等参数；
 - 热传导法：标定热流 Q ，冷边界温度 T_c ，热边界温度 T_h ；
- c) 记录数据的时间间隔不宜大于10分钟。

7.1.4 试验结束

- a) 数据采集完毕后，停止数据记录；
- b) 按照设备操作规程，停止低温液体供应或关闭制冷机，使系统自然复温或按程序加热复温；
- c) 待系统恢复至常温后，关闭真空机组及其他辅助设备。

7.2 放气速率测试

放气速率测试的步骤严格按照GB/T 31480—2015中附录B的规定执行。主要包括测试室本底漏放气速率测定、装入试样后的漏放气速率测定、以及数据处理与计算。试验前应对试样进行称重和规定的烘干处理。

8 数据处理

8.1 表观导热系数计算

高真空多层材料的表观导热系数按公式（1）计算：

$$\lambda = Q \cdot \frac{\ln \frac{r + \delta}{r}}{2\pi l (T_h - T_c)} \quad (1)$$

式中：

λ ——表观导热系数，单位为瓦每米开氏度[W/(m·K)]；

Q ——流经绝热材料的热通量，单位为瓦（W）；

对于蒸发量热法： $Q = \psi q_m h$

ψ ——流量计的校正系数，所用流量计的技术说明书或重新校准后的给定值；

q_m ——蒸发的氦气质量流量在1h内的平均值，单位为千克每秒（kg/s）；

h ——试验环境压力下液氦的汽化潜热，单位为焦每千克（J/kg）；

对于热传导法： Q 为通过标定直接获得的热流量。

T_h ——系统达到稳态后，热边界（试样总厚外表）温度在1h内的平均值，单位为开氏度（K）；

T_c ——系统达到稳态后，冷边界（量热器内筒外表）温度在1h内的平均值，单位为开氏度（K）；

r ——量热器内筒的外半径，单位为米（m）；

δ ——试样的厚度，单位为米（m）；

l ——测试段的长度，单位为米（m）。

8.2 放气速率计算

放气速率按GB/T 31480—2015中附录B规定的公式进行计算。试验结果取有效平行试验结果的平均值。

参考文献

- [1] GB/T 31480—2015 深冷容器用高真空多层绝热材料