

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 43891—2024

## 非金属化工设备 不透性石墨换热器传 热系数和流阻性能测试方法

Non-metallic chemical equipment—Test method for heat transfer  
coefficient and flow resistance performance of impervious  
graphite heat exchanger

国家标准全文公开系统专用，此文本仅供个人学习、研究之用，  
未经授权，禁止复制、发行、汇编、翻译或网络传播等，侵权必究。  
国家标准信息公共服务平台：<https://std.samr.gov.cn>

2024-04-25 发布

2024-11-01 实施



国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会

发布



## 目 次

前言 .....	Ⅲ
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 符号 .....	1
5 测试系统 .....	3
6 测量仪表及其安装 .....	7
7 待测换热器结构参数 .....	8
8 测试方法 .....	9
9 结果计算 .....	11
10 测试报告 .....	13
附录 A (资料性) 液-液无相变测试工况测量结果不确定度计算 .....	14
附录 B (资料性) 液-液无相变测试工况传热准则关系式拟合 .....	17
参考文献 .....	19



## 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。

本文件由中国石油和化学工业联合会提出。

本文件由全国非金属化工设备标准化技术委员会(SAC/TC 162)归口。

本文件起草单位：南通山剑防腐科技有限公司、上海市特种设备监督检验技术研究院、南通三圣石墨设备科技股份有限公司、南通京通石墨设备有限公司、宁波市特种设备检验研究院、贵州兰鑫石墨机电设备制造有限公司、湖南安广检验检测有限公司、山东鑫博奥防腐设备有限公司、贵州省特种设备检验检测院、青岛创合新材料有限公司、南通贝思特石墨设备有限公司、宁夏特种设备检验检测院、四川省特种设备检验研究院、重庆市特种设备检测研究院、上海蓝滨石化设备有限责任公司、天华化工机械及自动化研究设计院有限公司。

本文件主要起草人：任彬、黄晓东、冯曦、杨钧、黄辉、杨颖、聂印、孙晓靖、周伟、朱燕、周升涛、杨宇清、许金城、陈文飞、王胜辉、邓芝强、刘鹏、陈文杰、蔡琴、袁坤、姚国龙、陈娟、陈战杨、李建平、肖丽娟、贺正文、桑临春。



# 非金属化工设备 不透性石墨换热器传热系数和流阻性能测试方法

## 1 范围

本文件描述了不透性石墨换热器在液-液无相变、汽-液冷凝和液-汽蒸发工况下传热系数和流阻性能测试的方法。

本文件适用于以水、蒸汽和导热油为试验介质的不透性石墨列管式换热器、不透性石墨圆块孔式换热器及不透性石墨矩形块孔式换热器传热系数和流阻性能的测试。

碳化硅列管式换热器和碳化硅圆块孔式换热器的传热系数和流阻性能可参照本文件进行测试。

## 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 151 热交换器

GB/T 27418 测量不确定度评定和表示

GB/T 27698.1 热交换器及传热元件性能测试方法 第1部分：通用要求

## 3 术语和定义

GB/T 151、GB/T 27418 和 GB/T 27698.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**平均换热面积 average heat transfer area**

不透性石墨块孔式换热器纵向孔换热面积与横向孔换热面积的算术平均值。

### 3.2

**剩余体积 residual volume**

不透性石墨块孔式换热器换热块的总体积减去换热孔体积后剩余的体积。

### 3.3

**当量壁厚 equivalent thickness**

不透性石墨块孔式换热器剩余体积与平均换热面积之比。



## 4 符号

下列符号适用于本文件。

$A$ : 待测换热器换热面积, 单位为平方米( $\text{m}^2$ )。

$c_{p,c}$ : 待测换热器冷流体定压比热容, 单位为焦耳每千克开尔文 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ 。

$c_{p,h}$ : 待测换热器热流体定压比热容, 单位为焦耳每千克开尔文 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ 。

$c_{p,pre}$ : 预冷器冷流体定压比热容, 单位为焦耳每千克开尔文 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ 。

- $d_p$ :测压(差)孔内径,单位为毫米(mm)。
- $Eu_c$ :冷流体欧拉数,无因次量。
- $Eu_h$ :热流体欧拉数,无因次量。
- $F$ :温差修正系数,无因次量。
- $h_c$ :冷凝侧传热系数,单位为瓦每平方米开尔文[W/(m<sup>2</sup>·K)]。
- $h_{fg,s}$ :蒸汽汽化潜热,单位为焦耳每千克(J/kg)。
- $h_v$ :蒸发侧传热系数,单位为瓦每平方米开尔文[W/(m<sup>2</sup>·K)]。
- $K$ :总传热系数,单位为瓦每平方米开尔文[W/(m<sup>2</sup>·K)]。
- $L_T$ :温度测量仪表安装位置与待测换热器进、出口法兰密封面的距离,单位为毫米(mm)。
- $L_p$ :引压管的直管段长度,单位为毫米(mm)。
- $Nu_c$ :冷流体努塞尔数,无因次量。
- $Nu_h$ :热流体努塞尔数,无因次量。
- $Pr_c$ :冷流体普朗特数,无因次量。
- $Pr_h$ :热流体普朗特数,无因次量。
- $p_{c,i}$ :液-液无相变工况时冷流体进口压力;液-汽蒸发工况时蒸发侧进口压力,单位为帕(Pa)。
- $p_{c,o}$ :液-液无相变工况时冷流体出口压力;液-汽蒸发工况时蒸发侧出口压力,单位为帕(Pa)。
- $p_{h,i}$ :液-液无相变工况时热流体进口压力;汽-液冷凝工况时冷凝侧进口压力,单位为帕(Pa)。
- $p_{h,o}$ :液-液无相变工况时热流体出口压力;汽-液冷凝工况时冷凝侧出口压力,单位为帕(Pa)。
- $Q_c$ :待测换热器冷流体换热量,单位为瓦(W)。
- $Q_{con}$ :待测换热器冷凝液换热量,单位为瓦(W)。
- $Q_{con,pre}$ :预热器冷凝液换热量,单位为瓦(W)。
- $Q_{c,pre}$ :预冷器冷流体换热量,单位为瓦(W)。
- $Q_h$ :待测换热器热流体换热量,单位为瓦(W)。
- $q_{m,c}$ :待测换热器冷流体质量流量,单位为千克每秒(kg/s)。
- $q_{m,s}$ :蒸汽质量流量,单位为千克每秒(kg/s)。
- $q_{m,con}$ :待测换热器冷凝液质量流量,单位为千克每秒(kg/s)。
- $q_{m,pre}$ :预热器冷凝液质量流量,单位为千克每秒(kg/s)。
- $q_{v,c}$ :待测换热器冷流体体积流量,单位为立方米每秒(m<sup>3</sup>/s)。
- $q_{v,h}$ :待测换热器热流体体积流量,单位为立方米每秒(m<sup>3</sup>/s)。
- $q_{v,pre}$ :预冷器冷流体体积流量,单位为立方米每秒(m<sup>3</sup>/s)。
- $Re_c$ :冷流体雷诺数,无因次量。
- $Re_h$ :热流体雷诺数,无因次量。
- $Re_l$ :液相雷诺数,无因次量。
- $T_{c,i}$ :待测换热器冷流体进口温度,单位为摄氏度(°C)。
- $T_{c,o}$ :待测换热器冷流体出口温度,单位为摄氏度(°C)。
- $T_{h,i}$ :待测换热器热流体进口温度,单位为摄氏度(°C)。
- $T_{h,o}$ :待测换热器热流体出口温度,单位为摄氏度(°C)。
- $T_{pre,c,i}$ :预冷器冷流体进口温度,单位为摄氏度(°C)。
- $T_{pre,c,o}$ :预冷器冷流体出口温度,单位为摄氏度(°C)。
- $T_{pre,h,i}$ :预热器冷流体进口温度,单位为摄氏度(°C)。
- $T_{pre,h,o}$ :预热器冷流体出口温度,单位为摄氏度(°C)。
- $T_s$ :蒸汽温度,单位为摄氏度(°C)。
- $T_v$ :待测换热器蒸发侧汽化温度,单位为摄氏度(°C)。

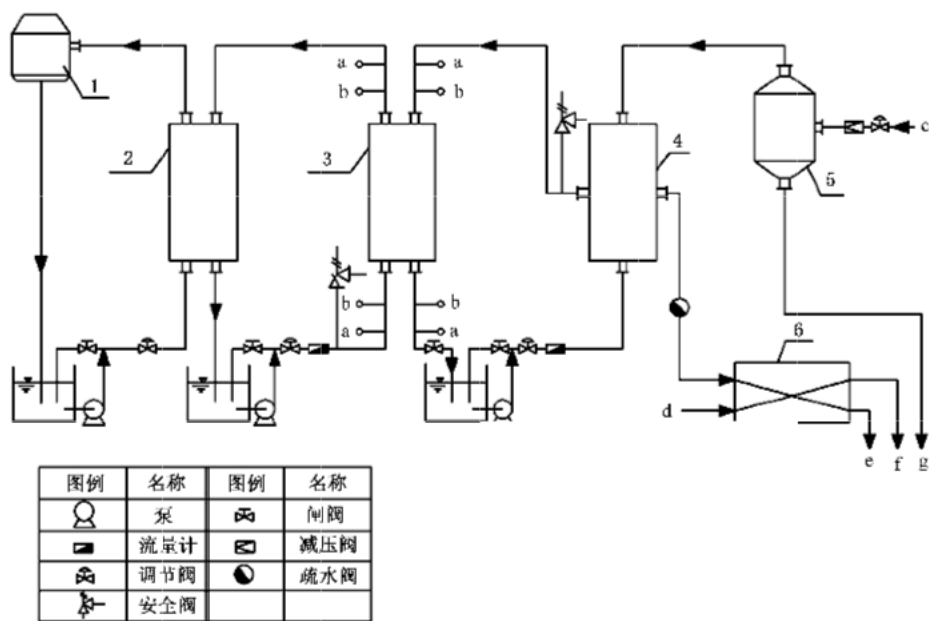


- $u_c$ : 待测换热器冷流体流速,单位为米每秒(m/s)。
- $u_h$ : 待测换热器热流体流速,单位为米每秒(m/s)。
- $X_{tt}$ : 马丁尼利数,无因次量。
- $x_i$ : 进口干度,无因次量。
- $x_m$ : 平均干度,无因次量。
- $x_o$ : 出口干度,无因次量。
- $\Delta p_c$ : 冷侧流阻性能,单位为帕(Pa)。
- $\Delta p_{c,dp}$ : 冷流体进、出口压差,单位为帕(Pa)。
- $\Delta p_{c,l}$ : 冷侧接管压力降,单位为帕(Pa)。
- $\Delta p_h$ : 热侧流阻性能,单位为帕(Pa)。
- $\Delta p_{h,dp}$ : 热流体进、出口压差,单位为帕(Pa)。
- $\Delta p_{h,l}$ : 热侧接管压力降,单位为帕(Pa)。
- $\Delta Q$ : 热平衡相对误差,无因次量。
- $\Delta T_1$ : 待测换热器进口端冷侧、热侧流体温度差,单位为开尔文(K)。
- $\Delta T_2$ : 待测换热器出口端冷侧、热侧流体温度差,单位为开尔文(K)。
- $\Delta T_m$ : 对数平均温差,单位为开尔文(K)。
- $\Delta T_{m,e}$ : 有效对数平均温差,单位为开尔文(K)。
- $\zeta_c$ : 冷侧接管局部阻力系数,无因次量。
- $\zeta_h$ : 热侧接管局部阻力系数,无因次量。
- $\eta_c$ : 冷流体动力黏度,单位为帕秒(Pa·s)。
- $\eta_h$ : 热流体动力黏度,单位为帕秒(Pa·s)。
- $\lambda_c$ : 冷流体导热系数,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)]。
- $\lambda_h$ : 热流体导热系数,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)]。
- $\rho_c$ : 待测换热器冷流体密度,单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>)。
- $\rho_h$ : 待测换热器热流体密度,单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>)。
- $\rho_{pre}$ : 预冷器冷流体密度,单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>)。

## 5 测试系统

### 5.1 液-液无相变工况测试系统

5.1.1 液-液无相变工况测试系统应符合图 1 的规定。



标引序号说明：

- |           |              |            |
|-----------|--------------|------------|
| 1——冷却塔；   | 6——过冷器；      | d——冷却水进口；  |
| 2——冷却器；   | a——温度测量孔；    | e——冷凝液排放口； |
| 3——待测换热器； | b——压力(差)测量孔； | f——冷却水出口；  |
| 4——加热器；   | c——蒸汽进口；     | g——冷凝液排放口。 |
| 5——分离器；   |              |            |

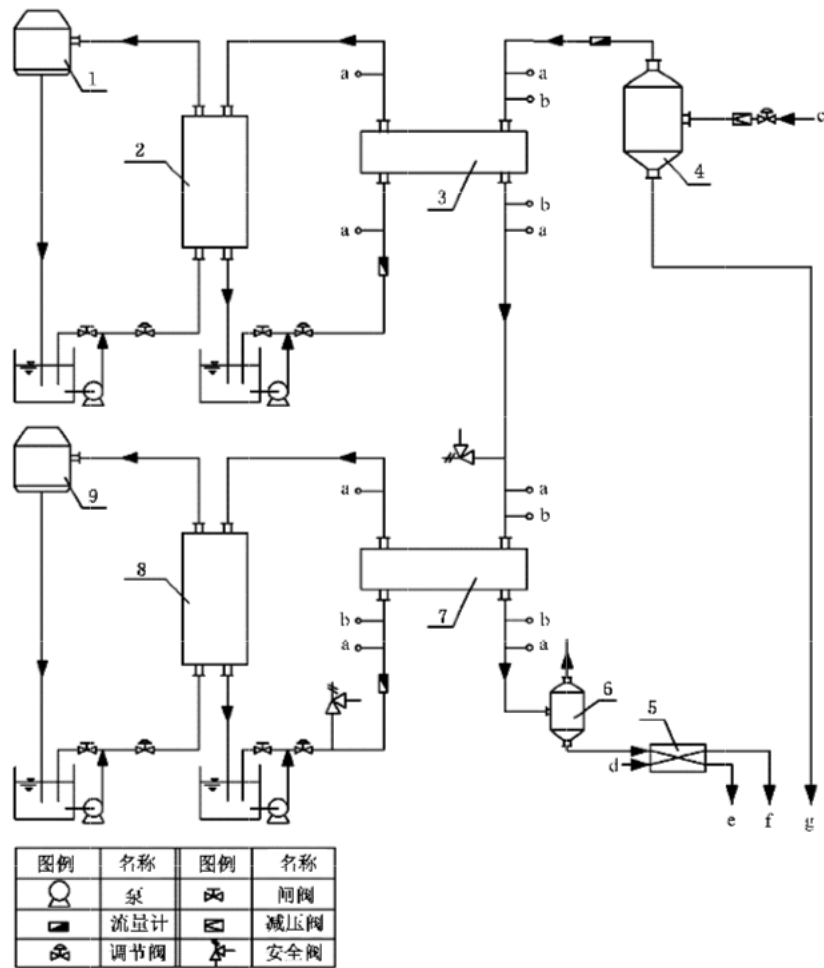
图 1 液-液无相变测试系统

5.1.2 测试系统中主要设备的作用如下：

- a) 冷却塔:冷却从冷却器流出的流体至室温；
- b) 冷却器:冷却进入待测换热器的冷流体至设定温度；
- c) 加热器:加热进入待测换热器的热流体至设定温度；
- d) 分离器:分离蒸汽中的冷凝液；
- e) 过冷器:冷却加热器排出的冷凝液。

5.2 汽-液冷凝工况测试系统

5.2.1 汽-液冷凝工况测试系统应符合图 2 的规定。



标引序号说明：

- |               |               |            |
|---------------|---------------|------------|
| 1——预冷器用冷却塔；   | 7——待测换热器；     | d——冷却水进口；  |
| 2——预冷器用冷却器；   | 8——待测换热器用冷却器； | e——冷凝液计量口； |
| 3——预冷器；       | 9——待测换热器用冷却塔； | f——冷却水出口；  |
| 4——预冷器用分离器；   | a——温度测量孔；     | g——冷凝液排放口。 |
| 5——过冷器；       | b——压力(差)测量孔；  |            |
| 6——待测换热器用分离器； | c——蒸汽进口；      |            |

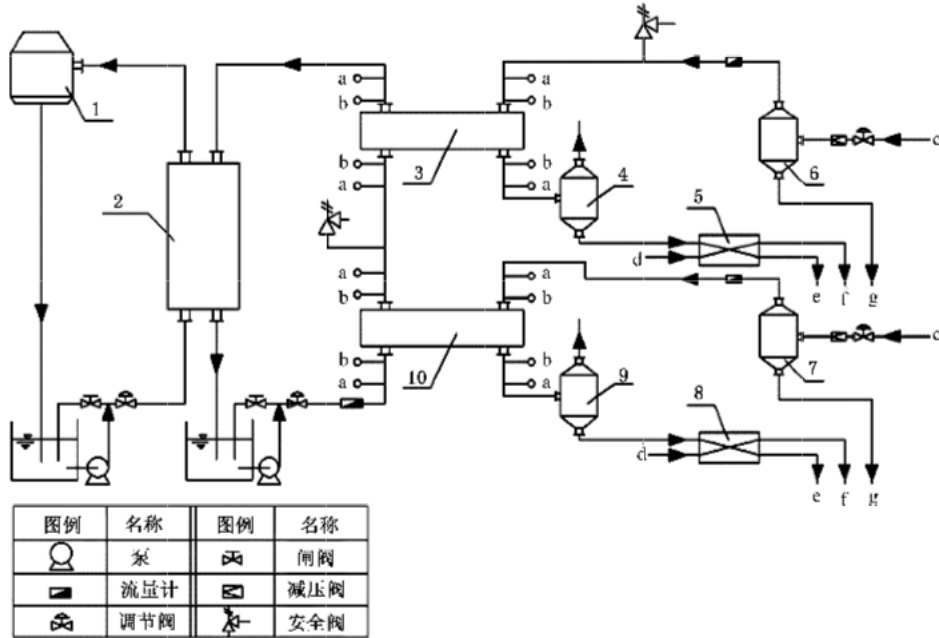
图 2 汽-液冷凝测试系统

5.2.2 测试系统中主要设备的作用如下：

- a) 预冷器用冷却塔:冷却从预冷器用冷却器流出的流体至室温；
- b) 预冷器用冷却器:冷却从预冷器流出的流体至设定温度；
- c) 预冷器:冷凝进入待测换热器冷凝侧的流体至设定干度；
- d) 预冷器用分离器:分离蒸汽中的冷凝液；
- e) 过冷器:冷却待测换热器用分离器排出的冷凝液；
- f) 待测换热器用分离器:分离待测换热器冷凝侧流体中的冷凝液；
- g) 待测换热器用冷却器:冷却进入待测换热器的冷流体至设定温度；
- h) 待测换热器用冷却塔:冷却从待测换热器用冷却器流出的冷流体至室温。

### 5.3 液-汽蒸发工况测试系统

5.3.1 液-汽蒸发工况测试系统应符合图 3 的规定。



标引序号说明：

- |                |              |            |
|----------------|--------------|------------|
| 1——冷却塔；        | 7——预热器蒸汽分离器； | c——蒸汽进口；   |
| 2——冷却器；        | 8——预热器用过冷器；  | d——冷却水进口；  |
| 3——待测换热器；      | 9——预热器用分离器；  | e——冷凝液计量口； |
| 4——待测换热器用分离器；  | 10——预热器；     | f——冷却水出口；  |
| 5——待测换热器用过冷器；  | a——温度测量孔；    | g——冷凝液排放口。 |
| 6——待测换热器蒸汽分离器； | b——压力(差)测量孔； |            |

图 3 液-汽蒸发测试系统

5.3.2 测试系统中主要设备的作用如下：

- 冷却塔:冷却从冷却器流出的流体至室温；
- 冷却器:冷却进入预热器的冷流体至设定温度；
- 待测换热器用分离器:分离待测换热器冷凝侧流体中的冷凝液；
- 待测换热器用过冷器:冷却待测换热器用分离器排出的冷凝液；
- 待测换热器蒸汽分离器:分离进入待测换热器蒸汽中的冷凝液；
- 预热器蒸汽分离器:分离进入预热器蒸汽中的冷凝液；
- 预热器用过冷器:冷却预热器用分离器排出的冷凝液；
- 预热器用分离器:分离预热器冷凝侧流体中的冷凝液；
- 预热器:加热进入待测换热器蒸发侧流体至设定干度。

### 5.4 测试系统安全和保温

5.4.1 各测试系统中的压力容器、压力管道及管件应符合相应技术法规和标准的要求。

5.4.2 待测换热器管程、壳程进口管路应安装安全阀,安全阀应符合相应技术法规和标准的要求。

5.4.3 测试系统中输送流体的管道及管件和待测换热器应采取保温措施。

## 6 测量仪表及其安装

### 6.1 流量测量仪表及其安装

6.1.1 液体流量测量仪表宜选用孔板流量计、涡轮流量计或电磁流量计,蒸汽流量测量仪表宜选用涡街流量计。流量测量仪表量程应满足测试要求,准确度等级应不低于 0.5 级。

6.1.2 流量测量仪表前、后直管段长度应满足 GB/T 27698.1 及仪表使用说明书的要求。

6.1.3 流量测量仪表安装位置应靠近待测换热器。流量测量点至待测换热器间不应存在测试流体泄漏和分流。

6.1.4 冷凝液质量流量的测量宜采用称重法,宜选用电子称重仪表,准确度等级应为 GB/T 7724 规定的高准确度及以上。

6.1.5 流量测量仪表应在检定或校准有效期内使用。

### 6.2 温度测量仪表及其安装

6.2.1 温度测量仪表宜选用热电偶或铂热电阻,允差值为 0.5 °C,其量程应满足测试要求。

6.2.2 热电偶或铂热电阻的安装方向及插入深度应符合 GB/T 27698.1 的要求。

6.2.3 温度测量仪表安装位置与待测换热器进出口法兰密封面的距离  $L_T$ (见图 4)应不大于 150 mm。

6.2.4 温度测量仪表应在检定或校准有效期内使用。

### 6.3 压力(差)测量仪表及其安装

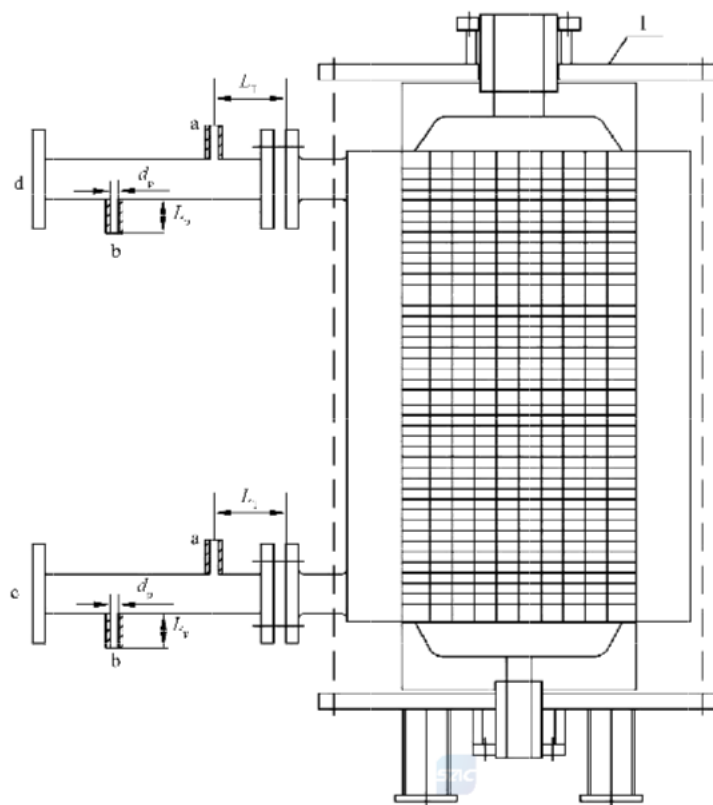
6.3.1 压力(差)测量仪表宜选用压力(差)传感器,其量程应满足测试要求,准确度等级应不低于 0.2 级。

6.3.2 压力(差)测量孔应靠近待测换热器,压力(差)测量仪表安装位置前后直管段长度应满足 GB/T 27698.1 的要求。

6.3.3 压力(差)测量孔应与管壁垂直,其内径  $d_p$  应为 2 mm~4 mm,引压管直管段长度  $L_p$ (见图 4)应大于或等于  $2d_p$ 。

6.3.4 压力(差)测量仪表的安装高度应保持一致。

6.3.5 压力(差)测量仪表应在检定或校准有效期内使用。



标引序号说明：

- 1——待测换热器；
- a——温度测量孔；
- b——压力(差)测量孔；
- c——试验介质进口；
- d——试验介质出口。

图 4 温度、压力(差)测量仪表安装示意图

## 7 待测换热器结构参数

7.1 对于不透性石墨列管式换热器,委托单位应提供待测换热器的下列参数:

- a) 不透性石墨管内径、外径、有效长度及数量,
- b) 不透性石墨管排列方式,
- c) 不透性石墨管中心距,
- d) 管程数,
- e) 壳体内径,
- f) 布管限定圆直径,
- g) 折流板缺口高度、间距及厚度,
- h) 不透性石墨材料导热系数。

注:不透性石墨管的有效长度是指不透性石墨管管长减去粘接长度、辅助管板厚度及折流板厚度后的长度。

7.2 对于不透性石墨块孔式换热器,委托单位应提供待测换热器的下列参数:

- a) 不透性石墨块横向孔直径、长度及数量,

- b) 壳程数,
- c) 不透性石墨块纵向孔直径、长度及数量,
- d) 管程数,
- e) 不透性石墨材料导热系数,
- f) 不透性石墨块剩余体积、当量壁厚。

注：横向孔长度是指横向孔中心线的长度。

7.3 测试单位应对委托单位提供的待测换热器结构参数进行确认。

## 8 测试方法

### 8.1 液-液无相变测试工况

#### 8.1.1 测量参数

对于液-液无相变测试工况,应测量并记录下列参数:

- a) 待测换热器冷流体体积流量  $q_{v,c}$  和热流体体积流量  $q_{v,h}$ ,
- b) 待测换热器冷流体进口温度  $T_{c,i}$ 、出口温度  $T_{c,o}$  和热流体进口温度  $T_{h,i}$ 、出口温度  $T_{h,o}$ ,
- c) 待测换热器冷流体进口压力  $p_{c,i}$ 、出口压力  $p_{c,o}$  (或者进、出口压差  $\Delta p_{c,dp}$ ) 和热流体进口压力  $p_{h,i}$ 、出口压力  $p_{h,o}$  (或者进、出口压差  $\Delta p_{h,dp}$ )。

#### 8.1.2 测试流程

8.1.2.1 测试前,应确保测试系统中各测试设备、管线以及测量仪表连接可靠,安全阀整定压力低于待测换热器设计压力。

8.1.2.2 测试时,应确保待测换热器中完全充满测试流体,并排尽压力(差)测量仪表引压管内的空气。

8.1.2.3 设定待测换热器热流体流速  $u_h$  不变,调整待测换热器冷流体流速  $u_c$ :

- a) 设定待测换热器热流体流速  $u_h$ 、冷流体流速  $u_c$ ,宜设定为 1.0 m/s;
- b) 设定待测换热器热流体进口温度  $T_{h,i}$  为  $60\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ,冷流体进口温度  $T_{c,i}$  为  $30\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- c) 在 a) 和 b) 规定的测试工况下稳定运行至少 5 min 后,当冷、热流体的热平衡相对误差  $\Delta Q$  不大于  $\pm 5\%$  时,按照 8.1.1 的要求采集数据,至少采集 3 组数据,每组数据采集应同时进行;
- d) 调整待测换热器冷流体流速  $u_c$ ,调整范围为 0.5 m/s~1.5 m/s,调整次数不少于 6 次,每次调整后,按照 b) 和 c) 的规定进行测试和数据采集。

8.1.2.4 等幅度调整待测换热器热流体流速  $u_h$ 、冷流体流速  $u_c$ :

- a) 设定待测换热器热流体流速  $u_h$ 、冷流体流速  $u_c$ ,宜设定为 1.0 m/s;
- b) 设定待测换热器热流体进口温度  $T_{h,i}$  为  $60\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ,冷流体进口温度  $T_{c,i}$  为  $30\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- c) 在 a) 和 b) 规定的测试工况稳定运行至少 5 min 后,当冷、热流体的热平衡相对误差  $\Delta Q$  不大于  $\pm 5\%$  时,按照 8.1.1 的要求采集数据,至少采集 3 组数据,每组数据采集应同时进行;
- d) 等幅度调整待测换热器热流体流速  $u_h$ 、冷流体流速  $u_c$ ,调整范围为 0.5 m/s~1.5 m/s,调整次数不少于 6 次,每次调整后,按照 b) 和 c) 的规定进行测试和采集数据。

8.1.2.5 测试流程可根据用户要求或设备特征进行调整。

### 8.2 汽-液冷凝测试工况

#### 8.2.1 测量参数

对于汽-液冷凝测试工况,应测量并记录下列参数:

- a) 蒸汽质量流量  $q_{m,s}$ 、预冷器冷流体体积流量  $q_{v,pre}$ 、待测换热器冷流体体积流量  $q_{v,c}$  以及待测换

热器冷凝液质量流量  $q_{m,con}$ ，

- b) 预冷器冷流体进口温度  $T_{prec,i}$  和出口温度  $T_{prec,o}$ 、待测换热器冷流体进口温度  $T_{c,i}$  和出口温度  $T_{c,o}$ 、蒸汽温度  $T_s$ ，
- c) 待测换热器冷凝侧(热流体)进口压力  $p_{h,i}$ 、出口压力  $p_{h,o}$  或待测换热器冷凝侧进、出口压差  $\Delta p_{h,dp}$ 。

## 8.2.2 测试流程

8.2.2.1 测试前,应确保测试系统中各测试设备、管线以及测量仪表连接可靠,安全阀整定压力低于待测换热器设计压力。

8.2.2.2 测试时,应确保待测换热器中完全充满测试流体,并排尽压力(差)测量仪表引压管内的空气。

8.2.2.3 设定待测换热器冷凝侧蒸汽质量流量  $q_{m,s}$  不变,按下列流程进行测试和采集数据:

- a) 设定待测换热器冷侧流体流速  $u_c$ ,宜设定为 1.5 m/s,并在整个测试过程中保持不变;
- b) 通过预冷器调整待测换热器冷凝侧流体进口干度  $x_i$  为 0.5;
- c) 在 a) 和 b) 规定的测试工况稳定运行至少 5 min 后,当冷、热流体的热平衡相对误差  $\Delta Q$  不大于  $\pm 5\%$  时,按照 8.2.1 的要求进行数据采集,至少采集 3 组数据,每组数据采集应同时进行;
- d) 调整待测换热器冷凝侧流体进口干度  $x_i$ ,调整范围为 0.3~0.8,调整次数不少于 6 次。每次调整后,按照 c) 的规定进行测试和采集数据。

8.2.2.4 调整待测换热器冷凝侧蒸汽质量流量  $q_{m,s}$ ,按 8.2.2.3 中 a)~d) 规定进行测试和采集数据,总计调整次数不少于 6 次。

8.2.2.5 测试流程可根据用户需求或设备特征进行调整。

## 8.3 液-汽蒸发测试工况

### 8.3.1 测量参数

对于液-汽蒸发测试工况,应测量并记录下列参数:

- a) 待测换热器冷流体质量流量  $q_{m,c}$ 、待测换热器蒸汽质量流量  $q_{m,s}$ 、预热器冷凝液质量流量  $q_{m,pre}$ 、待测换热器冷凝液质量流量  $q_{m,con}$ ，
- b) 预热器冷流体进口温度  $T_{preh,i}$ 、出口温度  $T_{preh,o}$ ，
- c) 待测换热器蒸发侧进口压力  $p_{c,i}$ 、出口压力  $p_{c,o}$  或待测换热器蒸发侧(冷流体)进出口压差  $\Delta p_{c,dp}$ 。

### 8.3.2 测试流程

8.3.2.1 测试前,应确保测试装置中各测试设备、管线以及测量仪表连接可靠,确保安全阀整定压力低于换热器设计压力。

8.3.2.2 测试时,应确保待测换热器中完全充满测试流体,并排尽压力(差)测量仪表引压管内的空气。

8.3.2.3 设定待测换热器蒸发侧冷流体质量流量  $q_{m,c}$  不变,按下列流程进行测试和采集数据:

- a) 设定待测换热器冷凝侧蒸汽质量流量  $q_{m,s}$ ,并在整个测试过程中保持不变;
- b) 通过预热器调整待测换热器蒸发侧冷流体进口干度  $x_i$  至 0.5;
- c) 在 a) 和 b) 规定的测试工况稳定运行至少 5 min 后,按照 8.3.1 的要求进行数据采集,至少采集 3 组数据,每组数据采集应同时进行;
- d) 调整待测换热器蒸发侧冷流体进口干度  $x_i$ ,调整范围为 0.3~0.8,调整次数不少于 6 次,每次调整后,按 c) 的规定进行测试和采集数据。

8.3.2.4 调整待测换热器蒸发侧冷流体质量流量  $q_{m,c}$ ,按 8.3.2.3 中 a)~d) 规定进行测试和采集数



据,总计调整次数不少于6次。

8.3.2.5 测试流程可根据用户需求或设备特征进行调整。

## 9 结果计算

### 9.1 物性参数确定

按照 GB/T 27698.1 的规定确定测试流体的下列物性参数:

- 冷、热流体的定压比热容  $c_{p,c}$ 、 $c_{p,h}$ ,
- 冷、热流体的密度  $\rho_c$ 、 $\rho_h$ ,
- 冷、热流体的动力黏度  $\eta_c$ 、 $\eta_h$ ,
- 冷、热流体的导热系数  $\lambda_c$ 、 $\lambda_h$ ,
- 蒸汽汽化潜热  $h_{fg,s}$ 。

### 9.2 总传热系数和流阻性能计算

9.2.1 液-液无相变测试工况下换热器总传热系数  $K$  按表 1 中的公式进行计算。

表 1 液-液无相变工况总传热系数  $K$  计算表

序号	名称	符号	计算公式
1	待测换热器冷流体换热量	$Q_c$	$Q_c = q_{v,c} \times \rho_c \times c_{p,c} \times (T_{c,o} - T_{c,i})$
2	待测换热器热流体换热量	$Q_h$	$Q_h = q_{v,h} \times \rho_h \times c_{p,h} \times (T_{h,i} - T_{h,o})$
3	热平衡相对误差	$\Delta Q$	$\Delta Q =  (Q_h - Q_c)/Q_c  \times 100\%$
4	对数平均温差	$\Delta T_m$	$\Delta T_m = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)$
5	温差修正系数	$F$	按 GB/T 151
6	有效对数平均温差	$\Delta T_{m,e}$	$\Delta T_{m,e} = F \times \Delta T_m$
7	总传热系数	$K$	$K = (Q_c + Q_h) / (2A \times \Delta T_{m,e})$

当待测换热器为不透性石墨列管式换热器时,换热面积  $A$  为按不透性石墨管外径计算所得的有效换热面积;当待测换热器为不透性石墨块孔式换热器时,换热面积  $A$  为不透性石墨块孔式换热器平均换热面积  $A_m$ 。

9.2.2 汽-液冷凝测试工况下换热器总传热系数  $K$  按表 2 中的公式进行计算。

表 2 汽-液冷凝工况总传热系数  $K$  计算表

序号	名称	符号	计算公式
1	预冷器冷流体换热量	$Q_{c,pre}$	$Q_{c,pre} = q_{v,pre} \times \rho_{pre} \times c_{p,pre} \times (T_{pre,o} - T_{pre,i})$
2	待测换热器冷凝侧入口干度	$x_i$	$x_i = 1 - Q_{c,pre} / (q_{m,s} \times h_{fg,s})$
3	待测换热器冷流体换热量	$Q_c$	$Q_c = q_{v,c} \times \rho_c \times c_{p,c} \times (T_{c,o} - T_{c,i})$
4	待测换热器冷凝液换热量	$Q_{con}$	$Q_{con} = q_{m,con} \times h_{fg,s}$
5	热平衡相对误差	$\Delta Q$	$\Delta Q =  (Q_{con} - Q_c)/Q_c  \times 100\%$
6	待测换热器冷凝侧出口干度	$x_o$	$x_o = x_i - Q_c / (q_{m,s} \times h_{fg,s})$

表 2 汽-液冷凝工况总传热系数  $K$  计算表 (续)

序号	名称	符号	计算公式
7	待测换热器冷凝侧平均干度	$x_m$	$x_m = (x_i + x_o) / 2$
8	对数平均温差	$\Delta T_m$	$\Delta T_m = (T_{c,o} - T_{c,i}) / \ln[(T_s - T_{c,i}) / (T_s - T_{c,o})]$
9	有效对数平均温差	$\Delta T_{m,e}$	$\Delta T_{m,e} = F \times \Delta T_m$
10	总传热系数	$K$	$K = (Q_{con} + Q_c) / (2A \times \Delta T_{m,e})$

当待测换热器为不透性石墨列管式换热器时,换热面积  $A$  为按不透性石墨管外径计算所得的有效换热面积;当待测换热器为不透性石墨块孔式换热器时,换热面积  $A$  为不透性石墨块孔式换热器平均换热面积  $A_m$

9.2.3 液-汽蒸发测试工况下换热器总传热系数  $K$  按表 3 中的公式进行计算。

表 3 液-汽蒸发工况总传热系数  $K$  计算表

序号	名称	符号	计算公式
1	预热器冷凝液换热量	$Q_{con,pre}$	$Q_{con,pre} = q_{m,pre} \times h_{fg,s}$
2	待测换热器蒸发侧入口干度	$x_i$	$x_i = [Q_{con,pre} - q_{m,c} \times c_{p,c} \times (T_v - T_{pre,i})] / (q_{m,c} \times h_{fg,s})$
3	待测换热器冷凝液换热量	$Q_{con}$	$Q_{con} = q_{m,con} \times h_{fg,s}$
4	待测换热器蒸发侧出口干度	$x_o$	$x_o = x_i + Q_{con} / (q_{m,c} \times h_{fg,s})$
5	待测换热器蒸发侧平均干度	$x_m$	$x_m = (x_i + x_o) / 2$
6	有效对数平均温差	$\Delta T_{m,e}$	$\Delta T_{m,e} = T_s - T_v$
7	总传热系数	$K$	$K = Q_{con} / (A \times \Delta T_{m,e})$

当待测换热器为不透性石墨列管式换热器时,换热面积  $A$  为按不透性石墨管外径计算所得的有效换热面积;当待测换热器为不透性石墨块孔式换热器时,换热面积  $A$  为不透性石墨块孔式换热器平均换热面积  $A_m$

9.2.4 待测换热器冷侧流阻性能  $\Delta p_c$ 、热侧流阻性能  $\Delta p_h$  按表 4 中的公式进行计算。

表 4 待测换热器冷、热侧流阻性能计算表

序号	名称	符号	计算公式
1	冷侧连接管压力降	$\Delta p_{c,l}$	$\Delta p_{c,l} = \sum \zeta_c \times \rho_c u_c^2 / 2$
2	热侧连接管压力降	$\Delta p_{h,l}$	$\Delta p_{h,l} = \sum \zeta_h \times \rho_h u_h^2 / 2$
3	冷侧流阻性能	$\Delta p_c$	$\Delta p_c = \Delta p_{c,dp} - \Delta p_{c,l}$ 或 $\Delta p_c = p_{c,i} - p_{c,o} - \Delta p_{c,l}$
4	热侧流阻性能	$\Delta p_h$	$\Delta p_h = \Delta p_{h,dp} - \Delta p_{h,l}$ 或 $\Delta p_h = p_{h,i} - p_{h,o} - \Delta p_{h,l}$

### 9.3 不确定度计算

液-液无相变测试工况下总传热系数  $K$ 、冷侧流阻性能  $\Delta p_c$  以及热侧流阻性能  $\Delta p_h$  的不确定度计

算参照附录 A 执行。

#### 9.4 总传热系数和流阻性能测试曲线

9.4.1 对于液-液无相变测试工况,应给出下列测试曲线:

- a) 总传热系数  $K$  与冷流体流速  $u_c$ 、总传热系数  $K$  与热流体流速  $u_h$  的测试曲线;
- b) 冷侧流阻性能  $\Delta p_c$  与冷流体流速  $u_c$ 、热侧流阻性能  $\Delta p_h$  与热流体流速  $u_h$  的测试曲线。

9.4.2 对于汽-液冷凝测试工况,应给出下列测试曲线:

- a) 总传热系数  $K$  与蒸汽质量流量  $q_{m,s}$ 、总传热系数  $K$  与冷凝侧流体平均干度  $x_m$  的测试曲线;
- b) 冷凝侧压力降  $\Delta p_h$  与蒸汽质量流量  $q_{m,s}$ 、冷凝侧压力降  $\Delta p_h$  与冷凝侧流体平均干度  $x_m$  的测试曲线。

9.4.3 对于液-汽蒸发测试工况,应给出下列测试曲线:

- a) 总传热系数  $K$  与冷流体质量流量  $q_{m,c}$ 、总传热系数  $K$  与蒸发侧流体平均干度  $x_m$  的测试曲线,
- b) 蒸发侧压力降  $\Delta p_c$  与冷流体质量流量  $q_{m,c}$ 、蒸发侧压力降  $\Delta p_c$  与蒸发侧流体平均干度  $x_m$  的测试曲线。

#### 9.5 单侧传热性能和流阻性能准则关系式

9.5.1 对于液-液无相变测试工况,应给出下列准则关系式:

- a) 可参照附录 B 拟合出冷流体努塞尔数  $Nu_c$ 、雷诺数  $Re_c$  和普朗特数  $Pr_c$  间的准则关系式;热流体努塞尔数  $Nu_h$ 、雷诺数  $Re_h$  和普朗特数  $Pr_h$  间的准则关系式;
- b) 冷流体欧拉数  $Eu_c$  与雷诺数  $Re_c$  的准则关系式、热流体欧拉数  $Eu_h$  与雷诺数  $Re_h$  的准则关系式。

9.5.2 对于汽-液冷凝测试工况,应给出下列准则关系式:

- a) 冷凝侧传热系数  $h_c$ 、冷凝侧液相雷诺数  $Re_l$  和马丁利尼数  $X_{ll}$  间的准则关系式,
- b) 冷凝侧压力降  $\Delta p_h$ 、冷凝侧液相雷诺数  $Re_l$  和马丁利尼数  $X_{ll}$  间的准则关系式。

9.5.3 对于液-汽蒸发测试工况,应给出下列准则关系式:

- a) 蒸发侧传热系数  $h_v$ 、蒸发侧流体雷诺数  $Re$  和马丁利尼数  $X_{ll}$  间的准则关系式,
- b) 蒸发侧压力降  $\Delta p_c$ 、蒸发侧流体雷诺数  $Re$  和马丁利尼数  $X_{ll}$  间的准则关系式。

## 10 测试报告

测试报告应包括下列内容:

- a) 委托单位信息,
- b) 待测换热器制造单位信息,
- c) 测试单位信息,
- d) 测试项目和依据,
- e) 待测换热器结构参数与尺寸,
- f) 测量仪表信息,
- g) 测试结果,至少包括:测试流程图、测试数据表、计算结果表、总传热系数和流阻性能测试曲线、单侧传热系数和流阻性能拟合曲线。

附录 A

(资料性)

液-液无相变测试工况测量结果不确定度计算

A.1 测量模型及不确定度来源分析

A.1.1 测量模型

A.1.1.1 总传热系数  $K$  按公式(A.1)计算。

$$K = \frac{[q_{v,c}\rho_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) + q_{v,h}\rho_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})] \cdot \ln[(T_{h,i} - T_{c,o})/(T_{h,o} - T_{c,i})]}{2AF[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} \dots\dots\dots(A.1)$$

A.1.1.2 冷侧流阻性能  $\Delta p_c$  按公式(A.2)计算。

$$\Delta p_c = p_{c,i} - p_{c,o} - \sum \zeta_c \frac{\rho_c q_{v,c}^2}{2A_c} \dots\dots\dots(A.2)$$

式中：

$A_c$ ——待测换热器冷侧流道截面积,单位为平方米( $m^2$ )。

A.1.1.3 热侧流阻性能  $\Delta p_h$  按公式(A.3)计算。

$$\Delta p_h = p_{h,i} - p_{h,o} - \sum \zeta_h \frac{\rho_h q_{v,h}^2}{2A_h} \dots\dots\dots(A.3)$$

式中：

$A_h$ ——为待测换热器热侧流道截面积,单位为平方米( $m^2$ )。

A.1.2 不确定度来源分析

A.1.2.1 总传热系数  $K$  的不确定度来源包括实际测量参数  $q_{v,c}$ 、 $q_{v,h}$ 、 $T_{c,o}$ 、 $T_{c,i}$ 、 $T_{h,o}$  以及  $T_{h,i}$ ,非测量参数  $\rho_c$ 、 $\rho_h$ 、 $c_{p,c}$ 、 $c_{p,h}$ 、 $A$  及  $F$ 。

A.1.2.2 冷侧流阻性能  $\Delta p_c$  的不确定度来源包括实际测量参数  $p_{c,i}$ 、 $p_{c,o}$  及  $q_{v,c}$ ,非测量参数  $\zeta_c$  及  $A_c$ 。

A.1.2.3 热侧流阻性能  $\Delta p_h$  的不确定度来源包括实际测量参数  $p_{h,i}$ 、 $p_{h,o}$  及  $q_{v,h}$ ,非测量参数  $\zeta_h$  及  $A_h$ 。

注：本文件仅考虑实际测量参数导致的不确定度。

A.2 标准不确定度评定

A.2.1 不确定度每个分量的标准不确定度评定采用 GB/T 27418 中的 B类评定方法。

A.2.2 不确定度每个分量的 B类标准不确定度  $u_b$  可按公式(A.4)计算。

$$u_b = \frac{a}{k} \dots\dots\dots(A.4)$$

式中：

$u_b$  ——B类不确定度；

$a$  ——被测量值区间的半宽度；

$k$  ——为包含因子或置信因子。

A.2.3 区间半宽度  $a$  根据下列信息确定：

a) 当测量仪表校准证书中给出扩展不确定度  $U$  时,区间半宽度  $a$  等于  $U$ ；

b) 当测量仪表技术说明书中给出准确度等级时,区间半宽度  $a$  等于该准确度等级的最大允许误差。

A.2.4 包含因子或置信因子  $k$  可根据下列方法确定：

- a) 当区间半宽度  $a$  的取值等于  $U$  时,  $k$  为包含因子；
- b) 当对被测量可能值落在区间内的情况缺乏了解时, 假设被测量为均匀分布,  $k$  为置信因子, 取值为  $\sqrt{3}$ 。

A.3 合成标准不确定度计算

A.3.1 总传热系数  $K$  的合成标准不确定度按公式(A.5)计算。

$$u_c(K) = \sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial q_{v,c}}\right)^2 u^2(q_{v,c}) + \left(\frac{\partial K}{\partial q_{v,h}}\right)^2 u^2(q_{v,h}) + \left(\frac{\partial K}{\partial T_{c,i}}\right)^2 u^2(T_{c,i}) + \left(\frac{\partial K}{\partial T_{c,o}}\right)^2 u^2(T_{c,o}) + \left(\frac{\partial K}{\partial T_{h,i}}\right)^2 u^2(T_{h,i}) + \left(\frac{\partial K}{\partial T_{h,o}}\right)^2 u^2(T_{h,o})} \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial q_{v,c}} &= \frac{[\rho_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i})] \cdot \ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i})]}{2AF[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} \\ \frac{\partial K}{\partial q_{v,h}} &= \frac{[\rho_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})] \cdot \ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i})]}{2AF[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} \\ \frac{\partial K}{\partial T_{c,i}} &= -\frac{[q_{v,c}\rho_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) + q_{v,h}\rho_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})] \cdot \ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i})]}{2AF[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]^2} + \\ &\quad \frac{q_{v,c}\rho_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) + q_{v,h}\rho_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})}{2AF(T_{h,o} - T_{c,i})[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} - \frac{q_{v,c}\rho_c c_{p,c} \ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i})]}{2AF[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} \\ \frac{\partial K}{\partial T_{c,o}} &= \frac{[q_{v,c}\rho_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) + q_{v,h}\rho_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})] \cdot \ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i})]}{2AF[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]^2} - \\ &\quad \frac{q_{v,c}\rho_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) + q_{v,h}\rho_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})}{2AF(T_{h,i} - T_{c,o})[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} + \frac{q_{v,c}\rho_c c_{p,c} \ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i})]}{2AF[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} \\ \frac{\partial K}{\partial T_{h,i}} &= -\frac{[q_{v,c}\rho_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) + q_{v,h}\rho_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})] \cdot \ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i})]}{2AF[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]^2} + \\ &\quad \frac{q_{v,c}\rho_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) + q_{v,h}\rho_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})}{2AF(T_{h,i} - T_{c,o})[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} + \frac{q_{h,c}\rho_h c_{h,c} \ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i})]}{2AF[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} \\ \frac{\partial K}{\partial T_{h,o}} &= \frac{[q_{v,c}\rho_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) + q_{v,h}\rho_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})] \cdot \ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i})]}{2AF[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]^2} - \\ &\quad \frac{q_{v,c}\rho_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) + q_{v,h}\rho_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})}{2AF(T_{h,o} - T_{c,i})[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} - \frac{q_{h,c}\rho_h c_{h,c} \ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) / (T_{h,o} - T_{c,i})]}{2AF[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} \end{aligned}$$

A.3.2 冷侧流阻性能  $\Delta p_c$  的合成标准不确定度按公式(A.6)计算。

$$u_c(\Delta p_c) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta p_c}{\partial p_{c,i}}\right)^2 u^2(p_{c,i}) + \left(\frac{\partial \Delta p_c}{\partial p_{c,o}}\right)^2 u^2(p_{c,o}) + \left(\frac{\partial \Delta p_c}{\partial q_{v,c}}\right)^2 u^2(q_{v,c})} \dots\dots\dots (A.6)$$

式中：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta p_c}{\partial p_{c,i}} &= 1 \\ \frac{\partial \Delta p_c}{\partial p_{c,o}} &= -1 \\ \frac{\partial \Delta p_c}{\partial q_{v,c}} &= -\sum \zeta_c \frac{\rho_c q_{v,c}}{A_c} \end{aligned}$$

A.3.3 热侧流阻性能  $\Delta p_h$  的合成标准不确定度按公式(A.7)计算。

$$u_c(\Delta p_h) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta p_h}{\partial p_{h,i}}\right)^2 u^2(p_{h,i}) + \left(\frac{\partial \Delta p_h}{\partial p_{h,o}}\right)^2 u^2(p_{h,o}) + \left(\frac{\partial \Delta p_h}{\partial q_{v,h}}\right)^2 u^2(q_{v,h})} \dots\dots\dots (A.7)$$

式中：

$$\frac{\partial \Delta p_h}{\partial p_{h,i}} = 1$$

$$\frac{\partial \Delta p_h}{\partial p_{h,o}} = -1$$

$$\frac{\partial \Delta p_h}{\partial q_{v,h}} = - \sum \zeta_h \frac{\rho_h q_{v,h}}{A_h}$$

#### A.4 扩展不确定度计算

A.4.1 总传热系数  $K$  的扩展不确定度按公式(A.8)计算。

$$U(K) = k \cdot u_c(K) \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

A.4.2 冷侧流阻性能  $\Delta p_c$  的扩展不确定度按公式(A.9)计算。

$$U(\Delta p_c) = k \cdot u_c(\Delta p_c) \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

A.4.3 热侧流阻性能  $\Delta p_h$  的扩展不确定度按公式(A.10)计算。

$$U(\Delta p_h) = k \cdot u_c(\Delta p_h) \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

A.4.4 包含因子  $k$  的值一般为 2 或 3,当  $k=2$  时,由扩展不确定度所确定的区间具有的包含概率约为 95%,当  $k=3$  时,由扩展不确定度所确定的区间具有的包含概率约为 99%。



## 附录 B

(资料性)

## 液-液无相变测试工况传热准则关系式拟合

B.1 设定待测换热器热流体流速  $u_h$  不变,调整待测换热器冷流体流速  $u_c$ 。

B.1.1 不透性石墨换热器传热过程总热阻按公式(B.1)计算。

$$\frac{1}{K} = R_c + R_w + R_h \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

$R_c$  ——冷侧热阻,无因次量;

$R_w$  ——壁面热阻,无因次量,按公式(B.2)计算;

$R_h$  ——热侧热阻,无因次量。

$$R_w = \frac{b}{\lambda_w} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

$b$  ——不透性石墨管壁厚或不透性石墨块孔式换热器当量壁厚,单位为米(m);

$\lambda_w$  ——不透性石墨材料导热系数,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)]。

B.1.2 总传热系数按公式(B.3)计算。

$$K = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{m,e}} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

B.1.3 固定热流体流速不变,热侧热阻与壁面热阻之和按公式(B.4)计算。

$$R_h + R_w = C \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

$C$  ——待定常数。

B.1.4 冷侧热阻按公式(B.5)计算。

$$R_c = \frac{1}{C_c \cdot Re_c^{n_c} \cdot Pr_c^{0.4} \cdot \lambda_c / d_c} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

$C_c$  ——待定常数;

$n_c$  ——待定常数;

$d_c$  ——冷侧流道当量直径,单位为米(m)。

B.1.5 公式(B.3)、公式(B.4)、公式(B.5)代入公式(B.1)得到公式(B.6)。

$$\frac{A \cdot \Delta T_{m,e}}{Q} = C + \frac{1}{C_c Pr_c^{0.4} \lambda_c / d_c} \cdot \frac{1}{Re_c^{n_c}} \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

B.1.6 令  $Y = A \cdot \Delta T_{m,e} / Q$ ,  $X = 1 / Re_c^{n_c}$ ,公式(B.6)变为公式(B.7)。

$$Y = C + \left( \frac{1}{C_c Pr_c^{0.4} \lambda_c / d_c} \right) \cdot X \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

B.1.7 固定热流体流速  $u_h$  不变,调整冷流体流速  $u_c$ ,可得到一系列数据点:  $(X_1, Y_1)$ 、 $(X_2, Y_2)$  ……  $(X_n, Y_n)$ ,通过线性拟合求出待定系数  $C$  和  $C_c$ 。

B.1.8 待定常数  $n_c$  通过迭代法试算求得。

B.1.9 冷侧传热准则关联式按公式(B.8)计算。

$$Nu_c = C_c \cdot Re_c^{n_c} \cdot Pr_c^{0.4} \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

**B.2 等幅度调整待测换热器热流体流速  $u_h$ 、冷流体流速  $u_c$**

**B.2.1** 热侧热阻按公式(B.9)计算。

$$R_h = \frac{1}{K} - R_c - R_w \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

**B.2.2** 热侧热阻还可按公式(B.10)计算。

$$R_h = \frac{1}{C_h \cdot Re_h^{n_h} \cdot Pr_h^{0.3} \cdot \lambda_h / d_h} \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

式中：

$C_h$  —— 待定常数；

$n_h$  —— 待定常数；

$d_h$  —— 热流道当量直径，单位为米(m)。

**B.2.3** 公式(B.10)代入公式(B.9)得公式(B.11)。

$$\frac{1}{(1/K - 1/h_c - R_w)(Pr_h^{0.3} \cdot \lambda_h / d_h)} = C_h \cdot Re_h^{n_h} \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

**B.2.4** 公式(B.11)两边取对数得公式(B.12)。

$$\ln \frac{1}{(1/K - 1/h_c - R_w)(Pr_h^{0.3} \cdot \lambda_h / d_h)} = \ln(C_h) + n_h \cdot \ln(Re_h) \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

**B.2.5** 令  $U = \ln \frac{1}{(1/K - 1/h_c - R_w)(Pr_h^{0.3} \cdot \lambda_h / d_h)}$ ,  $V = \ln(Re_h)$ , 公式(B.12)变为公式(B.13)。

$$U = \ln(C_h) + n_h \cdot V \quad \dots\dots\dots (B.13)$$

**B.2.6** 等幅度调整热流体流速  $u_h$ 、冷流体流速  $u_c$ , 得到一系列数据点:  $(V_1, U_1)$ 、 $(V_2, U_2)$  …  $(V_n, U_n)$ , 通过线性拟合求出待定系数  $C_h$  和  $n_h$ 。

**B.2.7** 热侧传热准则关联式按公式(B.14)计算。

$$Nu_h = C_h \cdot Re_h^{n_h} \cdot Pr_h^{0.3} \quad \dots\dots\dots (B.14)$$





参 考 文 献

- [1] GB/T 7724 电子称重仪表
-