|  |  |
| --- | --- |
| ICS | 77.160 |
| CCS | H 16 |

|  |
| --- |
| YS |

中华人民共和国有色金属行业标准

YS/T XXXXX—XXXX

铜及铜合金管传热系数及阻力特性试验方法

Experimental method for the thermal-hydraulic performance of copper and copper alloys tube

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

中华人民共和国工业和信息化部  发布

1. 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。

本文件由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）提出并归口。

本标准起草单位：

本标准主要起草人：

**铜及铜合金管传热系数及阻力特性试验方法**

**1范围**

本文件规定了铜及铜合金管材的传热系数和阻力特性试验方法，包括试验系统、试验样品、试验条件、试验步骤、试验数据处理、试验结果和试验报告等。

本文件适用于热交换器用铜及铜合金光面管、内螺纹铜管和翅片管的传热系数和阻力特性的试验。

**2规范性引用文件**

本文件没有规范性引用文件。

**3术语和定义**

下列术语和定义适用于本文件。

**3.1**

**换热量 heat transfer**

一定长度被测管的管内外存在温差时，单位时间内由导热、对流方式通过该管所传递的热量。

**3.2**

**压降 pressure drop**

流体在被测管中流动时，由于能量损失而引起的[压力](https://baike.baidu.com/item/%E5%8E%8B%E5%8A%9B)降低。

**3.3**

**热流密度 heat flux**

垂直于热流方向的单位面积热流量。

**3.4**

**传热系数 heat transfer coefficient**

稳定状态下的热流密度除以被测物体两侧环境的温度差。

**4 试验原理和试验装置**

**4.1试验原理**

**4.1.1**蒸汽压缩式制冷

压缩机系统为逆卡诺循环，即利用制冷剂在制冷循环中物态的周期性变化来实现的。制冷剂在蒸发管里由低压液体气化变为气体，吸收蒸发水箱的热量。变成气态的制冷剂被压缩机吸入，靠压缩机做功把它压缩成高温高压的气体，再排入冷凝管。在冷凝管中制冷剂不断向冷凝水箱放热，逐步凝结成液体。这些高压液体流经节流装置降压缓慢流入蒸发管，维持在蒸发管里继续不断地气化吸热。压缩机系统利用电能做功，借助制冷剂的物态变化，把蒸发管的热量“搬送”到冷凝管里放出，如此周而复始不断地循环，以达到制冷目的。内螺纹单管采用蒸汽压缩式制冷试验系统。

**4.1.2** 池沸腾传热

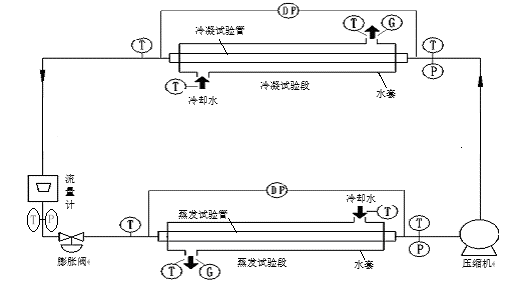
池沸腾传热试验是在热平衡允许的范围内，流经翅片管内的流体换热量等于翅片管外的换热量。通过测量流经翅片管内的液体流量与进出口温度，计算得到流体换热量，即得出翅片管对外的传热量。与此同时，保持特定的饱和温度不变，测得翅片管外制冷剂的饱和温度，就可以计算出对数温差，于是求得总传热系数；当流体流经翅片管内时，需要克服阻力，造成流体的压力损失，不同型号的翅片管内阻力不同，通过测量载冷剂流过待测试管的进出口压力降可获得测试工况下的流体流动阻力特性。翅片管的试验采用池沸腾传热试验系统。

**4.2试验装置**

4.2.1蒸汽压缩式制冷试验装置

内螺纹单管采用蒸汽压缩式制冷试验装置 ，包含压缩机、冷凝器、膨胀阀、蒸发器，用管道将它们连接成一个密封系统。试验部分由套管式换热器构成，待测试管为其内管。内管管内为制冷剂，外套管内为水介质，两者逆向流动。通过测量水侧和制冷剂侧进出口相关参数（流量、温度、压力等）。可确定试验段部分总的传热系数，通过热阻分析，可获得测试条件下，待测试管管内表面传热系数。试验 装置见图1所示。

通过测量制冷剂流过待测试管的进出口压力降可获得测试条件下的流体流动阻力特性。



说明：

1. --温度；
2. --压力；

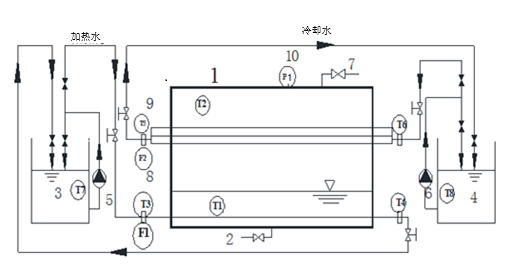
DP---压力；

G ---流量。

图1 蒸汽压缩式制冷试验装置系统示意图

**4.2.2** 池沸腾传热试验装置

翅片管采用池沸腾传热试验装置，试验装置系统由试验腔体、被测翅片管、热源系统、冷源系统、测量仪器仪表、信号采集系统等组成，见图2所示。



标引序号说明：

1. ----测试腔体；
2. ----排液阀；
3. ----恒温热水箱；
4. ----恒温冷却水箱；
5. ----热水循环泵；
6. ----冷却水循环泵；
7. ----充注制冷剂入口；
8. ----流量计；
9. ----温度计；
10. ----压力表；

T1-----制冷剂液相温度计；

T2-----制冷剂气相温度计；

T3-----蒸发管进口温度计；

T4-----蒸发管出口温度计；

T5-----冷凝管出口温度计；

T6-----冷凝管进口温度计；

T7-----热水箱温度计；

T8-----冷却水温度计；

F1-----蒸发管流量计；

F2-----冷凝管流量计；

P1-----压力表。

图2 池沸腾传热试验装置系统示意图

**4.3试剂**

**4. 3.1**载冷剂和制冷剂，常用制冷剂有R22，R32，R134a，R123，R410a和R407C等；常用载冷剂有纯净水和乙二醇溶液。

**4. 3.2**本文件推荐内螺纹管采用R22制冷剂，翅片管采用R134a 制冷剂。

**4.4 测量仪表**

4.4.1测量仪表及准确度

测量仪表及准确度等级应符合表1规定。

表1 测量仪表及准确度等级

|  |  |
| --- | --- |
| 测量仪表 | 准确度等级（或分辨率） |
| 温度计 | ±0.1℃ |
| 流量计 | ±0.5% |
| 制冷剂压力计 | ±0.04% |
| 被测管差压计 | ±0.065% |
| 注：表中所列仪表是最低限度的要求，并不限制使用其他同等或更髙准确度等级(或精度)的测量仪表。 | |

**4.4.2 测量仪表的**安装

**4.4.2.1流量测量**计

流量测量计的安装如下：

a ) 制冷剂流量计和水流量计应按其使用说明书的规定进行安装，如果流量是波动的，应采用积分式流量计；

b )测定制冷剂流量时如果使用体积流量计，制冷剂应充分过冷， 防止产生任何散发气体而导致测量的不准确。因此， 流量计的前后均应安装一个视镜；

c )推荐采用液体流量计测量。

**4.4.2.2温度测量**计

温度测量计的安装如下：

a )测量元件的感温点应位于管道中心， 其保护管的插入温度应满足温度计使用说明书的规定；

b )测温元件应设置在被测管入口和出口处，膨胀阀前，且流量计后， 测温点的上游（ 进口）、下 游（ 出口）各600 mm 范围内应保温；

c )管路中液体流动出现层流时，温度测量探头安装处的上游应安装混合装置。

**4.4.2.3压力测量和差压**计

压力测量和差压计的安装如下：

a ) 测压孔应与管内壁面垂直；

b )压力测量处至测试管之间不应有任何扰动件。

4.4.3 仪表检定

流量、温度、压力测量仪表，均应按有关规定送法定计量部门检定，并在有效期内使用。

**5 样品**

待测试管应符合如下要求：

a ) 待测试管表面和管内部应洁净，不应有针孔、裂纹、起皮、气泡、夹杂物、绿锈和粗拉道等；

b ) 待测试管不应有变形、划伤、凹坑、压痕和斑点等缺陷；

c ) 允许待测试管有轻微的矫直和车削痕迹、环状痕迹、细划纹、氧化色、发暗、水迹等存在；

d ) 待测试管端部应锯切平整，允许有轻微的毛刺。

e ) 待测试管应标明规格、基本参数、检验项目、送检日期及送检人、制造日期和制造商名称等信息。

**6 测试条件及试验步骤**

**6.1内螺纹管**

6.1.1测量套管换热器内径，单位为米。

6.1.2测量待测试管外径D和长度L，单位为米，计算测试铜管的外表面积，计算公式为：A外=πDＬ。

6.1.3将待测试管安装在指定位置，冷凝管在压缩机出口和膨胀阀进口处；蒸发管在膨胀阀出口和压缩机进口处。

6.1.4待测试管安装为水平状态。

6.1.5载冷剂和制冷剂管路系统及试件（管）全长范围内均应保温。

6.1.6待测试管为制冷剂循环，外套管内为载冷剂循环，使两者逆向流动。

6.1.7每个流量点至少采集5组数据。

6.1.8试验参数及试验条件见表2。

6.1.9试验条件各参数的读数允许差应符合表3的规定。

表2 内螺纹管的试验参数及试验条件

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 类别 | | 试验参数 | 单位 | 试验条件 |
| 蒸发测试 | 制冷剂侧 | 入口干度 | — | 0.15～0.25 |
| 出口压力对应的饱和温度 | ℃ | 6 |
| 出口过热度 | ℃ | 8 |
| 被测段差压 | kPa | 0～100 |
| 制冷剂质量流速 | kg/m2·s | 50～600 |
| 冷凝测试 | 制冷剂侧 | 入口过热度 | ℃ | 20 |
| 入口压力对应的饱和温度 | ℃ | 45 |
| 出口过冷度 | ℃ | 5 |
| 被测段差压 | kPa | 0～100 |
| 制冷剂质量流速 | kg/m2·s | 50～600 |

表3 内螺纹管的试验参数的读数允许差

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 试验参数 | 单位 | 蒸发测试 | 冷凝测试 |
| 载冷剂进口温度 | ℃ | ±0.1 | ±0.1 |
| 载冷剂出口温度 | ℃ | ±0.1 | ±0.1 |
| 载冷剂流量 | % | ±0.5 | ±0.5 |
| 制冷剂入口温度 | ℃ | — | ±0.1 |
| 制冷剂出口温度 | ℃ | ±0.1 | ±0.1 |
| 蒸发压力 | kPa | ±10 | — |
| 冷凝压力 | kPa | — | ±10 |
| 入口干度 | — | ±0.005 | — |
| 制冷剂流量 | % | ±0.5 | ±0.5 |
| 被测段差压 | % | ±0.065 | ±0.065 |

**6.2外翅片管**

6.2.1待测试管的安装按如下进行：

a )待测试管应保证水平放置，待测蒸发试管应完全浸入制冷剂液面20mm以下，不应裸露。待测试冷凝管应保证在液面20mm以上，在试验过程中，不应有制冷剂飞溅到冷凝管上。

b )保证试验腔体密封，先对试验腔体抽真空处理，真空度小于1000Pa，然后再充注试验所需制冷剂液体，使试验腔和管路设备在完全充满制冷剂液体和蒸汽的条件下运行，不应混有不凝气体。

6.2.2应等待系统稳定以后方可记录试验的每个数据。每组数据记录应不低于5个，求其平均值。

6.2.3 试验参数及试验条件见表4。

6.2.4试验条件各参数的读数允许差应符合表5的规定。

表4 外翅片管的试验参数及试验条件

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 类别 | 试验参数 | 单位 | 试验条件 |
| 蒸发管测试 | 制冷剂饱和温度 | ℃ | 5-7 |
| 热流密度 | kW/m2 | 10-40 |
| 载冷剂侧流速 | m/s | 1～3.5 |
| 压降 | kPa | -- |
| 冷凝管测试 | 制冷剂饱和温度 | ℃ | 35-40 |
| 热流密度 | kW/m2 | 10-40 |
| 载冷剂侧流速 | m/s | 1～3.5 |
| 压降 | kPa | -- |

表5 外翅片管的试验参数的读数允许差

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 试验参数 | 单位 | 蒸发测试 | 冷凝测试 |
| 出口水温 | ℃ | ±0.1 | ±0.1 |
| 载冷剂流速 | m/s | — | — |
| 制冷剂温度 | ℃ | ±0.1 | ±0.1 |
| 被测段差压 | % | ±0.065 | ±0.065 |

**7 试验数据处理**

7.1内螺纹管试验数据计算公式

7.1.1总传热系数的计算：

----------------(1)

式中：

*k*－测试管的总传热系数，单位为瓦每平方米开尔文(W/(㎡·K));

*A*－测试管外表面积，单位平方米（m2）;

∆t－对数平均温差，单位为开尔文(K);

－总换热量，单位为瓦(W); 当热平衡误差在5%以内时， ，

,其中cp为水的定压比热，当水温在0～230℃时，

cp=4.179×103+7.9×10-5×（t-10）2.9，单位是焦耳每千克开尔文[J/(kg·K)]；

Mw为水的流量，单位为千克每小时（kg/h）；

tin为进口水温，单位为摄氏度（℃）；

tout为出口水温，单位为摄氏度（℃）。

，其中，mr为冷媒的流量, 单位为千克每小时（kg/h），∆h为冷媒的进出口焓差,单位为千焦每千克（kJ/kg）。

注：可从NIST物性表查询。

7.1.2载冷剂侧传热系数的计算：

----------------(2)

式中:

*h*w－载冷剂侧的传热系数，单位为瓦每平方米开尔文(W/(㎡·K));

*d*－当量直径，单位为米(m)；

*λ*w－某温度下载冷剂的导热系数，单位为瓦每米开尔文(W/(m·K))；

Re－雷诺数，无纲量数；

Pr－普朗特数，无纲量数；

n－冷凝时n=0.4,蒸发时n=0.3，试验时需保证Re≥10000。

注：Re、Pr可从《传热学》（第五版，北京：高等教育出版社，2019.7，作者：陶文铨）查询。

7.1.3管内表面传热系数的计算：

-----------(3)

式中：

h－测试管的管内表面传热系数，单位为瓦每平方米开尔文(W/(㎡·K));

*k*－测试管的总传热系数，单位为瓦每平方米开尔文(W/(㎡·K));

λcu－铜的导热系数，单位为瓦每米开尔文(W/(m·K))；

d0－测试管的外径，单位为米 (m);

d1－换热器内径，单位为米(m);

7.1.4制冷剂单位长度压降计算：

---------------(4)

式中：

∆Pl－被测管单位长度压降，单位为千帕每米（kPa/m）；

∆P－被测管总压降，单位为，单位为千帕（kPa）。

L－被测管管长，单位为米(m)。

7.1.5制冷剂质量流速计算：

---------------(5)

式中：

Gr－制冷剂质量流速，单位为千克每平方米小时（kg/m2·s）；

Mr－制冷剂质量流量，单位为千克每小时（Kg/h）；

d－测试管的外径，单位为米 (m)；

M－米克重，单位为克每米（g/m）；

－测试管的密度，单位为克每立方厘米(g/cm³)；

**7.2 翅片管**试验数据计算公式

翅片管试验数据计算公式见表6，计算公式中的符号和单位见表7。

表6 翅片管测定数据的计算公式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 试验参数 | 计算公式 |
| 1 | 管内流速（v） | v=G/Ai |
| 2 | 换热量（Q） | Q=CP · G •ρ ( tin - tout ) |
| 3 | 热平衡误差（ΔQ） | ΔQ = ( Qe- QC ) / Qe× 100% |
| 4 | 对数平均温差（ΔTm） | ΔTm = ( tin - tout ) / ln [( ts– tout) / ( ts- tin )] |
| 5 | 热流密度（q） | q = Q / A |
| 6 | 总传热系数（k） | k = Qe / ( A •Δtm ) |
| 7 | 摩擦阻力系数（f） | f = - (ΔPdi ) / (L •ρv2 / 2) |

表7 计算公式中的符号和单位

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 符号 | 物理量 | 单位 |
| 1 | v | 管内流速 | 米每秒（m/s） |
| 2 | G | 体积流量 | 立方米每秒（m3**/**s） |
| 3 | Ai | 坯管内孔横截面积 | 平方米（m2） |
| 4 | Q | 换热量 | 瓦（W） |
| 5 | CP | 定压比热 | 焦每千克开尔（J/(kg·K） |
| 6 | ρ | 密度 | 千克每立方米（kg/m3） |
| 7 | tin | 测试管进口温度 | 摄氏度（℃） |
| 8 | tout | 测试管出口温度 | 摄氏度（℃） |
| 9 | ΔQ | 热平衡偏差 | 无量纲 |
| 10 | Qe | 蒸发换热量 | 瓦（W） |
| 11 | Qc | 冷凝换热量 | 瓦（W） |
| 12 | ΔTm | 对数平均温差 | 摄氏度（℃） |
| 13 | ts | 制冷剂饱和温度 | 摄氏度（℃） |
| 14 | q | 热流密度 | 瓦每平方米（W/m2） |
| 15 | A | 测试管未加工翅片前坯管表面积 | 平方米（m2） |
| 16 | k | 总传热系数 | 瓦每平方米开尔文W/( m2·K) |
| 17 | f | 摩擦阻力系数 | - |
| 18 | ΔP | 水侧压降 | Pa |
| 19 | di | 传热管内径 | m |
| 20 | L | 测试传热管强化段长度 | m |

**8 测试结果**

**8.1内螺纹管**

8.1.1绘出管内表面传热系数h与制冷剂质量流速Gr之间的关系曲线。

8.1.2绘出制冷剂单位长度压降ΔP/m与制冷剂质量流速Gr的关系曲线。

**8.2外翅片管**

8.2.1热工性能

确定被测管在特定饱和温度下总传热系数k与流速v之间的关系。

8.2.2流动阻力特性

a)确定被测管压力差Δp与管内流速v之间的关系。

b)可根据a)推算出被测管内流动摩擦阻力系数f与雷诺数Re的关系式。建议整理成f=CfRe-n的形式。

**9试验报告**

检测报告应包括以下内容：

a)委托单位名称、地址；

b)样品规格和制冷剂种类；

c)检测依据、检测设备、检测项目、检测时间、测试工况，以及报告日期；

d)检测结果：管内表面传热系数和压降曲线、测试数据的处理和计算方法；

e)结论及分析；

f)检测人、审核人、批准人签名；

g)检测单位名称。

**参考文献**

1. 陶文铨.传热学(第五版).北京：高等教育出版社，2019.7
2. NIST物性表

