



中华人民共和国国家标准

GB/T 38588—2020

城镇供热保温管网系统散热损失 现场检测方法

In-situ measurements of heat loss of insulating pipes for urban heat-supplying

2020-03-31 发布

2021-02-01 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	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和符号	1
3.1 术语和定义	1
3.2 符号	2
4 测试方法	4
4.1 热流计法	4
4.2 表面温度法	4
4.3 温差法	6
4.4 热平衡法	7
5 测试分级和使用条件	8
5.1 测试分级和选用	8
5.2 测试仪器和仪表	8
6 测试要求	9
6.1 测试准备	9
6.2 测试截面和测点布置	9
6.3 测试环境条件	10
6.4 测试步骤	11
7 数据处理	11
7.1 数据整理	11
7.2 散热损失计算	11
8 测试误差	13
8.1 误差分析	13
8.2 误差范围	13
9 测试报告	13
附录 A (规范性附录) 热流密度修正	14
附录 B (规范性附录) 表面温度法总传热系数计算	16
附录 C (规范性附录) 保温管道沿线调查表	19
附录 D (规范性附录) 保温管道保温结构散热损失测试数据记录表	21

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中华人民共和国住房和城乡建设部提出。

本标准由全国城镇供热标准化技术委员会(SAC/TC 455)归口。

本标准起草单位：昊天节能装备有限责任公司、北京市建设工程质量第四检测所、北京市煤气热力工程设计院有限公司、河北昊天热力发展有限公司、长春市热力(集团)有限责任公司、河北华热工程设计有限公司、哈尔滨工业大学、北京豪特耐管道设备有限公司、四川鑫中泰新材料有限公司、唐山兴邦管道工程设备有限公司、哈尔滨朗格斯特节能科技有限公司、天津天地龙管业股份有限公司、河南三杰热电科技股份有限公司、河北君业科技股份有限公司、大连科华热力管道有限公司、江丰管道集团有限公司、万华化学(烟台)销售有限公司、陶氏化学(中国)投资有限公司、上海亨斯迈聚氨酯有限公司、河北峰诚管道有限公司、天华化工机械及自动化研究设计院有限公司、廊坊华宇天创能源设备有限公司、河北益瑞检测科技有限公司、河北昊天能源投资集团有限公司、中国市政工程华北设计研究总院有限公司、北京昊天华清市政工程设计有限公司。

本标准主要起草人：郑中胜、张国玉、郎魁元、白冬军、贾震、张建兴、李民、张骐、王芄、贾丽华、李想、邱华伟、赖贞澄、刘秀清、陈朋、杨智丽、杨秋、张松林、庞德政、孙涛、钟华亮、赵相宾、贾宏庆、段文宇、邱晓霞、王振海、杨良仲、王莹、冯文亮、张志明。

城镇供热保温管网系统散热损失 现场检测方法

1 范围

本标准规定了城镇供热保温管网系统散热损失现场检测方法的术语、定义和符号,测试方法,测试分级和使用条件,测试要求,数据处理,测试误差及测试报告。

本标准适用于热水介质温度小于或等于 150 °C、蒸汽介质温度小于或等于 350 °C 的城镇供热保温管道、管道接口及其附件(以下简称管道)散热损失的现场检测。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 10295 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法

GB/T 17357 设备及管道绝热层表面热损失现场测定 热流计法和表面温度法

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

稳定传热 steady heat transfer

保温管道绝热结构层内,各点径向温度不随时间而改变的传热过程。

3.1.2

热流计法 heat flow meter apparatus method

采用热阻式热流传感器(热流测头)和测量指示仪表,直接测量保温管道保温结构径向传热的热流密度测试方法。

3.1.3

表面温度法 surface temperature method

通过测定保温结构外表面温度、环境温度、风向和风速、表面热发射率及保温结构外形尺寸,计算出其径向传热的热流密度测试方法。

3.1.4

温差法 temperature difference method

通过测定保温结构各层材料厚度、各层分界面上的温度、以及各层材料在使用温度下的导热系数,计算出保温结构径向传热的热流密度测试方法。

3.1.5

热平衡法 heat balance method

在管网系统稳定运行工况下,现场测定被测管道的介质流量、管道起点和终点的介质温度和(或)压力,根据焓差法或能量平衡原理,计算该管道的全程散热损失值的方法。

3.1.6

传感器亚稳态 pseudo steady state of transducer

在两个连续的 5 min 周期内,热流传感器的读数平均值相差不大于 2%和同一测点温度传感器读数平均值相差不大于 0.2 °C时的传热状态。

3.1.7

热流密度 heat flux

单位时间内,通过物体单位横截面积上的热量。

3.1.8

保温结构 insulation construction

保温层和保护层的总称。

3.1.9

地温 ground temperature

距被测保温结构敷设现场大于或等于 10 m,且与被测保温结构相同埋深处的土壤自然温度。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

- a_1 —— 温度因子, K^3 ;
- C_A —— 水平管道外表面总传热系数近似值计算系数;
- C_B —— 垂直管道外表面总传热系数近似值计算系数;
- C_r —— 材料表面辐射系数, $W/(m^2 \cdot K^4)$;
- c —— 测头系数, $W/(m^2 \cdot mV)$;
- c_1, c_2 —— 被测管道进出口热水比热容, $kJ/(kg \cdot K)$;
- D —— 保温结构外径, m;
- D_e —— 保温管道外护管直径, m;
- d —— 保温层内径(工作管外径), m;
- d_i —— 第 i 层保温材料外径, m;
- d_{i-1} —— 第 i 层保温材料内径, m;
- E —— 热流传感器的输出电压, mV;
- f —— 热发射率修正系数;
- G_{q1}, G_{q2} —— 被测管道进、出口处测得的蒸汽质量流量, kg/h;
- G_q —— 蒸汽质量流量, kg/h;
- G_s —— 热水质量流量, kg/h;
- H_E —— 直埋敷设管道中心至地表面深度, m;
- H_e —— 垂直管道高度, m;
- h_1, h_2 —— 被测管道进、出口蒸汽比焓, kJ/kg;
- j —— 直管道测试截面个数;
- k —— 将测试条件折算为年或供热周期平均环境温度条件的折算系数;
- k_1 —— 被测接口处的折算系数;
- k_i —— 第 i 个直管道测试截面处的折算系数;
- L —— 被测管道长度, m;
- l —— 一个接口处保温结构长度, m;
- m —— 接口数量;
- n —— 保温材料层数;
- Q —— 管道的全程散热损失, W;

Q_b	——年或供热周期平均环境温度条件下被测管道的总散热损失, W;
$Q_{b,i}$	——年或供热周期平均环境温度条件下第 i 管道的散热损失, W;
Q_m	——年或供热周期平均环境温度条件下管网系统的总散热损失, W;
$Q_{r,1}$	——年或供热周期平均环境温度条件下全管道接口处的总散热损失, W;
$Q_{r,2}$	——年或供热周期平均环境温度条件下被测管道上阀门和管路附件的散热损失, W;
$Q_{r,3}$	——年或供热周期平均环境温度条件下被测管道保温结构破损处的散热损失, W;
q	——热流密度, W/m^2 ;
q_1	——被测接口处的热流密度, W/m^2 ;
q_{bm}	——用表面温度法测试数据计算出的管道热流密度, W/m^2 ;
q_{wc}	——用温差法测试数据计算出的管道热流密度, W/m^2 ;
q_i	——第 i 个直管道测试截面处的平均热流密度, W/m^2 ;
q_l	——单位长度线热流密度, W/m ;
\bar{q}_l	——年或供热周期平均环境温度条件下的被测管道直管道的平均线热流密度, W/m ;
q_t	——实际热流密度, W/m^2 ;
q_s	——经外部因素修正后的热流密度, W/m^2 ;
q'	——仪表显示的热流密度, W/m^2 ;
R_E	——直埋敷设管道周围土壤热阻, $(m \cdot K)/W$;
R_l	——管道保温结构综合热阻, $(m \cdot K)/W$;
s	——热流传感器产品检定证书给定的与标定温度偏离时的修正系数;
T_{av}	——保温结构外表面绝对温度与环境绝对温度的平均温度, K;
T_F	——环境或相邻辐射表面的表面绝对温度, K;
T_w	——保温结构外表面绝对温度, K;
t	——工作管中的介质温度, K;
t_m	——当地年或供热周期平均环境温度(空气温度或地温), K;
t'_m	——测试时的环境温度(空气温度或地温), K;
t_0	——当地年或供热周期平均环境温度对应的平均介质温度, K;
t'_0	——测试时的介质温度, K;
t_1, t_2	——被测管道进出口热水温度, K;
t_{SE}	——直埋敷设管道处上方的地表温度, K;
t_F	——环境温度, K;
t_w	——保温结构外表面温度, K;
v	——风速, m/s ;
α	——传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;
α_c	——对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;
α_r	——辐射传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;
ϵ	——保温结构外表面材料的热发射率;
λ	——保温材料在使用温度下的导热系数, $W/(m \cdot K)$;
λ_E	——实测土壤导热系数, $W/(m \cdot K)$;
λ_i	——第 i 层保温材料在使用温度下的导热系数, $W/(m \cdot K)$;
σ	——斯蒂芬·玻尔兹曼常数 $W/(m^2 \cdot K^4)$;
Δt	——保温结构外表面温度与环境空气温度的温差, K。

4 测试方法

4.1 热流计法

4.1.1 热流计法适用于地上、管沟和直埋敷设保温管道的测试或保温结构内外表面存在一定温差、环境条件变化对测试结果产生的影响小,且保温结构散热较为均匀的代表性管道上进行的测试。

4.1.2 热流计法保温管道散热的热流密度应按式(1)计算:

$$q = c \times E \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- q ——热流密度,单位为瓦每平方米(W/m^2);
- c ——测头系数,单位为瓦每平方米毫伏 [$W/(m^2 \cdot mV)$];
- E ——热流传感器的输出电压,单位为毫伏(mV)。

4.1.3 测头系数应按 GB/T 10295 的方法,经标定后给出。可绘制出测头系数与被测表面温度(可视为热流传感器的温度)的标定曲线,该曲线应表示出工作温度和热流密度的范围。

4.1.4 当热流传感器贴敷部位的温度大于或小于传感器标定的温度时,应按热流传感器产品检定证书给定的与标定温度偏离时的修正系数,按式(2)对仪表显示的热流密度进行修正。

$$q_t = s \times q' \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

- q_t ——经修正后的热流密度,单位为瓦每平方米(W/m^2);
- s ——热流传感器产品检定证书给定的与标定温度偏离时的修正系数;
- q' ——仪表显示的热流密度,单位为瓦每平方米(W/m^2)。

4.1.5 热流传感器的贴敷应符合下列规定:

- a) 热流传感器应与热流方向垂直,且热流传感器表面应处于等温面中。
- b) 热流传感器宜预设置在保温结构的内部,当不具备内部设置条件时,可贴敷在保温结构的外表面,并应符合下列规定:
 - 1) 热流传感器与被测表面的接触不应有间隙和气泡,贴敷表面应平整。
 - 2) 贴敷前应清除贴敷表面的尘土、水、油渍等污物。贴敷面应涂敷适量减小附着热阻的黄油、硅脂、导热脂、导热环氧树脂等热接触材料,并可使用压敏胶带或弹性圈等材料将热流传感器压紧。
 - 3) 在地上或管沟敷设的保温管道外表面贴敷时,热流传感器表面的热发射率(表面黑度)应与被测保温管道表面的热发射率一致,当不一致时,可在传感器表面涂敷或贴敷与被测表面的热发射率相近的涂料或薄膜进行处理,当不能处理时,则应按附录 A 的规定对热流计显示的热流密度进行修正。
- c) 直埋保温管道热流密度测试时,宜将热流传感器设置在保温结构的外护管内。当地下水位较高,且在保温结构外表面贴敷热流传感器时,应对热流传感器及其接线处采取防水措施,热接触面间不应有水渗入。

4.1.6 热流传感器输出电压的测量指示仪表或计算机输入转换模块的准确度应与热流传感器的准确度相匹配。当测定的热流密度因环境影响而波动时,宜使用累积式仪表。

4.1.7 测试现场地上环境温度、湿度的测点距热流密度测定位置应大于 1 m,且不应受其他热源的影响。测试现场地温的测点距热流密度测定位置应大于 10 m,且应在相同埋深的自然土壤中。

4.1.8 数据测定应在达到亚稳态条件时读取。

4.1.9 测试方法的其他要求应按 GB/T 17357 的规定执行。

4.2 表面温度法

4.2.1 表面温度法适用于地上、管沟敷设的供热管网系统的测试。

4.2.2 表面温度法保温管道散热的热流密度应按式(3)计算:

$$q_{\text{bm}} = \alpha(t_{\text{w}} - t_{\text{F}}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

q_{bm} ——用表面温度法测试数据计算出的管道热流密度,单位为瓦每平方米(W/m^2);

α ——总传热系数,单位为瓦每平方米开 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$;

t_{w} ——保温结构外表面温度,单位为开(K);

t_{F} ——环境温度,单位为开(K)。

4.2.3 表面温度法总传热系数应按附录 B 的规定进行计算。

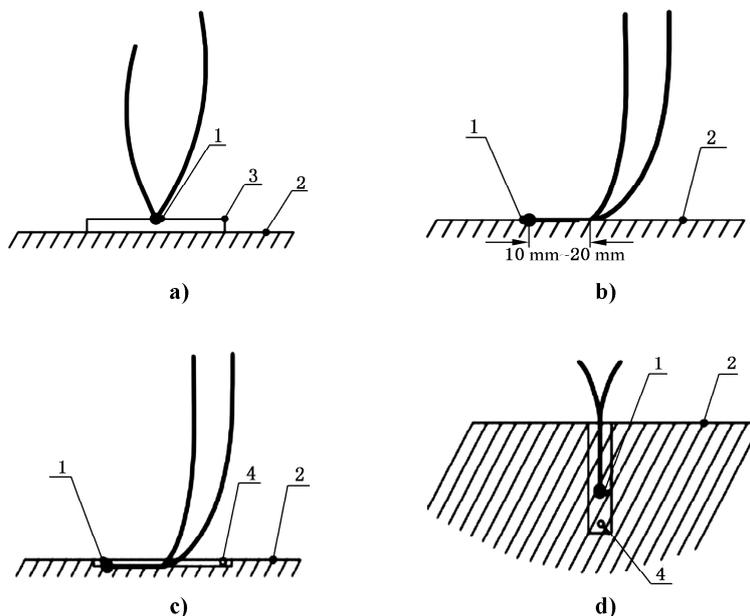
4.2.4 保温管道外表面温度的测定可采用表面温度计法、热电偶法、热电阻法或红外辐射测温仪法。

4.2.5 表面温度计法测定应符合下列规定:

- 表面温度计应采用热容小、反应灵敏、接触面积大、热阻小、时间常数小于 1 s 的传感器;
- 表面温度计的传感器应与被测表面保持紧密接触;
- 应减小环境因素对被测表面贴敷传感器周围温度场的干扰。

4.2.6 热电偶法应符合下列规定:

- 热电偶丝的直径不应大于 0.4 mm,且表面应有良好绝缘层。
- 热电偶与被测表面应接触良好,贴敷方式应符合下列规定:
 - 将热电偶焊接在导热性好的集热铜片上,再将其整体贴敷在被测表面上,适于现场布设,如图 1 a)所示;
 - 将热电偶沿被测表面紧密接触 10 mm~20 mm,适于现场布设,如图 1 b)所示;
 - 将热电偶嵌入被测表面上开凿的紧固槽或孔中,适于工厂预制,如图 1 c)、图 1 d)所示。



说明:

- 热电偶;
- 被测表面;
- 集热铜片;
- 紧固槽(孔)。

图 1 热电偶贴敷方式

- c) 测定值应采用毫伏计、电位差计或计算机输入转换模块读取,并按测试时环境温度进行参比端温度补偿。

4.2.7 热电阻法应符合下列规定:

- a) 可采用 Pt 100 B 级工业用热电阻;
- b) 热电阻护套应紧密贴敷在被测温度表面,热电阻与被测表面应接触良好;
- c) 测量线路应采用三线制,接入桥式或电位差的二次显示仪表,或接入计算机输入转换模块读取测定值。

4.2.8 红外辐射测温仪法应符合下列规定:

- a) 采用非接触式红外辐射测温仪测定保温结构外表面温度时,应按仪表使用要求正确选择测温仪与被测点的距离和发射角;
- b) 当保温结构外表面为有机材料、油漆或氧化表面时,应对被测表面的热发射率修正系数按附录 A 进行修正,并按仪表使用要求调整仪表的发射率读数。

4.2.9 环境温度的测定应使用温度计,保温结构表面温度和环境温度应同步测试,并按下列规定选择环境温度测点位置:

- a) 地上敷设的保温管道,应在距保温结构外表面 1 m 处测定空气的温度;
- b) 管沟敷设的保温管道应测试管沟内平均空气温度,测温点布设位置距离保温结构外表面及管沟内壁均应大于 0.1 m。

4.2.10 环境风速测定应使用风速仪,测量保温结构外表面温度时,应同步测量风向和风速。

4.2.11 测试方法的其他要求应按 GB/T 17357 的规定执行。

4.3 温差法

4.3.1 温差法适用于现场的地上、管沟和直埋敷保温管道的测试或保温管道保温结构预制及现场施工时,预埋测温传感器的测试。

4.3.2 温差法保温管道散热的热流密度应按式(4)计算:

$$q_{wc} = \frac{q_1}{\pi D} \dots\dots\dots(4)$$

式中:

- q_{wc} ——用温差法测试数据计算出的管道热流密度,单位为瓦每平方米(W/m²);
- q_1 ——单位长度线热流密度,单位为瓦每米(W/m);
- D ——保温结构外径,单位为米(m)。

地上和管沟敷设的单层保温结构保温管道,单位长度线热流密度按式(5)计算:

$$q_1 = \frac{2\pi\lambda(t - t_w)}{\ln(D/d)} \dots\dots\dots(5)$$

式中:

- q_1 ——单位长度线热流密度,单位为瓦每米(W/m);
- λ ——保温材料在使用温度下的导热系数,单位为瓦每米开[W/(m·K)];
- t ——工作管中的介质温度,单位为开(K);
- t_w ——保温结构外表面温度,单位为开(K);
- D ——保温结构外径,单位为米(m);
- d ——保温层内径(工作管外径),单位为米(m)。

地上和管沟敷设的多层保温结构保温管道,单位长度线热流密度按式(6)计算:

$$q_1 = \frac{t - t_w}{\sum_{i=1}^n (1/2\pi\lambda_i) \ln(d_i/d_{i-1})} \dots\dots\dots(6)$$

式中：

- q_1 ——单位长度线热流密度,单位为瓦每米(W/m);
 λ_i ——第*i*层保温材料在使用温度下的导热系数,单位为瓦每米开[W/(m·K)];
 t ——工作管中的介质温度,单位为开(K);
 t_w ——保温结构外表面温度,单位为开(K);
 n ——保温材料层数;
 d_i ——第*i*层保温材料外径,单位为米(m);
 d_{i-1} ——第*i*层保温材料内径,单位为米(m)。

直埋敷设保温管道的单位长度线热流密度按式(7)计算：

$$q_1 = \frac{t - t_{SE}}{R_1 + R_E} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- q_1 ——单位长度线热流密度,单位为瓦每米(W/m);
 t ——工作管中的介质温度,单位为开(K);
 t_{SE} ——直埋敷设管道处上方的地表温度,单位为开(K);
 R_1 ——管道保温结构综合热阻,单位为米开每瓦[(m·K)/W],按式(8)计算;
 R_E ——直埋敷设管道周围土壤热阻,单位为米开每瓦[(m·K)/W],按式(9)、式(10)计算。

$$R_1 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_i}{d_{i-1}} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

当 $H_E/D < 2$ 时：

$$R_E = \frac{1}{2\pi\lambda_E} \ln \left[\frac{2H_E}{D} + \sqrt{\left(\frac{2H_E}{D} \right)^2 - 1} \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

- λ_E ——实测土壤导热系数,单位为瓦每米开[W/(m·K)];
 H_E ——直埋敷设管道中心至地表面深度,单位为米(m)。

当 $H_E/D \geq 2$ 时,可简化为：

$$R_E = \frac{1}{2\pi\lambda_E} \ln \frac{4H_E}{D} \quad \dots\dots\dots (10)$$

4.3.3 稳定传热时,保温材料首层内表面与工作钢管接触良好的条件下,保温管道内的介质温度可视为保温材料首层内表面温度。

4.3.4 当保温结构外护管较厚时,应将外护管作为保温结构中的一层来计算热流密度。

4.3.5 保温结构各层界面的温度可采用预埋的热电偶或热电阻测量,并应符合 4.2.6、4.2.7 的规定。测得的各层温度平均值,可作为该层保温材料导热系数实测时的使用温度。

4.3.6 温度传感器在外护管上的引线穿孔应进行密封,不应渗漏。

4.3.7 保温结构的各层外径应为测试截面处的实际结构尺寸。

4.3.8 保温结构各层保温材料导热系数,应在实际被测保温管道的保温结构中取样,并应分别按实际平均工作温度测定。

4.3.9 直埋保温管道的土壤导热系数,应取管道现场的土壤试样测定。

4.4 热平衡法

4.4.1 热平衡法适用于地上、管沟和直埋敷设的保温管道测试以及无支管或支管末端有条件安装计量设施且无途中泄漏和排放的供热管线或管道的测试。当具有一定传输长度和一定介质温降的保温管道

全程温降较小且测温传感器准确度和分辨率不满足要求时,不应采用热平衡法。

4.4.2 在保温管道稳定运行工况下,现场测定被测管道的介质流量、管道起点和终点的介质温度和(或)压力,根据焓差法或能量平衡原理,计算该管道的全程散热损失值。不同介质保温管道全程散热损失计算应符合下列规定:

- a) 管道全程均为过热蒸汽的保温管道,全程散热损失按式(11)计算:

$$Q = 0.278G_q(h_1 - h_2) \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中:

- Q ——管道的全程散热损失,单位为瓦(W);
- G_q ——蒸汽的质量流量,单位为千克每小时(kg/h);
- h_1, h_2 ——被测管道进、出口蒸汽比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

- b) 管道中有饱和蒸汽及冷凝水的保温管道,管道的全程散热损失(冷凝水回收时,按实际计量的回收热量确定)按式(12)计算:

$$Q = 0.278(G_{q1} \times h_1 - G_{q2} \times h_2) \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中:

- G_{q1}, G_{q2} ——被测管道进、出口处测得的蒸汽质量流量,单位为千克每小时(kg/h)。

- c) 热水保温管道,测定的热水流量和管道进、出口热水温度,管道的全程散热损失按式(13)计算:

$$Q = 0.278G_s(c_1 \times t_1 - c_2 \times t_2) \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中:

- G_s ——热水质量流量,单位为千克每小时(kg/h);
- c_1, c_2 ——被测管道进出口热水比热容,单位为千焦每千克开[kJ/(kg·K)];
- t_1, t_2 ——被测管道进出口热水温度,单位为开(K)。

4.4.3 被测管道进出口处应按测试等级要求设置流量、温度和(或)压力测量仪表。当测试方使用管道进出口处已安装仪表时,应检验其准确度和有效性。



5 测试分级和使用条件

5.1 测试分级和选用

5.1.1 管网系统保温结构散热损失测试可分为三级,各级测试应符合下列规定:

- a) 一级测试应采用不少于两种测试方法,并应对照、同步进行;
- b) 二级、三级测试可采用一种测试方法;
- c) 一级测试的测试截面传感器布置密度应大于二级、三级测试,传感器布置方式见 6.2.2。

5.1.2 现场测试选级应符合下列规定:

- a) 采用新技术、新材料、新结构的管网系统鉴定测试,应执行一级测试;
- b) 管网系统新建、改建、扩建及大修工程的验收测试,应执行二级及以上测试;
- c) 管网系统的普查和定期检测,应执行三级及以上测试。

5.1.3 实验室测试选级应符合下列规定:

- a) 保温管道的生产鉴定,应执行一级测试;
- b) 保温管道的现场(包括施工和生产)抽样检测,应执行二级及以上测试。

5.2 测试仪器和仪表

测试采用仪器、仪表及其最大允许误差,应根据不同测试等级按表 1 选用。

表 1 测试采用仪器、仪表及其最大允许误差

测试项目	测试仪器、仪表	单位	最大允许误差		
			一级测试	二级测试	三级测试
外形尺寸	钢直尺、钢卷尺	mm	± 0.5	± 1.0	± 1.0
介质温度	温度计	℃	± 0.1	± 0.2	± 0.5
介质压力	压力表	%FS	± 0.4	± 1.0	± 1.0
热水流量	流量计	%	± 0.5	± 1.0	± 1.5
蒸汽流量	流量计	%	± 1.0	± 1.5	± 1.5
保温层厚度	游标卡尺	mm	± 0.02	± 0.02	± 0.02
保温层界面温度	热电偶、热电阻	℃	± 0.5	± 1.0	± 1.0
保温材料导热系数	导热仪	%	± 3	± 5	± 5
材料重量	天平,秤	g	± 0.1	± 0.5	± 1.0
外表面温度	热电偶、热电阻	℃	± 0.5	± 1.0	± 1.0
	表面温度计	℃	± 0.5	± 1.0	± 1.0
	红外测温仪	℃	± 0.5	± 1.0	± 1.0
材料辐射率	辐射率测量仪	%	± 2.0	± 2.0	± 2.0
热流密度	热流计	%	± 4	± 6	± 8
环境温度、地温	温度计	℃	± 0.5	± 1.0	± 1.0
空气相对湿度	湿度仪	%	± 5	± 10	± 10
环境风速	风速仪	%	± 5	± 10	± 10
测试使用的所有仪器应定期经法定计量检定机构检定或校准合格。					

6 测试要求

6.1 测试准备

6.1.1 测试应按任务性质和要求,确定测试等级。

6.1.2 测试前应进行现场被测试的保温管道沿线调查,并按附录 C 的规定进行记录。

6.1.3 测试前应结合测试内容及现场调查结果制定测试方案,并应符合下列规定:

- a) 制定测试计划、确定测试人员;
- b) 确定测试方法及相应测定参数;
- c) 确定测试截面位置和测点传感器布置方案。

6.1.4 测试前编制测试程序软件和记录表格。

6.2 测试截面和测点布置

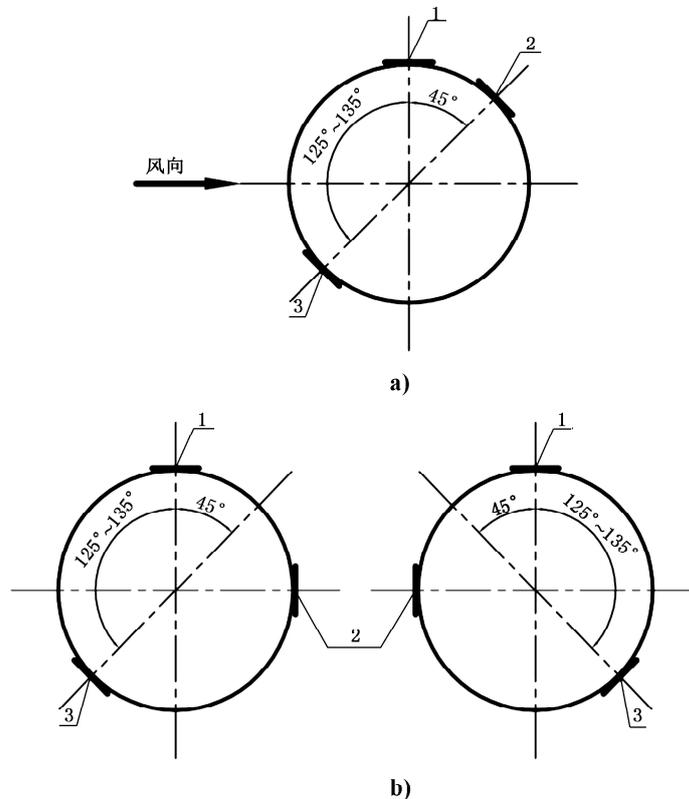
6.2.1 测试截面的布置应符合下列规定:

- a) 对于较复杂的管网系统,应按管道直径、分支情况、保温结构类型分成不同的测试管道;
- b) 每一管道应在首末端各设置一个直管道测试截面,并按管道实际长度、保温结构和测试等级要求,在其间存在敷设方式的差异或保温结构不同时,应再分别选择直管道测试截面;

- c) 每一管道中,管道接口处的测试截面和管路附件处的测试截面不应少于 1 个;
- d) 地上敷设的水平和竖直保温管道,应分别选取测试截面。

6.2.2 每一测试截面上,沿管道周向的测点布置应符合下列规定:

- a) 保温管道地上敷设时,测点应按图 2a)布置。
- b) 保温管道单管管沟敷设或直埋敷设时,测点布置可按图 2a)或其垂直对称位置布置。
- c) 保温管道双管管沟敷设或直埋敷设时,测点应按图 2b)布置。



说明:

- 1——上中测点;
- 2——上侧测点;
- 3——下侧测点。

图 2 保温管道测点布置

- d) 工作管直径大于 500 mm 保温管道的一级测试,应沿周向均匀布置 8 个测试传感器测点进行预测试。按预测试得出的管道保温结构表面热流和温度场分布结果,按热流密度平均值相等的原则确定测点的数量和位置,且测点数量不应少于 6 个。
- e) 工作管直径大于 500 mm 保温管道的二级、三级测试,应采用在图 2 测试截面各测点的对称位置处,再增加 3 个测点布置。

6.2.3 贴敷测试传感器前,应对保温管道的测点位置表面进行清理。在测试传感器的布置过程中应保持保温结构的原始状态。现场开挖或剖开保温结构布置传感器的直埋管道,应按原始状态恢复保温结构,并应进行回填。

6.3 测试环境条件

6.3.1 测试应在稳定传热条件下进行,应排除和减少不稳定因素对测试结果的影响,并不应在雨雪等

恶劣气候条件下测试。

6.3.2 测试地上保温管道及配件时,风速应小于 0.5 m/s。当不能满足要求时,应设置挡风装置。

6.3.3 地上管道及配件的测试应避免日照的影响,室外测试宜在阴天或夜间进行,否则应采取遮阳措施。

6.3.4 当被测保温管道表面有其他热辐射源影响,测试时应设置遮挡。

6.3.5 热流传感器不应受阳光直接辐射,宜选择阴天或夜间进行测定,或加装遮阳装置。

6.4 测试步骤

6.4.1 传感器贴敷完毕后,应在管网系统稳定连续运行 72 h 后进行测试。

6.4.2 连接测试数据采集系统,检查管道运行工况和测试截面处的测定数据是否稳定。可选择有代表性的测试截面进行预测试,读取传感器的数据,观察测定数据的变化情况。

6.4.3 确认已达到传感器亚稳态条件后,开始正式测试,采集和记录数据。

6.4.4 数据采集应 1 次/min,连续记录 10 min。

6.4.5 保温管道保温结构散热损失测试数据记录应按附录 D 执行。

7 数据处理

7.1 数据整理

7.1.1 采集的不合理数据应剔除,并应标明原因。

7.1.2 同一测试截面相同参数所测数据,应按算术平均值的方法计算该数据值。

7.1.3 表面温度法和温差法应按对应的计算公式计算各测试截面处的平均热流密度。

7.2 散热损失计算

7.2.1 折算系数

测试所得热流密度或散热损失,应根据测试时的介质温度和环境温度,折算为年或供热周期平均环境温度条件下的热流密度或散热损失。折算系数按式(14)计算:

$$k = \frac{t_0 - t_m}{t'_0 - t'_m} \quad \dots\dots\dots(14)$$

式中:

k ——将测试条件折算为年或供热周期平均环境温度条件的折算系数;

t_0 ——当地年或供热周期平均环境温度对应的平均介质温度,单位为开(K);

t_m ——当地年或供热周期平均环境温度(空气温度或地温),单位为开(K);

t'_0 ——测试时的介质温度,单位为开(K);

t'_m ——测试时的环境温度(空气温度或地温),单位为开(K)。

7.2.2 热流计法、表面温度法和温差法测试的管道散热损失

7.2.2.1 同一管径被测管道的直管道平均线热流密度为该管道各个直管道测试截面处的线热流密度平均值。按式(14)计算折算系数,再按式(15)计算年或供热周期平均环境温度条件下的被测管道直管道的平均线热流密度:

$$\bar{q}_1 = \frac{\pi D \sum_{i=1}^j k_i q_i}{j} \quad \dots\dots\dots(15)$$

式中：

\bar{q}_1 ——年或供热周期平均环境温度条件下的被测直管道的平均线热流密度，单位为瓦每米(W/m)；

q_i ——第 i 个直管道测试截面处的平均热流密度，单位为瓦每平方米(W/m²)；

k_i ——第 i 个直管道测试截面处的折算系数；

j ——直管道测试截面个数。

注 1：热流计法进行直埋保温管道热流密度测试时， q_i 取值为式(2) q_t 值。

注 2：热流计法进行地上或管沟敷设的保温管道热流密度测试时， q_i 取值为式(A.1) q_s 值。

注 3：表面温度法进行保温管道热流密度测试时， q_i 取值为式(3) q_{bm} 值。

注 4：温差法进行保温管道热流密度测试时， q_i 取值为式(4) q_{wc} 值。

7.2.2.2 同一管径管道接口处保温结构的散热损失测试，应根据被测接口处的热流密度，按式(16)计算年或供热周期平均环境温度条件下全管道接口处的总散热损失：

$$Q_{r,1} = \pi D \times q_1 \times k_1 \times l \times m \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中：

$Q_{r,1}$ ——年或供热周期平均环境温度条件下全管道接口处的总散热损失，单位为瓦(W)；

q_1 ——被测接口处的热流密度，单位为瓦每平方米(W/m²)；

k_1 ——被测接口处的折算系数；

l ——一个接口处保温结构长度，单位为米(m)；

m ——接口数量。

7.2.2.3 供热管网系统的散热损失计算应符合下列规定：

- a) 当采用热流计法时，直接测得热流密度。
- b) 当测得的数据是阀门和管路附件表面温度时，应符合下列规定：
 - 1) 对于地上和管沟敷设的管道可采用实测表面温度算术平均值，按表面温度法计算热流密度；
 - 2) 对于直埋的阀门和管路附件可采用实测表面温度算术平均值和实测土壤温度、土壤导热系数值，按温差法计算热流密度。
- c) 按式(14)折算系数计算年或供热周期平均环境温度条件下的阀门和管路附件的热流密度。
- d) 按阀门和管路附件的实际表面积折算出相对于该管道的当量长度，并按实际数量计算所有阀门和管路附件在年或供热周期平均环境温度条件下的总散热损失。

7.2.2.4 保温管道保温结构局部破损处的散热损失，应根据破损面积和实测表面温度的算术平均值，按表面温度法计算出热流密度和散热损失，按式(14)折算系数计算年或供热周期平均环境温度条件下的散热损失。

7.2.2.5 年或供热周期平均环境温度条件下被测管道的总散热损失按式(17)计算：

$$Q_b = \bar{q}_1 \times L + Q_{r,1} + Q_{r,2} + Q_{r,3} \quad \dots\dots\dots(17)$$

式中：

Q_b ——年或供热周期平均环境温度条件下被测管道的总散热损失，单位为瓦(W)；

L ——被测管道长度，单位为米(m)；

$Q_{r,2}$ ——年或供热周期平均环境温度条件下被测管道上阀门和管路附件的散热损失，单位为瓦(W)；

$Q_{r,3}$ ——年或供热周期平均环境温度条件下被测管道保温结构破损处的散热损失，单位为瓦(W)。

7.2.3 热平衡法测试的管道散热损失

热平衡法测试结果即为被测管道的总散热损失。按式(14)的折算系数计算年或供热周期平均环境温度条件下被测管道的总散热损失。

7.2.4 管网系统的总散热损失

年或供热周期平均环境温度条件下管网系统的总散热损失应为各管道散热损失之和,按式(18)计算:

$$Q_m = \sum_{i=1}^n Q_{bi} \dots\dots\dots(18)$$

式中:

Q_m ——年或供热周期平均环境温度条件下管网系统的总散热损失,单位为瓦(W);

Q_{bi} ——年或供热周期平均环境温度条件下第 i 管道的散热损失,单位为瓦(W);

n ——管网系统中的管道数。

8 测试误差

8.1 误差分析

8.1.1 测试误差来源于仪表误差、测试方法误差、测试操作及读数误差、运行工况不稳定及环境条件变化形成的误差等。

8.1.2 当出现的误差较大,又较难做出分析时,应采用多种测试方法对比测试,或一种测试方法的重复测试,以确定测试误差和重复性误差。

8.2 误差范围

8.2.1 一级测试应按 JJF 1059.1—2012 对各参数的测定做出测量不确定度分析,按 A 类和 B 类评定方法计算合成不确定度,并给出扩展不确定度评定。测试结果的综合不确定度不应大于 10%,重复性不应大于 5%。

8.2.2 二级测试应做出误差估计,测试结果的综合误差不应大于 15%,重复性测试误差不应大于 8%。

8.2.3 三级测试可不做误差分析和误差估计,但重复性测试误差不应大于 10%。

9 测试报告

9.1 测试报告宜包括以下内容:

- a) 测试任务书及测试项目概况,测试目的及测试等级要求。
- b) 测试项目的实际运行参数、测试现场及气象条件搜集。
- c) 测试方案,测试主要参数,主要测试仪器、仪表及准确度。
- d) 测试日期,测试工作安排及主要技术措施。
- e) 测试数据处理,计算公式,测量不确定度分析。
- f) 测试结果评定和分析,提出建议。

9.2 原始记录、数据处理资料及测试报告应及时存档备查。

附 录 A
(规范性附录)
热流密度修正

A.1 保温结构的外表面热发射率

保温结构的外表面热发射率宜采用实际测试值,也可按表 A.1 选取。

表 A.1 保温结构的外表面热发射率

外护管材料和表面状况	表面温度/°C	表面热发射率
粗制铝板	40	0.07
工业用铝薄板	100	0.09
严重氧化的铝	94~505	0.20~0.31
铝粉涂料	100	0.20~0.40
轧制钢板	40	0.66
极粗氧化面钢板	40	0.80
有光泽的镀锌铁皮	28	0.228
有光泽的黑漆	25	0.875
无光泽的黑漆	40~95	0.90~0.98
有色薄油漆涂层	37.8	0.85
砂浆、灰泥、红砖	20	0.93
石棉板	40	0.96
胶结石棉	40	0.96
沥青油毡纸	20	0.93
粗混凝土	40	0.94
石灰浆粉刷层	10~38	0.91
油 纸	21	0.91
硬质橡胶	40	0.94

A.2 修正系数

热流传感器表面的热发射率与被测保温管道表面发射率不一致时,热流传感器表面热发射率修正系数按表 A.2 选取。

表 A.2 热流传感器表面热发射率修正系数

被测表面发射率	热流传感器表面热发射率修正系数						适用条件
	被测表面温度/°C						
	50	100	150	200	300	400	
0.4	0.730	0.725	0.720	—	—	—	适用于硅橡胶热流传感器(表面热发射率 0.9)
0.5	0.780	0.780	0.780	—	—	—	
0.6	0.845	0.845	0.840	—	—	—	
0.7	0.890	0.890	0.885	—	—	—	
0.8	0.960	0.960	0.950	—	—	—	
0.9	1.000	1.000	1.000	—	—	—	
0.9	1.410	1.410	1.450	1.500	1.580	1.680	适用于金属热流传感器(表面热发射率 0.4)
0.8	1.330	1.330	1.350	1.400	1.480	1.530	
0.7	1.250	1.250	1.275	1.300	1.340	1.400	
0.6	1.170	1.170	1.180	1.200	1.240	1.280	
0.5	1.090	1.090	1.100	1.110	1.115	1.130	
0.4	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	

A.3 测试值修正

热流计测试结果应按式(A.1)修正:

$$q_s = f \times q' \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

q_s —— 经外部因素修正后的热流密度,单位为瓦每平方米(W/m^2);

f —— 热发射率修正系数,按 A.2 选取;

q' —— 仪器显示的热流密度,单位为瓦每平方米(W/m^2)。

附 录 B
(规范性附录)
表面温度法总传热系数计算

B.1 基本要求

总传热系数应根据测试等级的要求计算。一级测试应按 B.2 的方法计算,二级、三级测试可按 B.3 的方法计算。

B.2 外表面总传热系数

B.2.1 外表面总传热系数按式(B.1)计算:

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

α ——总传热系数,单位为瓦每平方米开[W/(m²·K)];

α_r ——辐射传热系数,单位为瓦每平方米开[W/(m²·K)];

α_c ——对流传热系数,单位为瓦每平方米开[W/(m²·K)]。

B.2.2 辐射传热系数取决于表面的温度和热发射率,材料表面热发射率定义为表面辐射系数与黑体辐射常数之比。可按式(B.2)进行辐射传热系数的计算。

$$\alpha_r = a_1 \times C_r \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

a_1 ——温度因子,单位为三次方开(K³);

C_r ——材料表面辐射系数,单位为瓦每平方米四次方开[W/(m²·K⁴)]。 C_r 也可从表 B.1 中选取。

温度因子可按式(B.3)计算:

$$a_1 = \frac{(T_w)^4 - (T_F)^4}{T_w - T_F} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

T_w ——保温结构外表面绝对温度,单位为开(K);

T_F ——环境或相邻辐射表面的表面绝对温度,单位为开(K)。

当温差不大于 200 K 时,温度因子和材料表面辐射系数按式(B.4)和式(B.5)近似计算:

$$a_1 = 4T_{av}^3 \dots\dots\dots (B.4)$$

$$C_r = \epsilon \times \sigma \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

T_{av} ——保温结构外表面绝对温度与环境绝对温度的平均温度,单位为开(K);

ϵ ——保温结构外表面材料的热发射率,按表 B.1 选取;

σ ——斯蒂芬·玻尔兹曼常数,单位为瓦每平方米四次方开[W/(m²·K⁴)],按 5.67×10^{-8} 取值。

B.2.3 对流传热系数通常取决于多种因素,诸如空气的流动状态、空气的温度、表面的相对方位、表面材料种类以及其他因素。对流传热系数的确定,应区分是建筑或管沟内部管道表面对流传热系数,还是地上管道对空气的对流传热系数;也应区分是管道内表面对流传热系数还是外表面对流传热系数。

在建筑物或管沟等内部空间敷设的管道,外表面对流传热系数的计算应符合下列规定:

- a) 垂直管道,且空气为层流状态时($H_e^3 \times \Delta t \leq 10 \text{ m}^3 \cdot \text{K}$),传热系数可按式(B.6)和式(B.7)计算:

$$\alpha_c = 1.32 \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{H_e}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.6})$$

$$\Delta t = |t_w - t_f| \quad \dots\dots\dots (\text{B.7})$$

式中:

Δt ——保温结构外表面温度与环境空气温度的温差,单位为开(K);

H_e ——垂直管道高度,单位为米(m)。

- b) 垂直管道,且空气为紊流状态时($H_e^3 \times \Delta t > 10 \text{ m}^3 \cdot \text{K}$),传热系数可按式(B.8)计算:

$$\alpha_c = 1.74 \sqrt[3]{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (\text{B.8})$$

- c) 水平管道,且空气为层流状态时($H_e^3 \times \Delta t \leq 10 \text{ m}^3 \cdot \text{K}$),传热系数可按式(B.9)计算:

$$\alpha_c = 1.25 \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{D_e}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.9})$$

式中:

D_e ——保温管道外护管外径,单位为米(m)。

- d) 水平管道,且空气为紊流状态时($H_e^3 \times \Delta t > 10 \text{ m}^3 \cdot \text{K}$),传热系数可按式(B.10)计算:

$$\alpha_c = 1.21 \sqrt[3]{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (\text{B.10})$$

在外部空间敷设的管道,外表面传热系数的计算应符合下列规定:

- a) 空气为层流状态时($v \times D_e \leq 8.55 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$),可按式(B.11)计算:

$$\alpha_c = \frac{8.1 \times 10^{-3}}{D_e} + 3.14 \sqrt{\frac{v}{D_e}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.11})$$

式中:

v ——风速,单位为米每秒(m/s)。

- b) 空气为紊流状态时($v \times D_e > 8.55 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$),可按式(B.12)计算:

$$\alpha_c = 8.9 \frac{v^{0.9}}{D_e^{0.1}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.12})$$

B.3 外表面总传热系数的近似值

B.3.1 保温管道外表面总传热系数近似值,可按式(B.13)、式(B.14)计算:

- a) 水平管道:

$$\alpha = C_A + 0.05 \Delta t \quad \dots\dots\dots (\text{B.13})$$

式中:

C_A ——水平管道外表面总传热系数近似值计算系数。

- b) 垂直管道:

$$\alpha = C_B + 0.09 \Delta t \quad \dots\dots\dots (\text{B.14})$$

式中:

C_B ——垂直管道外表面总传热系数近似值计算系数。

注:式(B.13)适用于保温结构外直径为0.25 m~1.0 m的保温管道;式(B.14)适用于所有管径。

B.3.2 常用管道外表面总传热系数近似值计算系数、热发射率和辐射系数可按表 B.1 取值。

表 B.1 常用管道外表面总传热系数近似值计算系数、热发射率和辐射系数

表面材料		C_A	C_B	ϵ	$C_r /$ [$10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$]
铝材	光亮表面	2.5	2.7	0.05	0.28
	氧化表面	3.1	3.3	0.13	0.74
电镀金属薄板	洁净表面	4.0	4.2	0.26	1.47
	积满灰尘	5.3	5.5	0.44	2.49
奥氏体薄钢板		3.2	3.4	0.15	0.85
铝锌薄板		3.4	3.6	0.18	1.02
非金属表面材料		8.5	8.7	0.94	5.33

表 C.2 (续)

管道名称:						
调查日期: 年 月 日			调查人: 审核人:			
年月日	最高气温 ℃	最低气温 ℃	平均气温 ℃	降雨量 mm	降雪量 mm	管道埋深处地温 ℃

附 录 D
(规范性附录)

保温管道保温结构散热损失测试数据记录表

D.1 热平衡法散热损失测试数据表

保温管道热平衡法散热损失测试数据表应按表 D.1 的规定执行。

表 D.1 保温管道热平衡法散热损失测试数据表

管道名称:									
测试日期: 年 月 日					测试人员:				
日期	时间	始端介质参数			终端介质参数			气温 ℃	地温 ℃
		流量 kg / h	温度 ℃	压力 MPa	流量 kg / h	温度 ℃	压力 MPa		

D.2 散热损失测试报告数据表

保温管道保温结构散热损失测试报告数据表可按表 D.2 的规定执行。

表 D.2 保温管道保温结构散热损失测试报告数据表

管道名称:						
测试日期: 年 月 日				测试人员:		
结构层各外径	mm	钢管 d_0	保温一层 d_1	保温二层 d_2	保温三层 d_3	外护层 d_w
各界面温度	℃	钢管外表或介质 t_0	一层外表 t_1	二层外表 t_2	三层外表 t_3	外护层外表 t_w
各层导热系数	W/(m·K)	保温一层 λ_1	保温二层 λ_2	保温三层 λ_3	外护层 λ_w	土壤层 λ_E
热流密度	W/m ²					
管道长度	m					

表 D.2 (续)

管道名称:		
测试日期: 年 月 日		测试人员:
折算当地年或供热季 平均温度下的热流 密度	W/m ²	
线热流密度	W/m	
接口处散热损失	W	
管路附件处 散热损失	W	
保温结构破 损处散热损失	W	
环境空气温度	℃	
自然地温	℃	
全程散热损失	W	

