

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.02.012

集中生活热水系统配水管网热损失计算方法

孙宏伟^{1,2}, 朱姝静³, 杨亚峰², 张 坡¹, 魏 娴¹, 赵 帅¹,
刘宇峻¹, 杨 慧^{1,2}

(1. 中建中原建筑设计院有限公司, 河南 郑州 450004; 2. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450004; 3. 郑州市建筑设计研究院有限公司, 河南 郑州 450007)

摘 要: 通过分析国家现行标准、建筑给水排水教材及设计手册中集中生活热水系统配水管网热损失的计算公式和计算思路,发现其计算方法以定性分析为主,无法保证计算结果与实际热损失量的符合性。提出采用“经济厚度”计算方法,利用传热学理论公式将管网热损失与保温层厚度结合在一起,根据项目确定的设计参数推导出其余相关的未知参数,并从数学角度分析得出这些参数之间存在唯一的函数对应关系。通过对热水管网不同设计条件下计算结果的分析,发现影响管网热损失量的一些关键因素,提出合理控制管网管径,尽量降低热水管网的运行温度,是降低管网热损失的有效途径。实例计算分析表明,采用“经济厚度”计算方法,结果唯一,偏差方向为正,热损失量小于教材和设计手册的计算结果。

关键词: 热损失; 集中生活热水系统; 配水管网; 经济厚度; 表面换热系数; 绝热层; 热流量

中图分类号: TU82 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)02-0074-09

Heat Loss Calculation Methods for Water Distribution Networks in Centralized Domestic Hot Water Systems

SUN Hongwei^{1,2}, ZHU Shujing³, YANG Yafeng², ZHANG Po¹, WEI Xian¹,
ZHAO Shuai¹, LIU Zijun¹, YANG Hui^{1,2}

(1. CSCEC Zhongyuan Architectural Design Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450004, China;
2. China Construction Seventh Engineering Division Corp. Ltd., Zhengzhou 450004, China;
3. Zhengzhou Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450007, China)

Abstract: By analyzing the calculation formulas and methodologies for heat loss in the water distribution networks of centralized domestic hot water systems as outlined in current national standards, building water supply and drainage textbooks, and design manuals, it was found that the existing methods relied primarily on qualitative analysis and cannot ensure alignment between calculated results and actual heat loss. A new approach using the “economic thickness” calculation method was proposed. This method integrated the calculation of pipeline network heat loss with the determination of insulation thickness based on theoretical heat transfer formulas. By using project-specific design parameters to derive other relevant unknown variables, a unique functional relationship among these parameters was established

基金项目: 中建中原建筑设计院有限公司课题(ZJZYJZSJY-2023-N-04)

通信作者: 孙宏伟 E-mail: 411523466@qq.com

from a mathematical perspective. Through an analysis of the calculation results under different design conditions for hot water pipeline networks, several key factors influencing heat loss were identified. It was suggested that reasonably controlling pipeline diameter and minimizing the operating temperature of the hot water network were effective measures to reduce heat loss. Case study calculations demonstrated that the “economic thickness” method yielded unique results with positive deviation and lower heat loss values compared to those obtained from textbooks and design manuals.

Keywords: heat loss; centralized domestic hot water system; water distribution network; economic thickness; surface coefficient of heat transfer; thermal insulation layer; heat flow rate

建筑内集中生活热水系统因供回水管网规模较大、流程较长,在输送过程中不可避免地会产生热量损失。为满足用户对热水供应及时性、稳定性及舒适性的要求,管网需维持适宜的温度,这也导致其能耗较高。因此,降低管网热损失量、优化管道保温措施,已成为建筑节能设计的关键环节之一。准确计算管网热损失量,是确定各管段循环流量及循环水泵流量的基础,对集中生活热水系统的节能优化具有重要意义。目前常用的计算方法均为近似估算,其计算结果与实际热损失量的符合性无从考证。为克服这一缺陷,尝试从传热学基础理论公式入手,借助计算软件及数学工具,推导出更为精确的热损失计算方法,并结合实际案例进行试算分析。

1 国家现行标准、教材及设计手册的要求

1.1 国家现行标准的规定

国家现行标准《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019,简称“建水标”)第6.7.5条规定:配水管道的热损失,经计算确定,单体建筑可取设计小时耗热量 Q_h 的2%~4%,小区可取 Q_h 的3%~5%。集中热水供应系统循环流量是为保证配水点热水温度而补偿配水管网热损失所需的热水循环水量,其值与配水管网的热损失以及热水供回水温差直接相关。然而,“建水标”未明确规定配水管网热损失的具体计算方法,其他相关标准、规范中也未见相应依据。

该条文基于设计小时耗热量 Q_h ,通过乘以一定比例系数进行估算。根据“建水标”第6.4.1条, Q_h 主要取决于用水人数(器具数量)、用水定额、冷热水温度及使用时间等变量。比例系数的选取与热水管网系统的规模相关,系统服务范围大、管线较长时取上限;反之,取下限。此估算方法未能准确

反映热水管网管径、管道长度及绝热保温措施等因素的影响,主要是工程实践的经验取值。

1.2 建筑给水排水工程教材及设计手册的规定

《建筑给水排水工程》(第八版)^[1]教材(简称“教材”)中关于配水管网的热损失计算公式如下:

$$\Delta t = \frac{\Delta T}{F} \quad (1)$$

$$t_z = t_c - \Delta t \sum f \quad (2)$$

$$q_s = \pi DLK(1 - \eta) \left(\frac{t_c + t_z}{2} - t_j \right) \quad (3)$$

式中: Δt 为计算管路的面积比温降, $^{\circ}\text{C}/\text{m}^2$; ΔT 为计算管路起点和终点的水温差, $^{\circ}\text{C}$; F 为配水管网的总外表面积, m^2 ; $\sum f$ 为计算管路终点以前的配水管网总外表面积, m^2 ; t_c 为计算管路起点水温, $^{\circ}\text{C}$; t_z 为计算管路终点水温, $^{\circ}\text{C}$; t_j 为计算管路周围空气温度, $^{\circ}\text{C}$; D 为计算管段外径, m ; L 为计算管段长度, m ; q_s 为计算管段热损失, kJ/h ; K 为无保温管道传热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$; η 为保温系数,无保温取0,简单保温取0.6,较好保温取0.7~0.8。

《建筑给水排水设计手册》(第三版)^[2](简称“手册”)中关于配水管网的热损失计算公式如下:

$$\Delta t_p = M \frac{\Delta T}{\sum M} \quad (4)$$

$$M = \frac{L(1 - \eta)}{D} \quad (5)$$

$$t_z = t_a - \Delta t_p \quad (6)$$

$$W = \pi DLK(1 - \eta)(t_m - t_k) \quad (7)$$

式中: Δt_p 为管段温降, $^{\circ}\text{C}$; $\sum M$ 为计算管段的温降因素之和; L 为管段长度, m ; t_a 为计算管段起点水温, $^{\circ}\text{C}$; t_m 为计算管段的平均水温, $^{\circ}\text{C}$; t_k 为计算管段周围的空气温度, $^{\circ}\text{C}$; W 为管段热损失, W 。

分析上述公式可知,“教材”和“手册”的计算思路较为相似,均先确定热水系统的总温差,再将总

温差分摊至各计算管段,仅在分配依据上存在差异——“教材”依据总外表面积,而“手册”则依据温降因素。该计算方法通过定性分析指出,管道热损失与管径、管长、保温措施、管道内热水温度及周围空气温度等因素相关。然而,该计算公式缺少相应的理论基础,直接影响了计算结果的准确性。为将上述各因素在管网热损失计算中通过公式予以定性定量反映,需借助传热学理论,将管网热损失计算与管网保温设计计算结合起来^[3-5]。

2 热损失计算与保温层厚度的数学关系

根据《工业设备及管道绝热工程设计规范》(GB 50264—2013,简称“绝热规范”)对管道保温和热损失量计算的相关条文规定,可采用下列公式计算:

$$T_s = \frac{Q}{\alpha_s} + T_a \quad (8)$$

$$\alpha_s = \alpha_r + \alpha_c \quad (9)$$

$$\alpha_r = \frac{5.669\varepsilon}{T_s - T_a} \times \left[\left(\frac{273 + T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + T_a}{100} \right)^4 \right] \quad (10)$$

$$\alpha_c = \frac{26.4}{\sqrt{297 + 0.5(T_s + T_a)}} \left(\frac{T_s - T_a}{D_1} \right)^{0.25} \quad (11)$$

$$\delta = \frac{1}{2} (D_1 - D_0) \quad (12)$$

式中: Q 为单位面积的热损失量, W/m^2 ; T_s 为绝热层外表面温度, $^{\circ}\text{C}$; T_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; α_s 为绝热层外表面的换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; α_r 为绝热结构外表面材料的辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; α_c 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; D_0 为管道外径, m ; D_1 为绝热层外径, m ; δ 为绝热层厚度, m ; ε 为绝热结构外表面材料的黑度。

“绝热规范”第5.8.2条规定,设置于室内的管道在经济保温厚度和散热损失计算中,环境温度 T_a 可取 20°C 。“绝热规范”第5.8.9条规定,不同材料黑度 ε 的取值范围在 $0.15 \sim 0.90$ 之间,当绝热结构外表面材料采用铝合金薄板时, ε 为 $0.15 \sim 0.30$,该研究取 $\varepsilon = 0.25$ 。

将式(9)~(11)代入式(8),整理化简后可得下式:

$$Q = (T_s - 20) \times \left\{ \frac{5.669 \times 0.25}{T_s - 20} \times \left[\left(\frac{273 + T_s}{100} \right)^4 - 2.93^4 \right] + \frac{26.4}{\sqrt{297 + 0.5 \times (T_s + 20)}} \left(\frac{T_s - 20}{D_1} \right)^{0.25} \right\} \quad (13)$$

式(13)等号右侧是1个含有参数变量 T_s 和 D_1 的代数式,等号左侧只含变量 Q 。因此,单位面积热损失量 Q 与绝热层外表面温度 T_s 和绝热层外径 D_1 存在函数对应关系。

对于热水管网的某一计算管段,管道外径 D_0 是确定值,先确定绝热层厚度 δ ,即可根据式(12)得出绝热层外径 D_1 ,再确定绝热层外表面温度 T_s ,根据式(13)得出单位面积热损失量 Q 。所以,可以根据热水管网已确定的设计参数,利用传热学公式计算出保温层厚度、绝热层外表面温度,进而计算出单位面积热损失量。由数学知识可知,根据式(13)无法求出这些参数对应的解,至少需要3个等式才可以求解。因此,还需要一些含有这3个未知参数的等式,其中,管道保温层厚度参数的确定是计算的关键。

3 管道保温层厚度的计算

3.1 计算公式的选取

“建水标”第6.8.14条规定:热水输(配)水、循环回水干(立)管应做保温,保温层的厚度应经计算确定,并应符合国家现行标准《设备及管道绝热设计导则》(GB/T 8175—2008,简称“绝热导则”)要求。

“绝热导则”第5.1.2条规定:为减少散热损失的保温层其厚度应按经济厚度方法计算。《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015,简称“节能标准”)第5.3.7条规定:集中热水供应系统的管网及设备应采取保温措施,保温层厚度应按现行国家标准《设备及管道绝热设计导则》GB/T 8175中经济厚度计算方法确定。

经济厚度,即绝热后年散热损失所花费的费用和绝热工程投资的年摊销费用之和为最小值时的保温层厚度值。生活热水的温度相对较低,采用单层保温即可满足要求。根据“绝热规范”相关条文

规定,圆筒型绝热层经济厚度计算的相关公式如下:

$$D_1 \ln \frac{D_1}{D_0} = 3.795 \times 10^{-3} \times \sqrt{\frac{P_E \times \lambda \times t \times |T_0 - T_a|}{P_T \times S}} - \frac{2\lambda}{\alpha_s} \quad (14)$$

$$Q = \frac{T_0 - T_a}{\frac{D_1 \ln \frac{D_1}{D_0}}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha_s}} \quad (15)$$

$$q = \pi D_1 Q \quad (16)$$

$$\lambda = 0.034 + 0.000 13 t_m \quad (17)$$

$$t_m = \frac{T_0 + T_s}{2} \quad (18)$$

式中: P_E 为能量价格,元/GJ; P_T 为绝热结构单位

造价,元/ m^3 ; S 为绝热工程投资年摊销率; λ 为导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; t 为年运行时间, h; T_0 为管道的外表面温度, $^\circ C$; t_m 为绝热层平均温度, $^\circ C$; q 为单位长度热损失量, W/m 。

3.2 公式中各参数的取值

① 根据“绝热规范”第5.8.1条规定,当无衬里时,管道的外表面温度 T_0 应取介质的长期正常运行温度。该研究以不锈钢管为例,忽略管网沿程热损失导致的温降,统一采用水加热设备出水温度,计算中取 $T_0=60^\circ C$ 。

② 以不锈钢管为例,管道外径 D_0 采用《管道工程用无缝及焊接钢管尺寸选用规定》(GB/T 28708—2012)中的数据。管道公称直径和外径如表1所示。

表1 管道公称直径和外径

Tab.1 Nominal diameters and outer diameters of pipeline

m

公称直径	DN20	DN25	DN32	DN40	DN50	DN65	DN80	DN100	DN125	DN150	DN200
外径 D_0	0.026 9	0.033 7	0.042 4	0.048 3	0.060 3	0.073 0	0.088 9	0.114 3	0.141 3	0.168 3	0.219 1

③ 生活热水管网采用单层保温,根据“绝热导则”第8.1.1.2条可知,绝热层厚度一般小于80 mm,大于20 mm,结合表1中的管道外径,可得到 $0.065 m < D_1 < 0.380 m$ 。

④ 根据“绝热规范”第5.8.8条规定,当管网常年运行时,年运行时间应按8 000 h计,对非常年运行的管网则应按实际运行时间计。该研究计算中 $t=8 000 h$ 。

⑤ 根据“节能标准”附录D.0.1条规定,能量价格即热价,热价35元/GJ相当于城市供热,热价85元/GJ相当于天然气供热。

⑥ 根据“节能标准”附录D.0.1条规定, S 值在设计使用年限内,按复利率计算。还贷年限 n 取6 a,贷款年利率 i 取10%,经计算 $S=22.96\%$ 。

⑦ 根据《公共建筑节能设计标准实施指南》规定,我国大部分地区绝热结构的造价相差不大,闭孔柔性泡沫橡塑保温材料的平均造价为3 400元/ m^3 。

4 对计算公式进行综合分析

4.1 对公式的计算分析

将 $P_E=85$ 元/GJ、 $P_T=3 400$ 元/ m^3 、 $t=8 000 h$ 、 $S=22.96\%$ 、 $T_0=60^\circ C$ 、 $T_a=20^\circ C$ 代入式(14)和式(15),并联立两式,整理化简后可得下式:

$$Q = 112.932 1 \sqrt{\lambda} \quad (19)$$

将式(17)和式(18)代入式(19),整理后可得下式:

$$Q = 112.932 1 \sqrt{0.037 9 + 0.000 065 T_s} \quad (20)$$

对式(8)~(20)进行分析,发现绝热层外表面温度 T_s 为重要的关联性参数,对于某一计算管段,可先假设1个 T_s 值,根据式(20)计算出单位面积热损失量 Q ;再将 Q 、 T_a 、 T_s 值代入式(8)计算出保温结构外表面换热系数 α_s ;将 $\varepsilon=0.25$ 、 T_a 、 T_s 值代入式(10)计算出辐射换热系数 α_r ;将 α_s 、 α_r 值代入式(9)计算出对流换热系数 α_c ;将 α_c 、 T_a 、 T_s 值代入式(11)计算出绝热层外径 D_1 ;将 T_0 、 T_s 值代入式(17)和式(18)计算出导热系数 λ ;将 λ 、 α_s 、 T_0 、 T_a 、 Q 值代入式(15)计算出 $D_1 \ln \frac{D_1}{D_0}$ 整体值;根据 $D_1 \ln \frac{D_1}{D_0}$ 和 D_1 值计算出管道外径 D_0 值。

对于热水管网的某一计算管段,其管道外径 D_0 值是确定的,将上述计算思路通过公式输入“Excel”计算软件,利用软件的“单变量求解”功能,将 D_0 值设为“目标单元格”,并设定其“目标值”分别为表1中的管道外径,将 T_s 值设为“可变单元格”,而后进行计算,可以依次计算出上述公式中出现的所有参数值。

最后,将 D_0 和 D_1 的值代入式(12)计算出绝热层厚度 δ 。

按照上述思路,计算出不同管径对应的保温层经济厚度及热损失量等参数,具体见表2。

表2 管道热损失量计算过程参数($T_0=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\varepsilon=0.25$ 、 $P_E=85\text{ 元/GJ}$)

Tab.2 Process parameters of pipeline heat loss calculation($T_0=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon=0.25$, $P_E=85\text{ CNY/GJ}$)

管径	$T_s/^{\circ}\text{C}$	$Q/(\text{W}/\text{m}^2)$	$\alpha_s/[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$	$\alpha_l/[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$	$\alpha_c/[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$	D_i/m	$q/(\text{W}/\text{m})$	$\lambda/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	$D_i \ln \frac{D_1}{D_0}$	D_0/m	δ/mm
DN20	24.267 6	22.438 5	5.257 9	1.457 4	3.800 4	0.097 6	6.874 6	0.039 48	0.125 73	0.026 9	35.3
DN25	24.333 5	22.439 7	5.178 2	1.457 9	3.720 3	0.107 9	7.600 9	0.039 48	0.125 51	0.033 7	37.1
DN32	24.405 3	22.441 0	5.094 1	1.458 4	3.635 7	0.120 2	8.469 9	0.039 49	0.125 26	0.042 4	38.9
DN40	24.448 3	22.441 8	5.045 0	1.458 8	3.586 2	0.128 2	9.033 1	0.039 49	0.125 12	0.048 3	39.9
DN50	24.525 5	22.443 2	4.959 3	1.459 3	3.499 9	0.143 7	10.128 8	0.039 49	0.124 85	0.060 3	41.7
DN65	24.596 3	22.444 6	4.883 2	1.459 9	3.423 3	0.159 5	11.238 5	0.039 50	0.124 61	0.073 0	43.2
DN80	24.673 8	22.446 0	4.802 6	1.460 5	3.342 1	0.178 5	12.576 9	0.039 50	0.124 34	0.088 9	44.8
DN100	24.779 4	22.447 9	4.696 8	1.461 2	3.235 6	0.207 7	14.636 7	0.039 51	0.123 98	0.114 3	46.7
DN125	24.874 8	22.449 7	4.605 3	1.462 0	3.143 3	0.237 7	16.756 7	0.039 52	0.123 66	0.141 3	48.2
DN150	24.957 9	22.451 2	4.528 3	1.462 6	3.065 8	0.267 1	18.829 8	0.039 52	0.123 37	0.168 3	49.4
DN200	25.091 2	22.453 7	4.410 3	1.463 6	2.946 7	0.321 2	22.648 2	0.039 53	0.122 92	0.219 1	51.1

4.2 不同条件下的计算结果对比分析

4.2.1 调整能量价格 P_E

在表2基础上,仅将 P_E 调整为35元/GJ,计算结果见表3。对比可知,热价降低后,经济绝热层厚度

明显减小,单位面积和单位长度热损失量明显增大。因此,热价下降导致散热损失对应的经济成本降低,经济绝热层厚度随之减小,进而使热损失量上升,不利于建筑节能。

表3 管道热损失量计算过程参数($T_0=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\varepsilon=0.25$ 、 $P_E=35\text{ 元/GJ}$)

Tab.3 Process parameters of pipeline heat loss calculation($T_0=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon=0.25$, $P_E=35\text{ CNY/GJ}$)

管径	$T_s/^{\circ}\text{C}$	$Q/(\text{W}/\text{m}^2)$	$\alpha_s/[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$	$\alpha_l/[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$	$\alpha_c/[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$	D_i/m	$q/(\text{W}/\text{m})$	$\lambda/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	$D_i \ln \frac{D_1}{D_0}$	D_0/m	δ/mm
DN20	25.959 3	35.016 5	5.875 9	1.470 0	4.405 9	0.075 0	8.249 7	0.039 59	0.076 97	0.026 9	24.1
DN25	26.066 3	35.019 6	5.772 8	1.470 9	4.301 9	0.084 0	9.237 0	0.039 59	0.076 73	0.033 7	25.2
DN32	26.183 5	35.023 0	5.663 9	1.471 7	4.192 2	0.094 9	10.438 1	0.039 60	0.076 48	0.042 4	26.3
DN40	26.253 7	35.025 0	5.600 7	1.472 3	4.128 4	0.102 0	11.222 4	0.039 61	0.076 32	0.048 3	26.9
DN50	26.380 1	35.028 6	5.490 3	1.473 2	4.017 1	0.116 1	12.768 6	0.03 961	0.076 04	0.060 3	27.9
DN65	26.496 1	35.031 9	5.392 8	1.474 1	3.918 7	0.130 5	14.353 0	0.039 62	0.075 79	0.073 0	28.7
DN80	26.623 1	35.035 6	5.289 9	1.475 0	3.814 9	0.148 1	16.287 6	0.039 63	0.075 51	0.088 9	29.6
DN100	26.796 0	35.040 6	5.156 0	1.476 3	3.679 7	0.175 4	19.299 9	0.039 64	0.075 13	0.114 3	30.6
DN125	26.952 0	35.045 0	5.041 0	1.477 5	3.563 5	0.203 9	22.437 5	0.039 65	0.074 78	0.141 3	31.3
DN150	27.087 5	35.048 9	4.945 2	1.478 6	3.466 6	0.232 0	25.533 4	0.039 66	0.074 49	0.168 3	31.9
DN200	27.303 9	35.055 1	4.799 5	1.480 2	3.319 3	0.284 3	31.288 8	0.039 67	0.074 01	0.219 1	32.6

4.2.2 调整管道的外表面温度 T_0

在表2基础上,仅改变管道外表面温度 T_0 分别为70、65、55、50 $^{\circ}\text{C}$,计算出单位面积热损失量,并将结果进行对比,具体见表4。

经比较,表3和表4中单位面积热损失量均明显小于《设备及管道绝热技术通则》(GB/T 4272—2008)第6.1.1条表2给出的常年运行工况允许最大散热损失值。

由表4可知,当管道外表面温度 T_0 确定时,单位

面积热损失量随管径的增大而增大^[6-7],表明管径大小直接影响热损失程度。影响管径的主要因素包括设计秒流量和流速,故设计时应合理选择计算参数,准确确定管径。当管径固定时,单位面积热损失量随管道外表面温度 T_0 的降低而减小。因此,应尽量优化确定合理的热水管网运行温度,进而减少管网热损失。由于管网沿程不可避免地存在热损失,其实际运行温度沿程降低。若所有管段均按水加热设备的出水温度统一设定为 T_0 ,将导致计算的

绝热层厚度以及单位面积与单位长度热损失量高于真实值,即计算结果存在正向偏差。

表 4 单位面积热损失量计算结果对比

Tab.4 Comparison of calculation results of unit area heat loss W/m²

项目	单位面积热损失量										
	DN20	DN25	DN32	DN40	DN50	DN65	DN80	DN100	DN125	DN150	DN200
$T_0=70\text{ }^{\circ}\text{C}$	25.303 1	25.304 6	25.306 2	25.307 1	25.308 9	25.310 4	25.312 1	25.314 5	25.316 6	25.318 4	25.321 4
$T_0=65\text{ }^{\circ}\text{C}$	23.902 5	23.903 8	23.905 3	23.906 1	23.907 7	23.909 2	23.910 7	23.912 9	23.914 8	23.916 5	23.919 2
$T_0=60\text{ }^{\circ}\text{C}$	22.438 5	22.439 7	22.441 0	22.441 8	22.443 2	22.444 6	22.446 0	22.447 9	22.449 7	22.451 2	22.453 7
$T_0=55\text{ }^{\circ}\text{C}$	20.897 9	20.899 0	20.900 2	20.900 9	20.902 2	20.903 4	20.904 6	20.906 4	20.908 0	20.909 3	20.911 5
$T_0=50\text{ }^{\circ}\text{C}$	19.262 5	19.263 4	19.264 5	19.265 1	19.266 2	19.267 2	19.268 4	19.269 9	19.271 3	19.272 5	19.274 4

5 从数学角度对公式进行分析

将式(9)~(11)、式(17)以及式(18)代入式(15),经整理化简后可得式(21)。

5.1 单位面积热损失量

从数学角度对单位面积热损失量进行分析,式(21)的计算具体如下:

$$Q = \frac{80 \times [0.034 + 0.000\,065 \times (60 + T_s)]}{D_1 \ln \frac{D_1}{D_0} + \frac{2 \times [0.034 + 0.000\,065 \times (60 + T_s)]}{\left\{ \frac{5.669 \times 0.25}{T_s - 20} \times \left[\left(\frac{273 + T_s}{100} \right)^4 - 2.93^4 \right] + \frac{26.4}{\sqrt{297 + 0.5 \times (T_s + 20)}} \left(\frac{T_s - 20}{D_1} \right)^{0.25} \right\}}}$$

(21)

对于某一计算管路, D_0 为确定值,式(21)等号右侧是1个含有参数变量 T_s 和 D_1 的代数式,而左侧只含变量 Q 。 T_s 的取值范围为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}<T_s<50\text{ }^{\circ}\text{C}$, D_1 的取值范围为 $0.065\text{ m}<D_1<0.380\text{ m}$ 。该等式在以变量 Q 为 z 轴、 T_s 为 x 轴、 D_1 为 y 轴的三维坐标系中是1个曲面。同理,式(13)在以变量 Q 为 z 轴、 T_s 为 x 轴、 D_1 为 y 轴的三维坐标系中同样也是1个曲面。

这一传热过程中,当给定保温层材料和保温层厚度时,即存在相应的传热热阻和导热热流量与之对应。当满足以上各个界面的边界条件时,保温层厚度、传热热阻和导热热流量等相关参数会存在很多组对应的结果。保温层厚度小,相应的传热热阻就小,导热热流量就大;保温层厚度大,相应的传热热阻就大,导热热流量就小。因此,从传热学理论的角度分析,同时满足式(8)和式(15)的相关参数存在无数组。

根据传热学理论,对于某一热水管道,在稳态情况下,热水的热流量经管道管壁、保温层结构及其表面传导到周围环境中,通过各个界面的导热热流量是恒定的^[4]。式(21)由式(15)推导而来,式(15)以管壁外表面和管壁外的部分之间的分界面为研究对象,其分子为两界面的温度差,分母为界面之间的传热热阻,二者之比即为界面间的导热热流量。式(13)由式(8)推导而来,对式(8)进行移项变形后可得下式:

$$Q = \frac{T_s - T_a}{1/\alpha_s}$$

(22)

同时满足式(13)和式(21)的解,即为二者对应函数图像的相交部分。两曲面相交形成1条曲线,曲线上包含无穷个点,对应存在无穷多组解,这与上述传热学机理的物理意义相符。因此,仅依靠式(13)和式(21)无法唯一确定保温层厚度及对应的散热量,尚需额外引入1项约束条件。

式(22)取管道保温结构外表面和保温结构外的环境之间的分界面为研究对象,其分子为两界面的温度差,分母为界面之间的传热热阻,二者之比即为界面间的导热热流量。式(8)和式(15)选取的研究界面不同,但界面之间的导热热流量相同。在

式(14)是在热损失费用与保温材料投资费用之和达到最经济合理的条件下,各参数需满足的等式。经整理化简后,该式表现为关于参数变量 T_s 和 D_1 的隐函数,形式较为复杂,难以直接确定其函数图像。将式(14)与式(15)联立,可得式(20),该式即包含了式(14)的约束条件。式(20)在以变量 Q 为 z 轴、 T_s 为 x 轴、 D_1 为 y 轴的三维坐标系中是1个与 y 轴平行的曲面。

例如,当 $D_0=0.0269\text{ m}$ 时,式(21)、式(13)和式(20)对应的函数图像见图1。

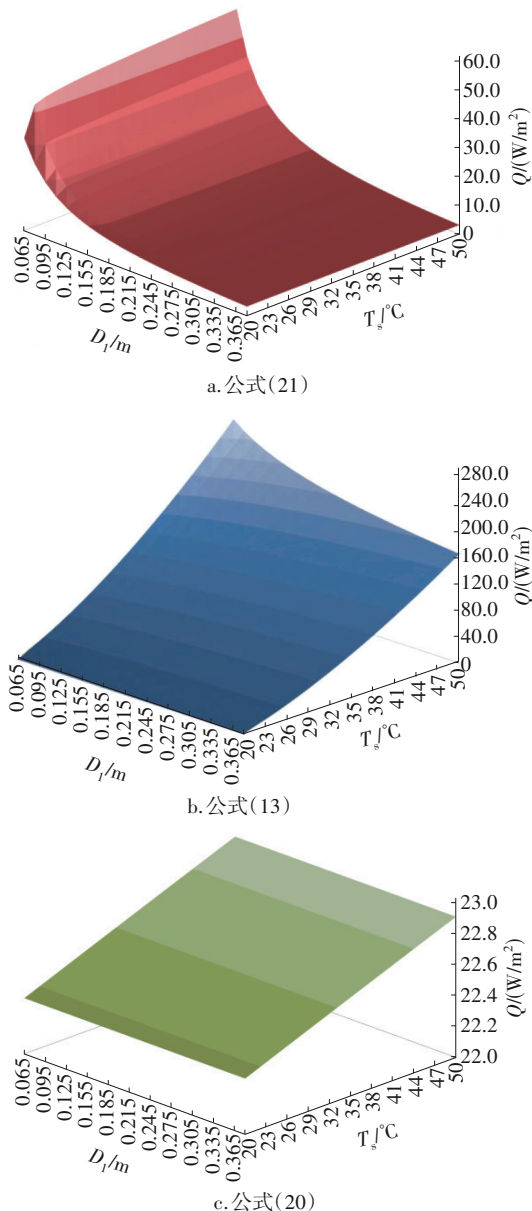


图1 不同数学公式对应的函数图像

Fig.1 Function graphs corresponding to different mathematical formulas

图1(a)、(b)、(c)的交点即为同时满足式(13)、式(20)和式(21)的解。此解即为热水管道同时满足不同界面间传热的边界条件和总投资费用经济合理要求的对应参数值。

综上,采用“经济厚度”的计算方法,引入约束条件式(14),利用传热学理论公式得到3个含有参数 Q 、 T_s 和 D_1 的等式,可以得出确定的唯一解。

5.2 保温结构外表面换热系数

“绝热通则”第5.3.2.1条规定,在经济厚度和热损失计算中, α_s 一般取 $11.63\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。根据“绝热规范”第5.8.4条及条文说明可知,保温结构外表面换热系数取 $11.63\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,其对应的保护层立足基点为抹面。鉴于当前金属保护层已广泛应用,有必要进一步区分保护层材料对换热系数的影响。将 $T_a=20\text{ }^\circ\text{C}$ 、式(10)和式(11)代入式(9)可得下式:

$$\alpha_s = \frac{5.669\varepsilon}{T_s - 20} \times \left[\left(\frac{273 + T_s}{100} \right)^4 - 2.93^4 \right] + \frac{26.4}{\sqrt{297 + 0.5 \times (T_s + 20)}} \left(\frac{T_s - 20}{D_1} \right)^{0.25} \quad (23)$$

分析式(23),当环境温度 T_a 和黑度 ε 确定后,保温结构外表面换热系数 α_s 主要与参数变量 T_s 和 D_1 有关。将 $\varepsilon=0.25$ 代入式(23),该等式在以变量 α_s 为 z 轴、 T_s 为 x 轴、 D_1 为 y 轴的三维坐标系中是1个曲面,对应的函数图像如图2所示。

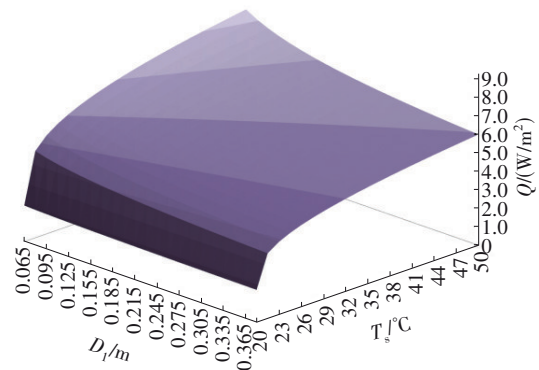


图2 公式(23)对应的函数图像

Fig.2 Function graph corresponding to mathematical formula (23)

由图2可知,当 T_s 在 $(20, 50)\text{ }^\circ\text{C}$ 区间时, α_s 随温度升高而单调递增;当 D_1 在 $(0.065, 0.380)\text{ m}$ 区间时, α_s 随外径增大而单调递减。因此,当 $T_s=50\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $D_1=0.065\text{ m}$ 时, α_s 取得最大值 $8.3759\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;当 $T_s=20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $D_1=0.380\text{ m}$ 时, α_s 取得最小值 $1.4260\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。同样,当 $\varepsilon=0.90$ 时,可以计算得到 α_s 的最大值为 $12.6927\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,最小值为 $5.1335\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

综上,在 $T_a=20\text{ }^\circ\text{C}$ 的前提下, α_s 的取值范围为 $(1.4260, 12.6927)\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。保温结构外表面

换热系数越大,导热热阻越小,热流量散失就越快^[4]。因此,直接将 α_s 采用固定值 $11.63\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 并不合理,应基于具体项目的设计参数,通过计算确定该值。

6 实例计算结果及分析

为便于计算对比,采用“教材”和“手册”中的热水管网计算实例。

“教材”P366实例:华北某城市一幢12层宾馆,客房共114套,设有504个床位,宾馆员工30人。设置集中生活热水系统,水加热器出口温度 $70\text{ }^\circ\text{C}$,室内环境温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$,保温材料为泡沫橡塑制品,保温系数 $\eta=0.6$ 。按照上述方法计算配水管网热损失,具体见表5和表6。

表5 上区管网热损失量计算结果

Tab.5 Calculation results of heat loss of pipe network in upper area

管径	绝热层厚度/mm	单位长度热损失量/(W/m)	管长/m	热损失量/W
DN32	43.2	10.233 9	18.0	184.210 2
DN40	44.4	10.890 9	36.0	392.072 4
DN50	46.4	12.168 8	72.0	876.153 6
DN65	48.2	13.456 5	34.6	465.594 9
DN80	50.0	15.005 9	15.0	225.088 5
DN100	52.2	17.381 5	50.5	877.765 8

表6 下区管网热损失量计算结果

Tab.6 Calculation results of heat loss of pipe network in lower area

管径	绝热层厚度/mm	单位长度热损失量/(W/m)	管长/m	热损失量/W
DN32	43.2	10.233 9	18.0	184.210 2
DN40	44.4	10.890 9	33.6	365.934 2
DN50	46.4	12.168 8	5.4	65.711 5
DN65	48.2	13.456 5	46.5	625.727 3

由表5可知,上区管网热损失量约为 $3\,020.88\text{ W}$,”教材”计算值为 $18\,600\text{ W}$,是前者的6.16倍。由表6可知,下区管网热损失量约为 $1\,241.58\text{ W}$,”教材”计算值为 $5\,900\text{ W}$,是前者的4.75倍。

“手册”P602实例:某5层疗养建筑,设有280张床位,70套病房卫生间。设置集中生活热水系统,水加热器出口温度 $55\text{ }^\circ\text{C}$,室内环境温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$,保温材料为泡沫橡塑制品,保温系数 $\eta=0.7$ 。按照上述方法计算配水管网热损失,具体见表7。

由表7可知,热水配水管网的热损失量为

$3\,081.011\,6\text{ W}$,即 $11\,091.64\text{ kJ/h}$ 。”手册”中计算值为 $16\,562.20\text{ kJ/h}$,为前者的1.49倍。

表7 管网热损失量计算结果

Tab.7 Calculation results of heat loss of pipe network

管径	绝热层厚度/mm	单位长度热损失量/(W/m)	管长/m	热损失量/W
DN20	33.2	6.124 7	19.6	120.044 1
DN25	34.9	6.785 2	50.4	341.974 1
DN32	36.5	7.577 1	151.2	1 145.657 5
DN40	37.5	8.090 5	68.2	551.772 1
DN50	39.1	9.092 6	68.0	618.296 8
DN65	40.5	10.108 9	30.0	303.267 0

根据上述计算可知,采用“经济厚度”计算方法,可先计算出各管径对应的经济保温层厚度及其单位长度热损失量,再统计出不同管径的管长,从而便捷地计算出管网的热损失量。该方法的计算结果均低于“教材”与“手册”中的计算值,且显著小于“教材”中计算结果。

7 结论

① 生活热水管道的保温层厚度应按“经济厚度”的方法确定。可以利用“绝热规范”中的公式将保温层厚度计算与热损失量计算相互关联。从数学角度来看,“经济厚度”计算方法中的单位面积热损失量与绝热层外表面温度、经济保温层厚度存在唯一的函数对应关系。

② “教材”和“手册”将管网热损失量计算与保温层厚度计算各自独立,不符合传热学基础理论,是一种近似计算方法。建议基于热水管网已确定的设计参数,采用“经济厚度”计算方法,借助Excel软件分别计算各管径保温层厚度及对应的单位长度热损失量。计算过程采用的公式均具有传热学理论基础,且理论证明其计算结果偏差方向为正,准确性相对较高。

③ 保温结构外表面换热系数与外表面材料的黑度、绝热层外径及绝热层外表面温度有关。“绝热导则”按 $11.63\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 对换热系数进行取值的方法并不适用于集中生活热水系统,建议根据具体项目对应的设计参数,经计算后确定其准确数值。

④ 管网热损失量与能量价格、管道外径、管道外表面温度、保温层厚度以及绝热层材料等因素密切相关。其中,能量价格的变动对其影响较大。

优化生活热水管网的管径设计,合理设定热水管网的运行温度,是生活热水系统设计中降低管网热损失、实现节能的有效措施。

⑤ 该研究计算选取的已知参数,如管材、管道内外径、管道外表面温度、环境温度、保温材料、绝热结构外表面材料的黑度及能量价格等,在实际项目中应根据具体条件分析确定。

参考文献:

- [1] 王增长,岳秀萍. 建筑给水排水工程[M]. 8版. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
WANG Z Z, YUE X P. Building Water Supply and Sewerage [M]. 8th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021(in Chinese).
- [2] 中国建筑研究院有限公司. 建筑给水排水设计手册[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社, 2018.
China Architecture Design & Research Group. Design Manual for Building Water Supply and Drainage [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018(in Chinese).
- [3] 崔景立,宋南,杨进春,等. 集中生活热水系统循环流量有关问题研究[J]. 给水排水, 2024, 50(3):91-95.
CUI J L, SONG N, YANG J C, et al. Research on circulation flow of central domestic hot water system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50 (3): 91-95 (in Chinese).
- [4] 章熙民. 传热学[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
ZHANG X M. Heat Transmission Science[M]. 5th ed.

Beijing: China Architecture & Building Press, 2007(in Chinese).

- [5] 王会斌. 热水系统循环流量的精确计算[J]. 给水排水, 2011, 37(增刊1):375-376.
WANG H B. Accurate calculation of circulating flow rate in hot water systems [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(S1): 375-376 (in Chinese).
- [6] 赵世明,高峰. 生活热水供应系统热能节省技术[J]. 给水排水,2009,35(2):69-72.
ZHAO S M, GAO F. Energy-saving technology for domestic hot water supply systems [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35 (2) : 69-72 (in Chinese).
- [7] 王耀堂,高峰,赵世明,等. 广州亚运城生活热水管网系统设计与能耗分析[J]. 给水排水,2011,37(7):80-84.
WANG Y T, GAO F, ZHAO S M, et al. Design and energy consumption analysis of domestic hot water pipe network system for Guangzhou Asian Games Town [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(7): 80-84 (in Chinese).

作者简介:孙宏伟(1981—),男,河南郑州人,本科,高级工程师,注册公用设备工程师(给水排水),给排水专业总工,主要从事建筑给排水及消防设计工作。

E-mail:411523466@qq.com

收稿日期:2025-01-07

修回日期:2025-03-03

(编辑:沈靖怡)

用生命之水,筑美丽中国