

# 全蓄冷工况下区域供冷管网最优化运行分析

王兴辉

深圳市特发小梅沙智慧能源有限公司

**摘要:** 本文分析了区域集中供冷管网的冷损失组成部分, 探究全蓄冷工况下区域集中供冷管网的最优化运行。通过两个极端案例的计算, 综合考虑二级泵耗能损失与管网热传导冷损失的情况下, 对于全蓄冷工况下的区域供冷管网运行, 大部分情况下可通过降低出水温度的方式来降低管网冷损失。

**关键词:** 区域供冷; 管网损失; 二级泵损耗; 供水温度

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.22.116

**前言:** 随着时代的发展, 能源的制约成为了社会发展的限制性因素。特别在集约化、高效率的城市化发展中, 如何高效用能便成为一个社会高度关注的问题。区域供冷冷源“集中管理、分散输运、蓄冷运行”的模式有助于实现运维的集约化、高效化和专业化, 能够较好地产生经济效益和社会效益, 目前这一模式得到越来越广泛的应用, 但是与传统中央空调系统管网小型化相比, 区域化的供冷管网导致的能耗损失增加始终成为众多学者争议的焦点。在冷站的冷源侧节能和管网生命周期设计等方面有了较多考虑, 但是对于已建成管网的最优运行探讨较少。在区域供冷管网运行过程中, 主要存在两个相反的约束, 在满足一定负荷的条件下, 降低冷站供水温度运行则二级水泵功耗导致的冷损失降低但管网热传导导致的冷损失增加, 升高供水温度运行则管网热传导导致的冷损失减少而二级水泵功耗导致的冷损失增加, 基于此本文以区域供冷管网为研究对象, 探究在全蓄冷工况下管网的最优化运行。

## 一、基本假设

本文以区域供冷管网作为研究对象, 探究在全蓄冷工况下的最优化运行, 其隐含有以下三条基本假设和前提: (1) 本文所述区域供冷管网为已建成的供冷管网, 因此不从投资、建设等全生命周期角度考虑供冷管网的投资、运行最优化。(2) 本文所述区域供冷管网仅探讨全蓄冷工况下的管网最优运行, 在全蓄冷工况下冷站的供水温度与冷站主机能效无关, 冷站供水温度仅影响区域供冷管网的冷损失。(3) 不同冷站供水温度下能够确保用户侧的负荷且回水温度保持一致。

## 二、管网冷损失组成及计算方法

区域供冷管网损失通常由三部分组成: 第一部分是因管网泄露导致的冷量损失; 第二部分是管网热传导导致的冷量损失; 第三部分是二级泵组的功耗导致的冷量损失。因管网泄露导致的冷量损失属于可避免冷损失因

此本文暂不考虑管网泄露导致的冷损失。

### (一) 直埋管热传导导致的冷量损失

区域供冷管网所使用的保温管通常由外护管、保温层和钢管组成, 通常以直埋的方式直接敷设在土壤中, 且埋深深度较深。管网热传导导致的冷量损失主要由低温水与土壤温差、管道长度和直埋管的热阻决定, 影响管网热传导冷量损失的几个因素中最重要的即是直埋管热阻。

直埋管的热阻主要由钢管热阻、保温层热阻和土壤热阻组成, 其计算如下式所示:

$$R_t = R_p + R_b + R_s \quad (1)$$

其中 $R_t$ 为总热阻,  $m \cdot ^\circ C/W$ ;  $R_p$ 为钢管热阻,  $m \cdot ^\circ C/W$ ;  $R_b$ 为保温层热阻,  $m \cdot ^\circ C/W$ ;  $R_s$ 为土壤热阻,  $m \cdot ^\circ C/W$ 。

钢管热阻主要取决于钢管外径、钢管内径和钢管导热系数, 其计算如下式所示:

$$R_p = \frac{\ln \frac{d_{out}}{d}}{2\pi\lambda_p} \quad (2)$$

其中 $d_{out}$ 、 $d$ 分别是钢管外径和内径,  $m$ ;  $\lambda_p$ 是钢管的导热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;

钢管保温热阻主要取决于钢管外径、保温层厚度和保温导热系数, 其计算如下式所示:

$$R_b = \frac{\ln \frac{d_{out} + 2\delta}{d_{out}}}{2\pi\lambda_b} \quad (3)$$

其中 $\delta$ 为保温层厚度,  $m$ ;  $\lambda_b$ 为保温层导热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;

因直埋管埋深较深, 埋深与保温管外径之比大于2, 根据参考相关文件, 土壤热阻主要由管道埋深、管道外径、保温层厚度和土壤导热系数确定, 土壤热阻可按式计算:

$$R_s = \frac{\ln \frac{h}{d_{out} + 2\delta}}{2\pi\lambda_s} \quad (4)$$

$h$ 为埋深,  $m$ ;  $\lambda_s$ 为土壤导热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

综上可知直埋管热传导导致的冷量损失由下式计算:

$$Q_1 = \frac{t_s - t_w}{R_t} l_2 \quad (5)$$

$Q_1$ 表示直埋管热传导导致的冷损失, W;  $t_s$ 为土壤平均温度, °C;  $t_w$ 为管内流体的温度, °C;  $l_2$ 为直埋管的长度, m;

将供水温度和回水温度代入式(5)可得下式:

$$Q_1 = \frac{2t_s - t_{wh} - t_{wg}}{R_t} l_2 \quad (6)$$

其中 $l_2$ 表示单程管长, 即供水管或回水管长度, m;

### (二) 二级水泵功耗导致的冷损失

对于区域供冷而言, 连接冷站与用户的是管网, 而驱动冷冻水从冷站向用户传输的则是二级水泵, 二级水泵在传输的过程中对水做工, 最终二级泵对水做的功以热量的形式耗散在冷冻水中, 导致冷冻水温度上升, 因此可以认为二级泵的有用功耗散在冷冻水中。二级泵做功的量可由两个管网内供回水压差和管网冷冻水流量共同确定, 考虑到工程实际中常用单位为流量单位为 $m^3/h$ , 压差单位为m因此二级泵有用功耗可由下式计算:

$$W_p = 2.73QH \quad (7)$$

$W_p$ 表示水泵对冷冻水做的有用功, W;  $Q$ 为管网流量,  $m^3/h$ ,  $H$ 为扬程m, 2.73为转换系数。

### (三) 管网冷损失

综合前文可知管网冷损失由两部分组成, 一部分是二级泵功耗导致的损失, 另一部分则是管网的热传导导致的冷量损失, 因此管网冷损失由下式计算:

$$Q_2 = W_p + Q_1 \quad (8)$$

其中 $Q_2$ 表示管网冷损失, W;  $W_p$ 表示水泵对冷冻水做的有用功, W;  $Q_1$ 表示直埋管热传导导致的冷损失, W。

将式(7)和(6)代入式(8), 可得以下管网冷

损失计算公式:

$$Q_2 = 2.73QH + \frac{2t_s - t_{wh} - t_{wg}}{R_t} l_2 \quad (9)$$

在确定的供冷管网中供冷负荷由下式计算:

$$P = 1167 (t_{wh} - t_{wg}) * Q \quad (10)$$

其中 $P$ 表示供冷负荷, W;

对于某一确定管网存在以下关系式:

$$H = cQ^2 \quad (11)$$

其中 $c$ 为管网阻力系数;

将式(10)、(11)代入式(9), 可得管网冷损失计算公式:

$$Q_2 = 1.72 * 10^{-9} c \frac{P^3}{(t_{wh} - t_{wg})^3} + \frac{2t_s l_2}{R_t} - \frac{t_{wg} l_2}{R_t} - \frac{t_{wh} l_2}{R_t} \quad (12)$$

根据前文基本假设, 对给定管网, 在回水温度 $t_{wh}$ 和总冷负荷 $P$ 不变的情况下,  $P$ 、 $t_s$ 、 $l_2$ 、 $R_t$ 、 $t_{wh}$ 可认为是常数, 因此管网冷损失可认为由供水温度确定, 在冷站供水温度范围内, 存在一个供水温度, 使得管网冷损失最小。

### 三、实例

假设在广州地区存在一个区域供冷站, 二级泵组输送最大总冷负荷为27000kw, 最大流量3000 $m^3/h$ , 出站口DN900管道, 在用户侧则有81个用户, 且均集中在距离冷站1.5km处, 分别考虑以下两种管网配置情况: 第一种管网是设置一组DN900供回水管道直接敷设1.5km后接入到81个用户; 第二种管网是在冷站DN900管道并联接入81组DN100供回水管道后敷设1.5km分别接入81个用户。根据前文基本假设, 用户侧负荷不变, 两种管网均

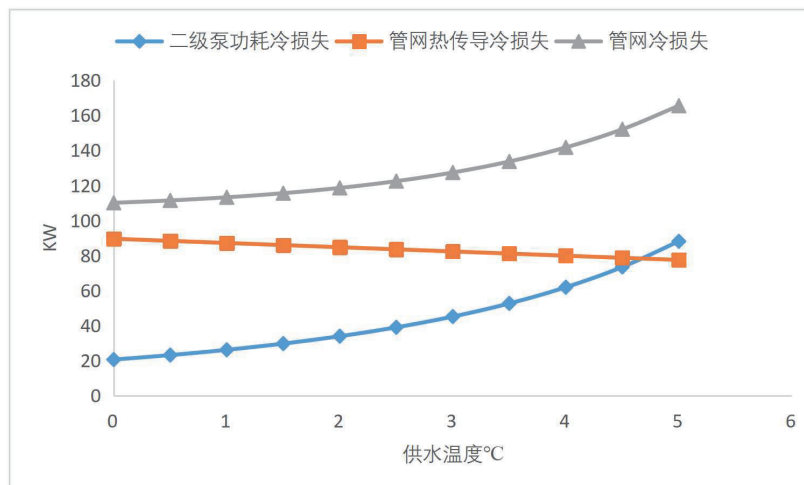


图1 第一种管网的管网冷损失

在全蓄冷工况下运行。在前文基本假设条件下依据式(15)对两种管网的冷损失进行计算,在式(15)中,所需负荷、热阻可由前文实例参数计算而来;对于钢管的导热系数,查询相关标准文件取 $52.8\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ,土壤的导热系数取 $1.7\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ,根据文献结果,土壤年均温度 $t_s$ 选用 $25^\circ\text{C}$ 。同时在式(15)中还需管网阻力系数,两种不同管网阻力差异较大,第一种管网 $c$ 选用 $0.013\text{pa}/(\text{m}^3/\text{h})^2$ ,第二种管网 $c$ 选用 $0.047\text{pa}/(\text{m}^3/\text{h})^2$ 。对于第一种管网,总管口径大,其管网阻力小,其计算结果如图1所示,在供水温度 $0^\circ\text{C}$ – $5^\circ\text{C}$ 的范围内,二级泵功耗导致的管网损失和管网热传导导致的能耗损失处于同一数量级,供水温度为 $0^\circ\text{C}$ 时管网冷损失最小。而随着供水温度的提升,管网热传导导致的冷损失缓慢降低,而二级泵功耗导致的冷损失则由于流量的增加呈现指数级上升,因此管网冷损失总体出现类指数级增加的趋势。

第一种管网在全蓄冷工况下的运行中,供水温度提升导致的二级泵功耗冷损失的增长速度远大于管网热传导损失降低速度,因此为了降低能耗,对于第一种管网应尽可能降低冷站的供水温度。

对于第二种给定的管网,由81组分支管组成,其管网单个管到小,管网散热面积大,管网损失较大。如图2所示,对于第二种管网,管网热传导损失远大于二级泵功耗导致的冷损失,在供水温度 $0^\circ\text{C}$ – $5^\circ\text{C}$ 的范围内,管网冷损失随供水温度先下降后上升,在供水温度 $2.5^\circ\text{C}$ 时管网冷损失达到最小。在第二种管网中,虽然二级泵功耗导致的冷损失随着温度升高呈现指数级增长,但是由于两者数量级差距太远,使得二级泵功耗导致的冷损失对管网冷损失很小,因此虽然管网冷损失随着供水温度呈现先下降后上升的趋势,但是在供水温度 $0^\circ\text{C}$ – $5^\circ\text{C}$ 范围内,管网冷损失变化非常小。

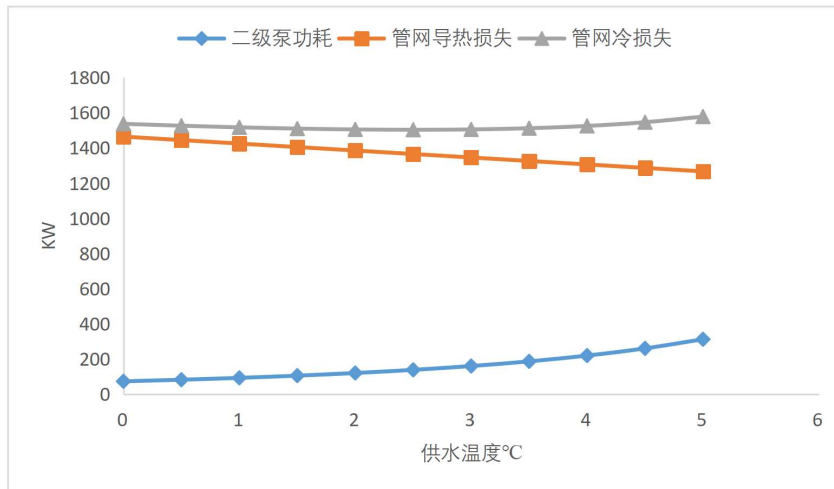


图2 第二种管网的管网冷损失

对于第二种管网在全蓄冷工况运行中,与二级泵耗能导致的冷损失相比,管网热传导导致的冷损失处于绝对地位,因此二级泵耗能随供水温度的增加导致管网冷损失随着供水温度产生“微型微笑曲线”,管网冷损失幅度变化不大,但是依然存在一个供水温度,使得管网冷损失处于最小。

**结论**

全蓄冷工况下的区域集中供冷,无需考虑冷站出水温度对主机能耗的影响,因此可将出水温度作为影响管网能耗的变量,以实例中两种极端案例举例,说明在管网热传导损失与二级泵能耗处于同一量级时,允许的供冷温度越低,则管网冷损失越小;而管网热传导损失远大于二级泵功耗损失的情况下,存在某一供冷温度使得管网冷损失最小化,但是由于管网热传导损失远大于二

级泵功耗损失,因此供冷温度变化对管网冷损失的绝对值影响不大。但是在最小管网冷损失右侧,依然可以采取降低冷站出水温度的策略确保管网冷损失最小化。

**参考文献**

[1] 李爽. 冷站系统全变频改造及节能分析[J]. 制冷与空调, 2015, 35(12): 4.  
 [2] 胡天玥. 区域供冷系统比摩阻及供冷半径研究[D]. 重庆大学, 2020.  
 [3] 张国强, 徐玉珍, 韩杰, 等. 区域供冷系统供回水经济温差优化模型研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(9): 6.  
 [4] 王晓兵, 陈燕萍, 许宇翔, 等. 基于长期监测的广州地区土壤温度推荐值[J]. 广东电力, 2011, 24(6): 4.