

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.22.022

北方某市山区温泉超长距离输送工程设计

徐 鹏, 潘 涛, 李 俊, 吴泽全
(合景泰富集团, 广东 广州 510000)

摘 要: 北方山区某温泉超长距离输送工程全长为48.146 km, 流量为60 m³/h, 通过导热模型计算温泉输送过程的导热情况, 以确定温泉沿程温度。然后以冬季最冷月温泉平均温度为条件, 得出管道水力坡降, 配合管道沿线高程, 确定了中途加压泵站的位置和扬程。基于温度对水力坡降及管道强度的影响, 对不同环境温度下管道强度进行复核, 合理选择普通或耐热管材。之后对水泵启停时的水击增压进行计算, 检验水锤对管道强度的影响, 进行水锤预防设计, 采用缓启缓闭措施减小水锤的影响。最后确定适合于该温泉输送系统的工程运行方案, 确保运行稳定。

关键词: 超长距离; 温泉; 导热; 水头损失; 水击增压

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)22-0125-05

Design of Super-long Distance Hot Spring Transportation Project in Mountain Area of a City in Northern China

XU Peng, PAN Tao, LI Jun, WU Ze-quan
(KWG Group Holdings, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The total length of a hot spring transportation project in mountain area in northern China is 48.146 km, the flow rate is 60 m³/h. The heat conduction of the hot spring transportation process was calculated with heat conduction model to determine the temperature along the pipeline. On the condition of the average temperature of the coldest hot spring in winter, the hydraulic slope of the pipeline was obtained, and the position and head of the pressure pumping station in midway were determined with the elevation along the pipeline. In view of the influence of temperature on hydraulic slope and pipe strength, the pipe strength under different ambient temperature was checked, and the common or heat-resistant pipe was selected reasonably. After that, the water hammer pressure was calculated, the influence of water hammer on pipe strength was tested, and the water hammer prevention design was carried out, and the measures of slow opening and slow closing were adopted to reduce the impact of water hammer. Finally, the project operation scheme suitable for the hot spring transportation system was determined to ensure stable operation.

Key words: super-long distance; hot spring; heat conduction; head loss; water hammer pressurization

温泉是一种具有显著价值的旅游资源,其不仅具有独特的健康理疗特性,也是对地热能的典型利用,能有效减少常规能源消耗和环境污染^[1]。

目前很多温泉输送工程由于设计不合理,管材选择未综合考虑,常存在管道破损、水质变差、温降

严重、接头脱节等问题。近些年国内外多位学者也就温泉输送的管材选择、温度计算、水质控制、运行方案等开展了大量的研究^[2-4],但对山区温泉超长距离输送过程中的设计研究尚不完善。笔者结合工程实例,针对山区地形变化大、长距离输送水力条件

复杂等特点,进行温泉输送过程的温度计算、水力分析、管道强度复核、水锤研究和运行方案设计。

1 工程概况

北方某市山区温泉超长距离输送工程,拟新建温泉输送管道,将温泉由出水点输送至山下调蓄池,供温泉酒店等用户使用。该工程目前处于施工准备阶段。管道全长为 48.146 km,设计流量为 60 m³/h,初始压力为 0.2 MPa,拟采用标准尺寸比 SDR = 13.6 的 dn200 PE100 管,其公称压力 PN = 1.25 MPa,公称壁厚 En = 0.014 7 m。根据冻土层厚度及输水管道沿线地形特征,输水管道全线管中心平均埋深取 1.5 m。本工程所在地区冬季最冷月平均气温为 -1.5 ℃,夏季最热月平均气温为 25.6 ℃。

2 温泉沿程温度

2.1 导热计算

输送的温泉向环境中导热的过程分为管壁导热和土壤导热两个阶段,温泉先通过管壁传热给管外土壤,土壤再向周边土壤及大气中传热。管壁导热按单层圆筒壁导热模型进行计算,输水管道热流量 Φ 为:

$$\Phi = \frac{2\pi \cdot l \cdot \lambda_1 (T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1)$$

式中 l ——管道长度,为 48 146 m

λ_1 ——管道导热系数,取 0.43 W/(m·℃)^[5]

T_1 ——管内壁温度,℃

T_2 ——管外壁温度,℃

r_1 ——管内壁半径,为 0.085 3 m

r_2 ——管外壁半径,为 0.1 m

计算得到输水管道热流量为 $8.181 \times 10^5 (T_1 - T_2)$ 。

土壤导热按多维稳态导热模型计算,因本工程输水管道长度相对于管道埋深无限大,且管道埋深大于 2 倍管径,所以输水管道热流量 Φ 为:

$$\Phi = S \cdot \lambda_2 \cdot (T_2 - T_3) = \frac{2\pi \cdot l}{\ln \frac{4H}{d}} \cdot \lambda_2 \cdot (T_2 - T_3) \quad (2)$$

式中 S ——多维稳态导热模型的形状因子

H ——管中心埋深,为 1.5 m

d ——管道外径,为 0.2 m

λ_2 ——土壤导热系数,根据当地土质情况取

$$1.1 \text{ W/(m} \cdot \text{℃)}^{[6]}$$

T_3 ——环境温度,℃

计算得到输水管道热流量为 $9.784 \times 10^4 (T_2 - T_3)$ 。

对于长时间稳态运行的系统,管壁导热和土壤导热的热流量相等,所以:

$$\Phi = 8.181 \times 10^5 (T_1 - T_2) = 9.784 \times 10^4 (T_2 - T_3)$$

取环境温度 $T_3 = 10 \text{ ℃}$,得到:

$$\Phi = 8.739 \times 10^4 T_1 - 8.739 \times 10^5$$

2.2 沿程温度计算

管道内温泉的温度随水流逐步降低,设温泉进入管道时的时间为 0,经过时间 t 温度降至:

$$T_1 = f(t) \quad (3)$$

根据温泉的温度变化,dt 时间内通过某一断面的温泉体积为 $\pi r_1^2 v dt$,这部分温泉通过 $v dt$ 长的管道向外传递的热量使其温度从 $f(t)$ 下降到 $f(t + dt)$,所以:

$$\pi \cdot r_1^2 \cdot v \cdot dt \cdot \rho \cdot c \cdot [f(t) - f(t + dt)] = \frac{v \cdot dt \cdot \Phi}{l} \cdot dt \quad (4)$$

式中 v ——管道内水流速,为 0.729 m/s

ρ ——水的密度,取 1 000 kg/m³

c ——水的比热容,为 $4.2 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{℃)}$

进行积分得到:

$$f(t) = e^{-1.892 \times 10^{-5}(t+x)} + 10 \quad (5)$$

因为温泉初始温度 $f(0) = 56$,代入计算得到:

$$f(t) = e^{-1.892 \times 10^{-5}(t-2.024 \times 10^5)} + 10 \quad (6)$$

环境温度为 10 ℃时,温泉沿程温度见图 1。

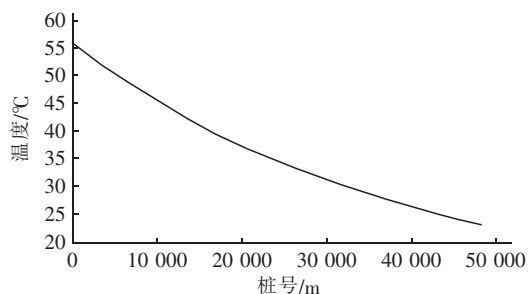


图1 温泉沿程温度(环境温度 10 ℃)

Fig.1 Temperature of the hot spring along pipeline (ambient temperature of 10 ℃)

不同环境温度下温泉沿程温度及出流温度如表 1 所示。

表 1 不同环境温度下温泉沿程温度及出流温度
Tab. 1 Temperature of the hot spring along pipeline and flowing from pipeline under different ambient temperature

环境温度 T ₃	温泉沿程温度	出流温 度 T _出
-1.5	$f(t) = e^{-0.000\,018\,92(t-214\,154)} - 1.5$	15.0
0	$f(t) = e^{-0.000\,018\,92(t-212\,756)}$	16.1
5	$f(t) = e^{-0.000\,018\,92(t-207\,813)} + 5$	19.6
10	$f(t) = e^{-0.000\,018\,92(t-202\,359)} + 10$	23.2
15	$f(t) = e^{-0.000\,018\,92(t-196\,278)} + 15$	26.8
20	$f(t) = e^{-0.000\,018\,92(t-189\,404)} + 20$	30.3
25	$f(t) = e^{-0.000\,018\,92(t-181\,500)} + 25$	33.9
25.6	$f(t) = e^{-0.000\,018\,92(t-180\,467)} + 25.6$	34.3

3 管道水力设计

3.1 水头损失计算

由于本工程全程较长,水头损失十分显著。输水管道水头损失包括沿程损失和局部损失^[7],输水管道全程水头损失 h 为:

$$h = \lambda \frac{l}{2r_1} \frac{v^2}{2g} + \sum \xi \frac{v^2}{2g} = \frac{0.25}{2\nu r_1^{0.226}} \frac{l}{2r_1} \frac{v^2}{2g} + \sum \xi \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

式中 λ ——摩阻系数
 ξ ——局部水头损失系数
 ν ——水的运动黏滞系数,为保证泵房扬程能满足全年各时段温泉的输送要求,水的运动黏滞系数取大值(最冷月温泉沿程平均温度下的运动黏滞系数),为 $7.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

局部损失按照沿程损失的 10% 计,则可以计算得到:

$$h = 0.003\,08l \quad (8)$$

输水管道水力坡降为 0.003 08。

3.2 加压泵房及减压阀设计

输水管道沿线地形高程如图 2 所示。

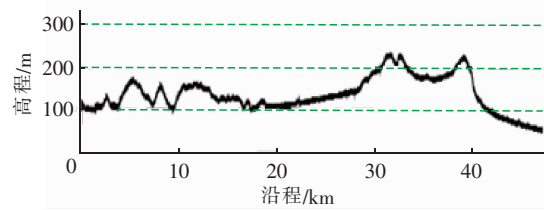


图 2 输水管道沿线地形纵断面图

Fig. 2 Topographic profile of the hot spring pipeline

本工程位于山地区域,地形起伏较大,最低处高程 52.59 m,最高处达 228.86 m。

沿程水力最不利点位于桩号 39 102 m 处,为保证水压能满足温泉输送要求,需沿途设加压泵房。根据沿线高程及水头损失情况,设计在桩号 4 102 m 和 28 531 m 处建设两座加压泵房,泵房扬程分别为 65 和 105 m。

对沿线各点进行压力校核,除桩号 39 102 m 后高程急减的陡坡段,其他段水压均能满足要求,在 0.05 ~ 1.25 MPa 范围内。

桩号 39 102 m 后高程急减的陡坡段水压超过管道公称压力 1.25 MPa,设计间隔设三处减压阀,保证水压不超过 0.80 MPa。

4 管道强度复核

一方面,管道内水温升高,会减小水的运动黏滞系数,进而减小管道输水过程的水头损失,导致相同条件下管道承受的水压增大;另一方面,高温会降低管道的公称压力,导致相同条件下管道的承压能力减小。因为加压泵房是按照最冷月温泉沿程平均温度设计的,所以需以最热月温泉沿程温度对沿程各点的承压能力进行校核。

当环境温度取夏季最热月平均气温 25.6 ℃ 时,计算可得最热月温泉沿程平均温度约为 45 ℃,水的运动黏滞系数 $\nu = 0.61 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,计算得到输水管道水力坡降为 0.002 76。

不同温度下 PE100 管公称压力的折减系数如表 2 所示。

表 2 不同温度下 PE100 管公称压力的折减系数

Tab. 2 Reduction factors of nominal pressure of PE100 pipe under different temperature

温度/℃	≤20	≤25	≤30	≤35	≤40	≤50
公称压力折减系数 f_1	1.0	0.93	0.87	0.80	0.74	0.63

以夏季最热月管道水力坡降和不同温度下管道公称压力折减系数,对沿程各点管道承压能力进行校核,发现部分管段水压超过管道的承压能力。设计在桩号 0 ~ 10 124 m、13 358 ~ 21 328 m 及 28 531 ~ 29 479 m 段采用公称压力 PN = 1.2 MPa 的 dn200 PE-RT II 型 S3.2 系列给水管,以保证全年各时段输水压力不超过管道公称压力^[8]。

温泉沿程温度(环境温度 25.6 ℃)及设计使用管材如图 3 所示。

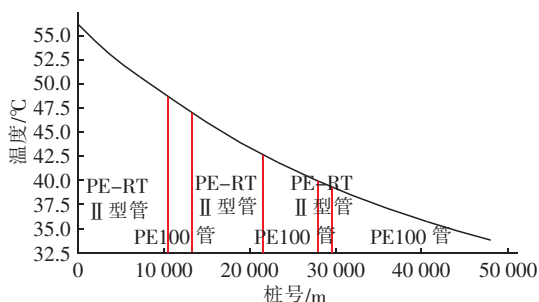


图3 温泉沿程温度(环境温度25.6℃)及管材

Fig.3 Temperature of the hot spring along pipeline (ambient environment of 25.6℃) and chosen pipe material

5 管道水锤分析

5.1 水锤预防说明

输水过程中,由于阀门或水泵的突然启闭,使水流速度发生剧烈变化,导致管道内水压突变的现象为水锤现象。阀门或水泵突然关闭,在惯性作用下后续水流继续向前流动,使管道内水压剧增,为正水锤。相反,关闭的阀门和水泵开启时,也会产生水锤,为负水锤,其相对于正水锤破坏作用较小。在实际工程中,水锤危害主要包括以下三方面:①由于管道内水压升高,造成管道或设备强度不够而破裂。②当管内压力降至汽化压力以下时,管道中某些截面流体发生汽化,水柱分离,造成管道气蚀,同时管道可能因负压过大发生塌瘪。当分离的水柱再次弥合时,会产生弥合水锤,对管壁造成冲击力。③流体压力聚变会导致管道接口发生变位和渗漏。

仅通过提高设计标准,选择强度更大的管道并不能实质性地解决水锤的破坏作用,还会造成工程浪费。首先需要在工程设计时,对可能产生的水击增压进行计算,复核管道和设备的强度,并根据复核结果修改设计方案,减小流速,增设防水锤设备。还需要在工程运营时,控制阀门启闭速度,制定相应的水锤防护策略。

5.2 水锤分析复核

根据儒可夫斯基公式^[9],阀门或水泵突然关闭产生的水击增压 Δp 为:

$$\Delta p = \rho c \cdot \Delta v = \rho \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{2r_1}{E_n \cdot E_p} + \frac{1}{E_w} \right)}} \cdot \Delta v \quad (9)$$

式中 E_p ——管道弹性模量,取 $1.00 \times 10^9 \text{ Pa}$ ^[10]

E_w ——水的体积模量,按最冷月温泉沿程平均温度取 $2.26 \times 10^9 \text{ Pa}$ ^[11]

Δv ——管道内水流速度变化值,为 0.729 m/s

计算得到水击增压为 0.210 MPa ,以沿线低点由高程产生的最大静水压与水击增压之和对管道强度进行校核,得到相应点水压均不超过输水管道的公称压力,不会造成管道破坏。

分析水击增压不是很大的原因,主要为采用PE塑料管,其弹性模量远小于钢管的 $2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 和球墨铸铁管的 $1.47 \times 10^{11} \text{ Pa}$;其次为管道流速较低,管道内水流速度变化值不大。

5.3 水锤预防设计

缓闭止回阀为防止破坏性水锤的一种阀门。设计在泵房出水口设置缓闭止回阀,防止水锤损坏加压泵。

设计在管道沿程高点设置 carx 型复合式排气阀,进气量 $0.023 \sim 0.046 \text{ m}^3/\text{s}$,大于管道流量。其既能满足正常运行时排除管道内空气的需要,也能满足停止运行时向管内充气,避免产生负压压瘪管道。

6 工程运行方案

6.1 启停泵方案

启泵程序:管道末端蓄水池液位下降至控制水位,触发启泵程序;采用液压控制,一级泵房前水压超过 0.2 MPa 时缓启一级泵房,一级泵房至二级泵房管道内水压和流速逐渐增大,将管道内气体排出;待二级泵房前水压超过 0.4 MPa 时缓启二级泵房,二级泵房后管道内水压和流速逐渐增大,将管道内气体排出,出水进入管道末端蓄水池内。

停泵程序:管道末端蓄水池液位达到控制水位,触发停泵程序;同时缓闭一级、二级泵房,120 s 内完全关闭;管道内的流速逐渐减小至 0,桩号 39 102 m 后高程急减的陡坡段管道内存水继续进入管道末端蓄水池内,最终被排空。

6.2 运行注意事项

启泵程序通过蓄水池液位和输水管内水压共同控制,停泵程序仅通过蓄水池液位控制。在停泵期间,由于管道渗漏可能造成一级泵房和二级泵房之间的管道中混入气体,所以需先开启一级泵房,将输水管中气体排放完毕,才能开启二级泵房,以免二级泵房发生空载运行,对水泵造成损坏。在蓄水池入口处设泄压阀,控制蓄水池进水压力。

7 结语

以北方某市山区一项温泉超长距离输送工程为

案例,经分析研究确定了不同环境温度下温泉沿程温度变化情况。计算得到最冷月输水管道水力坡降为0.003 08,根据沿线高程和水头损失确定了中途加压泵房的位置及扬程。对不同环境温度下的管道强度进行复核,并对强度不能满足要求的管段进行更换,改采用PE-RT II型S3.2系列给水管。对管道水击增压进行计算,并以此检验水锤对管道的影响,进行水锤预防设计。最后确定工程运行方案,保证输水系统稳定运行。

参考文献:

- [1] 沈惊宏,余兆旺,周葆华,等. 区域温泉旅游开发适宜性分析及其对策[J]. 自然资源学报,2013,28(12):2127-2139.
Shen Jinghong, Yu Zhaowang, Zhou Baohua, et al. Evaluation about tourism development suitability of hot spring in Hunan[J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(12):2127-2139(in Chinese).
- [2] Samsudin A R, Hamzah U, Rahman R A, et al. Thermal springs of Malaysia and their potential development[J]. J Asian Earth Sci, 1997,15(2/3):275-284.
- [3] 王学良,冯旭东,屠祥虹,等. 温泉应用的给排水技术探讨[J]. 给水排水,2008,34(3):74-78.
Wang Xueliang, Feng Xudong, Tu Xianghong, et al. Discussion on applied water technology for utilization of hot spring water[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008,34(3):74-78(in Chinese).
- [4] 杨靖宇,杨红. 住宅小区温泉集中热水供水系统设计要点[J]. 中国给水排水,2015,31(14):46-49.
Yang Jingyu, Yang Hong. Design points of hot spring central hot water supply system in residential area[J]. China Water & Wastewater, 2015,31(14):46-49(in Chinese).
- [5] 林振华. 温泉输送管道管材性能分析及应用建议[J]. 能源与环境,2010(2):84-85.
Lin Zhenhua. Performance analysis and application suggestion of hot spring pipeline[J]. Energy and Environment, 2010(2):84-85(in Chinese).
- [6] 周亚素. 土壤导热系数的现场测试方法[J]. 东华大学学报:自然科学版,2008,34(4):482-485.
Zhou Yasu. In site testing method of ground thermal conductivity[J]. Journal of Donghua University: Natural Science, 2008,34(4):482-485(in Chinese).
- [7] 中国市政工程西南设计研究院. 给水排水设计手册(第1册):常用资料[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China. Water Supply and Drainage Design Manual: Vol 1, Common Materials[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000(in Chinese).
- [8] GB/T 28799.2—2012, 冷热水用耐热聚乙烯(PE-RT)管道系统 第2部分:管材[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
GB/T 28799.2-2012, Plastics Piping Systems for Hot and Cold Water Installations—Polyethylene of Raised Temperature Resistance(PE-RT)—Part 2: Pipes[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013(in Chinese).
- [9] 吴迪,张剑,程永光,等. 内置软管的管道水锤波速理论计算公式[J]. 水利学报,2008,38(3):288-294.
Wu Di, Zhang Jian, Cheng Yongguang, et al. Formula for water hammer wave speed in conduits with thin rubber tube inside[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 38(3):288-294(in Chinese).
- [10] CJJ 101—2016, 埋地塑料给水管道工程技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
CJJ 101-2016, Technical Specification for Buried Plastic Pipeline of Water Supply Engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016(in Chinese).
- [11] GB/T 13663.2—2018, 给水用聚乙烯(PE)管道系统 第2部分:管材[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
GB/T 13663.2-2018, Polyethylene(PE) Piping Systems for Water Supply—Part 2: Pipes[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018(in Chinese).



作者简介:徐鹏(1991-),男,安徽芜湖人,硕士,工程师,主要从事给水水质控制技术的研究。

E-mail: pengxu16111@126.com

收稿日期:2019-09-26