

文章编号: 1671-6612 (2026) 02-203-07

地下消防水池结冻特性研究

祝心愿¹ 唐亮¹ 徐精凤²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司 济南 250013;

2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 针对严寒地区地下消防水池在冬季极易发生结冻, 从而导致整个消防系统失效这一重大安全问题, 以新疆双河市极端气候条件为研究背景, 开展了系统的传热与结冻特性研究。通过建立考虑土壤水相变过程的三维非稳态传热数学模型, 并采用显热容法处理复杂的移动边界问题, 精确模拟了消防水池及周边土壤在全年的温度场动态演化过程。研究揭示了水池各区域的冻结规律, 明确了顶部及左右上角点为高风险区域, 其全年冻结时长可达近80天。进而, 定量分析了关键设计参数的影响机制, 结果表明: 增加水池埋深可有效利用深层土壤的“恒温层”效应, 当埋深增至1.12米时, 冻结风险显著降低; 设置保温层能有效抑制热量流失, 但单一的顶板保温对受设备房低温环境影响的水池右上角改善有限, 必须结合右侧壁面保温才能实现全面防护, 当顶板与右侧保温层分别达到5cm和20cm时, 可实现零冻结率。研究为严寒地区地下消防水池的抗冻设计提供了深入的理论依据和具体、可行的优化设计策略。

【关键词】 地下消防水池; 传热; 结冻; 埋深; 保温

中图分类号 TU111.41 文献标志码 A

Study on Freezing Characteristics of Underground Fire Reservoirs

Zhu Xinyuan¹ Tang Liang¹ Xu Jingfeng²

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd, Jinan, 250013;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 This paper addresses the critical safety issue of underground fire reservoirs in severe cold regions being prone to freezing in winter, which can lead to the complete failure of the fire protection system. Focusing on the extreme climate conditions of Shuanghe City in Xinjiang, a systematic investigation into the heat transfer and freezing characteristics was conducted. A three-dimensional unsteady heat transfer model, accounting for the phase change of pore water in soil, was established. The apparent heat capacity method was employed to handle the complex moving boundary problem, enabling accurate simulation of the dynamic temperature evolution of the reservoir and surrounding soil throughout the year. The study revealed the freezing patterns, identifying the top and upper corners as high-risk zones, with an annual freezing duration of up to 80 days. Furthermore, a quantitative analysis of key design parameters was performed. The results demonstrate that increasing the burial depth effectively utilizes the "constant temperature" effect of deeper soil, with a depth of 1.12 meters significantly reducing freezing risk. While insulation layers effectively curb heat loss, roof insulation alone shows limited improvement for the upper right corner affected by the adjacent equipment room's low temperature. Comprehensive protection requires combined insulation on the roof and the right wall. A zero freezing rate was achieved with 5cm roof insulation and 20cm right-wall insulation. This research provides a solid

作者简介: 祝心愿 (1984.01-), 女, 本科, 高级工程师, E-mail: zhuxinyuan@spic.com.cn

通讯作者: 唐亮 (1983.09-), 男, 硕士研究生, 正高级工程师, E-mail: tangliang@sdepcei.com

收稿日期: 2025-11-10

theoretical basis and practical, optimized design strategies for the anti-freezing design of underground fire reservoirs in cold regions.

【Keywords】 Underground fire reservoirs; Heat transfer; Freezing; Burial depth; Thermal insulation

0 引言

消防水池作为消防系统的核心组成部分,在各类工业与民用建筑、交通隧道及能源设施中扮演着不可替代的角色。它们为自动喷淋系统、消火栓及其他灭火设备提供持续可靠的水源保障,是建筑物消防安全的第一道防线。在严寒地区,由于常年低温持续时间长、冻土深度大,地下消防水池作为消防系统的“心脏”,其抗冻性能直接关系到整个消防系统在极端气候条件下的运行可靠性^[1]。一旦地下消防水池因低温结冻,将导致供水功能障碍,使消防系统在火灾发生时完全失效,进而造成不可估量的人员伤亡和财产损失。因此,掌握地下消防水池的传热机理与结冻过程,精准预测其热工性能,对保障寒冷地区建筑消防安全具有至关重要的现实意义。

在寒冷地区地下消防水池防冻性能研究领域,国内外学者已从热工模型构建与防冻设计优化两方面展开了积极探索。在传热模型方面,研究主要聚焦于基于热平衡原理的简化解析方法与精细化数值模拟技术。翟计红等^[2]针对东北地区站房消防水池建立了考虑池顶、池壁与池底多路径传热的冻结时间估算模型,通过热平衡方程推导出考虑初始水温、土壤温度与保温层特性的冻结时间计算公式,为工程应用提供了实用工具。而在高原极端气候条件下,胡斌等^[3]则采用 ANSYS Fluent 软件构建了 WCDA 水池的三维非稳态传热模型,精细模拟了水体温度场分布与结冰风险,尤其关注了高原特殊气候条件下长波辐射、天空背景温度等参数对围护结构热过程的独特影响。在防冻设计优化方面,研究表明增加保温层厚度、提高埋深与覆土厚度、强化池顶与浅层池壁保温等措施均能有效延长冻结时间;特别是针对三维传热导致的池壁顶角局部低温问题,研究提出局部保温强化策略,并通过现场实测验证了其有效性,为极端环境下消防水池防冻设计提供了重要参考。这些研究从不同角度深化了对寒冷环境下消防水池传热机理与防冻设计关键技术的认识,为本研究提供了坚实的理论基础与方法借鉴。

由于近年来储热技术的发展,相关学者开展了地下储热的传热特性研究。关于埋地蓄热水体,保温层厚度、埋地水体尺寸、水箱埋深以及土壤的物性参数等因素都对其热损失分布和传热规律产生影响。许莉^[4]建立了倒金字塔形埋地储热水体数值仿真模型,指出储热水体总的热损失随着坡角的增加而降低,蓄热效率随水箱高度的减小而降低。Liu 等^[5]分析了高原气候下的地下水坑传热特性,发现地下水坑顶部、侧面和底部的热量损失分别占第一年热量损失的 34.2%、36%和 29.8%。Huang 等^[6]提出了一种通过地下水箱与土壤耦合加热来增加地下水箱蓄热能力的方法。结果表明,仅对水箱上半部分进行保温即可有效提高系统的蓄热能力。Bai 等^[7]对一个 3000m³的地下水池的蓄热量和温度分层进行了相关研究,在第一年,测得水池的总热损失为 98MWh,蓄热效率为 62%,热损失中 57%通过侧壁发生,30%通过顶部发生,其余通过坑底发生。

综合而言,消防水池在严寒地区建筑消防安全中具有关键作用,其防冻性能的保障是系统可靠运行的前提。尽管已有研究从热工模型构建与防冻措施优化等角度展开探索,形成了基于热平衡理论的简化解析方法与三维非稳态数值模拟技术,并在保温层设计、结构埋深等方面积累了有益经验;同时,地下储热技术的相关研究也为理解埋地水体的传热机制与热损失分布提供了重要参考,揭示了不同结构部位热损失比例、保温策略对蓄热性能的影响规律。然而,目前针对严寒地区地下消防水池的系统性传热与结冻特性研究仍较为缺乏,尤其在复杂边界条件与极端气候耦合作用下的温度场演化机理尚未充分揭示。为此,为准确掌握严寒气象条件下地下消防水池的传热与结冻特性,本文拟建立其传热过程的数理模型,系统分析消防水池及周边区域温度场的分布与动态变化规律,揭示关键结构参数与外界条件对传热过程的影响机制,并进一步开展埋地消防水池结冻情况的综合评价,以期为寒冷地区消防水池的抗防冻设计提供理论依据与技术参考。

1 地下消防水池传热模型

消防水池物理模型如图 1 所示, 水池部分顶部距离地面 0.45m, 底部距离地面 3.3m, 由于集水坑

的存在, 部分区域水池底部距地面 4.6m, 水池详细尺寸如图 1 所示, 水池右侧为泵房, 因此水池右侧按照空气区域计算。

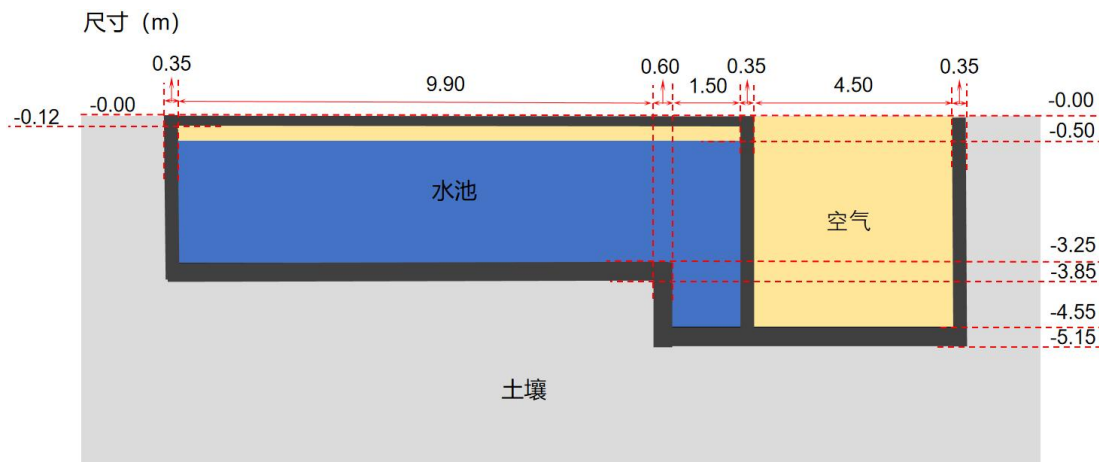


图 1 地下消防水池物理模型

Fig.1 Physical model of underground fire reservoir

土壤冻结是含湿多孔介质中复杂的相变过程, 为便于问题的分析, 在建立水池周围土壤冻结的数学模型时, 作以下假设:

- (1) 含湿土壤各向同性、均质;
- (2) 不考虑土壤中热湿耦合迁移和地下水流动对水池的影响;
- (3) 土壤的相变过程发生在一个小的温度范围内;
- (4) 忽略水在相变时的体积变化;
- (5) 在土壤的冻结区及未冻结区, 土壤的物性参数分别为常数。

考虑相变的土壤导热控制方程如式 (1) 所示。

$$C_{V,eff} \frac{\partial t_g}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial t_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial t_g}{\partial y} \right) \quad (1)$$

上述土壤区域的导热是一个涉及土壤中水相变的非线性导热问题。伴有相变的传热问题又称为移动边界问题, 其特点是在求解域内存在位置随时间变化的两相界面, 并在该界面释放或吸收热量, 目前除了少数简单情况能获得解析解外, 一般情况下都采用近似方法或数值方法求解。对于土壤中水的冻结, 常见的处理方法有焓法、显热容法、固相增量法等。本文中应用显热容法, 假设土壤中水的相变是发生在相变温度 t_m 附近的一个小的温度区间 $t_m - \Delta t \leq t \leq t_m + \Delta t$ 内, 构造的热容和导热系数的表达式如式 (2) (3) 所示。

$$\lambda_{eff} = \begin{cases} \lambda_s & (t_g < t_m - \Delta t) \\ \lambda_s + \frac{\lambda_l - \lambda_s}{2\Delta t} [t_g - (t_m - \Delta t)] & (t_m - \Delta t \leq t_g \leq t_m + \Delta t) \\ \lambda_l & (t_g > t_m + \Delta t) \end{cases} \quad (2)$$

$$C_{V,eff} = \begin{cases} C_s & (t_g < t_m - \Delta t) \\ \frac{L\varepsilon}{2\Delta t} + \frac{C_s + C_l}{2} & (t_m - \Delta t \leq t_g \leq t_m + \Delta t) \\ C_l & (t_g > t_m + \Delta t) \end{cases} \quad (3)$$

式中： τ 为时间，s； t_g 为土壤温度， $^{\circ}\text{C}$ ； λ_{eff} 为土壤导热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； $C_{V,eff}$ 为土壤体积热容， $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； L 为水的相变潜热或冰的熔解热， J/kg ； t_m 为土壤中水的相变温度， $^{\circ}\text{C}$ ； λ_s 、 λ_l 为冻结土壤、未冻结土壤的导热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； C_s 、 C_l 为冻结土壤、未冻结土壤的体积容积， $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

各热特性参数可确定：

冻结区：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_s &= \lambda_g (1 - \varepsilon) + \varepsilon \lambda_i \\ c_s &= c_g (1 - \varepsilon) + \varepsilon c_i \\ \rho_s &= \rho_g (1 - \varepsilon) + \varepsilon \rho_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

未冻结区：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_l &= \lambda_g (1 - \varepsilon) + \varepsilon \lambda_w \\ c_l &= c_g (1 - \varepsilon) + \varepsilon c_w \\ \rho_l &= \rho_g (1 - \varepsilon) + \varepsilon \rho_w \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中：下标 g 为土壤； i 为冻结冰； w 为水；

$c_s = C_s / \rho_s$ ； $c_g = C_g / \rho_g$ ； $c_i = C_i / \rho_i$ ； $c_l = C_l / \rho_l$ ； $c_w = C_w / \rho_w$ 。

(1) 初始条件

水池初始条件为温度条件：

$$T_w(x, t)|_{t=0} = T_{w0}(x, 0) \quad (6)$$

水池表面与空气接触，采用第三类边界条件：

$$\left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=1} = h(T_f - T_{x=1}) \quad (7)$$

土壤初始条件为温度条件：

$$T_s(x, y, t)|_{t=0} = T_{s0}(x, y, 0) \quad (8)$$

(2) 边界条件

内边界条件：土壤与消防水池接触，并以导热形式进行传热。内表面为温度边界条件。

$$T_s(x, y) = T_w(x) \quad (9)$$

远边界条件：由于该模型远边界位于无限大物体深处，定为绝热边界。

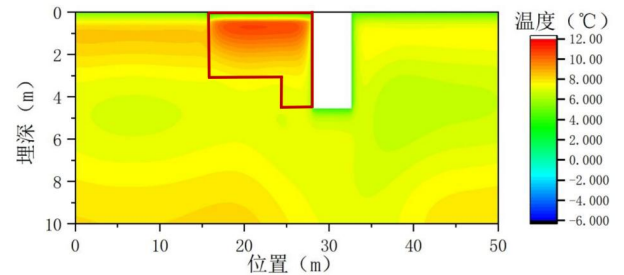
土壤与空气接触面为第三类边界条件。

$$\left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=Ny} = h(T_f - T_{y=Ny}) \quad (10)$$

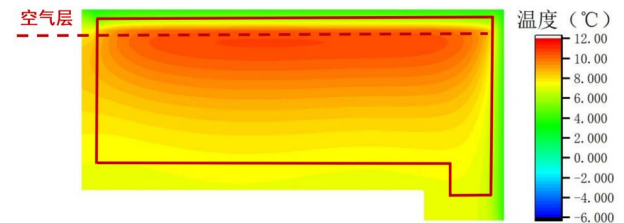
2 消防水池冻结情况及影响因素分析

2.1 消防水池全年传热与冻结分析

本节以新疆双河市气象条件为例，开展全年传热计算分析消防水池在全年无任何防冻结措施下的冻结情况。秋季土壤及消防水池温度云图如图 2 所示，秋季来临后，双河市气温逐渐下降，浅层土壤温度随空气降温而降低，埋深 0-2m 处温度可降至 5-8 $^{\circ}\text{C}$ ，深层土壤（埋深>4m）温度维持在 5-6 $^{\circ}\text{C}$ ，消防水池顶部温度随空气温度降低而逐步接近 0 $^{\circ}\text{C}$ ，在秋季末期，昼夜温差增大，夜间低温可能导致水池顶部水温短时低于 0 $^{\circ}\text{C}$ ，虽尚未形成持续冻结，但需警惕温度骤降引发的局部冻结风险，此时冻结风险主要集中在水池顶部表层水体。



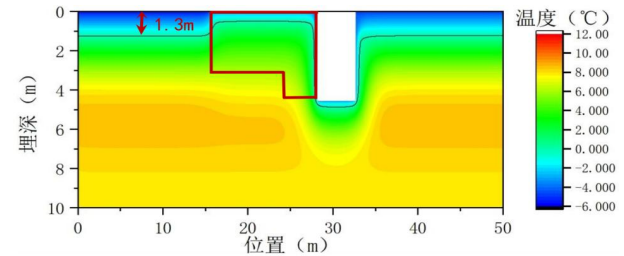
(a) 土壤温度云图



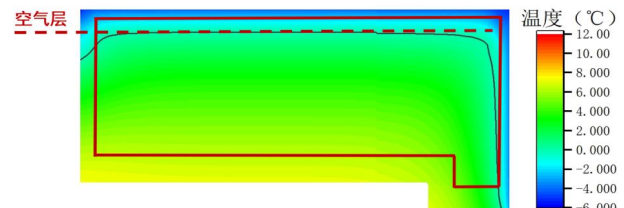
(b) 消防水池温度云图

图 2 温度云图-秋季 (9 月 30 日)

Fig.2 Temperature contour plot in autumn (Sept. 30)



(a) 土壤温度云图



(b) 消防水池温度云图

图 3 温度云图-冬季 (1 月 30 日)

Fig.3 Temperature contour plot in winter (Jan. 30)

冬季土壤及消防水池温度云图如图 3 所示, 冬季双河市进入严寒期, 极端低温常突破 -20°C 以下, 浅层土壤(埋深 0-2m)温度低至 -6°C 以下, 深层土壤(埋深 5m)温度也仅维持在 0°C 左右, 消防水池顶部直接与寒冷空气接触, 温度频繁低于 0°C 且持续时间较长, 根据模拟数据, 冬季水池周围冻土深度 1.3m, 冻结深度可能随低温持续时间增加而向下延伸, 水池左右上角点存在冻结风险, 冻结率 3.02%, 分析原因是: 周围冻土导致消防水池左上角点冻结, 室内温度较低导致消防水池右上角点冻结。冬季是消防水池全年冻结风险最高的季节, 需采取主动防冻措施(如太阳能集热器加热)以保障水池安全运行。



图 4 展示了消防水池水面不同位置全年温度随时间的变化情况。从图中可以看出, 水面中点温度始终最高, 全年多数时间维持在 0°C 以上, 这是因为该位置远离池壁, 受外界低温影响较小, 且受土壤恒温层及水体自身热惰性的保护更为显著。左上角点和右上角点温度相对较低, 且频繁低于 0°C , 最低约为 -1.87°C , 这是由于左上角点受周围冻土传热影响; 右上角点受设备房低温环境影响, 两者均为冻结风险高发区域。三个位置的低温时段主要集中于冬季, 与新疆双河市的严寒期相吻合。消防水池水面的冻结时长主要体现在顶部区域, 全年冻结时长近 80 天, 占全年的 22%, 主要集中在冬季, 故接下来主要分析消防水池在冬季不同工况下的冻结风险。

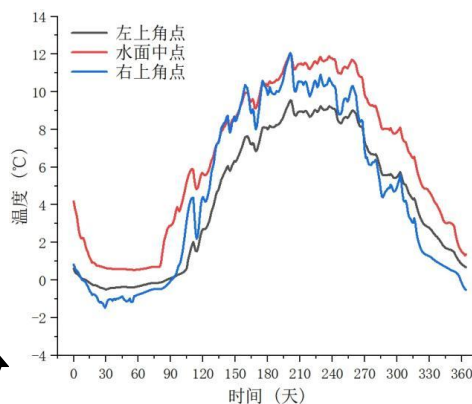
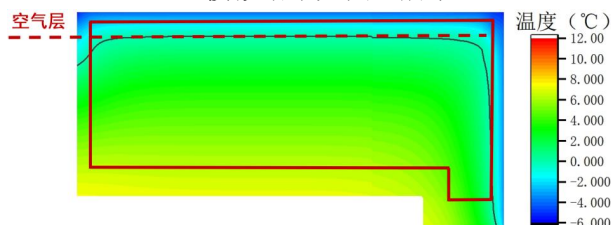


图 4 消防水池水面不同位置全年温度变化

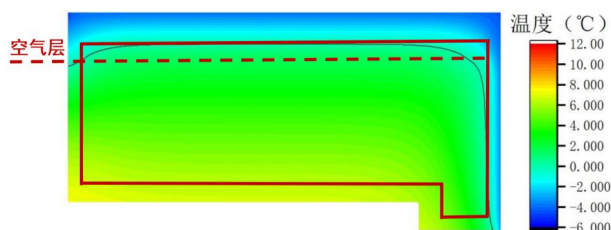
Fig.4 Annual temperature variation at different locations on the water surface of the underground fire reservoir

2.2 不同埋深条件下冻结情况

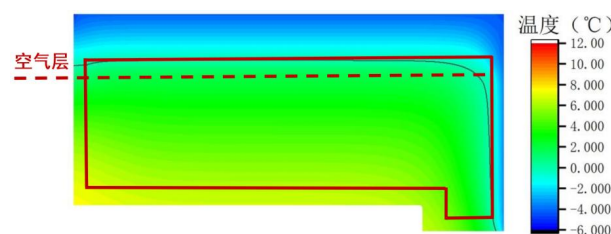
结合冬季冻土层厚度研究不同消防水池埋深下的冬季冻结情况, 设置消防水池埋深为 0.12m、0.62m、1.12m, 模拟结果如图 5 所示。



(a) 埋深 0.12m



(b) 埋深 0.62m



(c) 埋深 1.12m

图 5 地下消防水池不同埋深下冬季(1月30日)温度分布云图

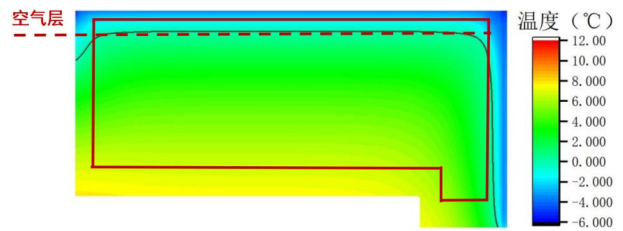
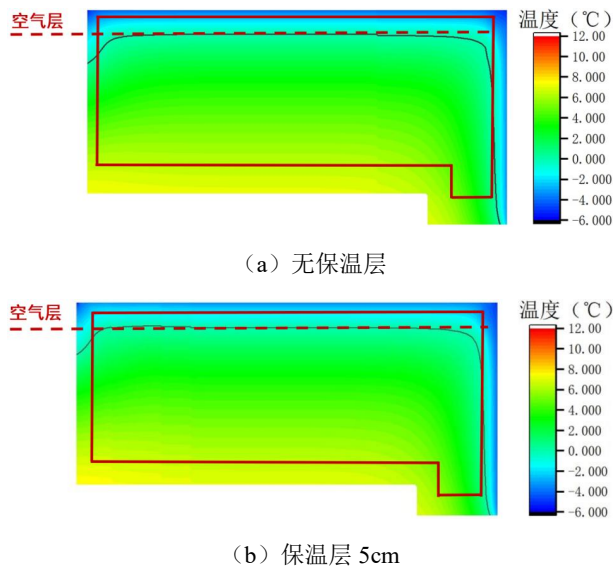
Fig.5 Temperature contour plot of the underground fire reservoir at different burial depths in winter (Jan. 30)

图 5 展示了消防水池埋深为 0.12m、0.62m、1.12m 时冬季(1月30日)的温度分布云图, 旨在结合冬季冻土层厚度研究不同埋深下消防水池的冬季冻结情况。新疆双河市冬季极端低温常突破

-20℃以下，冻土层厚度 1.3m，埋深 0.12m 的消防水池，其整体温度较低，水池内水面温度接近或低于 0℃，左右角点出现低于-2℃的低温区，由于埋深较浅，水池左侧与冻土层接触面积较大，热量通过土壤和空气流失，顶部水体冻结风险高。埋深增加后，水池顶部与地表冻土层的距离拉大，受浅层低温土壤的直接影响减弱，顶部冻结范围缩小，但仍存在短时低于 0℃ 的风险，主要集中在水池左右角点处；埋深 1.12m 的消防水池，整体温度进一步升高，顶部温度多在 0℃ 以上，底部温度稳定在 3-5℃，低温区基本消失，埋深较大时，水池大部分区域处于相对温暖的深层土壤中，受浅层冻土的传热影响显著减弱，周围土壤温度较高，可有效减少热量流失，冻结风险最低，仅在极端低温时段可能出现顶部表层短暂降温，但难以形成持续冻结。由此可见，消防水池埋深与冬季冻结风险呈显著负相关，埋深越大，冻结风险越低，这为新疆双河市消防水池的抗冻设计提供了依据，工程中建议适当增加埋深，利用深层土壤的恒温特性减少冻结风险，配合其他保温措施可进一步提升抗冻效果。

2.3 不同保温设置下冻结情况

图 6 为消防水池左右外壁面设置不同厚度保温层下冬季（1 月 30 日）温度分布云图，包含无保温层、5cm 保温层、10cm 保温层三种工况，旨在研究保温层对新疆双河市消防水池冬季冻结风险的影响。

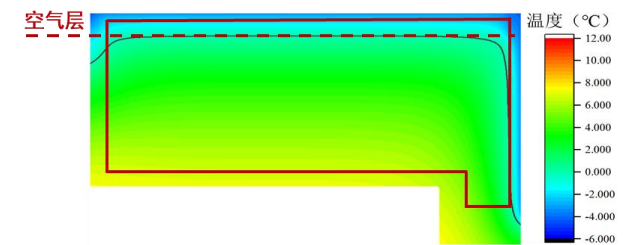


(c) 保温层 10cm

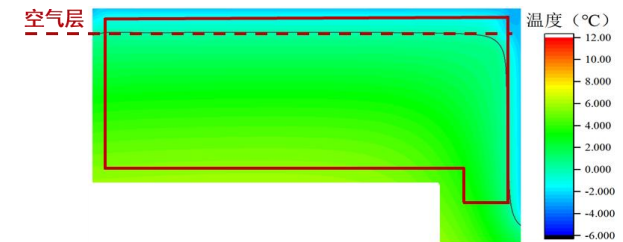
图 6 地下消防水池不同侧壁保温层厚度下冬季（1 月 30 日）温度分布云图

Fig.6 Temperature contour plot of the underground fire reservoir with different sidewall insulation thicknesses in winter (Jan. 30)

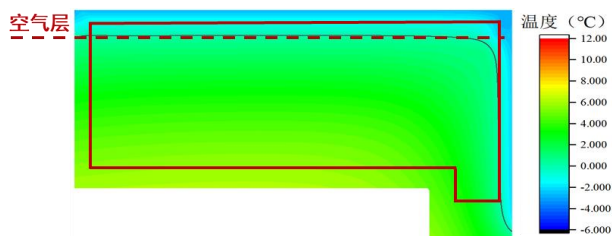
从云图整体趋势来看，随着保温层厚度增加，消防水池整体温度呈显著上升趋势。其中冬季无保温层工况下，水池温度较低，顶部及边缘区域出现低于 0℃ 的低温区，与周围寒冷空气及冻土的热量交换剧烈，热量流失快，易形成局部冻结；5cm 保温层工况中，水池整体温度较无保温层时明显升高，低温区范围缩小，顶部温度多维持在 0℃ 附近，边缘区域冻结风险降低，这是由于保温层减少了水池与外界冷空气、低温土壤的直接传热，热量损失速率减缓；10cm 保温层工况下，水池温度进一步提升，低温区基本消失，顶部及边缘温度多在 0℃ 以上，底部受深层土壤影响，温度可达 2℃ 以上，说明较厚的保温层能更有效阻隔热量流失，维持水体温度稳定。



(a) 顶板无保温



(b) 顶板保温层 5cm



(c) 顶板保温层 10cm

图 7 地下消防水池不同顶板保温层厚度下冬季(1月30日)温度分布云图

Fig.7 Temperature contour plot of the underground fire reservoir with different roof insulation thicknesses in winter (Jan. 30)

根据图 7 观察到顶板保温层厚度对消防水池冻结情况的改善效果及其局限性。在顶板无保温层的情况下,消防水池左上角和右上角均出现了明显的低温冻结区域,表明水池这两个与冷环境直接作用的角点热量流失严重,冻结风险最高。当顶板设置 5cm 保温层后,观察到水池左上角的冻结区域完全消失,温度显著提升,这说明顶板保温有效阻隔了上方冷空气及浅层低温土壤的传热,对该区域的防冻效果极为显著,对比右上角可以发现,其冻结状况虽有轻微缓解,但低温区域依然存在,改善效果甚微。即使将顶板保温层厚度进一步增加至 10cm,水池右上角的冻结情况也未能得到根本性改善。这一现象揭示了单一顶板保温措施的局限性,虽能有效应对来自顶部的热损失,但对于主要受右侧低温设备房环境影响的水池右上角,其隔热作用有限,需要对水池右侧壁面采取额外的保温措施,才能实现对消防水池的全面防冻保护。故考虑在设置顶板保温层厚度 5cm 工况下增加水池右侧保温层进行计算,结果如表 1 所示。

表 1 不同保温设置下地下消防水池冻结情况

Table 1 Freezing conditions of the underground fire reservoir with different insulation configurations

消防水池顶板保温层厚度/cm	消防水池右侧保温层厚度/cm	冻结率/%
0	0	3.02
	0	2.85
	5	1.67
5	10	0.44
	15	0.21
	20	0.00

表 1 数据显示,在无任何保温措施的基准工况下,消防水池的冻结率为 3.02%。这一初始值明确了当地严寒环境所带来的实质性冻结风险。当仅采用 5cm 顶板保温而右侧无保温时,冻结率小幅下降至 2.85%。此结果印证了顶板保温的有效性,但其降幅有限,表明仅对顶部保温无法解决。在固定 5cm 顶板保温,随着右侧保温层厚度从 5cm 增加至 10cm、15cm、20cm,冻结率呈现出连续的下降,分别从 1.67%降至 0.44%、0.21%,并最终在 20cm 时达到 0.00%。这表明对于新疆地区的该消防水池而言,针对右侧壁面热量流失的保温是抑制冻结最为有效的措施。

3 结论

本文针对严寒地区地下消防水池在冬季易发生结冻的问题,建立了考虑土壤相变过程的非稳态传热模型,系统研究了地下消防水池在典型严寒气候条件下的温度场分布与结冻特性,重点分析了埋深、保温层设置等关键因素对冻结风险的影响。主要研究结论如下:

在新疆双河市典型气象条件下,消防水池顶部区域受外界低温影响最为显著,全年冻结时长可达 80 天,冻结风险主要集中在左上角与右上角点。冬季冻土深度达 1.3m,导致水池周边土壤温度显著下降,进一步加剧了水池边缘区域的冻结风险。

随着埋深从 0.12m 增加至 1.12m,消防水池整体温度显著升高,顶部低温区域范围明显缩小。埋深越大,水池受浅层冻土和冷空气的影响越小,冻结风险显著降低,表明适当增加埋深是提高消防水池抗冻性能的有效措施。

设置顶板保温层能有效抑制顶部热损失,5cm 顶板保温即可显著改善左上角冻结状况;然而,单一顶板保温对受右侧低温设备房影响的右上角改善有限。综合设置顶板与右侧壁面保温层后,冻结率随保温层厚度增加而显著下降,当右侧保温层厚度达到 20cm 时,冻结率可降至 0%。

研究表明,针对消防水池不同部位的热损失特点,应采取差异化保温策略。尤其在存在局部冷桥或外部冷源影响的区域,仅依靠整体埋深或单一方向保温难以实现全面防冻,需结合局部强化保温措施。
(下转第 225 页)