文章编号：1671-6612（2026）05-761-09

冷库地面防冻设计及方案比选

汪庆军[1]　张清琳[2]

（1.中信建筑设计研究总院有限公司　武汉　430014;
2.中冶南方工程技术有限公司　武汉　430223）

【摘　要】　低温冷库常年连续运行易引发地基土壤冻胀，引发地面开裂、结构沉降、能耗上升等问题，必须设置可靠防冻措施。以武汉某冷库为研究对象，依据《冷库设计标准》（GB 50072-2021）开展地面防冻加热负荷计算，提出宜忽略土壤初始传热量、以加热层向冷间传热量为核心的负荷计算方法。基于无限长圆柱热源理论与虚拟热源法建立地面防冻传热计算模型，分别完成不冻液加热管、机械通风、加热电缆三种防冻方式的参数设计与换热计算，并从初投资、年运行维护成本进行技术经济对比。结果显示以乙二醇水溶液为热媒的加热管地面防冻方案综合效益较优；机械通风地面防冻设计宜采用最冷月每日最高 6 小时平均气温作为室外计算参数。研究结果可为同类低温冷库地面防冻胀设计与方案比选提供理论依据与工程参考。

【关键词】　地面防冻；防冻胀；加热负荷；传热计算；不冻液加热管；冷凝热回收

中图分类号　TB69　　文献标志码　A

Design and Scheme Comparison of Cold Storage Floor Anti-freezing

Wang Qingjun[1]　Zhang Qinglin[2]

(1.CITIC General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd, Wuhan, 430014;
2. WISDRI Engineering & Research Inc Co., Ltd, Wuhan, 430223)

【**Abstract**】　The long-term continuous operation of low-temperature cold storage easily causes frost heave of foundation soil, resulting in ground cracking, structural settlement, increased energy consumption and other problems. Therefore, reliable anti-freezing measures are essential. Taking a cold storage project in Wuhan as the research object, this paper calculates the floor anti-freezing heating load in accordance with the standard for design of cold stores (GB 50072-2021). A load calculation method focusing on the heat transfer from the heating layer to the cold room is proposed, ignoring the initial heat transfer of soil. Based on the infinite cylindrical heat source theory and the virtual heat source method, a heat transfer calculation model for floor anti-freezing is established. The parameter design and heat transfer calculation are carried out for three anti-freezing schemes, namely antifreeze heating pipes, mechanical ventilation and heating cables. Technical and economic comparisons are conducted in terms of initial investment and annual operation and maintenance costs. The results show that the floor anti-freezing scheme with ethylene glycol aqueous solution as the heat medium presents the best comprehensive benefit. For the design of mechanical ventilation floor anti-freezing, the average air temperature of the maximum 6 hours per day in the coldest month shall be adopted as the outdoor design parameter. The research findings can provide theoretical basis and engineering reference for the anti-frost heave design and scheme comparison of similar low-temperature cold storage floors.

【**Keywords**】　Floor anti-freezing; Frost heave prevention; Heating load; Heat transfer calculation; Antifreeze liquid heating pipe; Condensate heat recovery

---

作者（通讯作者）简介：汪庆军（1987.12-），男，硕士研究生，高级工程师，E-mail：565071968@qq.com
收稿日期：2026-04-26

0　引言

冷库冻结间、冻结物储藏间常年低温连续运行，库内低温与地下土层长期存在温差。在地面围护结构的传热作用下，库内冷量持续向下传导，造成保温层下部土壤温度逐步降低。当地基土壤温度降至 0℃及以下时，土壤中的自由水、毛细水会发生冻结；同时地下毛细水持续向上迁移补给，进一步加剧冻结作用，导致冻土厚度不断增加[1]。若不采取专门地面防冻胀措施，地基土壤将长期处于冻结状态，进而诱发土壤冻胀破坏。土壤冻胀危害突出，一是造成冷库混凝土地面隆起、开裂、破坏地面结构完整性，影响日常装卸作业安全；二是引发承重柱及基础不均匀沉降，致使主体结构开裂，严重威胁建筑整体安全；三是撕裂地面隔汽层、破坏保温构造，加大冷量损耗，增加设备运行能耗；四是对地下管线形成挤压与拉扯，易造成管道破损[2]。同时，冻胀修复成本高，冷库停产检修还将带来重大经济损失。后期冻土消融还会引发融陷等问题[3]。因此，低温冷库地面必须强制设置防冻措施，将地基土壤温度控制在 0℃以上，从源头杜绝冻土形成，保障冷库结构安全及长效稳定运行。

1　冷库地面防冻加热负荷计算

结合《冷库设计标准》（GB 50072-2021）附录 A 规定[4]，计算冷库地面防冻加热负荷。冷库地面传热计算模型采用如下假定：（1）低温冷库地面下土壤视为均质稳定传热体系；（2）忽略周边地面构造层及土壤的不稳定传热，按稳态传热计算；（3）地面防冻加热层上表面为统一温度界面，地基深层土壤温度保持恒定；（4）仅考虑冷间地面构造层的导热与土壤原生传热，不计入水分相变、渗流及太阳辐射影响[5]。

计算冷库地面防冻加热负荷公式如式（1）-（3）所示。

$$Q_f = \frac{\alpha \times (Q_r - Q_{tu}) \times 24}{T} \tag{1}$$

$$Q_r = F_d \times (t_r - t_n) \times K_d \tag{2}$$

$$Q_{tu} = F_d \times (t_{tu} - t_r) \times K_{tu} \tag{3}$$

式中：Q_f为地面防冻加热负荷，W；α为修正系数，年平均气温小于 10℃取α=1.0，年平均气温不小于 10℃取α=1.15；Q_r为地面加热层传入冷间的热量，W；Q_{tu}为土壤传给地面加热层的热量，W；T为防冻系统每日有效运行时长，h，一般不宜小于 4h；F_d为冷间地面面积，m²；K_d为冷间地面综合传热系数，W/(m²·℃)；K_{tu}为地基土壤综合传热系数，W/(m²·℃)；t_r为地面加热层的温度，℃，宜为 1℃~2℃；t_n为冷间内的空气温度，℃；t_{tu}为土壤温度，℃，土壤温度取冷间地面构造层以下 3.2m 深处历年最低两个月的土壤平均温度。

本文以武汉某冷库为例，介绍冷库地面防冻设计。冷库包括 2 间冻结物冷藏间以及 2 间控温月台，每间冷藏间面积 1134m²，每间月台面积 475m²。冷藏间和月台设计参数如表 1 所示。冻结物冷藏间加热管防冻地面构造层的做法如图 1 所示。

表 1　冷藏间和月台设计参数

Table 1　Design parameters of cold storage room and platform

区域	长 /m	宽 /m	净高 /m	储存能力 /t	日进货量 /(t/d)	冷间温度 /℃	进货温度 /℃	出货温度 /℃	冷却时间 /h
冻结物冷藏间	54	21	10.6	2650	265	-18	-8	-18	24
控温月台	54	8.8	6	——	——	5	——	——	——

计算地基土壤综合传热系数K_{tu}，如式（4）所示。

$$K_{tu} = \frac{1}{\frac{\delta_{tu}}{\lambda_{tu}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_{i-n}}{\lambda_{i-n}}} \tag{4}$$

式中：δ_{tu}为土壤计算厚度，一般取 3.2m；λ_{tu}为土壤导热系数，W/(m·℃)；$\delta_{i\text{-}n}$为加热层至土壤层各层材料的厚度，m；$\lambda_{i\text{-}n}$为加热层至土壤层各层材料的导热系数，W/(m·℃)。从图 1 中可知加热层至土壤层中间有：7：100mm 厚 C20 混凝土填充层；8：150mm 厚 C20 混凝土垫层；9：150mm 厚 3:7 灰土垫层；10：地基土壤，素土夯实[6]。混凝土导热系数为 1.51W/(m·℃)；灰土导热系数为 0.93W/(m·℃)；土壤导热系数为 1.41W/(m·℃)。依据公式（4），计算出地基土壤综合传热系数K_{tu}为 0.389W/(m²·℃)。

计算冷间地面综合传热系数 K_d，如式（5）所示。

$$K_d = \frac{1}{R_i + \sum_{j=1}^{n} \frac{\delta_{j-n}}{\lambda_{j-n}}} \quad (5)$$

式中：R_i 为冷间地面换热热阻，取 0.11(m²·℃)/W；δ_{j-n} 为加热层至冷间地面各层材料的厚度，m；λ_{j-n} 为加热层至冷间地面各层材料的导热系数，W/(m·℃）。从图 1 中可知，加热层至冷间地面中间有：1：冷间面层 180mm 厚 C30 细石混凝土；2：20 厚水泥砂浆保护层；4：200 厚 XPS 挤塑保温板；6：20 厚水泥砂浆找平层，其他层厚度薄热阻可忽略。C30 细石混凝土导热系数为 1.51W/(m·℃)；水泥砂浆导热系数为 0.93W/(m·℃)；XPS 挤塑保温板导热系数为 0.0289W/(m·℃)。依据公式（5），计算出地基土壤综合传热系数 K_d 为 0.135W/m²·℃。

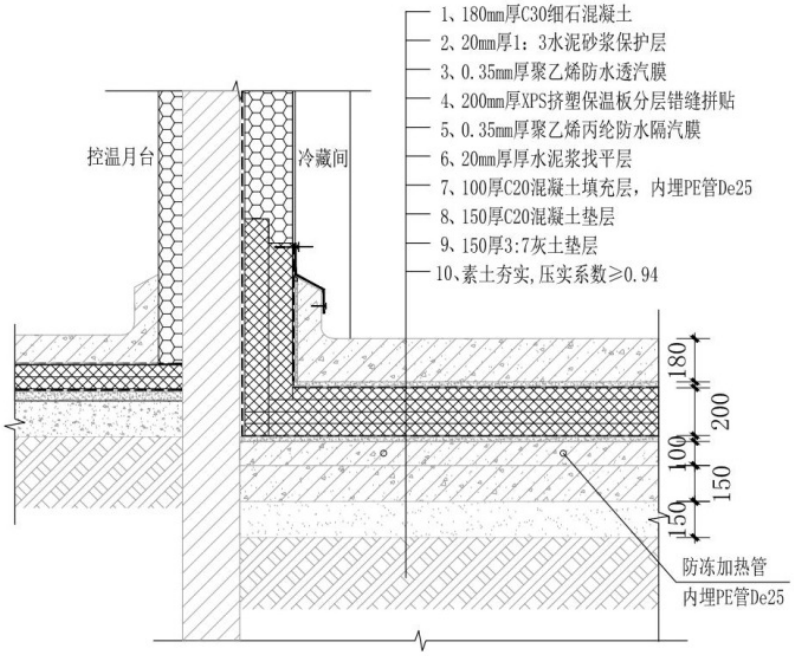


图 1　加热管防冻地面构造层示意图

Fig.1　Schematic diagram of structural layers of heating pipe anti-freezing floor

地面加热层的温度 t_r 取 1.0℃，《冷库设计标准》GB 50072-2021 附录 A 表 A.0.5，武汉地区土壤温度 t_{tu} 取 15.7℃，依据公式（2），地面加热层传入冷间的热量 Q_r 为 2996W；依据公式（3），土壤传给地面加热层的热量 Q_{tu} 为 6377W，从计算结果看，地面防冻加热负荷 Q_f 为负值。表明了该地区土壤原始温度高，加上地面保温隔热效果好，原始土壤传热量可抵消冷库地面冷渗透；但是并不能认为地坪无冻结风险，此状态仅是冷库运行初期，原始土壤温度高，利用土壤存储的热量可以抵消冷库地面冷渗透，但是随冷库长时间运行，加上冷库占地面积较大，冷库周边及深层土壤传入冷库区域的热量有限，冷库中间土壤的温度会持续下降，长期运行，依然会有冻结风险。经计算，当冷库地面下 3.2m 深处土壤温度下降到 7.9℃时，土壤传给地面加热层的热量等于地面加热层传入房间的热量 2996W，若无外热源加热，持续运行，土壤原始储热将不能抵消冷库地面冷渗透。经计算，3.2m 深处土壤温度下降到 7.9℃仅需 1.6 年持续传热。所以从长期考虑，当土壤原始储存的热量释放以后，冷库地面防冻的热量主要来自地面加热设施，所以建议采用公式（1）计算地面防冻加热负荷 Q_f 时不考虑减去土壤传给地面加热层的热量 Q_{tu}，把土壤原始储热仅作为冷库地面防冻的安全余量。所以经计算本项目加热系统运行时间取 5 小时，得出地面防冻日均等效加热负荷 Q_f 为 33.1kW；加热系统运行时间取 6 小时，得出地面防冻日均等效加热负荷 Q_f 为 27.5kW。

2　冷库地面防冻设计

2.1　冷库地面防冻传热计算模型

冷库地面防冻常规做法，主要在地面加热层内敷设通风管、不冻液加热管或发热电缆等加热设施[7]；架空式的地面防冻形式，本文不作探讨。

冷库地面加热层内敷设的通风管、不冻液加热管或发热电缆等加热设施，可等效为半无限大土体介质中的无限长圆柱热源，本文基于贾力等《高等传热学》线热源理论和虚拟热源法（即镜像法）建立传热计算模型[8]。将冷库地面设定为恒温边界，通过设置虚拟热源消除半无限域边界约束，利用温度场叠加原理，推导得到埋地加热设施周边土体温度场解析解，进而计算求解地面防冻所需单位管长换热量，并确定合理的管道敷设间距。

计算单位管长换热量 q_l 公式如式（6）所示。

$$q_l = \frac{t_f - t_r}{R_f + R_p + R_t} \tag{6}$$

式中：q_l 为单位管长换热量，W/m；t_f 为流体平均温度，℃；R_f 为管内对流热阻，如式（7）所示；R_p 为管壁导热热阻，如式（8）所示；R_t 为管道外土壤综合热阻，如式（9）所示；热阻单位 (m²·℃)/W。

$$R_f = \frac{1}{\pi h_f d_i} \tag{7}$$

$$R_p = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \times \ln\frac{d_o}{d_i} \tag{8}$$

$$R_t = \frac{1}{2\pi\lambda_t} \times \ln\frac{4H}{d_o} \tag{9}$$

式中：h_f 为管道内流体对流换热系数，W/(m²·℃)；d_i 为管道内径，m；d_o 为管道外径，m；λ_p 为管道导热系数，W/(m·℃)；λ_t 为土壤综合导热系数，W/(m·℃)；H 为埋管与恒温边界距离，m。

2.2　不冻液加热管地面防冻设计

以上述武汉某冷库为例，进行不冻液为热媒的加热管地面防冻设计，为保证冷库稳定运行，防止地坪被冻胀，本项目一层冻结物冷藏间地面设置了采用质量浓度为 28%的乙二醇水溶液为热媒的加热管地面防冻系统。埋地加热管选用 De25×2.5 聚乙烯管，加热管敷设在冷间地面隔热层下的加热层内。热源来自冷库制冷系统的冷凝热回收装置，回收制冷机组制冷时的免费冷凝热，有效降低能耗。地面防冻系统供液温度为 10℃，回液温度为 5℃。为抑制管路腐蚀、防止系统结垢，乙二醇水溶液内需投加专用缓蚀阻垢药剂，优先选用改性抑制型乙二醇水溶液[9]。地面防冻系统的控制根据温度探测联动启停，开启温度为 2℃，关闭温度为 4℃，温度监测探头设置在加热层内，避开加热管，温度测点不少于 2 处[10]。

根据 2.1 节冷库地面传热计算模型，计算采用乙二醇水溶液为热媒的地面防冻系统单位管长换热量，乙二醇水溶液在管道内的对流换热系数 h_f 为 90W/(m²·℃)，聚乙烯管的导热系数 λ_p 取 0.4W/(m·℃)，土壤综合导热系数 λ_t 取 1.5W/(m·℃)，依据公式（7）（8）（9），分别得出管内对流热阻 R_f 为 0.177m²·℃/W，管壁导热热阻 R_p 为 0.089(m²·℃)/W，管道外土壤综合热阻 R_t 为 0.256(m²·℃)/W。乙二醇水溶液流体平均温度 t_f 为 7.5℃，t_r 为 1℃，依据公式（6），计算的加热管单位管长换热量 q_l 为 12.5W/m。取地面防冻加热系统每天运行 5 小时，其地面防冻加热负荷 Q_f 为 33.1kW，计算得加热管所需总长度为 2656m；结合冷库平面图，设计布置加热管如图 2 所示。

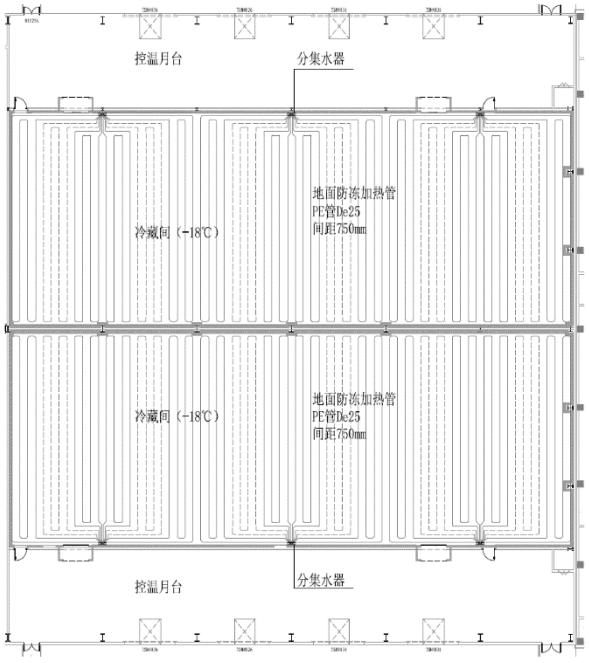


图 2　冷藏间地面防冻加热管布置图

Fig.2　Layout of anti-freezing heating pipes for refrigerated room floor

地面防冻加热管采用 De25×2.5 聚乙烯管，间距 750mm，冷藏间埋地加热管实际管长为 3120m，

满足计算管长要求。以乙二醇水溶液为热媒的加热系统共设置 6 套分集水器及阀门控制组件，每套分集水器设 6 支回路，每支回路上设置了流量调节和流量监测装置。冷库地面防冻加热负荷与每天运行时间成反比，每天运行时间越短，加热负荷越大，为了控制加热负荷，降低热源配置容量及减少加热管的长度，降低初投资，规范要求每日运行时间不宜低于 4h。同时加热管内液体流速不宜小于 0.25m/s，加热管间距一般取 600～1000mm。

2.3　机械通风地面防冻设计

本节冷库地面防冻采用机械通风方案，通风管管径选用内径 300mm 预制混凝土管道，通风管设置在保温隔热层下面的中粗砂垫层内[11]，采用机械通风防冻地面构造层的做法如图 3 所示。

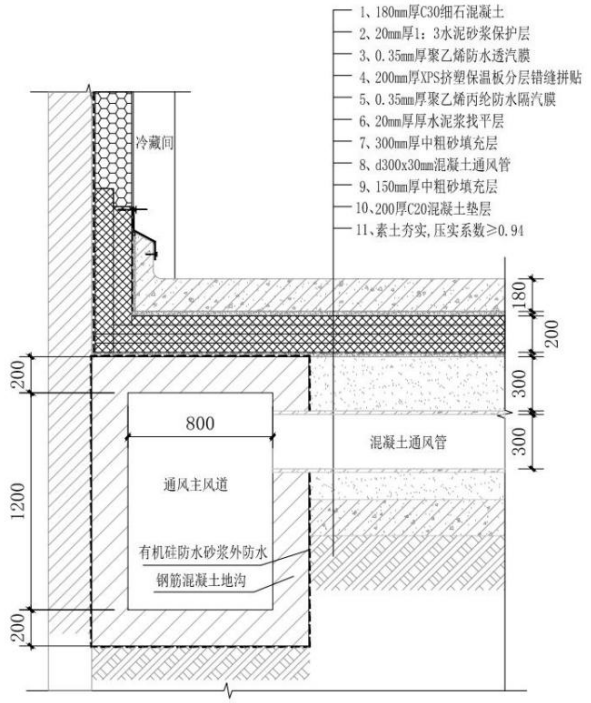


图 3　机械通风防冻地面构造层剖面图

Fig.3　Sectional view of structural layers for mechanical ventilation anti-freezing floor

进行机械通风管地下换热计算，首先是确定室外空气计算参数，由于通风系统不是连续运行，一般在白天室外温度较高时运行 4～8 小时，因此采用《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》（GB 50736-2012）中室外空气计算参数不合理[12]，冬季通风室外计算温度是累年最冷月平均温度，并不符合机械通风地面防冻的运行工况[13]。本文通过对武汉地区典型气象年室外空气参数的分析，数据来源于中国标准气象数据集典型气象年 TMY 逐时数据。图 4 为武汉冬季 12 月～次年 2 月每日室外干球温度最高 6 小时的平均温度，可以得到冬季最冷月 1 月每日室外干球温度最高 6 小时的平均温度为 7.9℃，最冷月（1 月份）室外干球温度最高 6 小时的平均温度低于 4℃的天数为 4 天，平均温度低于 5℃的天数为 8 天，考虑土壤具有一定蓄热能力，可以平衡最冷几日的加热不足，建议采用最冷月每日室外干球温度最高 6 小时的平均温度作为地面防冻机械通风室外空气计算温度。机械通风防冻系统运行控制依据加热层温度探测与室外温度联合控制，当室外空气干球温度低于 4℃，通风系统停止运行。

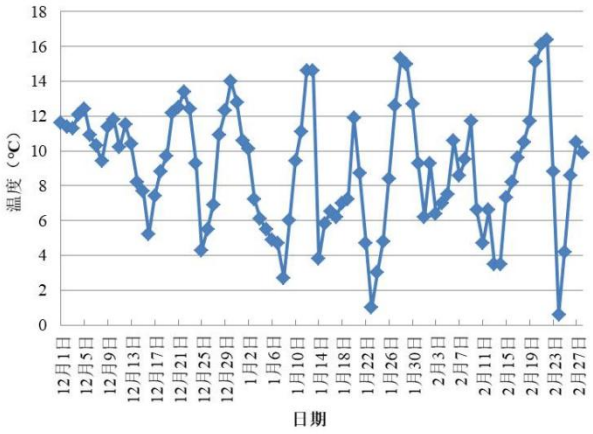


图 4　武汉冬季每日室外干球温度最高 6 小时的平均温度

Fig.4　Average temperature of maximum 6-hour daily outdoor dry-bulb temperature in Wuhan in winter

以武汉某冷库为例，进行机械通风地下通风管换热计算，机械通风系统每天按 6 小时运行，通风系统进风温度取 7.9℃，排风温度取 3.9℃，地面防冻加热负荷 Q_f 为 27.5kW，根据 2.1 节冷库地面传热计算模型，计算采用机械通风地面防冻系统单位管长换热量，机械通风在管道内的对流换热系数 h_f 为 9.13W/(m²·℃)，混凝土通风管的导热系数 λ_p 取 1.74W/(m·℃)，依据公式（7）（8）（9），分别得出管内对流热阻 R_f 为 0.116(m²·℃)/W，管壁导热热阻 R_p 为 0.017(m²·℃)/W，管道外土壤综合热阻 R_t 为 0.128(m²·℃)/W。通风系统空气平均温度 t_f 为 5.9℃，t_r 为 1℃，依据公式（6），计算的加热管单位管长换热量 R_f 为 18.8W/m，计算所需通风管的总长度为 1466m，结合冷库平面，通风管敷设间距为

1.5m，通风管的敷设布置如图 5 所示。冷藏间埋地通风管实际管长为 1512m，满足计算管长要求。

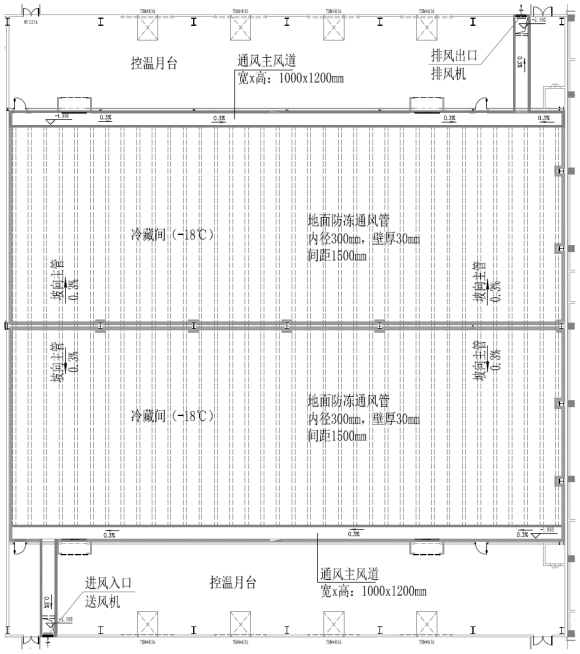


图 5　冷藏间地面防冻机械通风管布置图

Fig.5　Layout of mechanical ventilation pipes for anti-freezing floor of refrigerated room

以下通过分析广州及北京典型气象年室外空气参数，探讨夏热冬暖地区和寒冷地区冷库机械通风地面防冻设计室外计算参数选取策略。图 6 为广州和北京冬季 12 月～次年 2 月每日室外干球温度最高 6 小时的平均温度。

广州冬季最冷月 1 月每日室外干球温度最高 6 小时的平均温度为 16.5℃，最冷月（1 月份）室外干球温度最高 6 小时的平均温度低于 10℃的天数为 2 天，可见夏热冬暖地区冬季室外温度较高。依据公式（6），通风系统空气平均温度 t_f 取 14℃，冷库加热层的温度 t_r 为 1℃，两者存在较大温差，以上述某冷库地面参数为例，通过计算的加热管单位管长换热量 R_f 为 49.9W/m。单位管长换热量大，可以有效减少加热盘管长度或缩短机械通风运行时间；根据《冷库设计标准》（GB 50072-2021）建议防冻系统每日有效运行时长 T 一般不小于 4 小时，取广东地区机械通风每日运行时长为 4 小时。依据公式（1），得出地面防冻日均等效加热负荷 Q_f 为 41.3kW，计算加热管管长 829m，通风管敷设间距 2.7m，大于规范《冷库设计标准》（GB 50072-2021）建议敷设间距 1.5～2.0m，敷设间距过大地面加热均匀性受影响，建议按不大于 2.0m 间距设置通风管，实际选型通风管长度 1134m，通风管管径选用内径 250mm 预制混凝土管道，壁厚 30mm。

北京冬季最冷月 1 月每日室外干球温度最高 6 小时的平均温度为-0.2℃，送风温度低，不满足冷库地面防冻加热需求，需对送风系统进行加热，根据《冷库设计标准》（GB 50072-2021）规定，冬季送风温度不宜低于 10℃，送排风温差取 5℃，按每天有效运行时长 6 小时计算，以上述某冷库地面参数为例，通过计算的加热管单位管长换热量 R_f 为 24.9W/m，计算得通风管管长 1105m。设计选用内径 250mm 预制混凝土管道，壁厚 30mm，敷设间距为 2.0m，实际选型通风管长度 1134m。加热送风的热源来自冷库制冷系统的冷凝热回收装置，回收制冷机组制冷时的免费冷凝热，有效降低能耗。计算通风加热负荷为 46kW，热媒采用乙二醇水溶液。

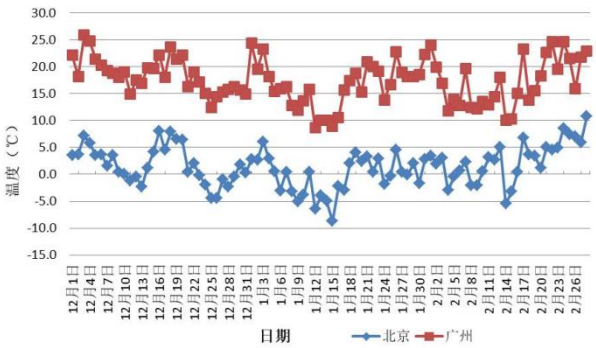


图 6　北京、广州冬季每日室外干球温度最高 6 小时的平均温度

Fig.6　Average temperature of maximum 6-hour daily outdoor dry-bulb temperature in Beijing and Guangzhou in winter

3　冷库地面不同防冻方案比选

3.1　不冻液加热管地面防冻方案

依据 2.2 节加热管地面换热设计，经设备选型计算得：以乙二醇水溶液为热媒的加热系统共设置 6 套分集水器及阀门控制组件；乙二醇循环泵流量 7.5m³/h，扬程 30m，功率 2.2kW，一用一备；热源采用制冷机组的冷凝热回收装置，设计冷凝热回收装置的制热量为 40kW。汇总不冻液加热管地面防冻方案初投资如表 2 所示。

表 2　不冻液加热管地面防冻方案初投资

Table 2　Initial investment of floor anti-freezing scheme with antifreeze liquid heating pipes

序号	工程项目	数量	综合单价	造价/元
1	PE25×2.5 防冻加热管及敷设安装	3120 米	28 元/m	87360
2	分集水器及阀门控制组件 6 套	6 套	1850 元/套	11100
3	乙二醇循环泵流量 7.5m³/h，扬程 30m，功率 2.2kW	2 台	1.0 万元/台	20000
4	定压、药液、管网	——	——	56800
5	保温、试压、调试	——	——	18200
6	制冷机组热回收装置的增量成本	——	——	84000
7	乙二醇防冻液（一次充注）含缓蚀阻垢剂等	——	——	11340
8	合计	——	——	288800

加热管地面防冻系统的运行费用主要是乙二醇循环泵的耗电及系统维护费用。热源采用冷凝热回收的免费热量，运行费用可忽略。经计算乙二醇循环泵每年耗电量为 4015kWh，电费按 0.75 元/kWh，循环泵一年运行费用 3011 元，加热系统运行维护费用约 2000 元[14]，设备年折旧费用 15177 元，年总运维成本约 20188 元。

3.2　机械通风地面防冻方案

3.2.1 武汉机械通风地面防冻方案

依据 2.3 节通风管地面换热计算，采用《冷库设计标准》（GB 50072-2021）附录 A 的方法计算通风量，得系统通风量为 22000m³/h，设置一台送风机和一台排风井，采用侧墙轴流风机，风量 22000m³/h，风压 250Pa，功率 3.0kW。系统运行费用主要为风机运行耗电量，经计算风机一年运行费用 9855 元，考虑 1000 元的运行维护费用，设备年折旧费用 17478 元，年总运维成本约 28333 元。武汉机械通风地面防冻方案初投资如表 3 所示。

表 3　武汉机械通风地面防冻方案初投资

Table 3　Initial investment of mechanical ventilation floor anti-freezing scheme in Wuhan

序号	工程项目	数量	综合单价	造价/元
1	内径 300mm，壁厚 30mm，预制水泥管含安装	1512 米	190 元/m	287280
2	混凝土砌筑主风道，净尺寸 1000mm×1200mm	120 米	1180 元/m	141600
3	风机风量 22000m³/h，风压 250Pa，功率 3.0kW	2 台	4800 元/台	9600
4	风阀、配件、洞口预埋、检修口、接头密封等	——	——	38500
5	风机配电箱、联动控制、线缆敷设	——	——	8600
6	沟槽开挖、防腐防水、系统调试	——	——	76800
7	合计	——	——	562380

3.2.2 广州机械通风地面防冻方案

计算得通风机风量为 14500m³/h，风压 250Pa，功率 1.5kW。广州机械通风地面防冻方案初投资如表 4 所示。风机一年运行费用 3285 元，考虑 1000 元的运行维护费用，设备年折旧费用 13807 元，年总运维成本约 18092 元。

表 4　广州机械通风地面防冻方案初投资

Table 4　Initial investment of mechanical ventilation floor anti-freezing scheme in Guangzhou

序号	工程项目	数量	综合单价	造价/元
1	内径 250mm，壁厚 30mm，预制水泥管含安装	1134 米	160 元/m	181440
2	混凝土砌筑主风道，净尺寸 1000mm×1200mm	120 米	1180 元/m	141600
3	风机风量 14500m³/h，风压 250Pa，功率 1.5kW	2 台	3600 元/台	7200
4	风阀、配件、洞口预埋、检修口、接头密封等	——	——	30000
5	风机配电箱、联动控制、线缆敷设	——	——	8000
6	沟槽开挖、防腐防水、系统调试	——	——	65000
7	合计	——	——	433240

3.2.3 北京机械通风地面防冻方案

计算得通风机风量为 13500m³/h，风压 250Pa，功率 1.5kW。冬季增加送风加热装置，热源采用制冷机组的冷凝热回收装置，增设乙二醇循环泵、加热盘管、阀门阀件及配电等，整套加热装置增量成本约 17.9 万元，其他投资与广州机械通风地面防冻方案一致，汇总得北京机械通风地面防冻方案总投资 61.2 万元。风机一年运行费用 4928 元，乙二醇循环泵每年电费 2025 元，考虑 2000 元的运行维护费用，设备年折旧费用 13794 元，年总运维成本约 22747 元。

3.3 加热电缆地面防冻方案

加热电缆地面防冻详细设计不再详述，本节仅做初投资和运行费用计算。加热电缆地面防冻系统按每天运行 5 小时计算，其地面防冻加热负荷 Q_f 为 33.1kW，加热电缆敷设长度为 3000m，敷设间距 750mm，单位长度加热量为 11.0W/m，初投资计算如表 5 所示。加热电缆年运行耗电量约 60407kWh，年运行费用 45306 元，考虑 1500 元运行维护成本，设备年折旧费用 13682 元，年总运维成本约 60488 元。

表 5 加热电缆地面防冻方案初投资

Table 5 Initial investment of heating cable floor anti-freezing scheme

序号	工程项目	数量	综合单价	造价/元
1	低温专用加热电缆及安装	3000 米	26.5 元/m	79500
2	配电箱、控制箱、漏电保护等，共 6 套	6 套	5000 元/套	30000
3	温控器、传感系统	——	——	5000
4	安装、绑扎、绝缘检测	——	——	3880
5	配电电缆、辅材	——	——	5200
6	合计	——	——	123580

通过以上三种方案初投资和运行费用计算，不冻液加热管地面防冻方案较优，与加热电缆地面防冻方案相比，静态投资回收期仅 3.8 年。与机械通风地面防冻方案相比，在武汉、北京不冻液加热管地面防冻方案初投资和运行费用都低于机械通风地面防冻方案；即使在广州夏热冬暖地区，冬季室外温度高，机械通风运行费用低，但初投资高于不冻液加热管地面防冻方案，广州地区机械通风地面防冻方案相对于不冻液加热管地面防冻方案静态投资回收期 68.9 年，所以不冻液加热管地面防冻是一种较优的方案。

需要注意不冻液加热管地面防冻热源采用免费的冷凝热，有效降低了运行费用。若本项目采用风冷热泵独立制热，每年运行费用增加约 12000 元。在此种情况下，比选结果为武汉、北京不冻液加热管地面防冻方案较优，而广州地区机械通风地面防冻方案相对于不冻液加热管地面防冻方案静态投资回收期下降到 10.2 年，但不冻液加热管地面防冻方案依然具备优势。

4 结论

本文通过对武汉某冷库不同地面防冻方式进行计算和分析，得出以下几点结论，可供其他类似项目参考与借鉴。

（1）冷库地面防冻加热负荷计算，建议仅考虑加热层传入冷间的热量，忽略土壤传给地面加热层的热量，此方法计算的结果更接近冷库地面防冻加热负荷需求。

（2）本文提供了一种地面加热设施传热计算的方法，采用无限长圆柱热源+虚拟热源理论模型，计算单位管长换热量，用于指导加热设施选型设计，确定加热设施管长与间距。

（3）机械通风地面防冻室外参数选择，建议采用最冷月每日室外干球温度最高 6 小时的平均温度作为地面防冻机械通风室外空气计算温度，其中室外干球温度最高小时数的选取和地面防冻系统每天运行时间相对应。

（4）从地面防冻几种方案对比可知，采用不冻液作为热媒的加热管地面防冻方案较优，并且尽

量采用带冷凝热回收的制冷机组，免费回收冷凝热，降低运行费用。

参考文献：

[1] 周晓岩,周小强,李军,等.冷库建筑地基冻胀问题及对策[J].低温与特气,2004,(1):40-41,44.

[2] 余鹏,孙典和,郑伟.地下室低温冷库防冻胀施工技术[J].建筑施工,2022,44(8):1839-1842.

[3] 陈新任,钱章寅,王惠芳.冷库地面冻胀原理及防冻策略[J].冷藏技术,2023,46(4):48-52.

[4] GB 50072-2021,冷库设计标准[S].北京:中国标准出版社,2021.

[5] 孙小红,满林香.冷库地坪通风散冷管道的数值模拟与优化[J].低温与超导,2020,48(2):75-79,106.

[6] T/CECS 1456-2023,冷库地面工程技术规程[S].北京:中国计划出版社,2023.

[7] 史雪菲.浅析冷间地面防冻的几种方式[J].制冷,2024,43(1):56-59.

[8] 贾力,方肇洪.高等传热学[M].北京:高等教育出版社,2008:37-40.

[9] 陈宏涛,徐军.浅谈大型冷库桶泵供冷和乙二醇载冷剂供冷实际应用[J].节能,2021,40(10):69-71.

[10] 刘金平.5000 吨组装式冷库地坪保温及防冻性能测试研究[J].制冷,1994,(3):7-12.

[11] 孙田田,刘勇,张力元,等.冷库地面防冻结构设计[J].制冷,2025,44(6):122-126.

[12] 陈曦,王军,毕文峰,等.设计参数对冷库地坪通风防冻系统性能的影响研究[J].低温与超导,2016,44(10):58-61.

[13] 高祖锟.冷库地坪防冻臌机械通风的传热计算[J].暖通空调,1996,(4):68-71.

[14] 刘方舟,连大旗,于露.冷库地坪防冻技术在实际工程中的应用及投资对比[J].冷藏技术,2023,46(4):53-57.