

文章编号: 1001-8360(2017)07-0142-09

# 多年冻土区框架热锚管边坡支护结构的提出及简化设计方法初探

董旭光<sup>1</sup>, 董建华<sup>1,3</sup>, 何天虎<sup>1,2</sup>, 马 巍<sup>3</sup>

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 为解决多年冻土区冻融循环及全球气温升高引起的边坡失稳问题, 基于“主动冷却”保护冻土的理念, 结合框架锚杆和热棒制冷技术, 提出一种既可主动降温、又能锚固支挡、还能减轻冻胀破坏, 且适用于多年冻土边坡的新型支护结构, 并阐述其技术原理; 提出极限承载力和热量平衡两个设计控制指标, 给出热-力共同控制的设计计算方法。将该结构和相应的计算方法应用于工程实例, 计算结果表明: 所提出结构不仅能防止多年冻土边坡上限退化, 甚至能抬升上限, 进而提高冻土边坡的稳定性; 给出的计算方法能够较为准确描述结构的工作机理, 为该结构的设计提供理论依据和参考。

**关键词:** 多年冻土; 边坡; 框架; 热锚管; 设计计算

中图分类号: TU475 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2017.07.020

## Invention and Simplified Design Method of Slope Supporting Structure of Frame and Heat Anchor Pipe in Permafrost Regions

DONG Xuguang<sup>1</sup>, DONG Jianhua<sup>1,3</sup>, HE Tianhu<sup>1,2</sup>, MA Wei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Sciences, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In order to solve the slope failure caused by the freeze-thaw cycles and global temperature rising in permafrost regions, based on the idea of active cooling for permafrost protection, combined with the frame-anchor and heat pipe cooling technology, a new supporting structure applicable to permafrost slope was proposed, which can provide active cooling and anchor retaining functions, and can reduce the frost heaving damage. The technical principle of the new structure was described. The design control indexes of ultimate bearing capacity and heat balance, and the calculation method of thermo-force combined control for the structure were put forward. The structure and the corresponding calculation method were applied to a construction project. The results show that the proposed structure can prevent the degradation of the upper limit of permafrost slope, uplift the limit and improve the stability of permafrost slope. The method can describe accurately the working mechanism of the structure, which provides a theoretical basis for the design of the structure.

**Key words:** permafrost; slope; frame; heat anchor pipe; design and calculation

收稿日期: 2016-11-02; 修回日期: 2017-03-09  
基金项目: 国家自然科学基金(51268037); 甘肃省杰出青年基金(145RJDA330); 冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE201510)  
第一作者: 董旭光(1987-), 男, 甘肃通渭人, 博士研究生。  
E-mail: dxguang568@163.com  
通信作者: 董建华(1980-), 男, 甘肃甘谷人, 教授, 博士。  
E-mail: djhua512@163.com

因为工程建设规模的逐渐扩大和全球气候变暖对冻土环境的影响, 冻土边坡失稳灾害越来越多。例如, 仅青藏高原风火山附近热融滑塌就有 10 多处<sup>[1-2]</sup>; 美国的费尔班克斯-都逊科里克公路经一年冬季有 800 km 遭到滑坡损害, 冻土边坡灾害对道路安全运营造

成重大威胁<sup>[3]</sup>。冻土的特殊物理性质决定了温度是诱发边坡滑塌的主要因素,治理措施的选择对冻土边坡长期安全性有重要影响<sup>[3-4]</sup>。McRoberts 等<sup>[5]</sup>将冻土斜坡失稳划分为泥流、滑坡和崩塌三种类型;Hutchinson<sup>[6]</sup>提出分析冻融滑坡稳定性的总应力法;金钰梅<sup>[7]</sup>研究了冻土边坡降雨入渗机理。目前,主要的治理措施有:采用非冻胀粗骨料替换冻胀土,利用排水措施疏排水分,隔热以减少对边坡的热干扰<sup>[8]</sup>;采用非寒区支护结构,如框架锚杆、抗滑桩或重力式挡墙等<sup>[2]</sup>。然而,这些都属于被动措施,不能解决气温变暖背景下边坡上限退化、热融深度增加的问题,治理冻土边坡留有安全隐患,适用性受限。

热棒是一种内填传热工质的重力热管,利用工作介质气液两项对流循环换热,将冻土中的热量传送到外界冷空气,冷却地基<sup>[9-10]</sup>。热棒在寒区路基、管线等工程中得到广泛应用,其提高地基强度和抗冻融的良好效果得到普遍认同<sup>[11]</sup>。但是,热棒仅可冷却土体,无法注浆及锚固,不能将冻融活动层锚固于稳定土层。框架锚杆是一种既轻又柔的边坡支护结构,通过外框架、锚杆和坡后稳定土体共同承担滑动土体变形产生的推力来保持坡体稳定,具有良好的控制坡体变形能力,已在边坡工程中大量应用<sup>[12-13]</sup>。但该结构只能进行支挡,无法冷却土体,不能有效防治冻土融化。

综上所述,仅靠热棒或普通框架锚杆治理多年冻土边坡灾害均存在缺陷。因此,研究支挡和降温一体化的锚固结构及其相应计算方法,实现低价、安全治理多年冻土边坡灾害成为工程技术亟待解决的问题。本文基于冻土保护理念,结合框架锚杆和热棒技术,提出一种新型多年冻土边坡支护结构,并阐述其技术原理,给出相应的设计思路和实用计算方法,为该结构的设计提供理论依据。

## 1 框架热锚管结构提出及技术原理

### 1.1 结构提出

基于“主动冷却”保护冻土生存环境的理念,结合框架锚杆支护和热棒制冷技术,提出一种新型多年冻土边坡支护结构,由框架和热锚管构成。其中,框架由横梁、立柱和格栅挡板组成。热锚管为金属内管与金属外管同轴嵌套结构,一端内、外管平齐,另一端内管伸出外管,且外管与内管之间实体封闭构成中空封闭圆筒,封闭圆筒内充填液态氮或其他传热工质。金属内管的后段周围设有出浆孔和钢筋倒刺,圆筒中间局部加厚形成凸轮,凸轮外表面带有螺纹。平齐端与凸轮间的圆筒称为冷凝段,非平齐端与凸轮间的圆筒分为绝热段和蒸发段,靠近凸轮涂绝热层的为绝热段,远

离凸轮无绝热层的为蒸发段,有出浆孔和倒刺部分的为锚固段。冷凝段上安装散热片,金属外管和散热片外面涂防腐层。热锚管的绝热段、蒸发段和锚固段埋于坡体,冷凝段置于坡外,管内压力注入浆体,浆体从出浆孔流出与周围土体黏结将热锚管锚固于冻土层。坡面施作格栅挡板和框架;热锚管穿过横梁与立柱交叉部位,锚具与凸轮螺纹连接,将热锚管固定于框架。热锚管与水平面的夹角为  $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。框架热锚管结构立面和剖面见图 1、图 2,热锚管详图见图 3, A—A 剖面见图 4。图中,  $d_1$  为内管的内半径;  $d_2$  为内管的外半径;  $d_3$  为外管的内半径;  $d_4$  为外管的外半径。

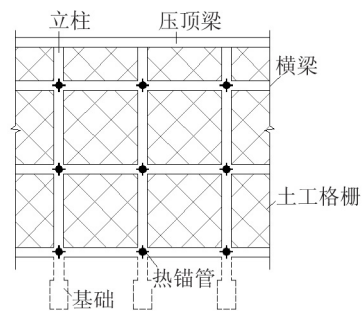


图1 框架热锚管支护结构立面

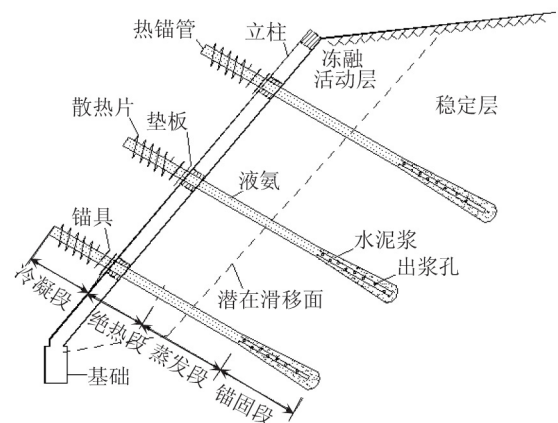


图2 框架热锚管支护结构剖面

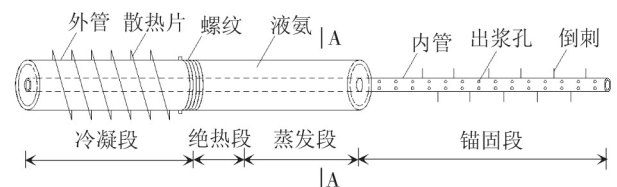


图3 热锚管详图

### 1.2 技术原理

框架热锚管是基于“主动冷却”保护冻土生存环境的理念,结合框架锚杆和热棒制冷技术的优点,克服各自的缺点而提出的一种新型冻土边坡支护结构,该结构是一种既能气液两相对流循环传热降温,又能注浆锚固和支护的轻柔性支护体系,其工作机理见图 5,主要分为 2 个方面。

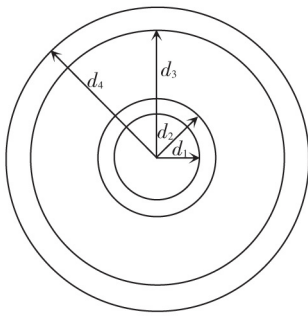


图4 热锚管A—A剖面图

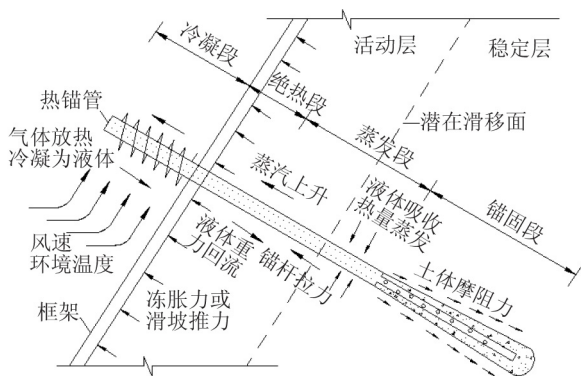


图5 框架热锚管结构工作原理图

### (1) 换热制冷

热锚管是该新型结构的对流换热制冷系统,冷凝段置于外界环境中,蒸发段埋入冻融活动层和稳定冻土层中,在温差作用下驱动管内传热工质(如氨、氟利昂、CO<sub>2</sub>等)的气液两相对流循环换热。冬季大气温度低于坡体温度,蒸发段的液态氨吸收周围土体的热量蒸发成气体,在气压差作用下沿圆筒内空腔上升至冷凝段,与置于大气中较冷的外管壁接触放出汽化潜热同时冷凝成液体,埋入土体的热锚管呈倾斜状态,在重力作用下冷凝液体沿管壁回流到蒸发段。如此循环往复,不断将冻融层和稳定冻土层的热量传输到大气中,将外环境冷量传输并储存于坡体内,从而降低边坡地温,抬升边坡冻土上限和提高冻融层的土体强度。夏季白天气温高于冻土温度,热锚管停止换热。然而,青藏高原地区多风、昼夜温差大,夏季夜间气温较低,换热工作在夜间启动,机理如同冬季,这对于提高夏季冻融活动层强度十分有利,可减轻热融滑塌。

### (2) 支挡锚固

框架和热锚管连接构成空间结构,两者协同工作充分利用岩土体自承能力,将冻融活动层锚固于冻结良好的稳定层。作用于格栅和框架的坡后土体滑坡推力或冻胀力通过锚具传至热锚管,然后通过热锚管锚固段与周围土层的摩阻力传至稳定地层。当土体冻胀时,结构变形大,冻胀力迅速减小,避免结构受力过大而失效,并且在融化时,结构部分变形恢复能紧贴坡面

继续支挡。

框架热锚管解决了注浆锚固与降温冷却的矛盾,是一种具有降温和支挡双重功能的锚固结构,且其结构质量轻、刚度小、变形能力强、整体性好、工艺简单,因此长期经济效益较好,应用前景良好。

## 2 结构设计方法

诱发冻土边坡失稳的主要原因决定了框架热锚管结构的设计目标:(1)防止边坡滑移失稳;(2)保持边坡天然上限不变或抬升上限。因此,应以极限承载力和热量平衡为控制指标,通过承载力和热稳定性计算来设计框架热锚管。

### 2.1 框架热锚管的承载力计算

框架热锚管支护结构主要由格栅挡土板、立柱、横梁和热锚管连接成空间结构,结构类似楼盖的梁板结构,该结构承载力设计主要包括4个方面。

#### (1) 框架热锚管的荷载计算

寒区边坡支护结构的最大特点是随季节变化支护结构承受交替变化的冻胀力和滑坡推力作用。而且,由大量研究<sup>[14-15]</sup>可知,冻胀力远大于滑坡推力,故以冻胀力作为设计荷载。由于冻胀力大小与约束强弱有关,目前仍无合理的计算方法。本文通过对比分析L形挡土墙和框架热锚管的差异,假定热锚管对框架的约束使结构对坡体的约束处处相同,即冻胀力呈矩形分布。参照规范<sup>[15]</sup>给出的L形挡土墙冻胀力计算方法进行计算,其大小为

$$p_f = m'_\sigma c_f \sigma_h = [1 - (s'/h'_f)^{1/2}] c_f \sigma_h \quad (1)$$

式中: $p_f$ 为挡土墙单位长度水平冻胀力; $m'_\sigma$ 为墙体变形影响系数; $c_f$ 为坡度影响系数; $\sigma_h$ 为单位水平冻胀力; $s'$ 为墙身允许水平位移值; $h'_f$ 为土体的冻胀量,其值为

$$h'_f = \epsilon h_f = \frac{0.09(\theta - \theta_u)}{3} \left( \frac{2\lambda_f n_f I_{af}}{S} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: $\epsilon$ 为冻胀应变; $h_f$ 为冻深; $\theta$ 为土体的总含水量; $\theta_u$ 为未冻水含量; $\lambda_f$ 为冻土的导热系数; $I_{af}$ 为气温冻结指数; $n_f$ 为冻结系数,取值参见文献<sup>[16]</sup>;S为土体的相变潜热,其值按下式计算<sup>[17]</sup>

$$S = L_w \rho_d (\theta - \theta_u) \quad (3)$$

式中: $\rho_d$ 为土体的干密度; $L_w$ 为水的相变潜热。

#### (2) 格栅挡土板计算

一般情况下,立柱间距和横梁间距相近,格栅挡土板上的荷载将沿两个方向传到四边支承上,根据横梁、立柱对格栅挡土板的支撑情况,格栅按四边简支计算。根据工程经验,考虑到格栅挡土板受力较小,按构造选配即可满足要求。

(3) 立柱和横梁计算

① 计算单元的选取

根据横梁、立柱作用的荷载将框架划分为横梁和立柱计算单元, 分别取立柱和横梁左右各一半作为计算单元, 然后进行单独计算, 单元划分见图 6。其中,  $S_0$  为悬臂段长度,  $S_x$  为立柱间距;  $S_y$  为横梁间距;  $\eta_1$  为立柱计算系数,  $\eta_2$  为横梁计算系数, 根据荷载等效原理, 参照文献[18]中楼盖计算原理, 其值均取 0.75。

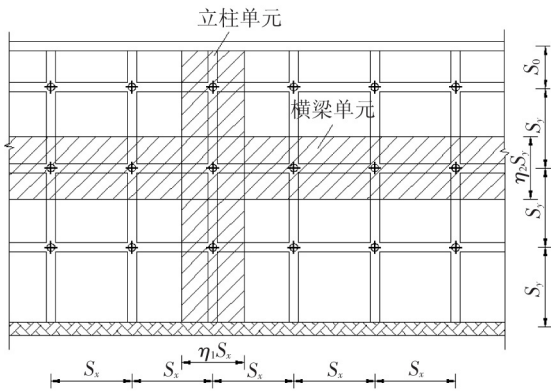


图 6 立柱、横梁单元划分

② 横梁和立柱的间距计算

热锚管既承担锚固受力, 又承担降温保护冻土的作用, 为实现合理和经济设计, 以传热半径来确定横梁、立柱间距。热锚管以圆柱形向冻土层传热, 避免两根热锚管传热相互影响, 取两传热圆柱相切为热锚管间距, 见图 7。

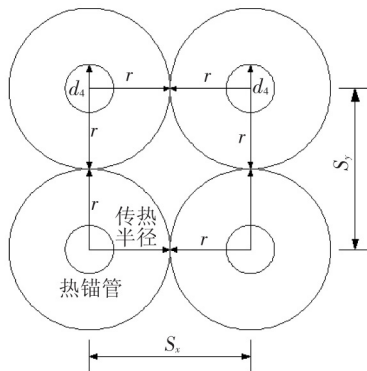


图 7 热锚管间距计算简图

横梁、立柱间距为

$$S_x = S_y = 2r \quad (4)$$

式中:  $r$  为热锚管的传热半径, 可根据热锚管产冷量恰好等于融化土体冻结相变潜热得到, 其值按下式超越方程计算<sup>[14]</sup>

$$I_{af} = \frac{S}{24} \left[ \pi L_e R_f (r^2 - d_4^2) + \frac{r^2}{4\lambda_u} \left( \ln \frac{r^2}{d_4^2} - 1 \right) + \frac{d_4^2}{4\lambda_u} \right] \quad (5)$$

式中:  $L_e$  为热锚管的蒸发段长度;  $\lambda_u$  为融土的导热系数;  $R_f$  为热锚管的热阻, 其值按下式计算<sup>[12]</sup>

$$R_f = \frac{1}{A_c e h} \quad (6)$$

其中

$$A_c = n A_1 \times 2\pi d_4 L_c \quad (7)$$

$$e h = 2.75 + 1.51 (v \sin \alpha)^{0.2} \quad (8)$$

式中:  $A_c$  为散热片的表面积;  $A_1$  为单圈散热片的面积;  $n$  为散热片个数;  $L_c$  为冷凝段长度;  $e$  为散热片的有效率;  $h$  为散热片表面的放热系数;  $v$  为平均风速;  $\alpha$  为热锚管与水平面夹角。

③ 横梁和立柱的内力计算

根据立柱单元的划分及受力状况, 立柱按多跨连续梁计算, 见图 8。其中,  $p_1$  为立柱上作用的荷载,  $p_1 = \eta_1 p_f S_x$ 。多跨连续梁为超静定结构, 利用力法进行求解, 方程为

$$\delta N \cos \beta + \Delta_p = 0 \quad (9)$$

式中:  $\delta$  为多余未知力所形成的柔度系数矩阵;  $N$  为热锚管拉力向量;  $\beta$  为热锚管与坡面法线的夹角;  $\Delta_p$  为荷载所形成的位移向量。

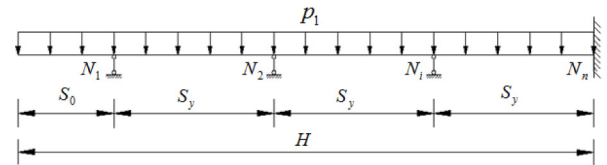


图 8 立柱计算

柔度系数矩阵为

$$\delta_{ij} = \int \frac{\bar{M}_i \bar{M}_j}{EI} dy \quad (10)$$

荷载位移向量为

$$\Delta_{ip} = \int \frac{\bar{M}_i M_p}{EI} dy \quad (11)$$

式中:  $EI$  为抗弯刚度;  $\bar{M}_i, \bar{M}_j, M_p$  分别为  $\bar{R}_i = 1, \bar{R}_j = 1$  和冻胀力单独作用在立柱上的弯矩。

横梁可视为是以立柱为铰支座的多跨连续梁, 一般情况下横梁间距相等, 故横梁可简化为等跨五跨连续梁计算, 见图 9。

$$M_i = \alpha_i p_2 l_0^2 \quad (12)$$

$$V_i = \beta_i p_2 l_n \quad (13)$$

式中:  $M_i$  为横梁、立柱各跨的跨中、支座截面的弯矩;  $V_i$  为横梁、立柱支座截面的剪力;  $\alpha_i$  为弯矩系数,  $\beta_i$  为剪力系数, 其值均参见文献[18];  $l_0, l_n$  为横梁、立柱计算跨度和净跨;  $p_2$  为横梁上作用的荷载,  $p_2 = \eta_2 p_f S_y$ 。

④ 横梁和立柱的截面设计

按正截面受弯承载力计算分别选配立柱、横梁的



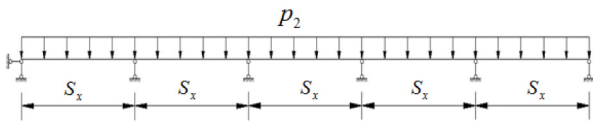


图9 横梁计算

受力纵筋,按斜截面受剪承载力计算分别选配立柱、横梁的箍筋。

(4) 热锚管锚承载力计算

锚固段长度按下式计算<sup>[12]</sup>

$$L_a = \frac{N}{\varphi_{LD} \pi D f_{ca}} \quad (14)$$

式中: \$L\_a\$ 为锚固段长度; \$\varphi\_{LD}\$ 为热锚管冻结强度修正系数; \$D\$ 为锚固体直径; \$f\_{ca}\$ 为热锚管与周围冻土冻结强度特征值。

根据热锚管的组成,其总长度 \$L\$ 按下式计算

$$L = L_c + L_i + L_e + L_a \quad (15)$$

式中: \$L\_i\$ 为绝热段长度。

2.2 热锚管的传热计算

(1) 充液量计算

充液量是保证热锚管正常换热的重要参数,充液量过大会引起不稳定传热,过小会发生干涸。根据文献<sup>[19]</sup>可知由 Streltsov 公式得到的充液量偏小,最佳充液量为热棒总容积的 20%~30%。因此,本文采用经验公式计算热锚管充液量 \$G\$ 为

$$G = (0.2 \sim 0.3) \pi (d_3^2 - d_2^2) (L_c + L_i + L_e) \quad (16)$$

(2) 产冷量计算

热锚管换热工作过程非常复杂,实际产冷量不仅取决于自身的额定功率,还取决于气温、风速、周围土体温度等因素。由于管壁热阻、工质蒸发热阻等相对较小,本文仅考虑冷凝段散热片和土体热阻。热锚管一边坡系统的换热流程见图 10,产冷量按下式计算<sup>[14]</sup>

$$Q_y = q_y \times t_f = \frac{T_s - T_a}{R_f + R_s} t_f \quad (17)$$

式中: \$Q\_y\$ 为热锚管产冷量; \$q\_y\$ 为热锚管实际换热功率; \$t\_f\$ 为热锚管工作时间; \$T\_s\$ 为计算期平均地温; \$T\_a\$ 为计算期平均气温; \$R\_s\$ 为蒸发段周围土体热阻,其式为

$$R_s = \frac{\ln(r/d_4)}{2\pi\lambda_u L_e} \quad (18)$$

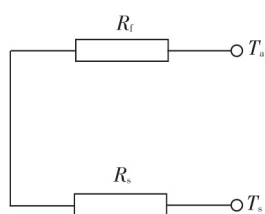


图10 热锚管的热阻流程图

2.3 热锚管传热范围内边坡耗冷量计算

气温逐年升高引起冻土边坡坡面上限退化,引起坡面上限退化的热量为边坡耗冷量。边坡传热过程类似于-一维平壁传热,假设年平均气温升高相等,根据热传导理论得到相邻两个冻融循环内,热锚管传热影响范围内边坡耗冷量为

$$Q_m = A_o \lambda_u \Delta T t / \Delta h = S_x S_y \left( \frac{S \lambda_u n_t \Delta T t}{2} \right)^{1/2} \quad (19)$$

式中: \$Q\_m\$ 为坡面上限退化热量; \$A\_o\$ 为以传热半径为边长的正方形面积; \$\Delta T\$ 为年平均气温升高值; \$t\$ 为一个冻融周期, \$a\$, 本文取 1 a; \$\Delta h\$ 为年平均坡面上限退化深度; \$n\_t\$ 为融化系数,取值参见文献<sup>[14]</sup>。

2.4 热锚管传热和承载力验算

为了达到热锚管支护边坡的稳定性目标,必须对主要控制指标如加固坡体热稳定性、传热极限和承载力进行验算。

(1) 边坡热稳定性验算

设计时应满足耗冷量小于产冷量,即

$$Q_m \leq Q_y / K \quad (20)$$

式中: \$K\$ 为安全系数,取值参见文献<sup>[14]</sup>。

当热稳定性满足时,剩余冷量将抬升冻土边坡上限,抬升量 \$\Delta H\$ 按下式计算

$$\Delta H = \frac{Q_y - Q_m}{K S A_o} \quad (21)$$

如果 \$\Delta H \geq 0\$,在气温变暖背景下,框架热锚管支护的边坡上限不退化或甚至有抬升趋势,即热融滑移面保持不变或向坡面移动,滑塌量不变或有减少。普通结构支护的边坡,气温变暖时,边坡上限逐年下降,滑移面深度增大,滑塌量不断增加。因此,当框架热锚管支护边坡的上限抬升量 \$\Delta H \geq 0\$ 时,间接说明该结构可提高冻土边坡的稳定性。

(2) 传热极限验算

热锚管的几何尺寸直接影响管内液体流通面积和蒸汽流动马赫数大小,故管径尺寸必须满足携带极限、声速极限和马赫数要求。根据两相封闭重力式热管携带极限、声速极限、马赫数决定的传热极限的推导方法给出热锚管相应的传热极限。

① 携带极限计算

$$q_x = \frac{C_k^2 h_{fg} \pi (d_3^2 - d_2^2) [g \sigma' (\rho_l - \rho_v)]^{1/4}}{[\rho_v^{-1/4} + \rho_l^{-1/4}]^2} \quad (22)$$

式中: \$q\_x\$ 为热锚管轴向传输功率的携带极限; \$C\_k\$ 为常数; \$h\_{fg}\$ 为工质气化潜热; \$g\$ 为重力加速度; \$\sigma'\$ 为工质表面张力系数; \$\rho\_l, \rho\_v\$ 分别为工质的液相、气相密度。

② 声速极限计算

$$q_s = \rho_v h_{fg} \pi (d_3^2 - d_2^2) \left[ \frac{k R_v T_o}{2(k+1)} \right]^{1/2} \quad (23)$$

式中: $q_s$  为热锚管中蒸汽流动产生“阻塞”所限制的声速极限; $k$  为蒸汽的绝热指数, $k=C_p/C_v$ ;  $R_v$  为蒸汽的气体常数, $R_v=R_0/M$ ,  $R_0$  为标准气压下气体常数,  $M$  为气体分子量;  $T_0$  为蒸汽温度。

③ 最大马赫数不超过 0.2 时的传热极限计算

$$q_m = 0.2\rho_v\pi h_{fg}(d_3^2 - d_2^2)(kR_vT_0)^{1/2} \quad (24)$$

式中: $q_m$  为最大传热极限。

④ 换热功率验算

为了保证热锚管的正常换热工作和制冷效率,必须对换热功率进行验算。

$$q_e = \min\{q_x, q_s, q_m\}/K \geq q_y \quad (25)$$

式中: $q_e$  为额定功率。

(3) 管壁承载力验算

热锚管的内、外管壁厚度应由拉力和管内工质处于最高温度时的蒸汽压力共同决定,由于拉力远大于蒸汽压力,故管壁厚度由拉力确定。

内管壁厚度

$$(d_2^2 - d_1^2) \geq N/(\pi[\sigma]) \quad (26)$$

外管壁厚度

$$(d_4^2 - d_3^2) \geq N/(\pi[\sigma]) \quad (27)$$

式中: $[\sigma]$  为材料的抗拉强度。

2.5 框架热锚管支护冻土边坡设计步骤

框架热锚管支护多年冻土边坡设计步骤见图 11 所示的流程图。

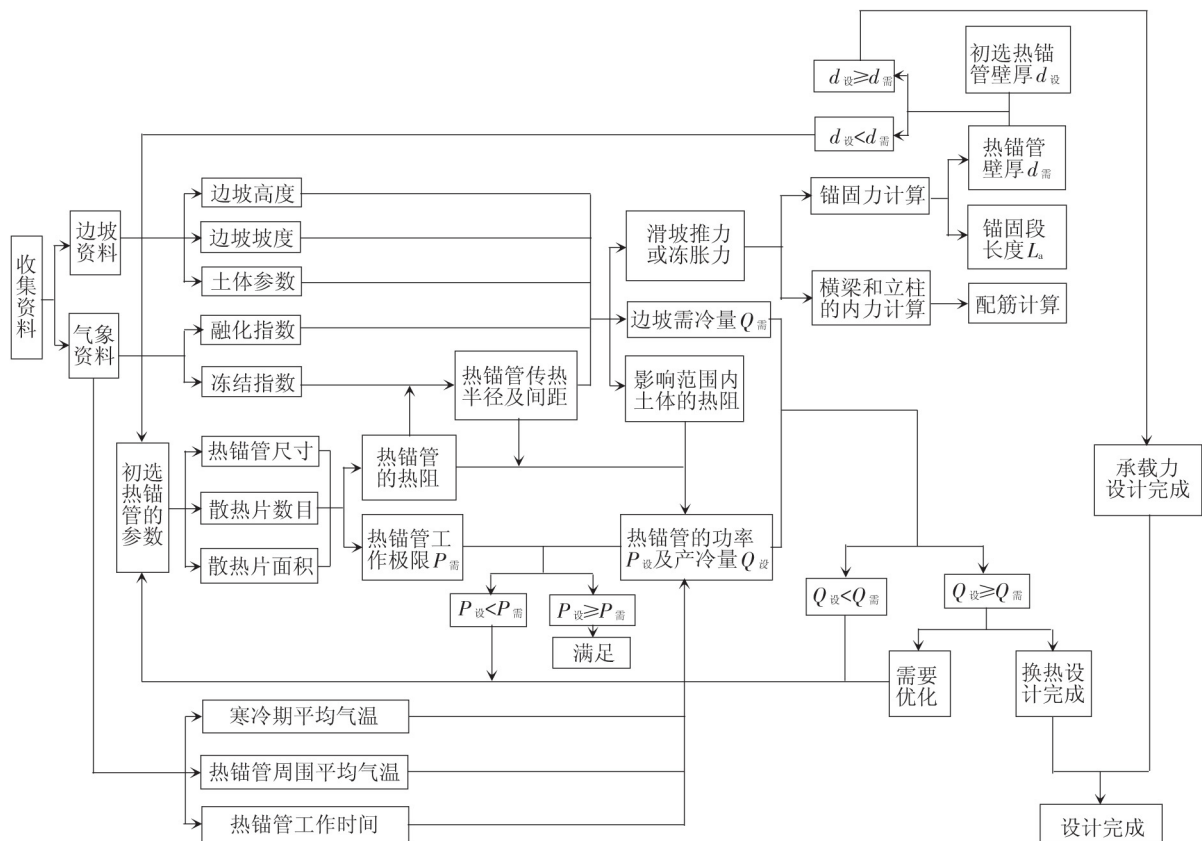


图 11 框架热锚管支护多年冻土边坡设计流程图

3 工程算例

3.1 工程概况

青海省大阪山开挖路堑边坡,开挖长度 130 m,坡高 9.0 m,坡度 78°,开挖扰动使原有冻土层的热量平衡被打破,据气象观测和地质状况调查资料,大阪山地区年平均气温 -3 °C,边坡海拔高度为 3 792 m 左右,在边坡加固深度范围内土质均匀,均为第四系全新统坡积粉质黏土,采用带格栅的框架热锚管结构支护,边坡安全等级为一级,取土体含水量  $\theta=25\%$ ,未冻水含

量  $\theta_u=8\%$ 。冻结期的平均地温 -2.6 °C,土体参数见表 1。该地区气温曲线  $T_a = -3 + 12\sin(2\pi t_h/365 + \pi/6) + 2.5t_h/50/365$ ,  $t_h$  为时间, d。冻结系数  $n_f = 0.7$ ;融化系数  $n_t = 3.1$ ;热稳定安全系数取  $K = 1.5$ 。

表 1 边坡土体物理力学和热力学参数

重度/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ (°)	极限侧 摩阻力/ kPa	$\lambda_u$ / ( $J \cdot (m \cdot$ $^{\circ}C \cdot h)^{-1}$ )	$\lambda_t$ / ( $J \cdot (m \cdot$ $^{\circ}C \cdot h)^{-1}$ )
18.5	12	14	170	4 068	5 688

### 3.2 设计过程及结果

#### (1) 初设参数选取

根据工程需求、热棒路基<sup>[12,19]</sup>和框架锚杆<sup>[12-13]</sup>工程经验,一般蒸发段长度取 $(1\sim 3)h_f$ ;冷凝段长取 $(0.4\sim 1.0)L_e$ ;绝热段取 $(0.2\sim 0.3)h_f$ ;热锚管内管径取 $40\sim 70$  mm,外管径取 $90\sim 140$  mm,间距取 $2.0\sim 4.0$  m;梁、柱截面一般取 $200\sim 400$  mm。初次选取热锚管内管径 $40$  mm,外管径 $140$  mm,管壁厚 $3$  mm;冷凝段长度 $1.8$  m,绝热段长 $0.5$  m,蒸发段长 $3.0$  m,有散热片部分长 $1.5$  m;散热片间距 $20$  mm、高 $30$  mm。传热工质为液氨,热锚管倾角 $20^\circ$ 。氨在 $270$  K时有关参数如下:液体密度 $\rho_l=643$  kg/m<sup>3</sup>,气体密度 $\rho_v=3.09$  kg/m<sup>3</sup>,蒸汽温度 $T_0=270$  K,液体表面张力系数 $\sigma'=2.69\times 10^{-2}$  N/m,汽化潜热 $h_{fg}=1.273\times 10^6$  J/kg,蒸汽绝热指数 $k=1.33$ ,气体常数 $R_v=0.489\times 10^3$  J/K。钢管选用 Q400 级,锚固体直径 $220$  mm。横梁、立柱梁、柱截面均取 $300$  mm,采用 C30 混凝土。

#### (2) 详细设计验算

##### ① 初设参数试算及调整

经过多次调整参数试算,取热锚管的内管半径为 $25$  mm,外管半径为 $50$  mm,内外管壁厚均为 $4$  mm,其余参数与上述相同,结果满足要求且比较经济,下面给出此参数的设计验算过程。

##### ② 冻融指数和热锚管热阻的确定

根据气温曲线和土热参数可得,冻结期平均气温为 $-9.6^\circ\text{C}$ ,冻结指数 $I_{af}=1\ 987^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ ,热锚管工作时间为 $160$  d。土体的相变潜热 $S=84.16$  MJ/m<sup>3</sup>。由式(6)~式(8)可得,热阻 $R_f=0.13^\circ\text{C}/\text{W}$ ;散热片表面积 $A_c=1.743$  m<sup>2</sup>;换热系数 $eh=4.4$  W/( $^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2$ )。

##### ③ 热锚管间距确定

由式(4)、式(5)可得:传热半径 $r=0.98$  m;横梁、立柱间距 $S_x=S_y=1.96$  m,取 $S_x=S_y=2.2$  m。从坡底到坡顶依次在 $1.2$ 、 $3.4$ 、 $5.6$ 、 $7.8$  m处布设热锚管。

##### ④ 横梁、立柱设计

由式(1)、式(2)可得:冻胀力 $p_f=43.4$  kPa。由式(12)、式(13)可得,立柱、横梁上作用荷载 $p_1=p_2=78.8$  kN/m;横梁弯矩 $M=34.9$  kN·m,横梁剪力 $V=94.5$  kN,立柱弯矩 $M=56.7$  kN/m,立柱剪力 $V=105.9$  kN;横梁、立柱的横截面正筋、负筋选配 $2\Phi 18$ ,箍筋选配 $\Phi 10@150$ 。

##### ⑤ 热锚管长度计算

由式(9)~式(11)可得,从坡底到坡顶热锚管的

拉力依次为 $148.5$ 、 $179.9$ 、 $167.6$ 、 $197.4$  kN。由于各排热锚管拉力相差不大,统一取 $200$  kN为设计值。由式(14)、式(15)可得,热锚管锚固段长度 $L_a=2.6$  m,总长度 $L=7.9$  m,取 $8.0$  m。

##### ⑥ 产冷量和耗冷量计算

由式(16)~式(19)可得,充流量 $G=6.7\times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>,土体热阻 $R_s=0.12^\circ\text{C}/\text{W}$ ,实际换热功率 $q_y=28$  W,热锚管产冷量 $Q_y=387.1$  MJ,热锚管传热范围内边坡耗冷量 $Q_m=73.8$  MJ。

##### ⑦ 传热性能和承载力验算

由式(20)、式(21)可得,边坡热稳定性验算 $Q_m < (Q_y/1.5=258.1$  MJ),上限抬升量 $\Delta H=0.51$  m,边坡热稳定性满足要求,滑移体厚度减小 $0.51$  m。由式(22)~式(25)得, $q_x=21.0$  kW, $q_s=402.6$  kW, $q_m=173.8$  kW, $q_e=14\ 000$  W $>28$  W,热锚管传热极限满足要求。由式(26)、式(27)得, $[(d_2^2-d_1^2)=184$  mm] $>177$  mm, $[(d_4^2-d_3^2)=384$  mm] $>177$  mm,内、外管壁承载力满足要求。

由上述验算可知,框架热锚管支护结构不仅能防止冻土边坡上限退化,还能抬升边坡上限,上限抬升后,热融滑移面向坡面移动,滑塌量减小,边坡稳定性显著提高。

#### (3) 设计结果

框架热锚管支护多年冻土边坡设计结果见图12、表2、表3。

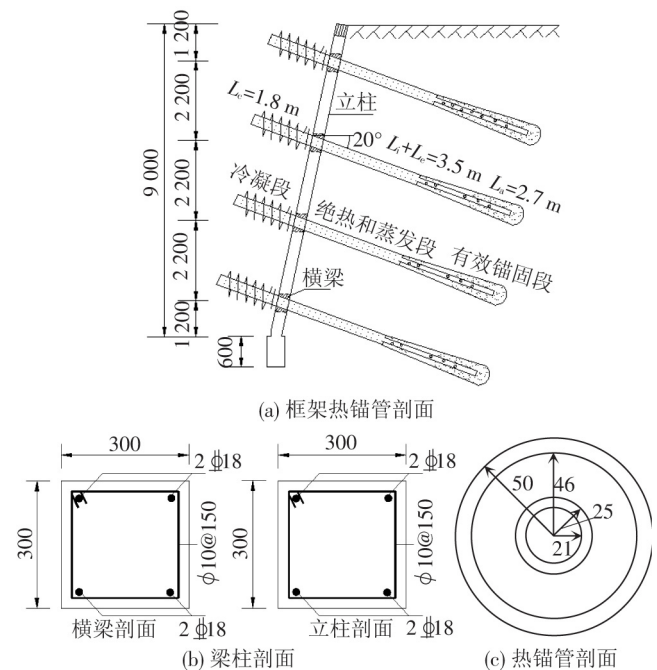


图12 支护设计剖面图(单位:mm)

表 2 框架设计结果

网格/(mm×mm)		25.4×25.4
土工格栅	纵向断裂率	≤4%
	纵向断裂率	≤4%
	纵向强度/(kN·m <sup>-1</sup> )	80
	横向强度(kN·m <sup>-1</sup> )	80
间距/m		2.2
截面尺寸/(mm×mm)		300×300
横梁	受弯正筋	2Φ18
	受弯负筋	2Φ18
	箍筋	Φ10@200
间距/m		2.2
截面尺寸/(mm×mm)		300×300
立柱	受弯正筋	2Φ18
	受弯负筋	2Φ18
	箍筋	Φ10@150

表 3 热锚管设计结果

热锚管层数	4	冷凝段长度/m	1.8
绝热段长度/m	0.5	蒸发段长度/m	3.0
锚固段长度/m	2.7	内管直径/mm	50
位置标高/m	1.2 3.4 5.6 7.8	外管直径/mm	100
内、外管壁厚/mm	4	锚固体直径/mm	220
散热片数/片	50	充液量/m <sup>3</sup>	6.7×10 <sup>-3</sup>

## 4 结论

(1) 基于保护冻土理念,提出一种治理多年冻土边坡失稳灾害的新型框架热锚管支护结构。该结构具有锚固支挡、主动降温冷却、柔性变形减轻冻胀等功能,是一种无源冷却的轻柔性锚固结构。与其他措施相比,结构设计理念新颖、技术先进可行、工艺简单,能够防止边坡发生热融滑塌和上限退化,具有较好的应用前景。

(2) 以保护冻土为原则,给出框架热锚管结构支护边坡的设计思路,提出极限承载力和热量平衡两个设计控制指标,给出热-力共同控制的实用计算方法,为工程设计提供理论依据。

(3) 分析表明:框架热锚管不仅能防止冻土边坡上限退化,还可抬升上限,提高边坡稳定性;计算方法能够真实描述结构的工作机理。

(4) 本文针对所提出的框架热锚管结构仅给出一种可行的简化计算方法,但该方法还存在一些问题需

要进一步改进和完善。例如,这种柔性结构的冻胀力、换热机理和框架-热锚管-土体相互作用等问题仍不清楚,还需结合室内外试验、理论和数值分析来进一步明确结构的工作机理及承载力性状。

### 参考文献:

- [1] 马巍,牛富俊,穆彦虎. 青藏高原重大冻土工程的基础研究[J]. 地球科学进展,2012,27(11):1 185-1 191.  
MA Wei, NIU Fujun, MU Yanhu. Basic Research on the Major Permafrost Projects in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advances in Earth Science,2012,27(11):1 185-1 191.
- [2] 熊治文,廖小平,徐兵魁,等. 青藏铁路多年冻土边坡与斜坡路基研究综述[J]. 铁道学报,2010,32(4):102-107.  
XIONG Zhiwen, LIAO Xiaoping, XU Bingkui, et al. Summary on Research on Slope and Slope Embankment in Permafrost Region of Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of the China Railway Society,2010,32(4):102-107.
- [3] 靳德武. 青藏高原多年冻土区斜坡稳定性研究[D]. 西安:长安大学,2004.
- [4] LI Tongchun, GUO Lina, JI Wei, et al. Reliability Analysis of Slope Stability Under the Condition of Extreme Ice-snow and Frozen Disaster[C]//The 12th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments, Hawaii, Earth and Space, 2010, 2 975-2 982.
- [5] MCRBORTS E C, MORGENSTERN N R. The Stability of Thawing Slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(4):447-469.
- [6] HUTCHINSON J N. Periglacial Solifluction: an Approximate Mechanism for Clay Soil[J]. Geotechnique, 1974, 24 (3):438-443.
- [7] 金钰梅. 冻土边坡降雨入渗机理研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [8] 董旭光,董建华,何天虎. 铺设保温板的多年冻土边坡水热力耦合分析[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2017,45 (1):35-40.  
DONG Xuguang, DONG Jianhua, HE Tianhu. Coupling Analysis of Moisture Heat and Stress Fields of Frozen Soil Slope with Insulation Board[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2017,45(1):35-40.
- [9] 盛煜,温智,马巍,等. 青藏铁路多年冻土区热棒路基温度场三维非线性分析[J]. 铁道学报,2006,28(1):125-130.  
SHENG Yu, WEN Zhi, MA Wei, et al. Three-dimensional Nonlinear Analysis of Thermal Regime of the Two-phase Closed Thermosyphon Embankment of Qinghai-Tibetan Railway[J]. Journal of the China Railway Society,2006,28 (1):125-130.
- [10] 马巍,程国栋,吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法



- 研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 579-587.
- MA Wei, CHENG Guodong, WU Qingbai. Preliminary Study on Technology of Cooling Foundation in Permafrost Regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 579-587.
- [11] ZHANG M Y, LAI Y M, ZHANG J M, et al. Numerical Study on Cooling Characteristics of Two-phase Closed Thermosyphon Embankment in Permafrost Regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(2): 203-210.
- [12] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [13] DONG Jianhua, ZHU Yapeng, ZHOU Yong, et al. Dynamic Calculation Model and Seismic Response for Frame Supporting Structure with Prestressed Anchors[J]. Science China Technological Sciences (E), 2010, 53(7): 1 957-1 966.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 118—2011 冻土地区建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [15] 中华人民共和国水利部. SL 23—2006, 渠系工程抗冻胀设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [16] 丁靖康, 赫贵生. 年平均气温临界值——设计青藏高原多年冻土区路堤临界高度的一个重要因素[J]. 冰川冻土, 2002, 22(4): 333-339.
- DING Jingkang, HE Guisheng. The Critical Value of Mean Annual Air Temperature——An Important Factor for Designing the Critical Height of Embankment in Permafrost Regions of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 22(4): 333-339.
- [17] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [18] 朱彦鹏, 田稳苓, 马成松. 混凝土结构设计[M]. 上海: 同济大学出版社, 2012.
- [19] 金龙. 多年冻土区热管路基降温效能分析与设计方法研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2013.
- (责任编辑 闫洪霞)

## 京沪高铁安全运营 6 周年

2017 年 6 月 30 日, 京沪高速铁路开通运营满 6 周年, 累计发送旅客突破 6.3 亿人次, 取得了显著的经济效益和社会效益。

6 年来, 京沪高铁在中国铁路总公司的领导下, 安全持续稳定, 运量逐年大幅增长, 运输效率不断提高, 服务周到、品牌响亮, 向世人展示了快速发展的中国高铁最新成果。

京沪高铁于 2011 年 6 月 30 日开通运营, 2013 年 2 月 25 日通过国家验收, 2016 年 1 月 8 日获 2015 年度国家科学技术进步奖特等奖。截至 2017 年 6 月 30 日, 京沪高铁已安全运营 2 193 d, 累计开行列车 58.387 9 万列, 年均增长 18.6%, 累计运送旅客突破 6.3 亿人次, 年均增长 21.2%。

京沪高铁人流如潮, 旅客发送量一年上一个大台阶。2014 年京沪高铁扭亏为盈, 2015 年实现股东分红, 2016 年及今年上半年盈利水平进一步提高。2017 年, 京沪高铁每日开行列车平均 426 列, 高速列车最小追踪间隔可达 3 min, 1 月 19 日创造了日发送动车 499 列的历史新高; 5 月 1 日创造了运送旅客 66.6 万人次的单日旅客发送量最高纪录。