



CECS G XXXX:2018

中国工程建设协会标准

**Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization**

多年冻土地区热棒路基设计与施工技术规范
(征求意见稿)

**Technical specification for the design and construction of
thermosyphon embankments in permafrost regions**

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于征求〈2016年第一批工程建设协会标准制订、修订计划〉（草案）意见的通知》（建标协字[2016]33号）的要求，由中交第一公路勘察设计研究院有限公司成立标准编制组，经广泛调查研究，结合工程实践，认真总结经验，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本标准的主要内容是：1.总则；2.术语、符号；3.热棒路基设计；4.热棒路基施工、检测及质量验收。

本标准由中国工程建设标准化协会工程管理专业委员会负责归口管理，由中交第一公路勘察设计研究院有限公司负责具体技术内容解释。如有需要修改和补充之处，请将有关意见和建议寄至中交第一公路勘察设计研究院有限公司（地址：陕西省西安市科技四路205号，邮编563003）。

主 编 单 位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

主 编：汪双杰

主 要 参 编 人 员：陈建兵 金 龙 朱东鹏 符 进 董元宏 刘 戈

张会建 彭 惠 李金平 樊 凯 穆 柯 袁 堃

邵广军 陈冬根 郭宏新 孙 田 周江洪

目录

1.总则	1
2.术语、符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3.热棒路基设计	6
3.1 一般要求	6
3.2 热棒路基适用性	7
3.3 热棒路基设计	8
3.4 热棒设计	14
4.热棒路基施工、检测及质量验收	18
4.1 一般规定	18
4.2 插入式热棒施工方法	18
4.3 填埋式热棒施工方法	21
4.4 热棒路基检测	23
附录 A 路基下冻土每年融化深度	26
附录 B 热棒工作时间的计算方法	27
附录 C 热棒冷却半径的计算方法	28
附录 D 热棒热阻的计算方法	30
附录 E 常用热棒路基一般设计图	33
附录 F 热棒日常养护	43
条文说明	44
1 总则	44
3 热棒路基设计	46
4 热棒路基施工、检测及质量验收	67

1.总则

1.0.1 为推动热棒路基在多年冻土地地区道路工程建设中的应用，提升热棒路基的设计、施工及质量控制等技术水平，确保工程质量，做到技术先进、安全可靠、经济合理，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于多年冻土地地区公路路基工程中应用热棒技术的设计、施工、检测及验收。各等级公路设计与施工均可参考。

1.0.3 多年冻土区热棒路基的设计应遵循能量平衡的原则，即在一年的冻融循环周期内，通过合理设计热棒路基结构，使得冻土地基通过热棒耗散的热量和吸收的热量达到平衡状态。

1.0.4 多年冻土区热棒路基的施工应考虑工程与多年冻土的相互影响，减少对冻土环境的扰动。

1.0.5 热棒路基的设计与施工应积极采用成熟可靠的新技术、新材料、新设备、新工艺。

1.0.6 热棒路基的设计、施工除应遵守本规范的规定外，尚应符合国家现行有关强制性标准、规范的规定。

2.术语、符号

2.1 术语

2.1.1 热棒 thermosyphon

用于多年冻土区，工作温度在 200K~333K（-73℃~60℃）之间，蒸发段在下方、冷凝段在上方、管内凝结液依靠重力而回流的传热管。

2.1.2 热棒路基 thermosyphon embankment

在路基中埋置热棒，利用热棒将冬季大气中的“冷能”储存于冻土中，以保证多年冻土区路基稳定的路基形式。

2.1.3 工质 working fluid

热棒内用于传递热量的介质。

2.1.4 蒸发段 evaporator section

热棒工质吸热汽化的部分。

2.1.5 冷凝段 condenser section

热棒工质放热凝结的部分。

2.1.6 绝热段 insulation section

热棒蒸发段与冷凝段之间，不与外界换热的部分。

2.1.7 等温特性 isothermal characteristics

在一定的热负荷和工作条件下，热棒内部工质蒸汽温度沿长度方向呈现出温度均匀且相等的特征。

2.1.8 启动温差 starting temperature

热棒进入工作状态时的蒸发段与冷凝段温度差值。

2.1.9 多年冻土 permafrost

冻结状态持续 2 年以上的土层（土壤、土、岩石）。

2.1.10 多年冻土上限 permafrost table

多年冻土层的顶面，也是指地表以下位置最深的冻融土层的界面。

天然条件下的多年冻土上界面为多年冻土天然上限。

2.1.11 年平均地温 mean annual ground temperature

地表以下温度随季节而变化，其变化幅度随深度增加而衰减。在某一深度以下，地温在一年内相对不变。这一深度称为地温年变化深度，该处的地温即为年平均地温。

2.1.12 融化盘 thaw bulb

在路基下，多年冻土地基土的一部分发生融化，形如盘、盆状，称为融化盘。

2.1.13 冻结指数 freezing index

一年（或整个冬季）中连续地低于 0°C 气温的持续时间和其数值乘积的总和，以度·日（ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ ）或度·月（ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{month}$ ）表示。

2.2 符号

T_a ——年平均气温；

T_d ——日平均气温；

T_g ——年平均地温；

R_l ——热棒各部分的等效热阻；

R_a ——热棒的等效热阻；

R_s ——热棒影响范围内土体热阻；

A_{ei} ——热棒蒸发段内表面积；

A_{ci} ——热棒冷凝段内表面积;

A_{co} ——热棒冷凝段面积;

A ——融化盘面积;

α_e ——热棒蒸发换热系数;

α_{ci} ——凝结换热系数;

α_{co} ——冷凝段外部换热系数;

d_o ——热棒外径;

d_i ——热棒内径;

l_c ——冷凝段长度;

l_e ——热棒蒸发段的长度;

l ——路基基底宽度;

n ——冷凝段散热翅片个数;

λ ——管壁材料的导热系数;

λ_a ——空气的导热系数;

λ_s ——土体导热系数;

ρ_f ——空气的密度;

ρ_d ——土体干密度;

w ——土体含水率 (含冰量);

L ——冰水相变潜热;

v_f ——外界风速;

Nu_f ——努赛尔数;

Re_f ——热棒外部空气的雷诺数;

μ_f ——空气的动力粘度;

$\frac{s_t}{H_c}$ 、 $\frac{s_t}{\delta_f}$ ——翅片间距和翅片高度之比、翅片间距与翅片厚度之比;

r_f ——热棒的冷却半径;

W ——热棒的实际功率;

Q_a ——单根热棒的年内传热量;

Q_L ——土体融化潜热;

Q ——热棒的年内传热量;

K ——安全系数;

h ——路基下冻土每年融化深度;

t_1 ——冷季开始时间 (日);

t_2 ——冷季结束时间 (日);

t_{t1} ——热棒开始工作时间 (日);

t_{t2} ——热棒结束工作时间 (日);

FI ——冻结指数。

3.热棒路基设计

3.1 一般要求

3.1.1 多年冻土地区热棒路基应根据工程方案、场地条件，合理选择勘察方法，保证勘察质量，满足方案设计的需要，并应充分考虑设计方案的经济性。

3.1.2 多年冻土地区热棒路基设计应收集沿线地形、地貌资料；既有道路勘察、设计、施工、试验工程观测资料；区域日平均气温（或月平均气温）数据；区域的风速资料。

3.1.3 热棒路基从结构上由路基和热棒两部分组成。热棒路基的路基部分的设计应符合《公路路基设计规范 JTG D30-2015》中的相关规定要求。

1 路基可根据地形采用路堤、路堑、半填半挖、低填浅挖等多种路基形式。

2 路基采用路堤通过时，路堤填高宜小于 3m。

3 存在多年冻土层的挖方路基，应采取封闭保护措施，避免冻土层长期暴露吸热引起的边坡病害。

4 热棒宜设置在路肩上。

3.1.4 路基设计应考虑地表水对多年冻土的不利影响，采取措施疏导地表水，做好路基排水防护设计。

1 排水设施应耐冰冻、耐冲刷、耐盐蚀。

2 排水措施应采取防渗处理措施。

3 排水边沟断面可采用三角形、矩形、阶梯形和浅碟形等形式。

4 挖方路段或斜坡路堤上方流入路界的地表径流量大时，应设置截水沟。

3.1.5 路基填筑应选择不冻胀或弱冻胀及弱融沉性的土石填料。严禁使用富含腐殖质的土、草炭土、泥炭土、草皮以及冻土作填料。

3.1.6 多年冻土地区热棒路基勘察应查明地层岩性、多年冻土类型、含冰量、天然上限和年平均地温。

3.1.7 工程地质测试应确定热棒蒸发段所处的各地层的导热系数、比热容及导温系数。导热系数的测定可采用室内试验确定。

3.1.8 热棒蒸发段应埋设于多年冻土天然上限 1.0m 以下。在冷凝段应设置散热翅片，翅片宜设置在地表 0.5m 以上，且散热翅片段的长度不小于 1.0m。

3.1.9 热棒的选择应符合现行国家标准《热棒》（GB/T27880）的要求。

3.2 热棒路基适用性

3.2.1 热棒路基适用于高温高含冰量、且路侧不易积水的填方路段或挖方路段。

3.2.2 单侧、双侧热棒适用范围

1 单侧热棒适用于：

- 1) 新建路段预防融化盘因阴阳坡的影响而偏移，设置于阳坡；
- 2) 治理改建路段由于融化盘偏移所引起的不均匀沉陷、纵向裂缝等病害。

2 双侧热棒适用于新建路段极高温多年冻土区、冻土退化区或整

体式宽幅路基。

3.2.3 热棒路基的适用性，应结合勘察资料和设计确定。在初步设计阶段，可以利用已有的研究成果（如数值分析、经验总结等）确定热棒路基适用路段。

3.3 热棒路基设计

3.3.1 多年冻土地地区路堤设计不宜清除地表植被，当遇泥炭、沼泽等地表软弱层时，应采取有效措施进行地表处理。

3.3.2 平坦地段，当路堤实际填土高度大于设计控制高度时，填土路基典型横断面结构应符合以下规定：

1 地基表面直接填筑砂砾或石渣，采用冲击碾压的方式挤入地面。挤入层砂砾压实稳定后，再填筑 30cm 砂砾或石渣，压实稳定。地表处理完成后填筑路基，其结构图可按图 3.3.1 设计。

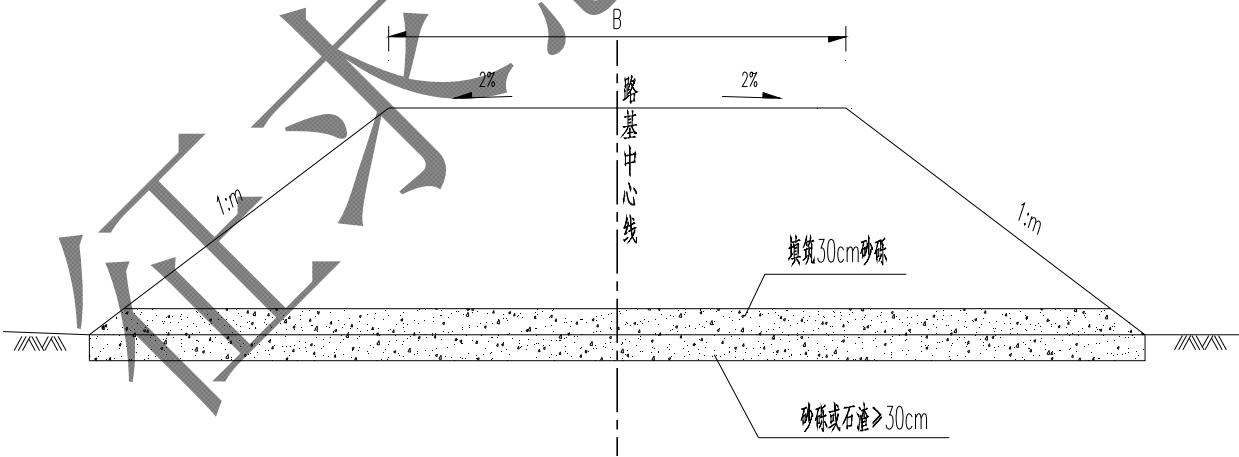


图 3.3.1 一般填方路基断面

1) 地表植被稀疏，无明显积水，无不良地质现象时，挤入地表路堤填料厚度按 30cm 控制，碾压后地表压实度应满足表 3.3.1 规定。

2) 地表植被良好、存在水草地或沼泽湿地、有明显积水等情况时，挤入地表路堤填料应根据地勘查明地质条件设计，碾压后地表压

实度应满足表 3.3.1 规定。

3) 路堤应分层铺筑，均匀压实，压实度应符合表 3.3.1 的规定

表 3.3.1 路堤压实度

填挖类型	路面底面以下深度 (m)	压实度 (%)		
		高速公路、一级公路	二级公路	三、四级公路
上路堤	0.80 ~ 1.50	≥ 94	≥ 94	≥ 93
下路堤	1.50 以下	≥ 93	≥ 92	≥ 90

2 地表排水条件较好时，路堤下部可采用当地细粒土填筑，上部宜采用粗粒土填筑，为防止冻胀翻浆，粗粒土填筑厚度应不小于 0.5m。

3 地表排水条件较差时，宜采用粗粒土填筑路堤。当采用细粒土填筑时，下部应设毛细水隔断层，其厚度应保证在路堤工后沉降完成后隔断层高出最高积水水位不少于 0.5m。

3.3.3 平坦地段，当路堤实际填土高度小于设计控制高度时，冻土路堤典型横断面结构应符合以下规定：

1 高含冰量多年冻土较厚时，可部分挖除换填。换填应选用保温、隔水性能较好的黏性土或片（块）石。换填深度与路堤高度之和应不小于路基设计临界高度与天然上限之和。

2 低含冰量多年冻土区，当路堤实际填土高度大于 0.5m，小于设计控制高度，地表条件较好，无明显积水，无不良地质现象时，可采用基底开挖换填、压实后填筑路基，换填深度 80cm，基底应布设

隔水土工布，设置单向横坡，坡底一侧埋设 PVC 排水管。其结构可按图 3.3.2 设计。

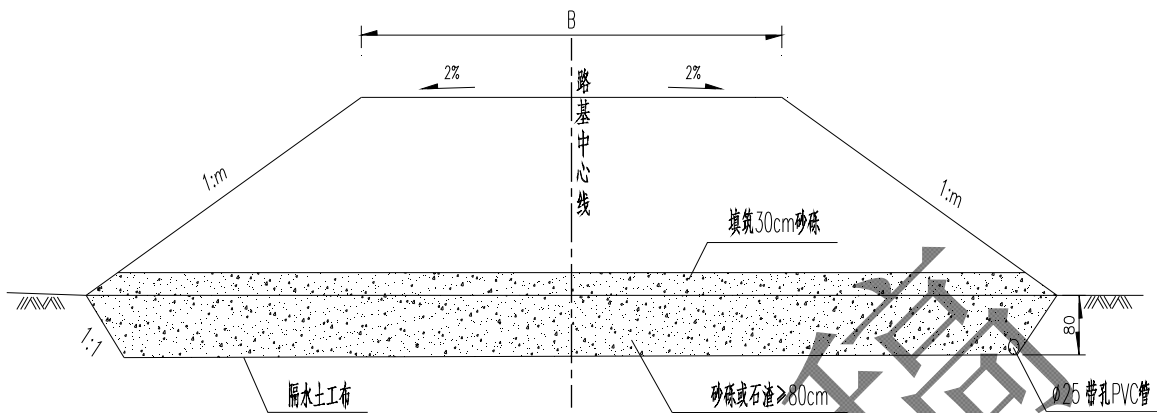


图 3.3.2 部分换填断面

3.3.4 多年冻土路堑设计应包括路基横断面设计和支挡结构防护设计。

1 富冰冻土、饱冰冻土及含土冰层等高含冰量地段的路堑，应采用基底部分或全部换填以及坡面防护、保温等措施。

2 路基按控制融化速率原则设计时，断面型式可参考图 3.3.3。路基底部超挖换填，超挖深度 80cm ~ 150cm，换填粗粒土，底部铺设隔水土工布，设单向横坡及 PVC 管排水。边坡地下水位较低时，采用草皮或植物边坡防护，地下水位较高时，应在上边坡修建盲沟排水，路面下宜设置 XPS 保温板。

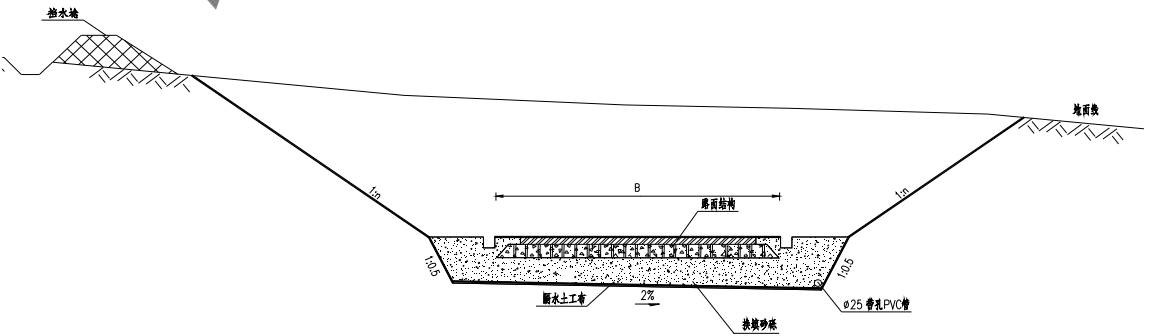


图 3.3.3 路堑路基断面

3.3.5 低填浅挖及零填挖断面路基的设计应根据路段的水文、地质条件和多年冻土的含冰量条件等进行设计，并应根据不同处治方案的经济与技术可行性比较。

1 路基下多年冻土中的富冰冻土、饱冰冻土、含土冰层等高含冰量冻土厚度较大，埋藏较深，全部清除换填困难且不经济时，可采取部分换填的保护多年冻土路基设计方案。

2 路基下多年冻土为少冰冻土、多冰冻土等低含冰量多年冻土，可采用基底超挖换填、压实后填筑路基，换填深度应超过多年冻土上限 50cm，基底应布设隔水土工布，设置单向横坡，坡底一侧埋设 PVC 排水管。如图 3.34 所示。

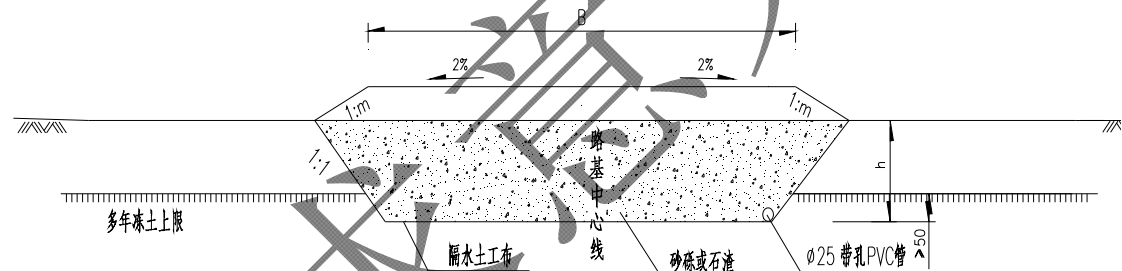


图 3.3.4 低含冰量多年冻土区低填浅挖路基横断面形式

3.3.6 半填半挖段路基的设计应根据路段的水文、地质条件和多年冻土的含冰量条件等进行设计，并应根据不同处治方案的经济与技术可行性比较。

1 当地表横坡大于 1: 3 时，路基基底应开挖台阶，台阶纵断面方向长度不小于 200cm，横断面方向应不小于 100cm，台阶高度应不小于 30cm，并设置 2%向内倾斜的横坡。路基实际填土高度应满足填方路段路基设计高度的要求，如图 3.3.5 所示。

2 高含冰量多年冻土区以及宽幅路基条件下，可在路面结构层下

设置隔热层，其厚度不宜小于 6cm。

3 填方侧路基高于 4m 时，应设置土工格栅。

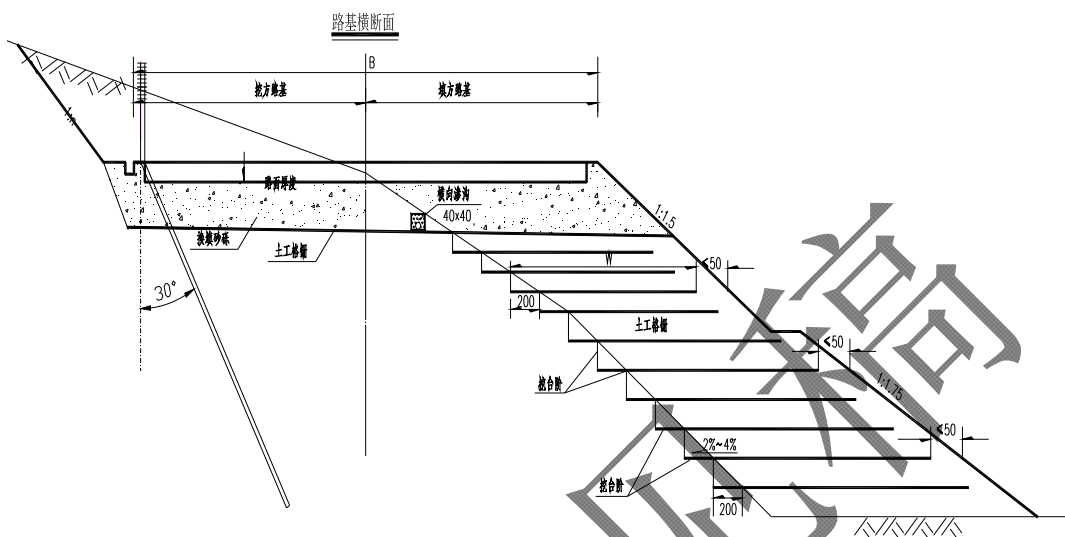


图 3.3.5 低含冰量多年冻土区半填半挖段路基横断面形式

3.3.7 施工填料

3.3.7.1 砂砾

1 用于基底处理的砂砾其颗粒组成应满足垫层材料级配要求, 0.075mm 以下颗粒含量不超过 5%。

2 在指定的砂砾料场取料，砂砾宜粗不宜细，最大粒径不超过15cm。

3 不得采用砂性土、中粗砂、碎石土等替代。

3.3.7.2 石渣

1 用于基底处理所用的石渣最大粒径 $\leq 15\text{cm}$ ，饱水抗压强度 $> 30\text{MPa}$ ，含土量小于 5%。

2 洁净且不易风化，不得采用碎、块石土替代。

3.3.7.3 土工格栅

1 土工格栅采用双向塑钢土工格栅。

2 纵、横向抗拉强度应大于 80KN/m，延伸率小于等于 3%，宽度不小于 4.0m。

3 土工格栅应均匀张拉，相邻两幅格栅在交界处搭接布置，横向搭接宽度为 20cm，纵向搭接宽度为 15cm。

3.3.7.4 路基上部填料

1 路基上部填料必须按照设计在指定的取土场取土，严禁在路基两侧取土；

2 取土场的填料应进行取样试验，严禁使用塑性指数 > 12 、液限 $> 32\%$ 的细粒土及腐殖土、草皮、以及冻土作为路基填料；

3 有条件的尽可能采用卵碎石土等粗颗粒土作为路基填料。

3.3.8 热棒可按形状分为直插式热棒、L 型热棒等；按设置位置可分为路基单侧布设、路基双侧布设；按路基尺度可分为分幅路基单侧、双侧布设，整幅路基路肩及路中同时布设。具体布设位置图见附录 E。

3.3.9 热棒的埋置深度应根据被处治路基的多年冻土认为上限深度确定，宜为上限以下 1.0~2.5m。

3.3.10 热棒的有效作用半径应根据热棒现场试验观测结果确定，无现场试验时，也可根据当地气候条件、冻土地温土体的导热系数等，通过数值模拟分析和试验工程确定。

3.3.11 热棒的间距应根据热棒的有效作用半径确定，宜为有效作用半径的 1.5~2.5 倍；热棒的设置可采用单棒竖置、单棒斜置、双棒

竖置和双棒斜置等方式，可参考以下原则确定：

- 1 在不损失热棒制冷效果的前提下热棒宜斜置，斜置角度宜为 75° 。
- 2 在极高温冻土区及冻土退化区应埋置双侧热棒，并保持适当的路基填土高度。
- 3 在中高温冻土区，当人为上限较大时，可采用双侧热棒冷却路基；当融化盘因阴阳坡的影响而偏移时，可在阳坡设置单侧热棒。

3.4 热棒设计

3.4.1 应根据当地气象资料、地质勘察资料及热棒的现场试验数据，根据热棒现场试验确定的实际功率初选热棒的直径、长度、散热器面积、翅片数目等。如缺乏现场试验数据，可按已有设计经验和参照现行国家标准《热棒》（GB/T27880）选择。

3.4.2 保证冻土路基稳定性所需的耗冷量 Q_D 应按消除普通路基下融化盘面积所需的耗冷量计算，计算公式如下。

$$Q_D = L\rho_d w \cdot A \quad (3.4.2-1)$$

式中：

L ——冰水相变潜热， $L = 334\text{kJ/kg}$ ；

ρ_d ——土体干密度（ kg/m^3 ）；

w ——含冰量（%）；

A ——融化盘面积（ m^2 ），应由现场试验数据确定；缺乏现场试验数据时可由数值模拟等方法确定；也可按下式计算。

$$A = \frac{2}{3}lh \quad (3.4.2-2)$$

式中： l ——路基基底宽度（m）；

h ——路基下冻土每年融化深度（m），应由现场试验确定；缺乏热棒的现场试验时，可结合勘察资料或数值计算等方法确定，初步设计时可遵照附录 A 取值。

3.4.3 热棒的工作时间 t 可采用公式计算或者图表法计算（遵照附录 B）。热棒的工作温差为当地年平均气温 T_a 和年平均地温 T_g 的差值。

3.4.4 热棒的纵向间距 S 可按热棒的冷却半径考虑安全系数储备进行计算，按式（3.3.2-3）计算。

$$S = r_f / K \quad (3.4.4-1)$$

式中： K ——安全系数，可取 1.0~1.5。

r_f ——热棒的冷却半径（m），应由现场试验确定；缺乏热棒的现场试验时，应遵照附录 C 计算。

3.4.5 单根热棒的设计年内传热量 Q 计算按下式计算确定。

$$Q \geq Q_a \quad (3.4.5-1)$$

Q_a ——热棒的实际年内传热量（J），应由热棒的实际功率对工作时间做积分确定。有热棒现场试验时，应按下式确定。

$$Q_a = \int_{t_{t1}}^{t_{t2}} P dt \quad (3.4.5-2)$$

式中： P ——热棒的实际功率（W），应由现场试验确定；

t_{t1} ——热棒开始工作时间（日）；

t_{t2} ——热棒结束工作时间（日）。

无现场试验资料，在初步设计阶段，可按热棒的热阻、当地气候条件、地层条件等按下式估算。

$$Q_a \geq \int_{t_{t1}}^{t_{t2}} \frac{T_s - T_a}{R_s + R_a} dt \quad (3.4.5-3)$$

$$R_s = \frac{\ln(2s/d_o)}{2\pi\lambda L_e} \quad (3.4.5-4)$$

$$R_a = \frac{1}{A_{co}\alpha_a} \quad (3.4.5-5)$$

$$A_{co} = \pi l_c d_o + 2n_0\pi\left[\left(\frac{d_o}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_i}{2}\right)^2\right] \quad (3.4.5-6)$$

$$\alpha_a = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{d_o} \quad (3.4.5-7)$$

$$N_{\mu_f} = 0.134 \cdot Re_f^{0.681} \cdot P \cdot r_f^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{s_f}{H_c}\right)^{0.2} \cdot \left(\frac{s_f}{\delta_f}\right)^{0.1134} \quad (3.4.5-8)$$

$$Re_f = \frac{\rho_f \cdot v_f \cdot d_o}{\mu_f} \quad (3.4.5-9)$$

式中： T_s ——年平均地温（℃）；

T_a ——年平均气温（℃）；

R_s ——热棒影响范围内土体热阻（℃/W）；

R_a ——热棒热阻（℃/W）；

t_{t1} ——热棒开始工作时间（日）；

t_{t2} ——热棒结束工作时间（日）；

d_o ——热棒外径（m）；

L_e ——热棒在土体中的深度（m）；

A_{co} ——热棒冷凝段面积（m²）；

α_a ——冷凝段外部换热系数（W/(m²·℃)）；

l_c ——热棒冷凝段长度（m）；

n_0 ——热棒散热翅片个数；

Nu_f ——热棒翅片所处区域空气的努塞尔数；

λ_f ——热棒翅片的导热系数 (W/(m · K))；

Re_f ——热棒翅片所处区域空气的雷诺数；

$\frac{s_f}{H_c}$ ——翅片间距和翅片高度之比；

$\frac{s_f}{\delta_f}$ ——翅片间距与翅片厚度之比；

ρ_f ——热棒翅片所处区域空气的密度 (kg/m³)；

μ_f ——热棒翅片所处区域空气的动力粘度(N · s/m²)；

v_f ——热棒翅片所处区域空气的风速 (m/s)。

3.4.6 热棒的设计功率应满足下式的要求。

$$n \geq K \cdot Q_D / Q \quad (3.4.6-1)$$

式中： n ——设计中所需热棒根数；

K ——安全系数，可取 1.0~1.5。

3.4.7 热棒的热阻可按等效传热理论计算。热棒制冷过程各环节的热阻可按照传热学理论进行计算，最后热棒的传热总热阻可由热棒传热的各个环节热阻综合确定，计算方法可遵照附录 D。

3.4.8 热棒路基的实际功率应根据应用场地的地质条件、工程特性等，以现场试验确定；缺乏现场试验资料时可参考类似地区的现场试验取值。

3.4.9 对于不同等级新建、改扩建道路，应采用不同热棒路基设计的安全系数。

4.热棒路基施工、检测及质量验收

4.1 一般规定

4.1.1 热棒路基在施工前必须由技术人员进行专门的技术交底后方可施工。

4.1.2 安装热棒前，应对临时建筑、运输道路、水源、电源、照明、主要材料和机具及劳动力等进行充分准备，并作出合理安排，选择合适的钻机。

4.1.3 热棒施工前应确认路基主体已通过交工验收。

4.1.4 施工前热棒检测

1 安装前应逐根检查热棒外形，保证外观良好，无明显破损，焊缝平整，翅片不倒折，表面防腐层完好。不得安装有明显外形损坏的热棒。

2 热棒现场安装前应检查热棒的出厂检验报告、产品出厂质量证明文件、第三方检测报告，三证齐全方可安装。

3 热棒施工前应抽取2%(不少于10根)的样品进行气密性检查、启动特性检查、等温特性检查，检查方法应遵照现行《热棒》(GB/T 27880)等相关标准的规定。若检验全部合格则整个批次合格；若检验存在不合格项，则加倍检验；检验若有不合格项，则整个批次不合格，不得安装。

4.1.5 热棒临时存放时，必须远离火源；露天存放时，宜进行覆盖，防止阳光直射。

4.2 插入式热棒施工方法

4.2.1 安装时间

- (1) 插入式热棒路基应在路面施工完成后安装。
- (2) 一般应在冷季进行安装施工。
- (3) 在施工完成后，应立即安装护栏对热棒进行保护。

4.2.2 施工前准备

(1) 测量放线

- 1 应根据设计文件的热棒间距和路线，用经纬仪进行放样定位，并用白灰标示每根热棒的钻孔点位。
- 2 若设计为双侧热棒时，路基两侧热棒应错位布设。

(2) 钻机定位

- 1 应根据热棒外径、埋深等选择合适的钻机，平整场地，将钻机移至钻孔点位，固定钻机。
- 2 钻机应采用地锚固定。
- 3 在地层较复杂，钻机震撼较大的情况下，必须采用钢绳固定或支架支撑，避免发生意外。

4.2.3 插入式热棒路基施工

(1) 钻孔施工

- 1 应根据钻机的种类选择合适的钻头及钻进方法。
- 2 在易塌孔地层中，简便易行有利于保护冻土的护壁方法是：钻进中，可向孔内投入泥球，用合金钻头搅拌涂沫孔壁，以达到保护钻孔，防止钻孔坍塌的目的。
- 3 热棒埋置角度控制：应根据钻机的类型进行控制，其与钻

直线夹角为 0° ，孔直线度偏差 $\geq 5\text{mm}$ 。

4 钻进角度控制：开孔时应采用导向装置，用慢速钻进，液压给进加压，保证钻孔角度，为了避免钻进时钻头下俯，钻孔均必须预留一个倾角。

5 为保证埋入深度的准确，应充分利用钻探、测地雷达等勘察资料，准确确定路基下的冻土人为上限。

6 钻出的钻渣应及时清理，钻孔完成后应清理钻孔周边 0.5m 范围内的泥土和杂物，钻孔附近不应有阻碍热棒吊装的施工材料和杂物。

（2）成孔后的检测

1 应对钻好的孔位，孔径、孔深进行检查，检查合格后方可进行下一道工序。

2 钻孔施工完成后，应及时起吊热棒，进行热棒安装。

3 如不能立即安装，则应采取临时措施保护钻孔，如用泡沫垫将孔口掩盖，防止孔内落入杂物等。

（3）热棒吊装

1 在考虑吊装时，应结合工件的强度、刚度、局部稳定性等选择最有利的受力位置，必要时应采取补强加固措施，以确保安全施工。

2 在吊装单支热棒时，利用热棒本身顶部端盖的环行槽作为受力点进行系吊时（设计吊点），应根据热棒的长度，采取必要的防护措施，防止因设备的摇摆而发生危险。

3 吊车吊臂有效起吊高度应超出热棒的长度 1m。

4 吊装时，应注意不得压伤和擦伤工件（尤其是上部的翅片部分）。

5 主要吊装工序如下：吊装设备就位----起吊----热棒孔内就位-----孔内热棒导正。

（4）回填

1 热棒吊装置入孔后，应先进行导正纠偏。

2 同一侧的热棒，回填前必须纠正热棒角度，保证同一侧热棒位于同一平面内。

3 用砂土回填热棒与孔之间的间隙，回填必须密实。

4 热棒安装完成后，应对施工场地进行清理，将施工垃圾清理远运至弃土场，并恢复路基边坡原状。

4.3 填埋式热棒施工方法

4.3.1 施工时间

（1）填埋式热棒在路基施工到指定位置时即可进行安装。

（2）一般在冷季末暖季初进行安装施工。

4.3.2 施工前准备

（1）填埋式热棒施工前应检查路基施工高度与设计文件上的热棒蒸发段填埋位置是否一致，二者相差不得>10cm。

（2）应根据设计文件的热棒间距和路线用经纬仪进行放样定位，并用白灰标示位置。

4.3.3 填埋式热棒路基施工

1 基底压实

(1) 新建路基填筑至指定高度，路基的填料及压实度应符合《公路路基设计规范》(JTGD30-2015)中相关规定要求。

2) 旧路改建路基，开挖路槽至指定深度，对基底进行补强压实后，应符合现行《公路路基设计规范》(JTGD30-2015)等相关规范的要求。

2 修整路槽横坡

将开挖好的路槽修正成中间低，两侧高的反向横坡，反向横坡坡度应为 3%~5%。

3 安装热棒蒸发段

应将热棒按标示位置放置在路基上，保证蒸发端有向路基内侧 3%~5%的横坡。对于发卡式热棒等冷凝段填埋在路基内的热棒形式，可暂时将冷凝端放置在路基外。

4 回填土，整平压实

(1) 按最小填筑厚度将蒸发段填平压实。

(2) 填土应采用挖掘机回填或采用装载机将路基填料从一端向前推运，不允许其它机械设备直接碾压热棒。

(3) 填土厚度达到要求后，应用平地机整平，压路机压实。

(4) 填料最小厚度为 20cm。

(5) 应先检验路基的压实度，在路基的压实度合格后，再检测路基弯沉，检测结果应满足路床顶面的验收标准。

5 安装热棒冷凝段

对于发卡式热棒等冷凝段填埋在路基内的热棒形式，应人工将热棒冷凝段搬移至路基内，注意连接部分的气密性、弯折角度和强度，不得损坏发卡式热棒。

6 回填土方并压实

(1) 回填 20cm 的填土。

(2) 填土应采用挖掘机回填或采用装载机将路基填料从一端向前推运，施工机械不得直接碾压热棒冷凝段。

(3) 填土厚度达到要求后，应用平地机整平，压路机压实。

(4) 应先检验路基的压实度，在路基的压实度合格后，再检测路基弯沉，检测结果应满足路床顶面的验收标准。

4.4 热棒路基检测

4.4.1 热棒施工前检测

施工前热棒检测应符合第 4.1.4 条的规定。

4.4.2 热棒工后检验

(1) 外观检验

应主要检查施工过程中是否对热棒壁造成了损坏，如有损坏或疑似破损，应修补防腐措施，并应检查气密性，检查方法应符合现行国家标准《热棒》(GB/T27880) 等规范的要求；若损坏，必须更换。

(2) 防护措施检验

对于直立式、斜插式热棒，一般应用防撞护栏进行保护，热棒距护栏的距离宜大于 35cm。对于填埋式热棒，热棒外侧 30cm 内路基填料应用细砂或砂性土填筑，并保证压实度符合《公路路基设计规范》

(JTGD30-2015)等相关规范的要求。

(3) 施工质量检验

1 埋深检验：对于直立式、斜插式热棒，埋深检验一般检测露出地面长度确定，误差在 $\pm 20\text{mm}$ 内；

2 倾斜角：一般用测斜仪检测，误差为 $\pm 2^\circ$ ；

3 填埋式热棒压实度检测：填埋式热棒上覆、下覆填土压实度应符合路基设计规范，高速公路和一级公路为 96，二级公路为 95，三四级公路为 94。

(4) 热棒完整性及功效检验

热棒施工完成后，根据地质勘察资料，应按照相似相近原则选择相似段落，每个相似段落布设一个测温观测断面，检测各个不同地质区段热棒的实际工作效率。

热棒检测周期应为一年，考虑到高原地区没有通电，采集数据用电由蓄电池提供，应每月采集温度 3 次，为每月的 10 号、20 号、30 号。利用采集的温度数据，按照传热学理论，计算热棒一年内的吸热量，然后计算实际工作效率。

热棒周边测温电缆埋设应按距热棒壁每 30cm 埋设一根，共三根。

4.4.3 施工后路基检测

填埋式热棒路基施工完成后，应对路基进行检测。

- (1) 确定标高已达到路床顶面标高
- (2) 在热棒路基施工后，必须对路基的压实度、平整度和弯沉检测。
- (3) 对路基平整度、密实度进行检测。
- (4) 保证检测结果必须满足路基验交标准。

附录 A 路基下冻土每年融化深度

A-1 路基下冻土每年融化深度 (cm)

路基高度 (m)	年平均地温 (°C)				
	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-3.0
1.0	19.9	14.7	9.9	7.0	—
2.0	19.8	13.4	8.4	4.7	—
3.0	18.6	11.2	6.0	1.6	—
4.0	17.4	9.8	3.4	—	—

附录 B 热棒工作时间的计算方法

公式法：

(1) 收集得到年平均地温和气温一年的变化数据，分别拟合成时间的正弦函数 $f_g(t)$ 和 $f_a(t)$ 。

(2) 求解方程式 (B-1)，得到在寒季（日平均气温小于 0°C ）范围内的两个解 t_1 和 t_2 ， t_1 小于 t_2 。

$$f_g(t) = f_a(t) \quad (\text{B-1})$$

(3) 根据式 (B-2) 计算得到热棒的工作时间：

$$t = t_2 - t_1 \quad (\text{B-2})$$

图表法：

(1) 收集得到年平均地温和一年的日平均气温数据，绘制在温度-时间直角坐标纸上。

(2) 在寒季范围内找出两条曲线的两个交点，其横坐标分别记为 t_1 和 t_2 ， t_1 小于 t_2 。

(3) 根据式 (B-2) 计算得到热棒的工作时间。

附录 C 热棒冷却半径的计算方法

热棒的冷却半径应根据热棒路基的实际功率由下式确定。

$$r_f = \sqrt{d_o^2 + \frac{Q_a}{\pi h Q_L}} / K \quad (\text{C-1})$$

$$Q_a = \int P dt \quad (\text{C-2})$$

$$Q_L = L \rho_d w \quad (\text{C-3})$$

式中： r_f ——热棒的冷却半径 (m)；

d_o ——热棒外径 (m)；

Q_a ——单根热棒的年内传热量 (J)；

P ——热棒的实际功率 (W)，由现场试验确定；

Q_L ——土体融化潜热 (J)；

ρ_d ——土体干密度 (kg/m^3)；

w ——土体含水率 (含冰量)；

L ——冰水相变潜热， $L=334\text{kJ}/\text{kg}$ ；

K ——安全系数，可取 2~6，高温冻土区取小值；

h ——路基下冻土每年的融化深度，应结合勘察资料确定，初步设计时可遵照附录 A 选择。

缺乏热棒的现场试验时，热棒的冷却半径可按式计算。

$$FI = Q_L [\pi L R_a (r_f^2 - d_o^2) + \frac{r_f^2}{4\lambda_s} (\ln \frac{r_f}{d_o} - 1) + \frac{d_o^2}{4\lambda_s}] \quad (\text{C-4})$$

式中： r_f ——热棒的冷却半径 (m)；

d_o ——热棒外径 (m)；

λ_s ——土体导热系数 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

Q_L ——土体融化潜热 (J);

L ——冰水相变潜热, $L=334\text{kJ/kg}$;

R_a ——热棒的传热热阻 ($^{\circ}\text{C/W}$), 遵照附录 D 计算;

FI ——冻结指数 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$), 可用公式法或经验法计算。

计算冻结指数的公式法:

用公式法计算冻结指数时, 冻结指数由下式确定:

$$FI = \int_{t_1}^{t_2} |T_d| dt, \quad T_d < 0^{\circ}\text{C} \quad (\text{C-5})$$

式中: t_1 ——冷季开始时间 (日);

t_2 ——冷季结束时间 (日);

T_d ——日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$);

t ——时间 (日)。

计算冻结指数的经验公式法:

用经验公式计算冻结指数时, 冻结指数由下式确定:

$$FI = \sum_{i=1}^{N_F} |T_{ai}|, \quad T_{ai} < 0^{\circ}\text{C} \quad (\text{C-6})$$

式中: N_F ——一年内温度低于冻结点的日数 (日);

T_{ai} ——日平均气温低于冻结点的时间范围内第 i 日所对应的日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), 冻结点一般取 0°C 。

附录 D 热棒热阻的计算方法

热棒制冷过程各环节的热阻可按下列公式计算：

1 热棒蒸发段固体壁的导热热阻 R_1 ：

$$R_1 = \frac{1}{2\pi\lambda l_e} \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) \quad (\text{D}-1)$$

式中： l_e ——热棒蒸发段的长度（m）；

d_o 、 d_i ——热棒外径、内径（m）；

λ ——管壁材料的导热系数（W/(m·K)）。

2 热棒蒸发段的蒸发（沸腾）换热热阻 R_2 ：

$$R_2 = \frac{1}{A_{ei}\alpha_{ei}} \quad (\text{D}-2)$$

$$A_{ei} = \pi d_i l_e \quad (\text{D}-3)$$

式中： A_{ei} ——热棒蒸发段内表面积（m²）；

α_{ei} ——蒸发换热系数（W/(m²·K)）。

3 热棒冷凝段的凝结换热热阻 R_3 ：

$$R_3 = \frac{1}{A_{ci}\alpha_{ci}} \quad (\text{D}-4)$$

$$A_{ci} = \pi d_i l_c \quad (\text{D}-5)$$

式中： A_{ci} ——热棒冷凝段内表面积（m²）；

α_{ci} ——凝结换热系数（W/(m²·K)）；

l_c ——冷凝段长度（m）。

4 热棒冷凝段固体壁的导热热阻 R_4 ：

$$R_4 = \frac{1}{2\pi\lambda_c} \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) \quad (\text{D}-6)$$

5 热棒冷凝段外壁与冷源之间的换热热阻 R_5 :

$$R_5 = \frac{1}{A_{co}\alpha_{co}} \quad (\text{D}-7)$$

$$A_{co} = \pi d_o + 2n\pi\left[\left(\frac{d_o}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_i}{2}\right)^2\right] \quad (\text{D}-8)$$

$$\alpha_{co} = \frac{Nu_f \cdot \lambda_a}{d_o} \quad (\text{D}-9)$$

$$Nu_f = 0.134 \cdot Re_f^{0.681} Pr_f^{1/3} \left(\frac{s_t}{H_c}\right)^{0.2} \left(\frac{s_t}{\delta_f}\right)^{0.1134} \quad (\text{D}-10)$$

式中: A_{co} ——热棒冷凝段面积 (m^2);

α_{co} ——冷凝段外部换热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$);

n ——冷凝段散热翅片个数;

λ_a ——空气的导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$);

Nu_f ——努赛尔数 (Nusselt);

$\frac{s_t}{H_c}$ ——翅片间距和翅片高度之比;

$\frac{s_t}{\delta_f}$ ——翅片间距与翅片厚度之比;

Re_f ——热棒外部空气的雷诺数, 根据空气动力学理论,

$$Re_f = \frac{\rho_f v_f d_o}{\mu_f};$$

ρ_f ——空气的密度 (kg/m^3);

v_f ——外界风速 (m/s);

μ_f ——空气的动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$).

6 热棒的传热热阻 R_a 可按下式计算:

$$R_a = \sum_{i=1}^5 R_i \quad (\text{D}-11)$$

一般情况下, 热棒的热阻可只计入热棒冷凝段外壁与冷源之间的换热热阻 R_5 。

$$R_a = R_5 \quad (\text{D}-12)$$

征求意见稿

附录 E 常用热棒路基一般设计图

E.1 多年冻土区热棒路基路堤一般设计图。

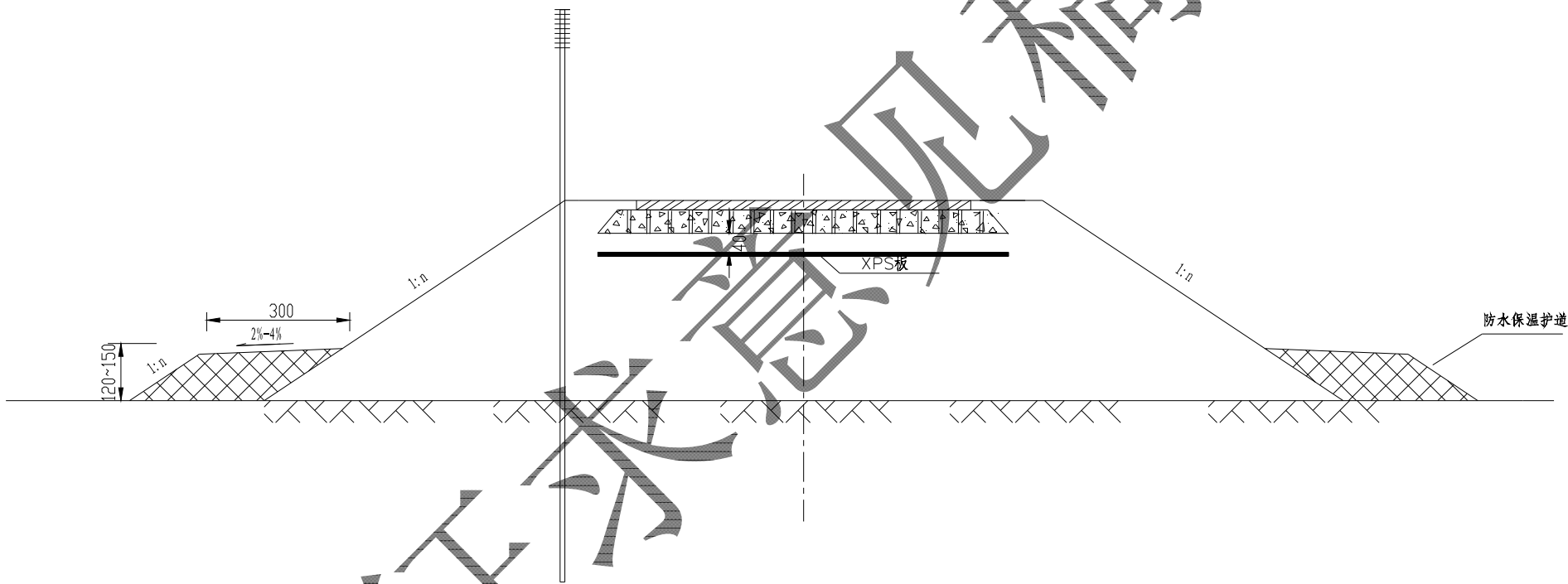


图 E.1-1 单侧直插式热棒路基路堤段一般设计图

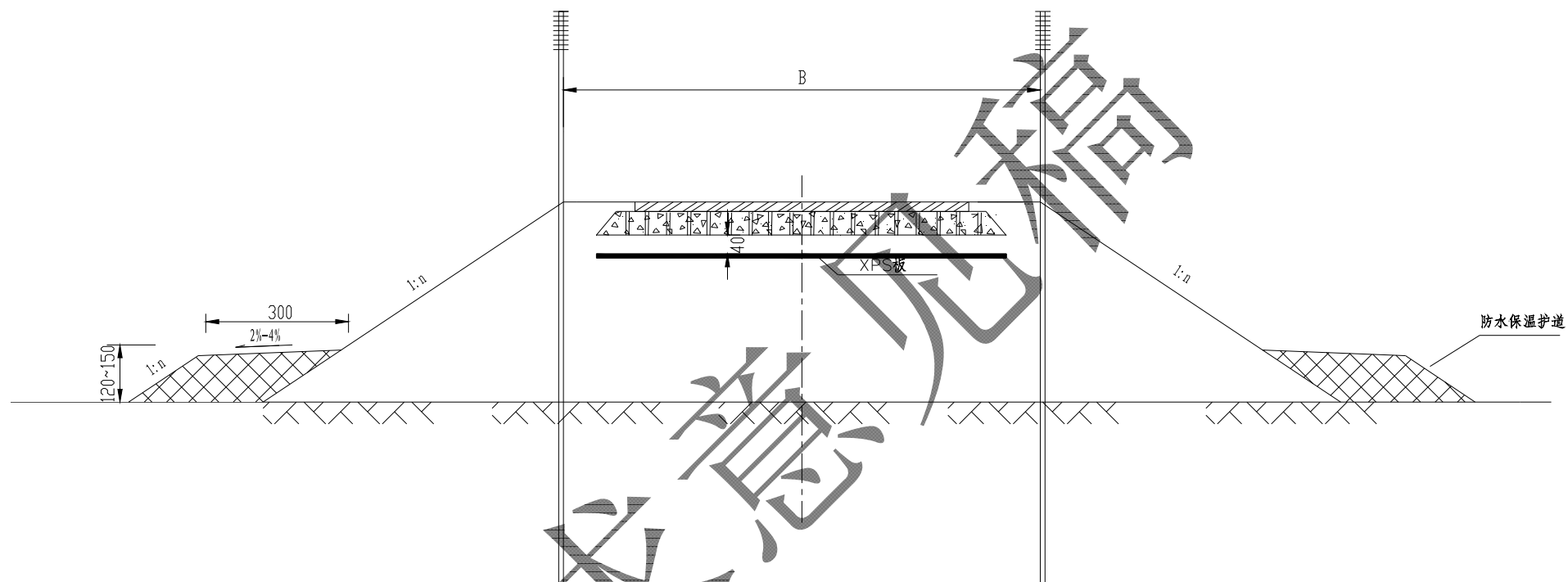


图 E.1-2 双侧直插式热棒路基路堤段一般设计图

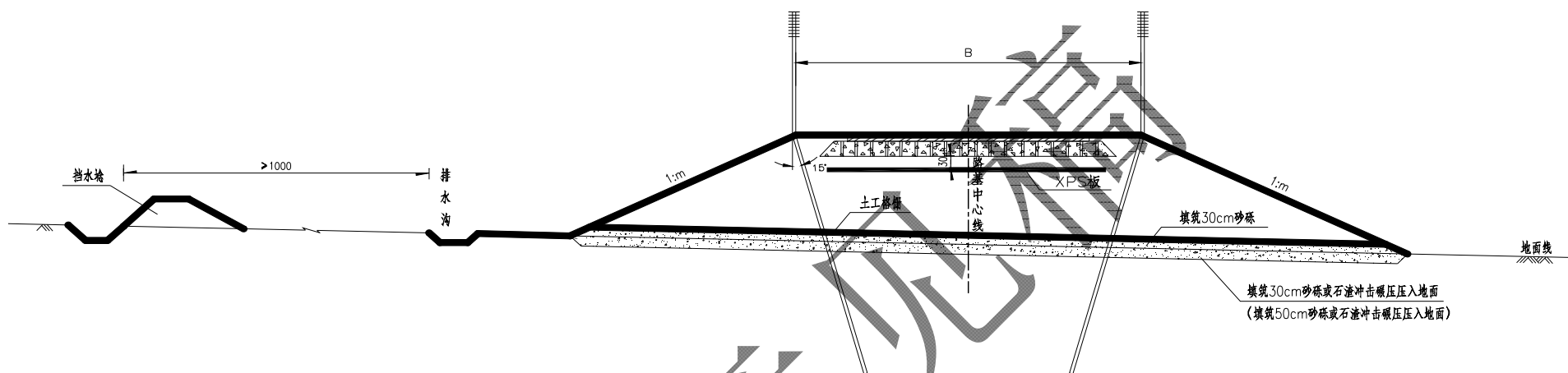


图 E.1-3 双侧 L 型热棒路基路堤段一般设计图

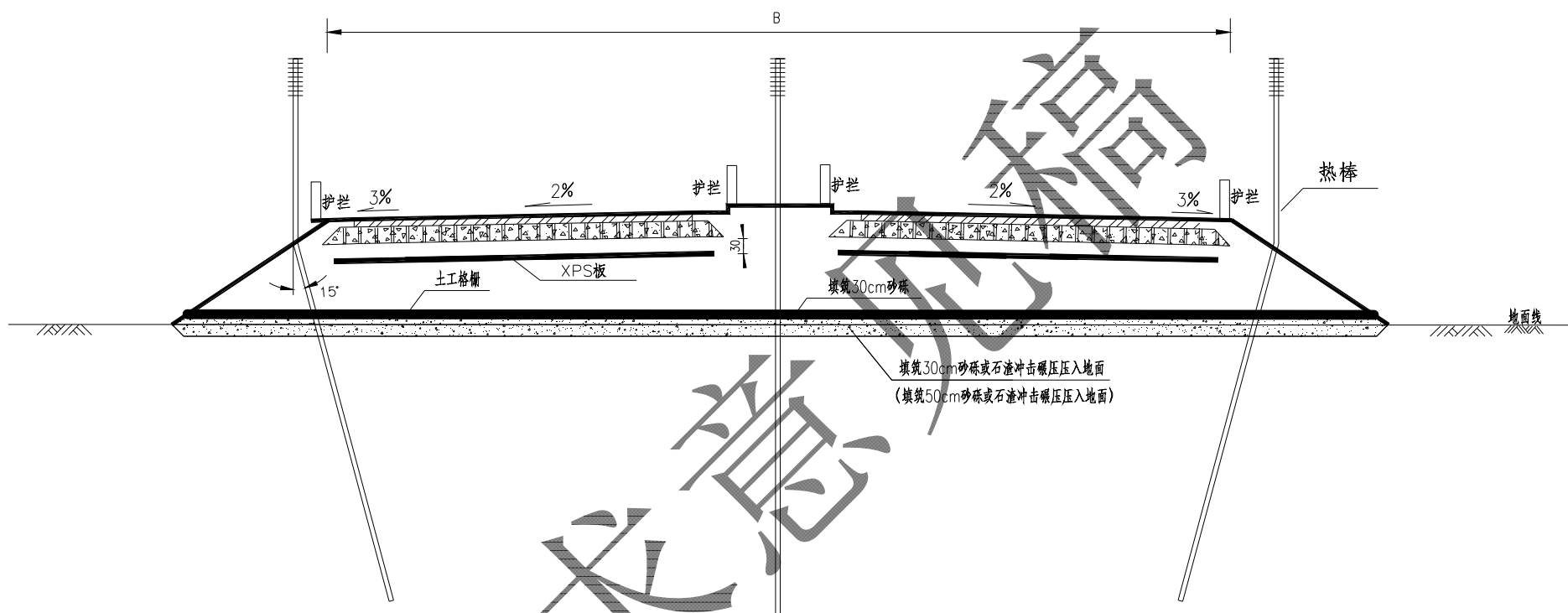


图 E.1-4 宽幅 L 型热棒路基路堤段一般设计图

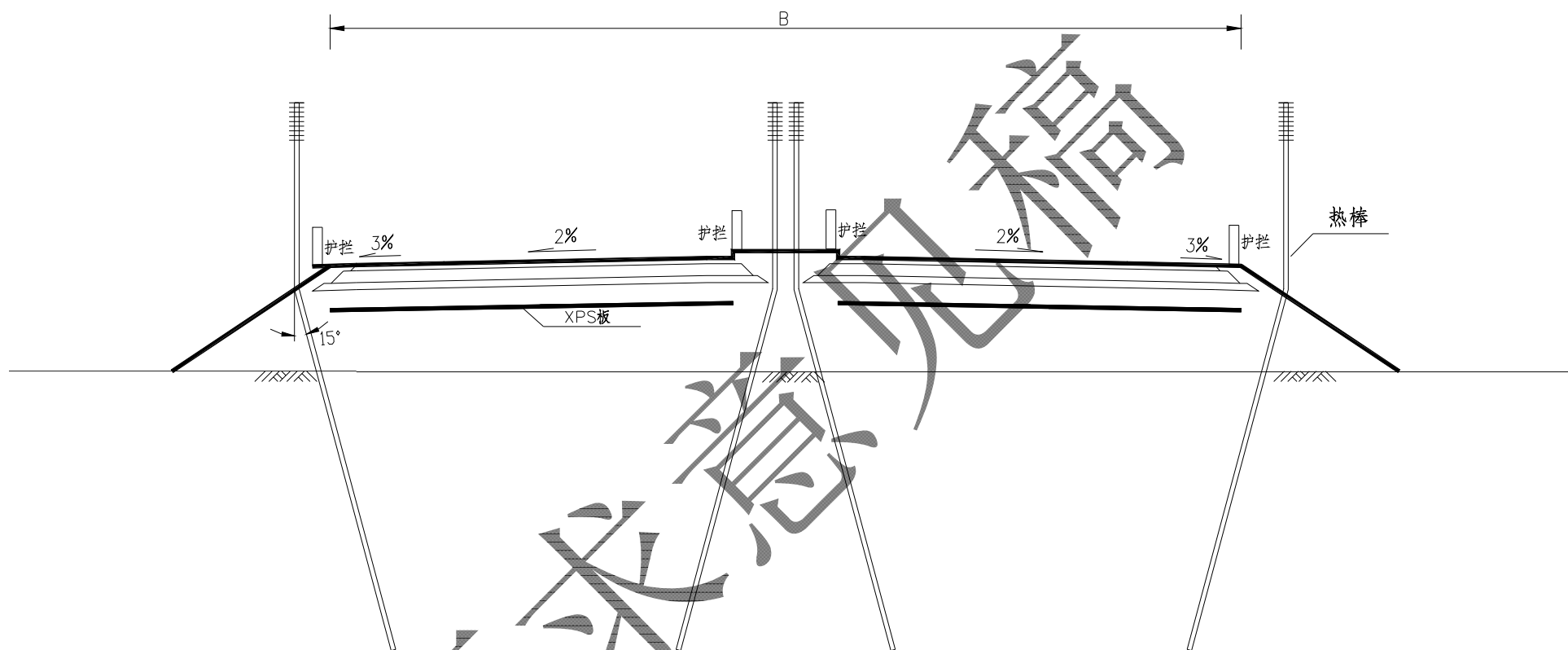


图 E.1-5 宽幅热棒路基路堤段一般设计图

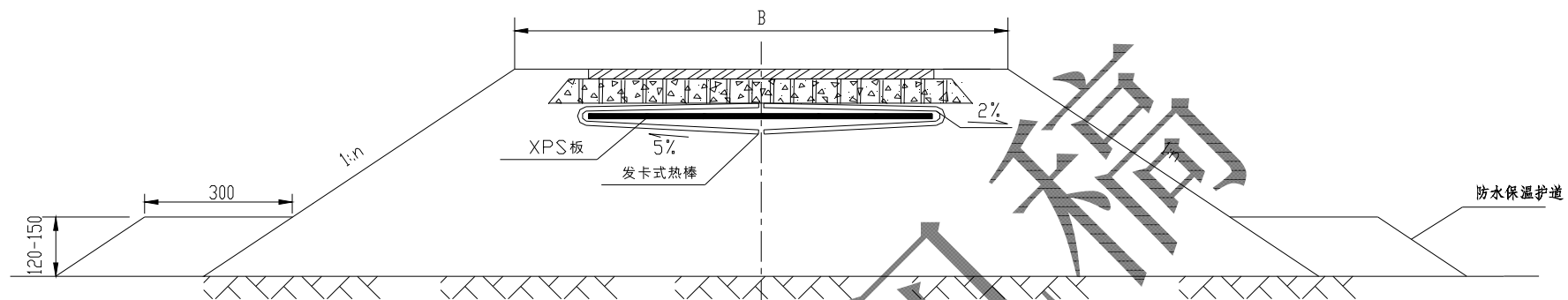
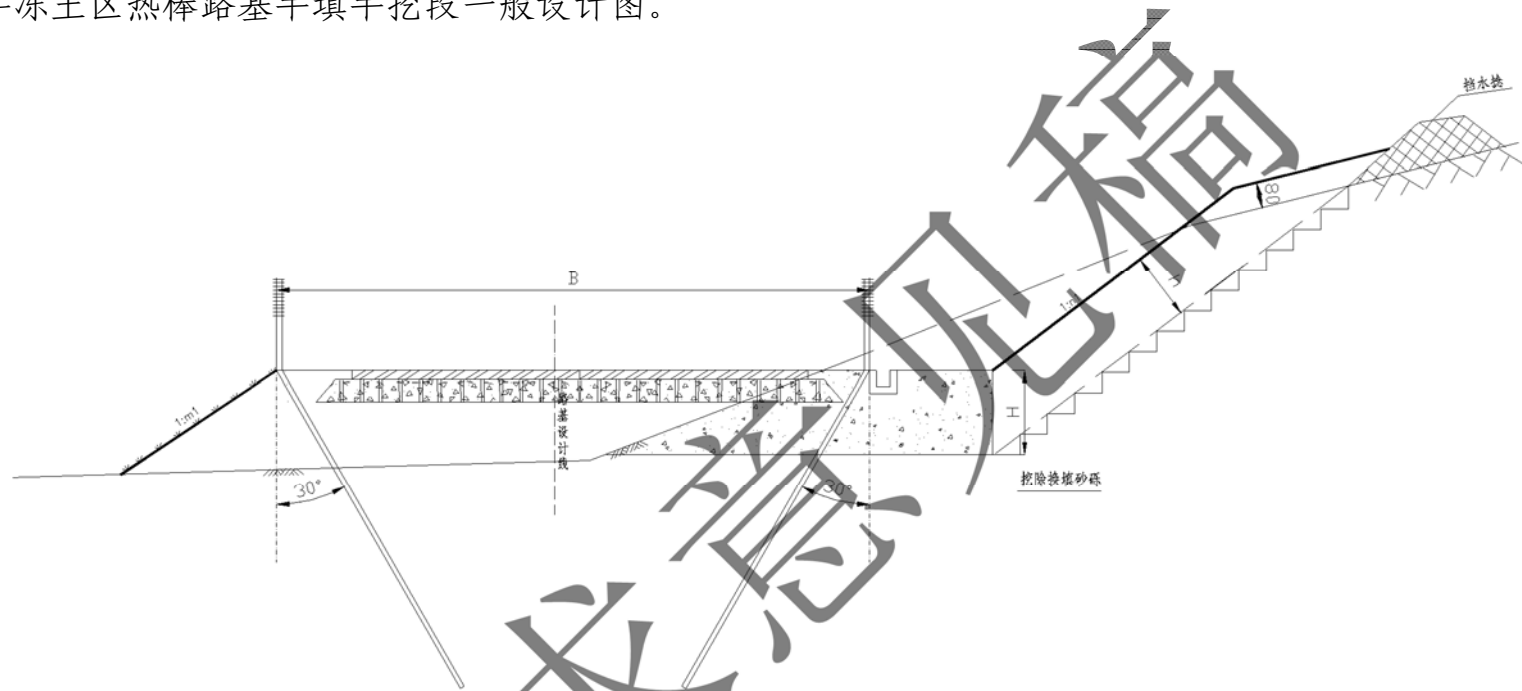


图 E.1-6 发卡式热棒路基路堤段一般设计图

E.2 多年冻土区热棒路基半填半挖段一般设计图。



E.3 多年冻土区低填浅挖段热棒一般设计图。

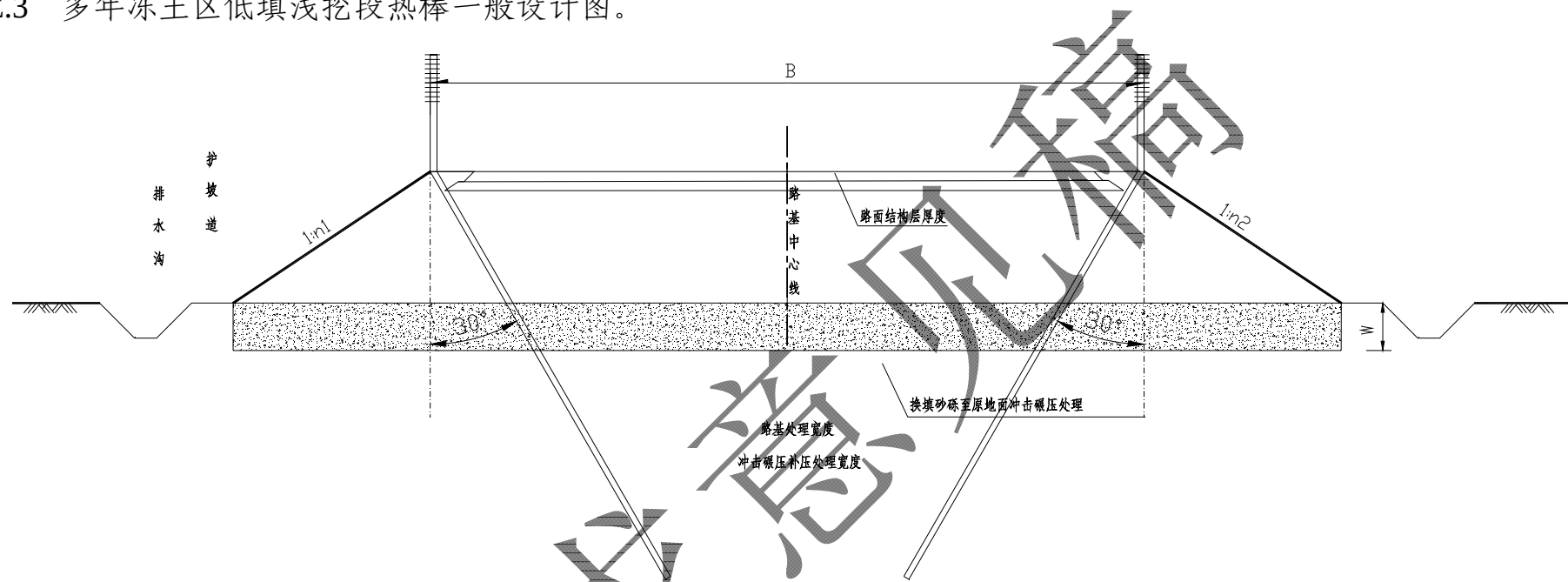


图 E.3-1 热棒路基低填浅挖段一般设计图

E.4 多年冻土区热棒路基路堑段一般设计图。

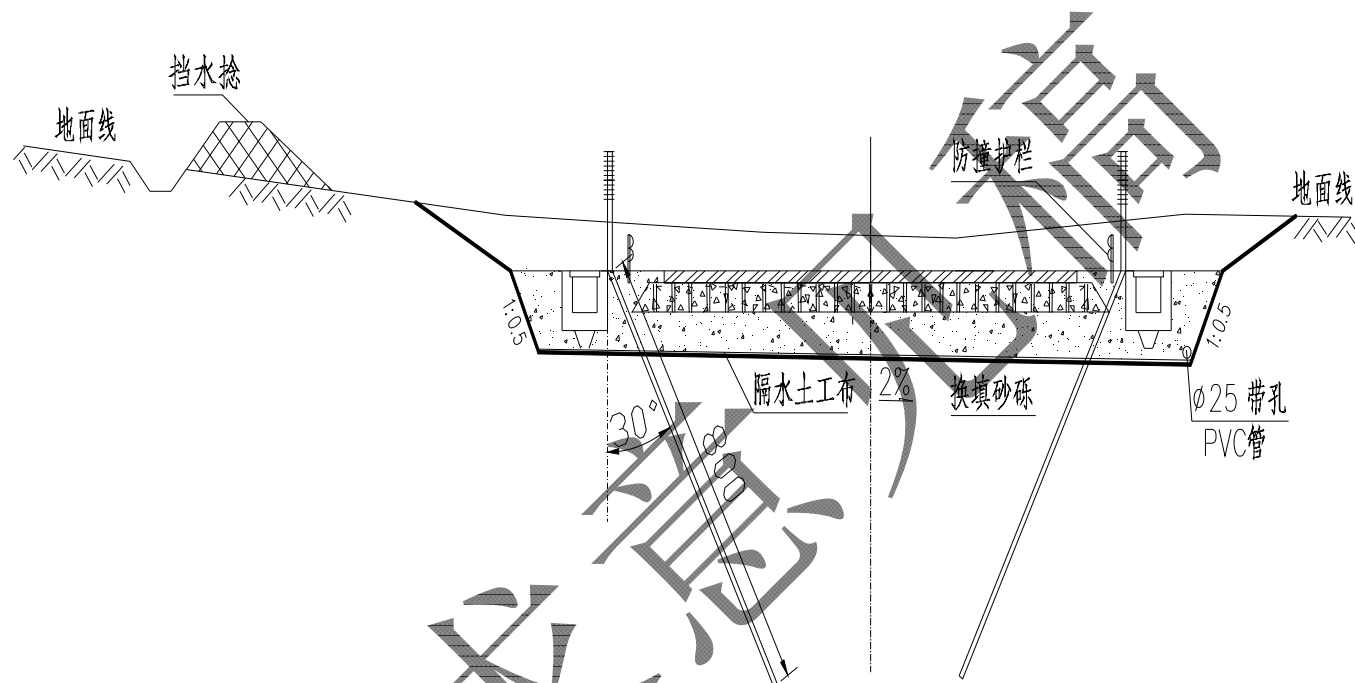


图 E.4-1 热棒路基路堑段一般设计图

附图说明:

- 1 热棒的技术要求应符合本规范 3.1.9 条规定。
- 2 上述一般设计图中尺寸均以厘米计, B 为路基宽度。
- 3 本附录给出的路堑、半填半挖段和低填浅挖段一般设计图中未详列所有热棒型式, 可参照路堤段设计图。
- 4 基底处理参照多年冻土区一般路基设计图中同类工况进行。
- 5 热棒沿路基走向布设, 间距应符合本规范 3.4.4 条规定。
- 6 防水保温护道用路基填料或低热传导率填料填筑, 压实度不小于 80%。
- 7 在不损失热棒制冷效果的前提下, 热棒可采用直插式、斜插式或 L 型热棒。

附录 F 热棒日常养护

F.1 热棒与水平面的夹角宜为 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。

F.2 热棒保护

1 热棒纵向的间距不得小于 2.5m。

2 防腐保护

(1) 可用热镀锌做防腐处理。

(2) 可用油漆做防腐处理。

3 日常维护

(1) 应每年一次集中调查，重点调查防撞护栏的完整性，热棒外观的完整性。

(2) 应每年一次对热棒做油漆防腐处理。

(3) 对外因造成损坏的防撞护栏应及时更换。

(4) 应每五年进行一次热棒工作状态检测，重点检测外形、外观受损热棒。对不工作热棒集中更换。

F.3 热棒路基排水要求

热棒路基应具有完善的排水措施，不得在路基坡脚积水。当需在水草沼泽地等地表水丰富的地区设置热棒路基时，应首先采取措施处理地基表面，挤排地表积水。

F.4 附属设施要求

(1) 应在热棒路基路肩处采用波形梁防撞护栏防护。

(2) 防撞护栏与热棒间距不得小于 0.5m (1m)。

(3) 防撞护栏一般情况下应选 A 级，局部危险路段可选 SB 级。

条文说明

1 总则

1.0.1 热棒是一种新型、高效的传热元件。其工作介质积蓄在热棒的底部，蒸发段处于热棒下半部，冷凝段在热棒的上半部，绝热段在中间。工质在蒸发段吸取了热源供给的热量后蒸发，蒸汽向上流动，通过绝热段后，在冷凝段将汽化潜热释放后而凝结为液体，由于重力的作用回流到下半部蒸发段完成一个工作循环。借助于工质连续不断的循环，将下半部热源的热量不断的传递到上半部的冷源。目前在寒区工程中应用的热棒主要就是这种重力式热棒。

美国、加拿大和前苏联最早将热棒技术应用于多年冻土工程中。上个世纪 80 年代以来，热棒技术在我国得到应用。在青藏公路、青藏铁路工程中都采用了热棒技术提高冻土路基的稳定性。然而，由于热棒内部结构和传热机制的复杂性，对于热棒路基的设计参数基本是依据已有工程实例和经验确定，主要设计思路还是以经验为主，取保守值施工，待施工完成后，再检验路基的温度场，考察热棒的降温效果，属“后知型”的设计思路。这种状况导致了难以对热棒路基进行科学合理的设计，限制了其推广应用。制定本规范的主要目的是使热棒路基设计标准化，符合技术先进、安全可靠、经济合理的要求，保障热棒路基的推广应用。

1.0.2 本规范适用于寒区新建路基工程的设计、施工和检验，对于整治、改建工程，可参照执行。

1.0.3 多年冻土工程建设的基本原则，一般为保护冻土（保持冻结）

和控制融化速率（允许融化）两种原则。保护冻土设计就是采取综合工程措施，使路基按最小临界高度建成后保持路基下多年冻土不发生融化，保证工程稳定性。控制融化速率设计就是按照设计容许变形的要求，允许路基下多年冻土在使用年限内缓慢融化。进一步分析可以发现，保护冻土和控制融化速率的设计原则，本质上都是采用一定的工程措施，减缓或者消除外界传入的热量，保证多年冻土地基的相对稳定，从而确保冻土工程的稳定性。多年冻土地地区公路能量平衡设计理念主要围绕多年冻土地基能量变化过程开展研究，以多年冻土地基—工程活动能量相互作用为纽带，以工程构筑物 and 冻土地基的稳定性与能量变化过程相互关系为主线，重点研究多年冻土地基的能量收支过程及工程措施的能量调节程度，以解决保证工程构筑物稳定性所需的冻土地基能量平衡状态为设计目标。能量平衡设计主要包含三个方面的内容：（1）研究公路工程的稳定性与能量变化过程的相互关系；（2）明晰工程措施对冻土地基能量状态的调节程度；（3）明确多年冻土公路工程设计的目标和影响因素。

1.0.5 近年来，许多异型热棒和新型热棒复合结构在多年冻土区得到应用，此类结构多针对热棒的传热特点进行改造或与其它措施复合使用，提高了路基结构的传热性能和稳定性。对于此类技术的使用，应以试验为基础，可参照本规范执行。

3 热棒路基设计

3.1 一般要求

3.1.1 多年冻土是一种对温度极其敏感的特殊岩土，不当的勘察方法会影响多年冻土的上限深度、含冰量、年平均地温等指标的测定。勘察方法的选择，参照现行《岩土工程勘察规范》(GB50021 2001) 和现行《冻土工程地质勘察规范》(GB50324-2014) 执行。

目前国内热棒价格大概为 5000 元/根，根据针对共和至玉树高速公路的造价计算，填高为 3m、宽度为 10m 的路基，仅热棒的材料费和安装费就高达 600 万元/公里。可见，热棒是一种造价较高的工程措施，应充分考虑其设计方案的经济性。

3.1.2 区域的日平均气温（或月平均气温）数据主要用于计算当地的冻结指数。风速资料主要用于计算热棒散热器的等效换热热阻。

3.1.3 研究发现，路堤高度对热棒的制冷效果并没有显著影响。但是如果路堤高度过大，热棒长度随之增加，其本身造价和吊装等安装造价也相应增加。

3.1.4 对热棒路基的排水设计作以下几点说明：

- 1 对青藏公路热棒路基的长期观测发现，路侧积水易诱发路基纵裂等病害，对热棒路基的稳定性造成不利影响，因此，热棒路基的设计应做好防排水设计。

- 2 热棒路基的排水设计应符合《公路路基设计规范 JTGD30-2015》、《公路排水设计规范 JTG/T D33-2012》和《多年冻土地区公路设计与施工技术细则 JTG/T D31-04-2012》中的相关规定要求。

3.1.6~3.1.7 对冻土勘察作以下几点说明：

1 为减少钻进中摩擦生热，保持岩芯核心土温不变，钻速要低，孔径要大，一般开孔孔径不宜小于 130mm，终孔孔径不宜小于 108mm；回次钻进时间不宜超过 5min，进尺不宜超过 0.3m，遇含冰量大的泥炭或黏性土可进尺 0.5m；钻进中使用的冲洗液可加入适量食盐，以降低冰点；

2 对于新建工程，应勘察确定多年冻土天然上限；对于改建、扩建工程，应勘察确定多年冻土人为上限；

3 应对热棒蒸发段所处地层分层取样，详细测定其热物理和冻土力学指标，样品取出后应立即冷藏，尽快试验；

4 冻土的基本热物理指标包括导热系数、比热容和导温系数，可通过面热源法、热线法和热平衡法等测定。测试方法及取样要求应参照现行国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123) 的规定执行；

5 由于钻进过程中孔内蓄存了一定热量，要经过一段时间待孔内温度恢复到天然状态后才可进行地温的测试。地温恢复的时间视孔深的增加而增加，一般 20m 深的钻孔需一星期左右的恢复时间，因此孔内测温工作应在终孔 7 天后进行。

3.1.8

1 热棒蒸发段埋设位置的考虑因素有：1) 在抬升冻土上限的同时，降低冻土地温，提高地基稳定性；2) 埋设位置过浅则有可能导致不完全回冻，产生融化夹层，对稳定性产生不利影响；3) 埋设过深则会增加热棒长度，增加造价。

2 热棒换热效能的关键在于散热段，散热翅片能够极大地增强热棒冷凝段的对流散热效率。因此，综合考虑近地面气流特征和安全因素，合理设置散热翅片的位置和尺寸。

3.2 热棒路基适用性

3.2.1

1 多年冻土区路基填土的热阻作用能够有效抵御外界热量的传入，减少对冻土层的热扰动，是冻土上限抬升的有利因素。此外，对于高路基路段，路基填土过高，造成热棒长度增加，对于施工、造价、成本等多方面不利。

2 已有的试验工程表明，对于未经处理的沼泽、湿地、积水路段，热棒的制冷作用会造成坡脚到路肩部分结冰，使得该部分成为应力集中区，造成路基纵向裂缝等病害，且积水的存在会明显降低热棒的制冷效果。因此对于此类地区，应先处理地表，完善排水系统。

3 对于弱融沉和融沉地区，路基所面临的融沉危害较小，以普通填土路基或辅助保温措施即可保证路基稳定性。

4 对于天然上限大于 4.0m 的路段，一方面路基面临的融沉危害较小，另一方面，采用热棒路基方案，会造成热棒长度过大，对于施工、造价、成本等多方面不利。

3.2.2 为了测试验证多年冻土区热棒路基的降温效果，在青藏公路整治改建工程中，设置了热棒路基试验路段，多年冻土区所采用的热棒路基，有单侧热棒路基和双侧热棒路基两种，设置单侧热棒的目的是为了防止融化盘的偏移，造成路肩边坡滑塌以及纵向裂缝。设置双侧

热棒的目的是为了加强制冷效果，降低土体温度，提高人为上限，防止冻土融化。通过近 10 年的观测发现，热棒路基主要有两个方面的作用。(1) 冷却地基。冻土路基在多年的运营过程中，在以黑色路面的吸收为主导因素的多种外在因素影响下路基已形成了融化盘，且由于路基阴阳面的吸热不均，融化盘向阳坡偏移，导致了路基的纵向裂缝，利用热棒制冷技术，使上限回升，消除阳坡侧融化盘偏移，有效治理路基纵向裂缝，同时防止冻土上限的进一步下移，减小路基沉降变形。(2) 提高冻土上限，防止路侧冻结层上的水向路基下迁移。由于路基下形成了融化路基侧的冻结层上水向路基下运移，一方面降低了路基基础的强度，另一方面冻结层上水带来的热量加速了路基下冻土上限的下移，使地下冰融化，路基下沉，热棒制冷使上限抬升，阻止冻结层上水的运移，以达到保护冻土，促进路基稳定的目的。

3.2.3 通过数值仿真计算，分析了冻土路基的冻融界面形态。从冻土路基融化盘的形态看出，整体上融化盘近似于盆状，冻土上限在路中部位下降最大，随着远离路中，上限逐渐抬升，一般在远离坡脚约 1~2m 处抬升到自然水平，冻融界面整体形态可用二次抛物线拟合。热棒路基的设计过程必须充分考虑融化盘的形态变化。对于高温冻土区，冻融界面曲率较大，融化盘不仅深度较大，且底部较宽，影响范围较大，因此面积也相应较大。这类地区的冻土路基的稳定性易受到外界环境升温及人类工程活动的影响，一旦破坏，后期治理难度增大，一般仅靠抬升路基高度和采用被动防护措施很难保证路基稳定性，需考虑采用主动冷却措施，是适用于热棒路基地区。而对于低温冻土区，

冻融界面曲率减小，虽然融化盘在路中部分较深，但底部影响范围相对较小，总体面积也较小。且在此类地区，抬升路基高度对于减小融化盘区域有较好的效果。因此，对于此类地区，冻土路基采用被动冷却方案就可保证路基稳定性，不推荐采用热棒路基。以保证路基安全运营 20 年为热棒路基的设计目标，以第 20 年路基人为上限低于天然上限 1.0m 以上为标准，作为热棒路基的适用条件。

此外，综合考虑多年冻土的融化规律，结合融化盘分析结果，以冻土上限年变化率为 -5.0cm/a 为标准。大于 -5.0cm/a 的路基可以考虑采用热棒路基，小于此标准则推荐采用被动冷却方式，如抬升路基高度、保温板路基等。

为验证计算结果的准确性，收集整理了青藏公路沿线地温观测资料，分析结果表明，路中人为上限逐年下降，在低温区（唐北 1、2、3、8 号观测断面，年平均地温约为 $-1.8^{\circ}\text{C}\sim-2.7^{\circ}\text{C}$ ，路基高度为 $1.6\text{m}\sim3.4\text{m}$ ）的融化速率约为 $2\sim6\text{cm/a}$ ，在高温区（唐北 4、5 号与唐南 1、2 号观测断面，年平均地温约为 $-0.1^{\circ}\text{C}\sim-0.9^{\circ}\text{C}$ ，路基高度为 $2.1\text{m}\sim3.5\text{m}$ ）则约为 $16\sim32\text{cm/a}$ ，计算结果与观测值较为吻合。

3.4 热棒设计

3.4.1 热棒路基的设计计算过程可按如下流程进行（图 3-1）：

(1) 根据当地气象资料和路基结构参数，预估普通公路路基（无调控措施）的热状况，得到人为上限的变化过程和路基融化盘的形态，进一步分析得到需要抬升的冻土上限和融化盘的面积。这一步可以通过数值计算得到，在后面将详细介绍。

(2) 根据当地气象资料和其它工程经验,初选热棒的直径、长度、散热器面积、翅片数目等,初步确定热棒的纵向间距 S 。热棒的设计目标主要为回冻路基融化盘,即热棒的产冷量主要用于融化盘土体冻结相变潜热(由于冻土的显热与潜热相比较小,在设计计算时可不考虑),而其“供冷量”则主要由当地的气象条件决定。与传热影响范围相对应的就是热棒的冻结半径(热棒产冷量能够冻结土体最大径向半径值),其直接决定了热棒设计的纵向间距。热棒路基的设计采用保护冻土的设计原则,则其设计目标为保持人为上限不低于原始天然上限。

(3) 根据计算所得需要抬升的冻土上限、融化盘面积和热棒的纵向间距,计算出所需要的耗冷量 Q_D 。

(4) 绘出气温和年平均地温 T_s 的变化曲线图,从图中确定寒季热棒的工作时间 t ,工作时间内平均气温 T_a ,及工作温差 (T_s-T_a) 。

(5) 根据第四章的理论分析和初选确定的热棒结构参数,计算热棒的热阻 R_a ,并计算热棒影响范围内的土体热阻 R_s 。

(6) 由工作温差和热棒及土体的热阻计算出热棒的功率 P 及产冷量 Q ,并根据工程等级要求选定安全系数 K 。判断 Q 与耗冷量 Q_D 的大小,若 $Q>K\cdot Q_D$,则满足设计需求;若 $Q<K\cdot Q_D$,则不满足设计需求,需要调整热棒结构参数。返回步骤(1),重新确定热棒结构参数,进行试算,直到满足设计需求。

(7) 若热棒结构参数满足设计要求,但 Q 较 $K\cdot Q_D$ 较大时,表明初选的结构参数远超过设计需求,造成一定浪费,需要对设计进行优

化。返回步骤(1)，重新确定热棒结构参数，进行试算，直到 Q 略大于 $K \cdot Q_D$ 。

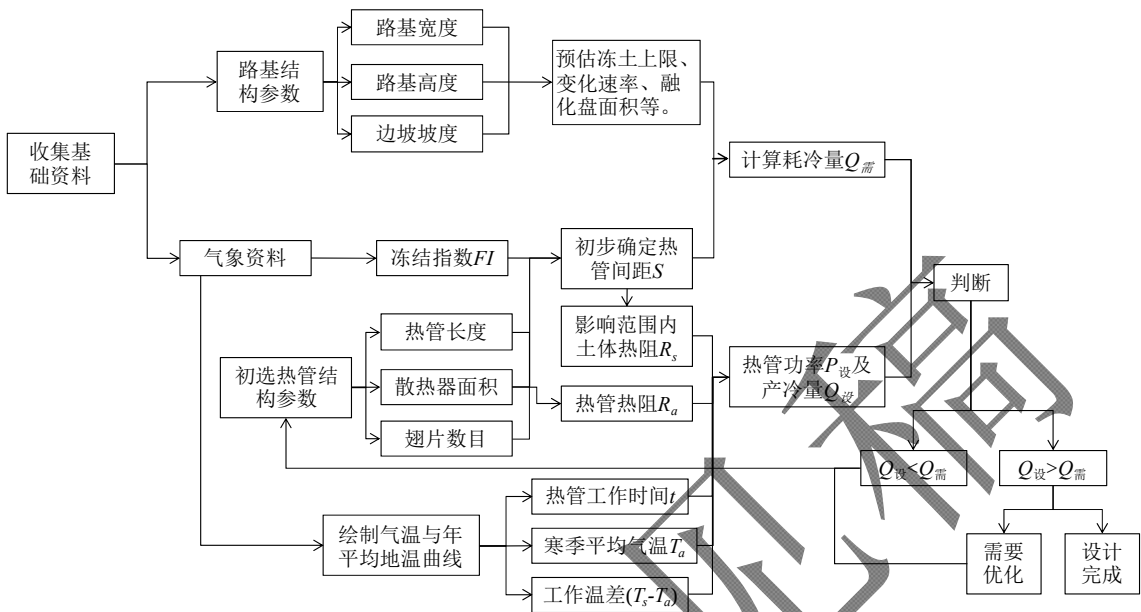


图 3-1 热棒路基设计流程

3.4.2 冻土路基下地基每年融化深度 h 受路基运营时间、路基高度及年平均地温的影响。有研究表明， h 与路基运营时间呈线性关系：

$$h = [a \quad b] \begin{bmatrix} t \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

式中： t ——路基运营时间，年；

a 、 b ——系数。

上式中系数分别与路基高度 H 呈线性关系：

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & d \\ e & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

式中： H ——路基高度 (m)；

c 、 d 、 e 、 f ——系数。

上式中系数又分别与年平均地温呈线性关系：

$$\begin{bmatrix} c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_g \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

式中： a_i ——系数， $i=1\sim 4$ ；

T_g ——年平均地温（℃）。

整理以上各式，可得：

$$h = [(a_1T_g + b_1)H + (a_2T_g + b_2)]t + [(a_3T_g + b_3)H + (a_4T_g + b_4)] \quad (3-4)$$

式中： $a_1=-0.008$ ， $a_2=0.103$ ， $a_3=0.356$ ， $a_4=-0.378$ ， $b_1=0.004$ ， $b_2=0.234$ ，

$b_3=-0.277$ ， $b_4=0.549$ 。

在进行热棒设计计算时，需要用式 3.3.2-1 计算冻土路基保持稳定所需的耗冷量 Q_D ，式中需要抬升的路中冻土上限可以利用当地气象、地勘资料通过数值预报的方式确定，也可查附录 A 或者利用式(3-4)计算确定。

3.4.5 根据对青藏公路楚玛尔河地区热棒路基试验路段近 8 年的监测数据分析，得到了热棒路基的年内传输能量及热棒的实际功率，如表 3-1 所示。

表 3-1 热棒年内传热能力估算

年度	水平温度梯度(℃/m)		年度传输能量(MJ)	热棒实际功率(W)	
	年平均	寒季		年平均	寒季
2004	0.80	1.80	1850.54	58.68	132.03
2005	0.84	1.74	1943.07	61.61	127.63
2006	0.76	2.06	1758.02	55.75	151.10
2007	0.82	2.26	1896.81	60.15	165.77
2008	0.78	2.22	1804.28	57.21	162.84
2009	0.76	1.94	1758.02	55.75	142.30
2010	0.64	1.66	1480.43	46.94	121.76
2011	0.68	1.70	1572.96	49.88	124.70

平均	0.76	1.92	1758.02	55.75	141.02
----	------	------	---------	-------	--------

从表 1 中可以看出，在热棒路基修建后的 8 年间，热棒的年度传输能量大约在 1500MJ~2000MJ 之间，热棒的实际功率（年平均功率与年最大功率）远小于额定功率，其年最大功率出现在冷季 1 月~2 月间。因此在进行热棒设计计算时，必须以其实际功率计算。

目前在工程中应用的热棒类型大多为直插式热棒或者斜插式热棒，较少出现异型热棒或者采用新工艺、新材料、新材料的热棒，因此对于此类热棒的应用效果和降温效能指标，目前只限于试验室测定，如需在实体工程应用，则必须通过现场试验确定实际功率。

此外，目前对于热棒路基的降温效能指标主要是通过对青藏公路热棒试验工程的长期观测得到的，对于一级公路和高速公路工程，缺乏相应指标。对于此类工程，必须通过现场试验确定实际功率。

3.4.6 为便于更好地理解本规程的热棒路基设计方法，这里通过共和至玉树公路热棒路基设计详细说明设计方法和流程。

1 背景及资料收集

为了支持青海省等藏区发展，国家规划把 G214 线共和至结古段建设成为具有青海特色的高速化公路，穿越大片连续和不连续多年冻土区。地温监测资料表明，公路沿线多年冻土地温基本上均在一 $0.3^{\circ}\text{C} \sim -1.5^{\circ}\text{C}$ 之间，属于多年冻土中的高温不稳定、高温极不稳定多年冻土区。

项目查拉坪地区 K576+080~K576+700 段属于高原台地地貌，地势较平坦，植被发育良好，水草沼泽较为发育，腐殖土层较厚。地层

岩性主要为碎石。冻土呈网状构造，多见层状冰，冻结强度偏低，富冰、饱冰冻土(含冰量约为 30%~40%)，年平均气温约为-3.5℃~-4.0℃，年平均风速约为 4.0m，年平均地温约为-0.5℃~1.0℃，天然上限 1.2~1.8m，高含冰量冻土厚度为 1.9~8.7m。新建公路右侧约 2 公里外有河流及光缆各一条。公路附近未见天然积水坑。工点附近旧路路面已遭完全破坏，通行状况较差。钻探工作揭示地层岩性如表 3-2 所示。地温和气温资料如图 3-2、图 3-3 所示。

表 3-2 地层岩性

地层岩性	地层标高 (m)	地层层厚 (m)	描述
植被覆盖层	0.5	0.5	呈褐色到深褐色，植被根系极为发育，土壤湿润，黏性较大
泥炭	3.5	3.0	呈灰褐色到深褐色，有臭味，腐殖质含量较高，土壤含水率较大；2.7m 起始见冻土，可见明显冰屑，富冰到饱冰冻土，含少量角砾
粘土	9.2	5.7	呈灰褐色，可塑，角砾含量逐渐增大，富冰到饱冰冻土
粉质粘土	15	5.8	呈灰褐色，角砾含量较大，可见漂石，含冰量减小，少冰到多冰冻土

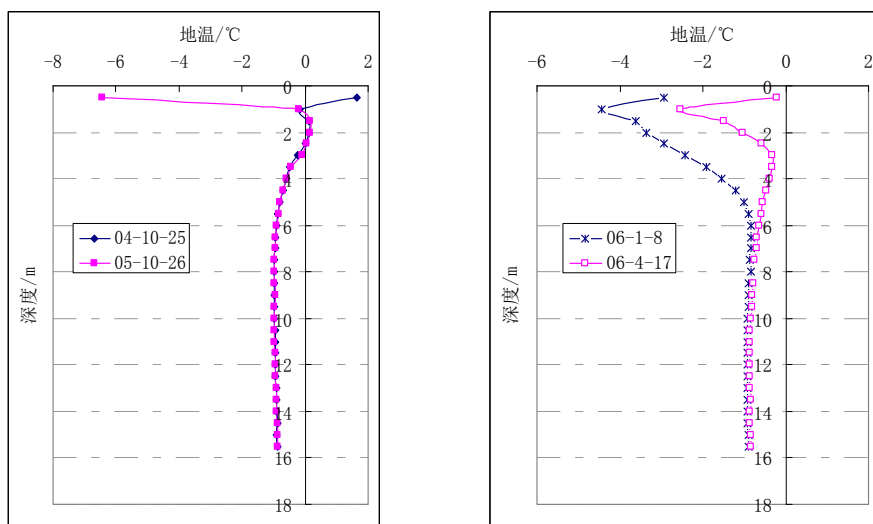


图 3-2 地温资料

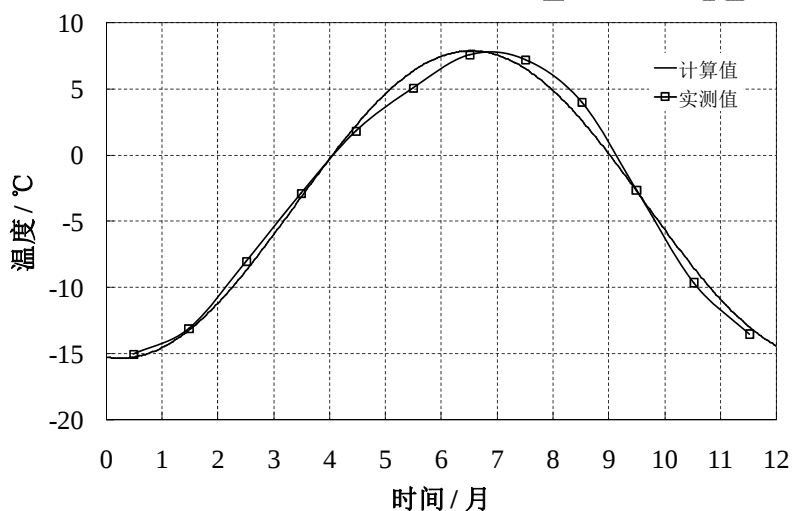


图 3-3 玛多县月平均气温资料

2 预估冻土融化速率与融化盘面积

此路段路基高度约为 2.0m，年平均地温约为 $-0.5^{\circ}\text{C}\sim-1.0^{\circ}\text{C}$ ，查表附录 A-1 可得，冻土人为上限将以 $13.4\text{cm/a}\sim19.8\text{cm/a}$ 的速率退化下降，基底宽度为 16.0m。按照上限进行设计，则每年需要抬升的融化盘面积按照二次抛物线估算：

$$S = \frac{2}{3}lh = \frac{2}{3} \times (16 + 2) \times 0.198 = 2.38\text{m}^2$$

对月平均气温（图 3-3）进行拟合，可用三角函数拟合的公式表示：

$$T = -3.749 + 11.6 \times \sin(-0.5001 \cdot t - 1.443)$$

由上式和式附录 C-5，计算得到该地区的冻结指数为 $1992.22^{\circ}\text{C} \cdot \text{天}$ 。

3 参数预估

根据青藏公路相关热棒路基设计经验，初选热棒长度为 12m，外径为 89mm，内径为 73mm。其中冷凝段 4m，绝热段 2m（为了穿透路基体），蒸发段 6m。翅片高度选择为 3m，翅片的螺距、高度及基圆半径依据国标《热管》（GB/T 27880-2011）选取，如表 3-3 所示。

表 3-3 初选热棒参数

冷凝器参数	
高度	3.0m
翅片形状因子	1.8
翅片螺距	0.012m
翅片个数	250 片
r1 翅片基圆半径	0.0415m
r2 翅片外圆半径	0.0673m

由初选结果，热棒冷凝器的散热面积约为 4.55m^2 ，按照附录 D，可得热棒的热阻 $R_d = 0.01167^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

4 纵向间距

由冻结指数及热棒的热阻，根据式(3.4.4-1)，可以试算得到热棒的有效影响半径约为 2.0m。因此，初步确定热棒的纵向间距为 2.0m。由附录 D 计算公式，得到传热半径内土体的热阻为 $R_s = 0.05050^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

5 耗冷量计算

根据式 (3.4.2-1)，可得到保证路基稳定性所需要的耗冷量 $Q_{\text{需}}$

=2289.4MJ，按双侧热棒设计，则每根热棒的所需耗冷量为 $Q_{需}$
=1144.7MJ。

6 能量平衡计算

根据共玉公路沿线典型气温条件，寒季平均气温为-10.3℃，年平均地温为-0.5℃~-1.0℃，热棒的有效工作时间为每年的十月上旬到明年的三月下旬，约为 5 个月，则单根热棒所需功率为 $P_{需} = \frac{1144.7\text{MJ}}{5 \times 30 \times 24 \times 3600} = 83.3\text{W}$ 。而热棒的设计功率为 $P_{设} = \frac{(-1.0+10.3)^{\circ}\text{C}}{(R_s+R_d)} = 149.6\text{W}$ 。对于多年冻土区高速公路，取安全系数为 $K=1.3$ 。 $K \times P_{需} = 108.29\text{W} < P_{设}$ ，故所设计热棒参数满足设计要求，但所选的热棒功率较大，超出所需功率较多，需要进一步优化。

7 参数优化

对热棒功率影响较大的主要是冷凝器，所以可以通过减小冷凝器的散热面积对其进行优化。减小热棒冷凝段长度为 3m，蒸发段长度为 5m，散热器长度为 1m，其他参数不变，则热棒冷凝器的散热翅片共 83 片，散热面积为 1.95m^2 ，热棒的热阻为 $0.02628^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

重复 2-6 的步骤，优化后的热棒设计功率为 $P_{设} = \frac{(-1.0+10.3)^{\circ}\text{C}}{(R_s+R_d)} = 121.2\text{W} > K \times P_{需}$ ，满足设计需求，且考虑到一定的安全储备，设计合理。

3.4.7 通过分析热棒的传热过程，以等效热阻法计算了热棒各个环节的热阻，以目前青藏公路所采用的热棒来说，在热棒换热过程中，冷凝段与外界的换热热阻占到热棒总热阻的 85.6%（见图 3-2），热棒的传热过程主要受外部热阻的影响，冷凝段的换热能力决定了热棒的整

体换热能力。结合野外热棒检测结果，进一步分析计算可知，外界风速对于热棒冷凝段的换热效率有很大影响。

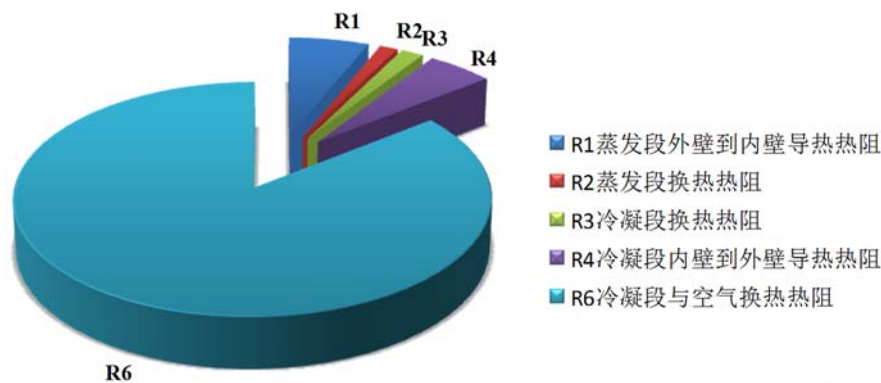


图 3-2 热棒各个环节热阻对比

3.4.8 由于热棒在多年冻土区的工作环境复杂多变，因此其实际功率往往与其额定功率有较大不同。所以在热棒路设计时应以现场试验测得的实际功率设计。在缺乏现场试验时，可参考类似地区现场试验成果，计算功率折减系数，根据额定功率计算出实际功率。例如，表 3-1 所示青藏公路楚玛尔河地区热棒路基试验路段近 8 年的实际年平均功率为 55.75W，该处热棒的额定功率为 500W，其功率折减系数为 89%。

3.4.9 关于热棒路基设计的安全系数，目前资料较少，如有现场试验，应按实际测得的热棒冷量有效利用率的倒数取值。对于一般等级的路基工程推荐取 1.1~1.3，对于高等级公路可取 1.2~1.8。考虑热棒的热群桩效应时可适当减小一些；考虑热棒路基服役期间气候升温的影响时，可适当提高。

3.5 构造要求

3.5.1 冻土路基的设计原则一般为保持冻结（保护冻土）和允许融化。即采取有效的工程措施控制路基下多年冻土不融化或人为上限的下

降导致冻土路基产生的融沉变形在设计容许变形范围以内。因此，热棒的蒸发段应设置在冻土上限附近。

此外，通过室内试验发现热棒的传热能力都是随冷凝段(蒸发段)长度的增加而增强，但是又有所区别。图 3-3 表明，以青藏公路所用热棒为例，当蒸发段的生长到 3.0m 以上长度时，热棒的传热能力逐渐趋于稳定，不再明显增强。因此蒸发段的选择除满足最小长度以外，一般主要按照当地冻土地质条件、路基结构形式等决定。

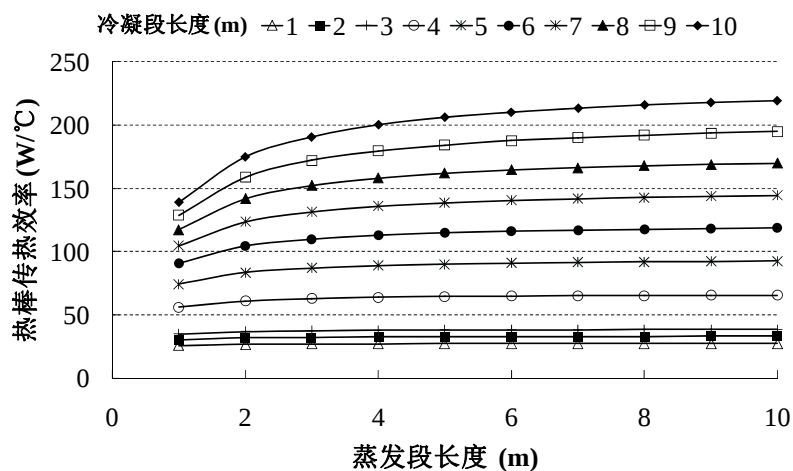


图 3-3 热棒传热能力随蒸发段长度变化曲线

图 3-4 是在蒸发段为 6.0m 条件下，热棒的换热效率随冷凝段的变化曲线。从图中可以看出，在冷凝段的长度小于 3.0m 时，其换热效率相对较弱，主要是由于冷凝段长度较短时，表面的散热翅片也较少，而且近地表的风速也相对较小，都将严重影响冷凝段的换热能力。而当冷凝段的长度达到 3m 以上时，热棒的换热能力与冷凝段的长度基本呈线性变化。综合考虑青藏高原的环境风速，蒸发段长度等条件对热棒换热能力的影响，4m~6m 的冷凝段长度是较为合理的。这一长度范围是基于青藏公路热棒路基的结构参数计算得到的，冷凝段长

度为 4m, 翅片长度为 2m。明显地, 翅片越长, 热棒的换热能力越强。因此, 在翅片长度增加的情况下, 冷凝段的长度可减小, 取 2m~4m。在后期的设计中 (共和至玉树公路、青藏高速公路等), 设计人员尝试了采用 3m 的冷凝段 (其中翅片长度 2.5m), 热棒的有效功率变化不大。

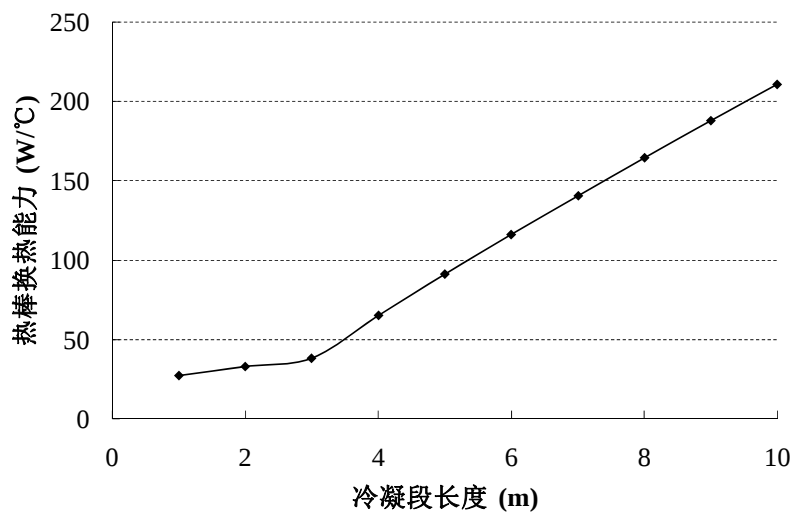


图 3-4 热棒传热能力随冷凝段长度变化曲线

3.5.2 为测定热棒的倾斜角度对传热效能的影响, 中交第一公路勘察设计研究院有限公司开展了热棒的室内模型试验 (图 3-5)。试验中对热棒在 0°、10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°、90° 共计 10 种倾斜角度 (与水平方向夹角) 下的热棒传热性能进行了测试。主要对热棒外壁温度和热流进行监测。试验中选用的热棒是表面光滑、无翅片的氨-钢热棒, 长度 1.525 m, 外径 0.051 m, 试验中热棒冷凝段和蒸发段长度相等。冷凝段和蒸发段进行独立控温, 其中蒸发段采用定温方式, 即冷浴恒温在 -0.5 °C (模拟地温); 冷凝段采用变温方式, 即冷浴温度在 -0.5 °C~-15 °C 范围内降温变化, 分级加载, 在上一级稳定后加载下一级。



图 3-5 热棒传热测试装置

表 3-2 不同倾斜角度条件下热棒外表面热流密度和冷凝段与蒸发段温差回归方程

倾斜角度 (°)	回归方程	相关系数 R^2
0	$q = -32.92\Delta T - 1.37$	>0.99
10	$q = -35.67\Delta T - 5.53$	>0.99
20	$q = -36.15\Delta T - 10.02$	>0.99
30	$q = -35.18\Delta T - 8.80$	>0.99
40	$q = -33.60\Delta T - 6.13$	>0.99
50	$q = -32.23\Delta T - 4.67$	>0.99
60	$q = -30.27\Delta T - 6.10$	>0.99
70	$q = -27.70\Delta T - 5.08$	>0.99
80	$q = -26.57\Delta T - 7.10$	>0.99
90	$q = -27.39\Delta T - 7.11$	>0.99

通过表 3-2，可以得到热棒在不同倾斜角度条件下的传热系数，见图 3-6。

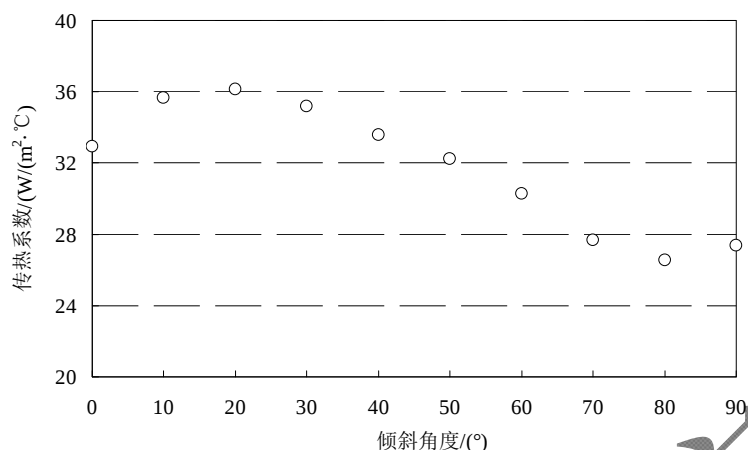


图 3-6 不同倾斜角度条件下热棒传热系数

图 3-6 表明热棒传热性能与其倾斜角度密切相关，热棒在竖直条件下传热性能并不是最强，其在倾斜过程中传热性能先略微减小，随后在小于 60°以后逐渐增大，在 20°左右达到最强，然后又继续减弱。这种现象，主要是由于热棒工作过程中，内部工质气、液循环“淤堵”现象造成的。当热棒工作时，蒸发段液体工质受热汽化，上升到冷凝段，释放出潜热后液化，之后依靠重力下降回到蒸发段。在热棒处于稳定工作时，内部工质的上升与下降十分频繁，会造成一定的“淤堵”现象，影响热棒的传热效率。而当热棒倾斜一定角度时，液体、气体工质将会分别沿着热棒内壁的上、下侧循环，弱化“淤堵”现象，提高热棒的工作效率。因此，倾斜式热棒的传热效率要优于垂直热棒，而且从试验结果来看（图 3-6），存在一个最优角度，此时热棒的传热效率将达到最大。

为了反映倾斜角度对热棒传热性能变化影响的程度，试验中将热棒在不同倾斜角度条件下的传热系数与 90°倾斜角度传热系数进行对比分析。图 3-7 为不同倾斜角度下热棒传热系数与 90°倾斜角度热棒传热系数的比值。从图中可以看出，热棒在倾斜角度 20°时，比值最

大，达到 1.3 以上，这表明热棒在倾斜角度 20°时，传热能力比竖直条件下增大达 30%以上。

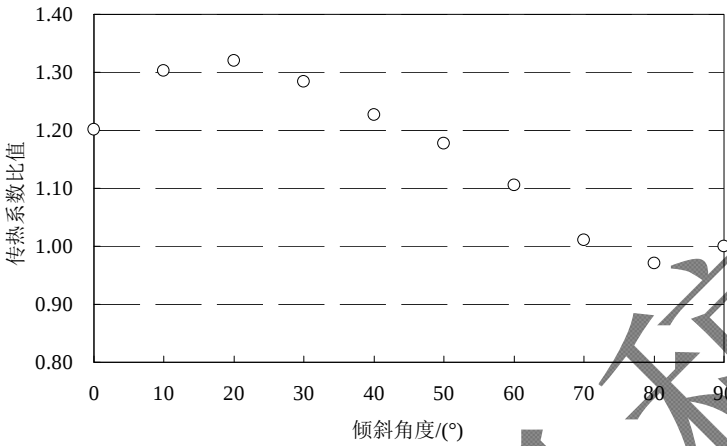


图 3-7 不同倾斜角度条件下热棒传热系数与 90°倾斜角度传热系数比值

同样，通过图 7 和表 2 可计算得到热棒在不同倾斜角度条件下的启动温差，这里定义为热棒开始工作时冷凝段与蒸发段的温差（即冷凝段温度低于蒸发段）。各倾斜角度条件下的热棒启动温差绘于图 3-8。

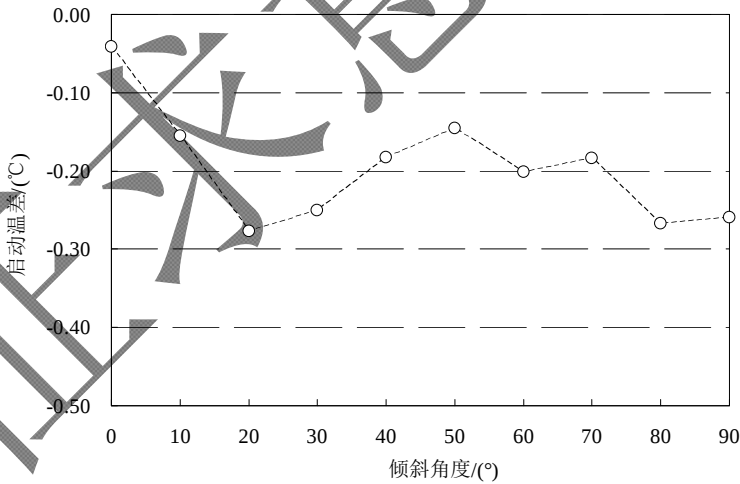


图 3-8 不同倾斜角度条件下热棒启动温差变化

从表 3-2 和图 3-8 可以发现，在倾斜角度为 0°时，热棒启动温差最小，仅为-0.04 °C，这表明热棒在水平条件下，无需重力的影响，因此热棒开始工作的启动温差很小。其他倾斜角度条件下，虽然有一定的波动，但基本维持在-0.28~ -0.14°C，平均值为-0.20 °C，因此，

可以认为试验中选取的热棒的启动温差应该在 -0.20°C 左右。

本试验对于热棒倾斜角度的室内试验研究,是针对特定结构的热棒装置开展的。实际应用中,热棒的传热性能与倾斜角度的关系,还受到其它热棒的结构因素影响,如热棒的长度、充液率等。综上所述,本试验所得出的热棒倾斜角度的研究,限于试验条件,尚未开展其它充液率、长度等结构的热棒传热性能试验,仅为热棒传热性能的定性分析。在实际应用中,可尽量选择倾斜式热棒(不仅有利于增强热棒的传热性能,还有利于降低路中冻土温度)。对于倾斜角度的选择,依据试验的试验结果、相关参考文献并考虑现场施工条件等,建议选择 70° 。实际上,上述指标都是在室内条件下测定的,现场的施工条件和应用条件较为恶劣,会在一定程度削弱角度的影响。青藏公路热棒路基试验工程实测数据表明,热棒的实际工作功率远低于其额定功率,因此对于热棒倾斜角度的选择,主要还是依据路基结构和工程地质条件的需求确定。

3.5.3 热棒一般在出厂前已经完成了镀锌防腐措施。在现场发现局部防腐层受损的热棒可采用涂抹防锈漆进行防腐处理后,再进行热棒的安装。

热棒的日常维护主要注重外观完整性及局部的腐蚀造成热棒内工质的泄漏。在日常的公路养护工作中,即要对发生事故的热棒路段进行标记,在事故后检查热棒的损坏情况。每年进行一次集中调查及维护,对损坏热棒进行记录。对于防撞护栏损坏的要及时更换,防止再次碰撞造成热棒的损坏。当损坏热棒达到一定数量时,因安排施工,

集中更换。

根据现有研究成果及工程观测,在地表水丰富地区设置热棒易引发路肩聚水凝冰,诱发纵向裂缝、不均匀变形及边坡滑塌等病害。因此,对于此类地区,应格外重视地表水处理。

3.5.5 插入式热棒的蒸发段埋置在公路的路肩位置,其本身高度在 3m 左右、间距在 4m 左右。高原公路条件复杂,总车流量虽然不大,但是重车多,小车速度快,重车之间的超车频繁,在路况较好路段更易发生因超车而冲出路基的事故。根据青藏公路现有热棒路基的调查,热棒路基段路况整体较好,但路基两侧护栏有多处明显损毁,但损毁护栏后的热棒情况良好,并无损坏。因此,插入式热棒在完成安装后,要立即安装防撞护栏,护栏形式推荐采用波形梁护栏。

防撞护栏与热棒之间要保持一定的距离,防止车辆撞击护栏后再次撞击热棒。热棒与护栏之间的距离应控制在 0.5m-1m。护栏安装位置根据规范确定,因此,热棒在安装时应预先考虑与护栏之间的间距,并预留位置。

热棒路段的护栏主要起到保护热棒的作用,多年冻土区公路设计时速也不会太高,因此护栏一般情况下选用 A 级,局部危险路段可选用 SB 级。

4 热棒路基施工、检测及质量验收

4.1 一般要求

4.1.1~4.1.2 鉴于发卡式热棒——隔热层复合路基属于新材料、新工艺的应用，尚没有可行的施工技术规范，施工人员不熟悉施工过程及质量控制注意事项，在所用材料、机械设备、人员准备充分，明确设计和施工意图，项目组技术人员现场指导下后方可进行施工。

4.1.4 热棒是一种结构特殊的热棒，在使用前要先完成结构设计检测，结构设计除结构满足使用者初衷和意图外，要重点考虑强度满足安全使用要求，且易于施工或进行施工质量控制。在设计使用时就应给出相关施工技术指导和质量控制要求。热棒在按设计意图定制生产后，要经过 100% 出厂检测和现场抽样检测。

热棒的启动性是热棒正常工作的重要指标之一。为了反映热棒启动特性变化规律，通过室内试验对不同条件下的热棒启动温差（即冷凝段温度低于蒸发段）进行测试，见图 4-1。从图 4-1 中可以看出，在倾斜角度为 0° 时，热棒启动温差最小，仅为 -0.04°C ，这表明热棒在水平条件下，无需重力的影响，因此热棒开始工作的启动温差很小。其他倾斜角度条件下，虽然有一定的波动，但基本维持在 $-0.28\sim -0.14^\circ\text{C}$ ，平均值为 -0.20°C ，因此，可以认为试验中选取的热棒的启动温差应该在 -0.20°C 左右。需要说明的是，以上的测试数据是在试验室测定的，而热棒的启动温差也与热棒的长度、工质、充液率等有关，此外，现场的施工条件和应用条件较为恶劣，会在一定程度增大启动温差。

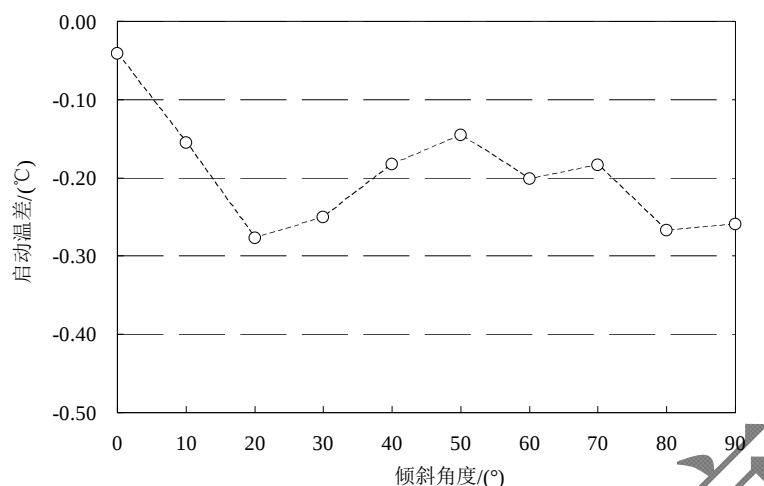


图 4-1 不同倾斜角度条件下热棒启动温差变化

在热棒正常工作时，无论是蒸发段还是冷凝段，工质均处于饱和状态，蒸发段与冷凝段的温差较小，热棒周围形成较为均匀的温度场，加速了下部土体的冻结过程，减小的冻胀力，且由于冻结表面大，冻结速率快，周围水分来不及向冻结锋面迁移和聚集，有效抑制了冻结水分向冻结锋面移动的数量及速度，对于防止冻土冷生过程的差异性有重要的影响。因此，热棒的等温性能是热棒正常工作的重要特征之一，等温性能的差异对于保障冻土路基稳定性有重要意义。

对自检合格的产品由业主委托有热棒检测能力的检测机构对发热棒进行第三方检测，主要是进行热棒的启动性能和等温性能检测、超声波检测、气密性检测和热传导性能检测。检测合格的发卡式热棒进行标记，出具第三方检测报告。

施工前现场检测阶段只能核查拟使用的热棒“出厂检验报告”和“产品出厂质量证明文件”及“第三方检测报告”。核查到货包装上发货标志、施工单位依据发货标志进行质量和数量验收，防止不合格产品用于工程。

4.1.5 热棒属于结构特殊的工业产品。对于检验合格的热棒，使用汽

车进行一站式运输，减少运输环节造成热棒的损坏。但由于热棒结构尺寸较大，在运输、搬运、存放过程中难免会受到破损，施工现场也不具备再次检验的能力。因此，在施工安装前要仔细检查热棒的外观，保证外观良好，无明显破损，焊缝平整，翅片不倒折，表面防腐层完好，避免将无效的热棒应用于工程中，造成不必要的返工及浪费。

4.2 热棒插入式施工方法

4.2.1

1) 热棒属于一次成型的工业产品，其工作特点要求绝对的密封性，当热棒的外壁破损后会造成内填工质的泄漏，热棒就不能正常工作。热棒在出厂前进行相关的质量检测，保证产品的质量。插入式热棒设置在路基的土路肩外侧，其冷凝端外露，为了避免施工过程中，机械、人为因素造成对热棒损坏、失效，应在路面施工完成后，再进行热棒的安装。

2) 插入式热棒路基在路面施工完成后即可安装，但考虑到冬季安装气候条件较差，暖季可施工时间较充裕，且安装完成后冷季即可检测工作状态，推荐暖季进行安装施工。

3) 高原多年冻土区经济落后，道路保通要求较高。热棒一般用于高温高含冰量多年冻土区，地质条件差，一般情况下使用热棒路段的旧路病害严重，行车舒适性很差。因此，无论新修道路或是旧路重建后，热棒路基段在路面施工完成后很快会被用来保通，行驶的车辆会对碰撞热棒，造成热棒的倾斜、翅片的损坏，严重时造成热棒的断裂，完全丧失工作能力。因此，热棒在安装完成后必须立即安装护栏进行防

护。

4.2.2

1 热棒的间距主要是根据其制冷的有效半径确定的。根据在青藏高原公路、青藏铁路的使用情况，其有效半径在 2m 左右，依据对地基处治的要求不同，热棒的间距一般为有效半径的 1.0 至 2.5 倍。热棒的位置是设计人员在热棒路基设计时，根据地形地貌、冻土类型、热棒功率等因素综合确定的，现场施工时必须按照设计要求布设热棒，才能使热棒路基起到整体冷却冻土的目的。

2 热棒作为一种主动冷却冻土的工程措施，可以在冷季不断的向土体输送冷量。热棒冷凝端周围的土体在不断的降温过程中，也将热棒带来的冷量向四周土体不断的扩散。根据研究表明，热棒的有效影响半径在 1.5-2m，但其最大影响半径可以到达 7-10m，且随着时间的推移不断的向外扩散。因此，在布设双侧热棒时，应采用两侧热棒错位布设，以达到热棒的最大制冷效果。

4.3 热棒填埋式施工方法

4.3.1

1) 填埋式热棒就是将热棒的蒸发端置于隔热层底部，将冷凝端置于隔热层的顶部，然后将热棒与隔热板的组合结构置于路面结构层以下的土路基中，达到夏季隔热，冬季导冷的作用。因此，填埋式热棒的施工时间主要受到路基施工进度控制，当路基施工到指定位置后即可进行填埋式热棒的施工。

2) 在复合路基施工时，其中铺设 XPS 板的施工季节对路堤下冻

土上限有较大影响，暖季施工，大量潜热已经传入路基，此时铺设隔热材料不利于已传入热量的散失，XPS板路基的施工季节最好能选择在冷季，但温度太低，地表冻结又不宜施工，那么在进行隔热层施工时应避开最大融深季节，结合青藏高原试验路区段的气候特点，综合考虑最佳施工季节应选择在路基刚解冻时段。

4.3.3 施工工序

1 基底压实

1) 填埋式热棒组成包括发卡式热棒及XPS板，热棒的蒸发段位于XPS板底，冷凝段位于XPS板顶，热棒形如发卡将XPS板夹在其中。与插入式热棒位于路肩位置不同，填埋式热棒布设于路基体内，位于路面结构层下部。填埋式热棒本身结构又包括热棒及XPS板两种材料，因此在施工时要严格控制各结构层的压实度，以保证填埋式热棒路基整体的压实度能达到验收标准。

对于新建路基，填埋式热棒底层路基作为整体热棒路基结构的受力层，其路基的填料及压实度必须符合现行《公路路基设计规范》中相关规定要求。

2) 旧路改建路基，不需要对改建路段路基全部重建，开挖路槽至指定深度后检测压实度及相关指标，满足压实度要求的即可直接进行填埋式热棒的安装，对于不满足要求的路基，应对基底进行补强压实，在符合《公路路基设计规范》中相关规定要求后，方可进行填埋式热棒的安装施工。

2 修整路槽横坡

发卡式热棒主要通过内部工质在蒸发段蒸发、蒸汽在冷凝段冷凝带出热量后，恢复成液态回流至蒸发段。一般热棒靠重力进行两相液汽对流循环传热，发卡式热棒和一般热棒一样，冷凝液从冷凝段返回到蒸发段不是靠吸液芯所产生的毛细力，而是靠冷凝液自身的重力，因此发卡式热棒的工作具有一定的方向性，蒸发段必须置于冷凝段的下方，且必须在垂向上有相应倾角，这样才能使冷凝液靠自身重力得以返回到蒸发段。因此，在布设冷凝端时，需要将路床修成中间低，两侧高的反向横坡，反向横坡坡度 3%~5%，以保证热棒内工质的正常回流。

同理，在埋设蒸发段时，也要修正路床，形成中间高，两侧低的横坡，横坡坡度 3%~5%。

3 各结构层的填料及压实

在施工过程中，绝不允许施工机械直接碾压热棒及 XPS 板。因此，在填料的过程中，采用挖掘机回填或采用装载机将路基填料从一端向前推运，填料厚度要满足最小填筑要求以保证热棒及 XPS 板不被施工机械压坏。每层压实结束后，均要对压实度进行检测，以保证路基整体的压实度。

4.4 热棒路基检测

4.4.2 施工质量检验

热棒的埋深、倾斜角度和冷凝段长度都是经设计单位精心计算确定的，若施工不符合设计要求，将会降低热棒的散热效率，因此，必须严格检验埋深和倾斜角。

填埋式热棒由于设置于路床部分，属于路基体的一部分，应该满足路床部分压实度的要求，高速公路和一级公路为 96，二级公路为 95，三四级公路为 94；防止压实过程中路基填料损坏热棒，热棒外侧 30cm 内路基填料应用细砂或砂性土填筑。

就目前而言，热棒的实际功率只能通过现场埋设温度传感器，采集地温观测数据进行计算确定，并且所得的实际功率还能按照相似原则为以后的多年冻土区公路设计提供技术指导。