

文章编号:1006-2106(2013)09-0060-05

热棒群在多年冻土区隧道浅埋段防护中的应用*

刘 锟** 蔡汉成 李 奋

(中铁西北科学研究院有限公司, 兰州 730000)

摘要:研究目的:多年冻土区隧道洞口浅埋段结构所处的环境温度主要受大气温度影响,变化幅度大,同时施工造成的热融圈(围岩活动层)接近或与多年冻土上限重叠,冻结层上水易向洞周汇集,因此该段隧道极易出现衬砌开裂、漏水、挂冰等冻融破坏现象。利用较为成熟的热棒技术,对多年冻土区隧道浅埋段围岩进行“主动冷却”防护,减少或避免冻融循环对隧道支护结构可能造成的破坏。

研究结论:(1)热棒群工作后可显著降低其影响范围内的围岩温度,提高冻土围岩强度,抬升多年冻土上限,并在洞顶形成冻土隔水帷幕,减小隧道支护结构所受冻胀力;(2)可阻隔冻结层上水向隧道结构方向的渗入,同时使热融圈的回冻时间从3~5个冻融循环期减少到1个,有效地解决洞口段支护结构冻融破坏等问题;(3)该工程费用相对较少,安装、监测方便;(4)研究成果适用于新建或已建多年冻土隧道浅埋段的病害预防及治理。

关键词:热棒群;多年冻土;隧道浅埋段;防护技术

中图分类号:U213.1 文献标识码:A

Application of Thermal Probe Group in Protection of Shallow Section of Tunnel in Permafrost Area

LIU Kun, CAI Han - cheng, LI Fen

(Northwest Research Institute Co. Ltd of CREC, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract; Research purposes: The environment temperature of the structure in shallow section of the tunnel in the permafrost area is mainly influenced by the atmospheric temperature. The water above frozen layer is easy to converge around the tunnel opening because of the large amplitude of change of temperature and the thawing circle caused by construction approaching to or overlapping the top limit of permafrost during the construction. Therefore, the damage phenomena like lining cracking, water leakage and ice covering easily happen to the parts of the tunnel in such area. The possible damage to the supporting structure for the tunnel caused by the freezing and thawing cycle can be reduced or avoided by using the active cooling protection for the surrounding wall in the tunnel shallow section in permafrost area.

Research conclusions: (1) By using the thermal probe group, the temperature of the surrounding wall will be significantly reduced within its sphere of influence, the strength of the surrounding wall of permafrost will be enhanced, and the top limit of the permafrost will be raised to form a waterproof curtain on the tunnel ceiling for reducing the frost heaving force on the tunnel supporting structure. (2) The water above frozen layer can not infiltrate into the tunnel structure and the refreezing time will be reduced from 3 to 5 freezing and thawing cycles to 1 cycle. In this way, the problem of the freeze - thawing damage to the supporting structure in the portal section can be solved. (3) This technology has features of lower engineering cost and more convenience in terms of installing and monitoring. (4) This

* 收稿日期:2013-05-23

** 作者简介:刘锟,1969年出生,男,工程师。

research achievement can be used for the disease control and treatment of the shallow section of tunnel in the permafrost area.

Key words: thermal probe group; permafrost; the shallow section of tunnel; protective technology

1 研究背景

冻土特殊的物理力学性质以及围岩冻融作用、冻胀力等因素的存在,给多年冻土区隧道结构的可靠性提出了更高的要求。特别在洞口浅埋段(一般指隧道埋深小于2倍洞径的区段),由于结构所处环境温度主要受大气温度影响,变化幅度大,同时施工造成的热融圈(围岩活动层)接近或与多年冻土上限重叠,冻结层上水易向洞周汇集,因此该段隧道极易出现衬砌开裂、漏水挂冰等冻融破坏现象。据预测,到2050年青藏高原平均气温将上升 $2.2\sim 2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1],隧道作为永久性工程,至少应考虑未来几十年的气候变化对其可靠性造成的不利影响。考虑到现有的热棒制造及安装技术比较成熟,利用和借鉴多年来广大技术工作者在此方面取得的成果和经验,改变目前主要依靠调整“热阻”进行“被动”热防护的观念,利用热棒技术,在多年冻土区冻土隧道浅埋段引入有“主动冷却”作用的热防护措施无疑是一种积极的尝试。

现有的热棒制冷技术在多年冻土区土木工程中主要应用于路基、桥涵、输油管道、电力塔基、冷库等方面,其冷却多年冻土、提高地基强度、抗冻胀融沉的作用得到了工程界的普遍认同^[2],但该技术 在隧道结构安全热防护方面尚未得到应用。目前国内已建成的多年冻土区隧道工程,在洞口浅埋段防护方面除加强支护结构外,其余基本都采用与非浅埋段相同的措施,即在初期支护与二次衬砌之间(或二次衬砌表面)设置保温板作为隔热层,依靠调整“热阻”进行“被动”热防护。由于现有的保温材料具有“隔热又隔冷”的特点^[3],在一定条件下,其防护作用利弊共存,同时还存在监测设备安装、维护不方便等问题。利用热棒的“主动”降温特性^[4]对多年冻土区隧道浅埋段进行热防护,可以通过改善围岩的一些热物理特性来提高隧道支护结构的可靠性。另一方面,与传统技术相比,减小了因加强支护而需要的较大开挖断面和混凝土工程量,工程费用较少,设备可靠性好,安装、监测方便。此外,目前多年冻土区隧道主要采用复合衬砌结构,其浅埋段地质条件普遍较差,二次衬砌多为承载结构,需及时施做,而初期支护与二次衬砌隔热保温层的敷设需要占用一定的作业时间,不利于对围岩有害变形的及时控制。而热棒群设置于洞顶地表,实施时间不受隧道施工情况限制。若时间安排合理,能在隧道开工前

提前实施,可以起到强化冻土围岩、减少热融等作用,对隧道开挖施工非常有利。

2 热棒群设置方法

方案设计是多年冻土区隧道浅埋段热棒群防护技术的重点,主要包括收集隧址区气象、地质资料,确定热棒群埋设位置、范围及平面布置形式,计算热棒埋设间距,计算热棒规格参数,确定热棒规格型号及相应数量,确定热棒工作效果监测断面位置等内容。

2.1 资料收集

收集隧址区的气温、风速、地表温度等资料,结合工程地质勘察资料,查明隧道浅埋段围岩的基本热物理参数、多年冻土类型、上限深度、地温年平均变化深度和年平均地温。

2.2 确定热棒群埋设位置、范围及平面布置形式

热棒群布置横断面如图1所示。

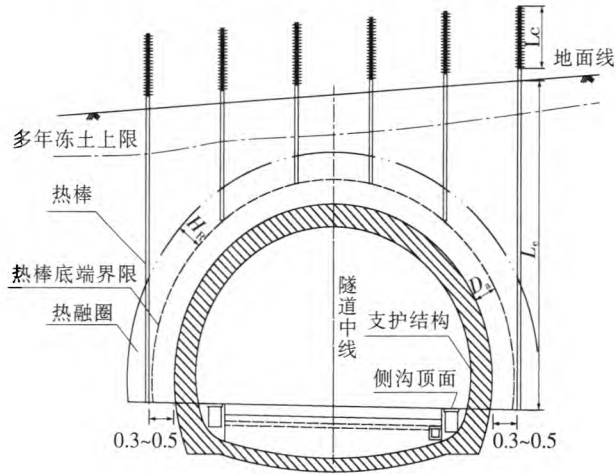


图1 热棒群布置横断面示意图

在隧道浅埋段对应的洞顶地表放出隧道中线,在该中线上按2~5m间距逐点测出地表高程,结合隧道施工图纸中的设计高程(公路隧道一般为中线处路面高程;铁路隧道一般为内轨顶面高程)计算出每个点对应的隧道拱顶外缘的实际埋深(实际埋深=实测出的该点地表高程-隧道设计高程-隧道净高-支护结构层厚度)。沿隧道纵向,热棒群设置的范围从仰坡刷坡线后3~5m开始,至隧道拱顶外缘实际埋深达到下式时终止:实际深度=2×该处多年冻土上限深度+隧道热融圈厚度(如图1中 H_r 所示)。根据前期监测结果,隧道热融圈厚度一般为3~5m,可以实测,也可

根据隧道开挖季节直接选取,暖季开挖时选较大值,寒季开挖时选较小值。

热棒群横向设置范围以最外侧一列热棒的蒸发段棒体与隧道支护结构侧面的距离不大于 0.5~1.0 m 为原则。需特别注意,隧道顶部的热棒蒸发段底端与隧道支护结构之间必须保持 0.5~1.0 m 的安全距离(如图 1 所示 D_a)。

为了使热棒工作时形成的“冻土防渗幕”顶部较为平整,减少因人为上限凹凸不平而给冻结层上水顺坡迁移造成的阻滞,热棒一般采用等边三角形组成的梅花形布置,且该等边三角形的边长等于热棒间距 S ,如图 2 所示。

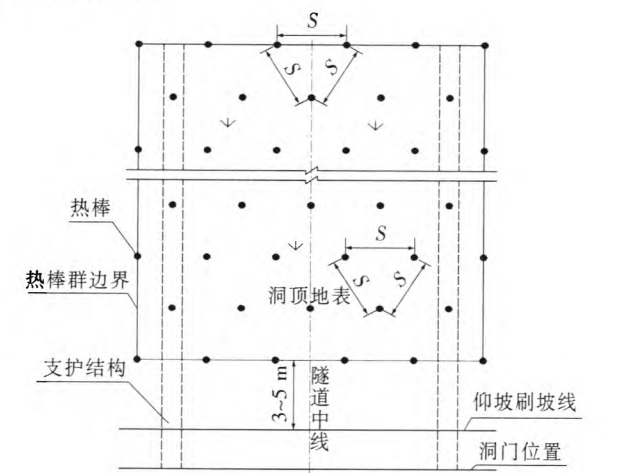


图 2 热棒群平面布置示意图

2.3 确定热棒埋设间距及规格参数

热棒埋设间距可采用傅里叶方程及步骤 1 搜集的数据进行理论计算,相关文献中算例较多。实际工程中宜参照以往经验直接选取,一般取间距 S 在 2~4 m 之间。

采用热工计算公式:

$$q = \frac{T_s - T_a}{R_f + R_s}, R_f = \frac{1}{\alpha A}, R_s = \frac{\ln \frac{2r}{D}}{2\pi\lambda Le}, Q_y = 2qt_r \text{ 以及 } Q_m = LA_0S$$

- 式中 q ——热棒的热通量;
 $T_s、T_a$ ——分别为热棒工作时间内气温平均值和地温平均值;
 $R_s、R_f$ ——蒸发段土体热阻和冷凝段散热热阻;
 α 和 A ——分别为热棒散热器的散热系数和散热面积;
 r ——热棒的计算传热影响半径;
 L_e ——蒸发段长度;
 D ——热棒的直径;
 λ ——热棒影响范围内土体平均导热系数;
 t_r ——热棒连续工作时间;

- L ——围岩土体单位体积的相变潜热;
 A_0 ——隧道横断面上冻土上限新平衡位置与原位置所包围的土体面积与隧道拱、墙部支护结构外 3 m 范围内土体面积之和;
 S ——热棒间距;
 Q_y —— t_r 时间内热棒的总产冷量;
 Q_m ——围岩从原来的热平衡达到新的热平衡时的耗冷量。

工程实际中可不考虑各参数之间的耦合效应,通过数值拟合可得出热棒的产冷量与其直径 D 、散热面积 A 以及蒸发段长度 L_e 的关系式,使用该关系式进行试算,即可得出热棒的理论规格参数,之后根据步骤 2 确定的热棒埋设范围、深度、平面布置形式、埋设间距以及热棒理论规格参数,结合 GB/T 27880—2011 的有关规定,确定热棒的规格型号及相应数量。

目前热棒安装及其工作效果监测技术比较成熟,不再赘述。需要注意的是,热棒群应在暖季末、寒季初进行安装,使其安装后立即进入工作状态,及时消除钻孔作业等给冻土造成的热干扰,避免地表水由安装孔下渗。热棒定位后,应及时用黏沙土拌成的泥浆将热棒与孔壁之间的间隙回填密实。

3 热棒群对围岩的冷却作用

以共玉公路姜路岭隧道浅埋段热棒防护效果监测数据为依据。姜路岭隧道处于青藏高原多年冻土区,其浅埋段共埋设热棒 367 根,间距 3 m,梅花形布置,同时布设了 6 个监测断面及 3 处天然对比监测点,如图 3 所示。热棒埋设完成时间为 2012 年 12 月 20 日。

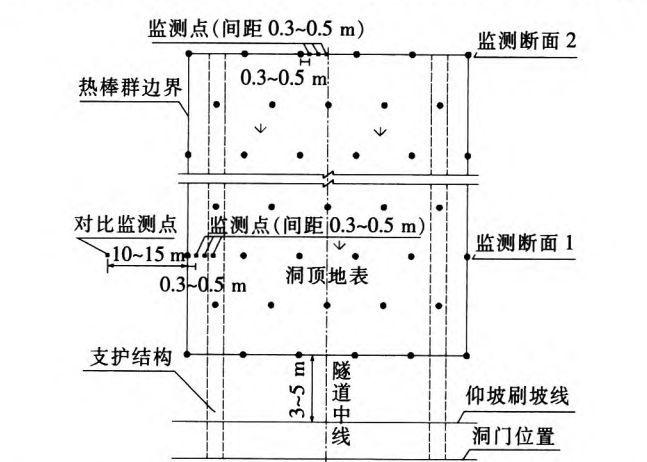


图 3 姜路岭隧道进口右洞热棒群及监测点平面布置示意图

整理隧道进口右洞一处监测点(隧道左侧,测温管深 14 m,底端距支护结构 0.5 m,距相邻热棒均为 1.5 m。该处隧道埋深 5.7 m,热棒蒸发段埋入 8 m)的数据后绘制出该处 2013 年 1 月 18 日~3 月 1 日期间的地温变化曲线,如图 4 所示。表 1 为进口右洞地温

变化曲线部分测温数据统计表。

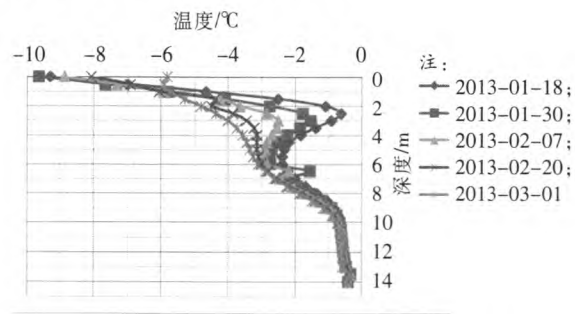


图4 姜路岭隧道进口右洞某监测点地温曲线

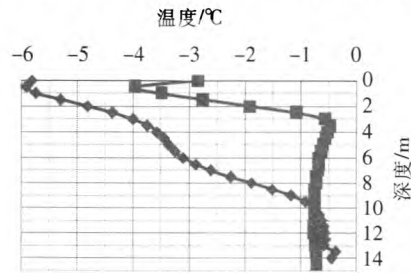
表1 部分测温数据

距地表深度	2 m	4 m	6 m	8 m	10 m
1月18日	-1.10	-1.84	-2.39	-1.35	-0.66
1月30日	-2.77	-2.23	-2.73	-1.56	-0.67
2月7日	-3.65	-2.70	-2.87	-1.68	-0.69
2月20日	-4.49	-3.15	-3.01	-1.80	-0.70
3月1日	-4.82	-3.57	-3.10	-1.88	-0.75

注:表中温度值单位为℃。

从图4及表1可以看出,在距地表0~2 m深度内,地温变化主要受气温影响;在距地表2~8 m深度内,地温变化主要受热棒制冷作用影响,随着时间的推移,其周围土体温度逐渐降低;在距地表8~10 m深度内,受热棒向下散失的冷量影响,地温也呈降低趋势,但降幅不大。

再以该监测点以及最近处对比监测点(离开热棒群10 m,未受热棒制冷作用影响)的数据为例,绘制出2013年3月1日地温曲线,如图5所示。表2为进口右洞某监测点地温变化曲线的部分测温数据统计表。



注:◆ 2013-03-01 监测点, ■ 2013-03-01 对比监测点

图5 进口右洞某监测点与对比监测点地温曲线

表2 部分测温数据

距地表深度	2 m	4 m	6 m	8 m	10 m	12 m	14 m
热棒监测点	-4.82	-3.57	-3.10	-1.88	-0.75	-0.60	-0.57
对比监测点	-1.90	-0.51	-0.67	-0.71	-0.74	-0.75	-0.73
降温幅度	-2.92	-3.06	-2.43	-1.17	-0.01	-	-

注:表中温度值单位为℃。

从图5及表2可以看出,在距地表0~2 m深度

内,受气温及热棒制冷作用双重影响,平均地温降低-2.53℃;在距地表2~8 m深度内,主要受热棒制冷作用影响,平均地温由-0.75℃降低到-3.33℃,降幅为-2.58℃;其中在距地表4 m深度处降温幅度最大,达-3.06℃。可见热棒群工作后主动降温效果非常显著。

4 热棒群工作效果分析

以前述现场监测数据为例,从热融圈回冻时间、温度变化对冻土强度的影响以及隧道结构所受冻胀力的变化三个方面对热棒群工作效果进行分析。

4.1 热融圈回冻时间

该监测点处隧道埋深为5.7 m,测温管底端与隧道支护结构的水平距离仅0.5 m,可以认为埋深在8~14 m之间的测温管处于隧道的热融圈之内(据以往监测结果,支护结构外径向3~5 m范围内为热融圈)。从图5及表2可以看出,热棒底端向下有不小于2 m的传热影响范围。热棒群工作70 d后,监测范围内的热融圈围岩温度处于-1.88℃~-0.57℃之间。该隧进口浅埋段围岩以粉质黏土为主,其起始冻结温度为-0.1℃(西北院格尔木试验室资料),因此可断定该处热融圈围岩呈冻结状态,说明在热棒群的主动冷却及冬季洞内较低气温的共同作用下,监测范围内的热融圈经过1个寒季已完全回冻。据青藏铁路风火山隧道的监测情况,其热融圈的完全回冻经历了4个冻融循环期,可见,热棒群对隧道热融圈的回冻起到了较好的促进作用。传统方法主要通过隧道初期支护与二次衬砌之间(或二次衬砌表面)设置隔热保温层以提高隧道支护结构层的“热阻”,进而减少洞周围岩与洞内环境之间的热交换,对减弱洞周围岩的冻融活动有积极意义。但也存在一些问题,如隔热层在冬季对围岩热融圈的回冻有阻滞作用,减缓了热融圈内围岩冬季时的冻结速度,给水分迁移和冻土组构的形成留下了条件,易在支护结构外侧形成层状、网状结构冻土,产生一定程度的“分凝冻胀”,加剧围岩的冻胀程度。热棒群主动防护技术通过加快热融圈的回冻速率,可有效解决上述问题,减少其对隧道支护结构的危害。

4.2 冻土强度

冻土的温度是影响其力学性质最主要的因素,一般而言,冻土的强度是负温度的函数,即温度越低,强度越大。据试验资料(青藏铁路风火山地区试验资料),当温度从-1℃降到-2℃时,冻结黏土的单轴压缩极限强度增长近50%。根据共玉公路姜路岭隧道的监测数据,热棒群工作70 d后地表以下2~10 m

范围内的平均地温从 $-0.91\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到了 $-2.82\text{ }^{\circ}\text{C}$, 降幅达 $1.92\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可见热棒群影响范围内围岩的强度有了大幅度地提高, 相当于在洞顶一定范围内形成了“冻土抵抗层”及“冻土防渗帷幕”, 即能有效减少寒季初冻结层上水的冻结压力给隧道防排水措施及支护结构造成的威胁, 又可减少冻结层上水向隧道结构方向的渗入, 解决防排水系统易失效、支护结构出现冻融破坏等问题。

4.3 冻胀力方向

通常情况下, 冻土隧道拱墙部支护结构所受的冻胀力主要为法向冻胀力, 方向垂直于隧道支护结构, 如图6所示。

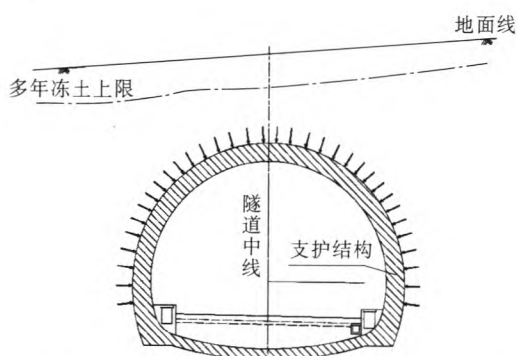


图6 无热棒群时隧道拱墙部支护结构所受冻胀力示意图

热棒群工作时, 热棒的径向冷冻作用使隧道部分支护结构所受冻胀力的方向发生了改变, 如图7所示, 在起拱线以上部位, 冻胀力的方向趋于水平, 减小了支护结构所受的形变压力, 改善了隧道支护结构的受力条件。可以看出, 当热棒蒸发段沿支护结构法向布置时此方面的防护效果最佳。

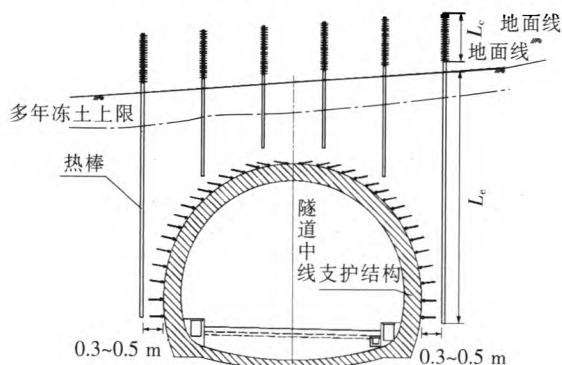


图7 设置热棒群后隧道拱墙部支护结构所受冻胀力示意图

5 结论

通过对采用热棒群对多年冻土区隧道浅埋段进行主动热防护技术的阐述与分析, 可以得出以下结论。

(1) 相对于传统的隔热保温方法, 热棒群主动防护技术可以显著缩短隧道浅埋段围岩热融圈的回冻时

间, 有效减少“分凝冻胀”对隧道支护结构的危害。

(2) 热棒群防护技术可显著降低冻土围岩温度, 提高围岩强度, 并在洞顶形成“冻土防渗帷幕”, 有利于结构安全。

(3) 热棒群设置后可减小隧道部分支护结构所受的法向冻胀力, 且当热棒蒸发端沿支护结构法向布置时效果最佳。

(4) 热棒群防护技术的实施不影响洞内施工作业, 相对于隔热保温技术工程费用较少, 设备可靠性好, 安装、监测方便。若能在隧道开工前实施, 可以起到强化冻土围岩、减小热融范围等作用, 对隧道施工非常有利。

参考文献:

- [1] 秦大河. 中国西部环境演变评估[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Qin Dahe. Assessment of Environmental Evolution in Western China[M]. Beijing: Science Press, 2002: 20-22.
- [2] 丁靖康, 等. 多年冻土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
Ding Jingkang. Permafrost and Railway Engineering[M]. Beijing: China Railway Press, 2011: 9-10.
- [3] 徐敦祖, 等. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Xu Xiaozu. Physics of Frozen Soils[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [4] 丁靖康. 冻土地区热桩技术的应用[R]. 兰州: 中铁西北科学研究院, 1990.
Ding Jingkang. Application of Permafrost Thermal Pile Technology[R]. Northwest Research Institute Co. LTD of C. R. E. C., 1990.
- [5] 庄骏, 等. 热棒技术及其工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
Zhuang Jun, etc. Heat Pipe Technology and Its Application in Engineering[M]. Chemical Industry Press, 2000.
- [6] 陈肖柏, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Chen Xiaobo, etc. The Role of Soil Freezing and Foundation[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [7] 徐兵魁, 熊治文. 青藏高原多年冻土区热棒路基的设计计算[J]. 中国铁道科学, 2006(5): 89-92.
Xu Bingkui, Xiong Zhiwen. Permafrost Regions Hot Rod Embankment Design Calculations[J]. China Railway Science, 2006(5): 89-92.
- [8] 牛东兴, 李勇, 熊治文, 等. 青藏铁路多年冻土区热棒路基地温场分析[J]. 铁道工程学报, 2012(9): 30-33.
Niu Dongxing, Li Yong, Xiong Zhiwen, etc. Tibet Railway Permafrost Ground Temperature Hot Rod Field Analysis[J]. Journal of Railway Engineering, 2012(9): 30-33.

热棒群在多年冻土区隧道浅埋段防护中的应用

作者: 刘锟, 蔡汉成, 李奋, LIU Kun, CAI Han-cheng, LI Fen
作者单位: 中铁西北科学研究院有限公司, 兰州, 730000
刊名: 铁道工程学报 
英文刊名: Journal of Railway Engineering Society
年, 卷(期): 2013 (9)

参考文献(8条)

1. 秦大河 中国西部环境演变评估 2002
2. 丁靖康 多年冻土与铁路工程 2011
3. 徐敦祖 冻土物理学 2010
4. 丁靖康 冻土地区热桩技术的应用 1990
5. 庄骏 热棒技术及其工程应用 2000
6. 陈肖柏 土的冻结作用与地基 2006
7. 徐兵魁;熊治文 青藏高原多年冻土区热棒路基的设计计算[期刊论文]-中国铁道科学 2006(05)
8. 牛东兴;李勇;熊治文 青藏铁路多年冻土区热棒路基地温场分析[期刊论文]-铁道工程学报 2012(09)

引用本文格式: 刘锟. 蔡汉成. 李奋. LIU Kun. CAI Han-cheng. LI Fen 热棒群在多年冻土区隧道浅埋段防护中的应用[期刊论文]-铁道工程学报 2013(9)