

# 加装采风口增强通风管路堤的降温效果

杨丽君, 孙斌祥, 杨秋伟, 刘琦, 徐学祖

(绍兴文理学院 土木工程系, 浙江 绍兴 312000)

**摘要:**针对青藏高原多年冻土区通风管路堤,研究了加装采风口对通风管路堤降温效果的增强作用。基于路堤通风管的进风量,具体分析了加装采风口增强通风管路堤降温效果的影响因素。分析表明,加装采风口后通风管路堤的冬季降温效果显著增强;当采风口安装在竖向通风管顶端时,通风管路堤冬季降温效果随着竖向通风管高度的增加而增加。对流换热是通风管路堤通过通风管与外界空气发生热交换的重要形式,从通风管对流换热的角度考虑,采风口安装高度越高越好,但由于车辆运行会扰动路堤两侧附近的风场,采风口的安装高度最高应不超过路堤高度。

**关键词:**路堤;通风管;采风口;降温效果;对流换热

**中图分类号:**U213.1; TU445 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)01-0087-06

## Cooling Capability of Duct-ventilated Highway Embankment Enhanced by Self-windward Vent

YANG Li-jun, SUN Bin-xiang, YANG Qiu-wei, LIU Qi, XU Xue-zu

(Department of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, Zhejiang, P. R. China)

**Abstract:** For the duct-ventilated highway embankments in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, the cooling capability of duct-ventilated embankment enhanced by a self-windward vent is focused. Based on the intake-air volume in the ventilation pipe, the factors influencing the cooling capability in duct-ventilated embankment enhanced by a self-windward vent are analyzed. The analysis results indicate that the enhancement of the cooling capability in the duct-ventilated embankment with a self-windward vent is significant during winter months. For the self-windward vent equipped on the top of the vertical pipe, the cooling capability during winter months in the embankment increases with the increase of vertical pipe height. Convective heat transfer is a dominant mode of heat exchange between the ventilation pipe wall and the ambient air in the duct-ventilated embankment. From a convective heat transfer point of view, the height of self-windward vent installed ought to be as high as possible. However, due to disturbance of the wind field near both sides of the duct-ventilated highway embankment caused by the running vehicles, the height of self-windward vent shouldn't exceed the embankment height.

**Key words:** embankment; ventilation pipe; self-windward vent; cooling capability; convective heat transfer

多年冻土的冻融变形、稳定性及处理技术是国家“西部大开发战略”实施过程中急需解决的主要工程地质问题<sup>[1-3]</sup>。随着青藏铁路的建成并通车,其安全营运及维护成为一个十分重要的问题,同时,青藏

公路高速化计划也被提到了议事日程,因此,有必要从综合的角度来研究各种地温调控技术对多年冻土的保护机理及其影响因素,研究出适合青藏高原特点且更为有效的地温调控新技术<sup>[1-14]</sup>。

收稿日期:2010-06-06

基金项目:国家自然科学基金项目(40772194,40972203)

作者简介:杨丽君(1972-),女,副教授,主要从事岩土工程研究及教学,(E-mail)yanglj@usx.edu.cn.

块(碎)石路堤的自然对流降温效果很大程度上取决于块(碎)石的粒径大小<sup>[9-11]</sup>,试验路堤温度场变化的实际监测发现粒径较小的碎石路堤自然对流降温效果不明显<sup>[3-4]</sup>,而通风管路堤是一种较为有效的地温调控技术<sup>[5-8,12-21]</sup>,其降温效果主要由通风管冬季通风能力决定<sup>[16-18]</sup>,风速的大小直接影响到通风管内空气与路堤的对流换热,从而影响到路堤内部以及路堤底下多年冻土的温度分布。由于冬季风速大,通过通风管的对流换热效率也较高,且气温较低,有利于路堤的冷却和保持路堤的稳定<sup>[16-17,22]</sup>。对于传统通风管路堤,为了在通风管内有较大的气流速度,通风管在路堤中的埋深位置要求离地表面有一定的高度<sup>[6]</sup>,这一定程度上限制了通风管对路堤下土层的降温,另外,由于路堤走向的变化,风向将影响进入通风管的风量,从而影响了传统通风管路堤的降温效果。由于青藏公路高速化改造中对冻土路堤的稳定性提出了更高要求,迫切需要研究能够增强路堤降温效果的综合地温调控技术,为此,论文提出在通风管口加装竖向通风管及自然迎风采风口的采风口通风管路堤,不管路堤走向采风口始终朝向风向,其能最大限度采集冷空气进入通风管,提高通风管与路堤之间的对流换热效率,以达到增强冻土路基的降温效果。这种综合地温调控技术将更有利于冻土路堤的稳定,相关研究目前还很缺少,其降温效果与进风量的关系、夏季的影响等问题都需要进行开拓性的研究。根据通风管进风量的定义,分析了传统通风管路堤和加装采风口通风管路堤进风量的变化,并对青藏高原多年冻土区加装采风口通风管路堤降温效果的增强作用及影响因素进行了具体研究,为加装采风口通风管路堤在青藏公路高速化改造中的实际应用提供理论基础。

## 1 通风管进风量的计算

### 1.1 通风管进风量定义

图1所示为通风管路堤的通风管布置,进风口

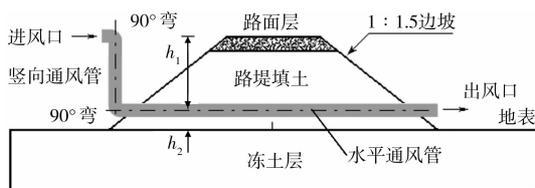


图1 采风口通风管路堤

加装自然迎风的采风口,出风口可加装自动温控门。为了增强冻土路堤的降温效果,采风口采集冷空气进入到通风管的进风量要尽可能大,以增强通风管

与路堤之间的对流换热效率。

为研究通风管不同进风方式的进风量大小,其进风量可按式计算<sup>[23]</sup>

$$L = 3\ 600\ F u \quad (1)$$

式中: $L$ 是通风管的进风量, $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $F$ 是通风管进风口的有效面积, $\text{m}^2$ ;  $u$ 是进风口的平均风速, $\text{m}/\text{s}$ 。

在路堤走向确定以后,风速、风向是影响通风管进风量的主要因素。从青藏高原实际的风速风向观察资料分析,冬季和夏季期间的风向总体上互为相反,且冬节风速明显大于夏季风速。因此,采风口应装在冬季迎风的路堤一侧,否则会产生倒灌现象,即出风口迎风向时由于采风口会自动迎风而造成出风口和采风口同时进风的现象。由于采风口安装在路堤的迎风一侧,当夏季风向转向出风口时这种倒灌现象将减少通风管的夏季通风,减轻通风管夏季增温效应,当然最好通过自动温控门控制通风管夏季通风<sup>[16-18]</sup>。

### 1.2 传统通风管进风量

对于传统通风管路堤,当风向与通风管轴线同向时,通风管进风口的有效面积即为其横截面积,当风向与通风管轴线斜交时,可先将风速分解为平行于通风管轴线方向的分量和垂直于管轴线方向的分量,如图2所示,设通风管管口风速为 $u$ ,与通风管轴线的夹角为 $\varphi$ ,则沿通风管方向的风速分量 $u'$ 为

$$u' = u \cos \varphi \quad (2)$$

利用式(1),通风管的进风量计算式为

$$L = 3\ 600\ F_0 u \cos \varphi \quad (3)$$

式中 $F_0$ 为通风管横截面,也可以认为通风管进风口的有效面积等于通风管横截面积在风速方向的投影面积,即

$$F = F_0 \cos \varphi \quad (4)$$

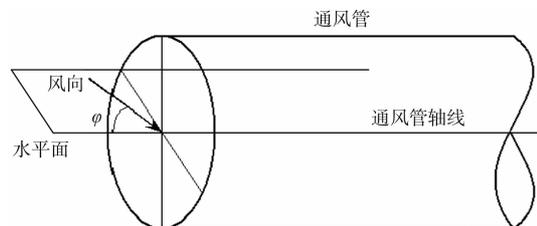


图2 风速与通风管进风口有效面积的关系

因此,在风速一定时,路堤通风管进风口横截面积在风速方向的投影面积越大通风管进风量也将越大,其冬季进风也将更有利于路堤的降温。

根据青藏公路典型路段的气象观察资料,距地面10.85 m处的风速年变化规律为<sup>[7]</sup>

$$u_{y/10} = 4.05 + 1.95 \sin\left(\frac{2\pi}{8\ 760} t + \frac{3\pi}{2}\right) \quad (5)$$

由上式可知,除去平均风速,一年中沿路堤横断面的风向变化刚好转过一周。假设风向从夏季开始刚好与出风口一侧通风管轴线重合,则有

$$\cos \varphi = \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t + \frac{3\pi}{2}\right) \quad (6)$$

对于只有水平通风管的传统通风管路堤,设水平通风管轴线距天然地表的高度  $h_2$ ,则通风管进风口附近风速  $u_{y/h_2}$  的计算公式为<sup>[7-9,18]</sup>

$$u_{y/h_2} = u_{y/10} \left(\frac{h_2}{10.85}\right)^{0.12} \quad (7)$$

根据文献[18]分析,考虑路堤左右侧风压差、通风管局部阻力损失及沿程阻力损失的影响,管外风速换算成管内风速要乘以一个阻力系数  $\xi_1$ <sup>[18]</sup>

$$\xi_1 = \left[ \frac{K_1 - K_2}{1 + \xi_i + \lambda_h \frac{l}{d} + \xi_o} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中, $K_1$ 、 $K_2$  为通风管进风口和出风口外侧的空气动力系数, $\xi_i$  为通风管进风口局部阻力损失系数, $\xi_o$  为出风口局部阻力损失系数, $\lambda_h$  为水平通风管沿程摩阻系数, $l$  为水平通风管长度, $d$  为通风管直径。

利用式(1)、(4)及(5)–(8),传统通风管路堤进风口的进风量  $L_1$  可表示为

$$L_1 = 3600\xi_1 F_0 \left(\frac{h_2}{10.85}\right)^{0.12} \left[ 4.05 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t + \frac{3\pi}{2}\right) + 1.95 \sin^2\left(\frac{2\pi}{8760}t + \frac{3\pi}{2}\right) \right] \quad (9)$$

从冬季降温效应的角度考虑,可对通风管进风量只计算一年中冬季半周期的平均进风量(夏季通风管温控门自动关闭),则对上式冬季半周期求平均值,得

$$\bar{L}_1 = 12792\xi_1 F_0 \left(\frac{h_2}{10.85}\right)^{0.12} \quad (10)$$

式中, $\bar{L}_1$  是传统通风管路堤在冬季半个周期内的平均进风量。

### 1.3 采风口通风管的进风量

设采风口中心线与水平通风管轴线垂直距离为  $h_1$ 、水平通风管轴线与天然地表垂直距离为  $h_2$ ,则采风口附近空气的速度  $u_{y/h_1}$  可表示为<sup>[7-9,18]</sup>

$$u_{y/h_1} = u_{y/10} \left(\frac{h_1 + h_2}{10.85}\right)^{0.12} \quad (11)$$

根据文献[18]分析,考虑进出风口风压差、通风管局部阻力损失及沿程阻力损失的影响,采风口外风速换算成管内风速要乘以一个阻力系数  $\xi_2$ <sup>[18]</sup>

$$\xi_2 = \left[ \frac{K_1 - K_2 \frac{h_2^{0.12}}{(h_1 + h_2)^{0.12}}}{1 + \xi_i + 2\xi_e + \lambda_v \frac{h_1}{d} + \lambda_h \frac{l}{d} + \xi_o} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

式中, $K_1$ 、 $K_2$  为采风口进风口外侧和出风口外侧的空气动力系数, $\xi_i$  为采风口进风口局部阻力损失系数, $\xi_e$  为采风口  $90^\circ$  弯的局部阻力损失系数, $\lambda_v$  为竖直通风管沿程摩阻系数,其它参数同前。

对于采风口通风管路堤,由于采风口能自动转向迎风方向,在冬季气温负半周内风速方向始终能与采风口轴线重合,则通风管的有效进风面积为

$$F = F_0 \quad (13)$$

利用式(1)、(5)及(11)–(13),采风口通风管路堤进风口的进风量  $L_2$  可表示为

$$L_2 = 3600\xi_2 F_0 \left(\frac{h_1 + h_2}{10.85}\right)^{0.12} \times \left[ 4.05 + 1.95 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t + \frac{3\pi}{2}\right) \right] \quad (14)$$

同样,从冬季降温效应的角度考虑,可对采风口通风管进风量只计算一年中冬季半周期的平均进风量(夏季通风管温控门自动关闭而不通风),则有

$$\bar{L}_2 = 19049\xi_2 F_0 \left(\frac{h_1 + h_2}{10.85}\right)^{0.12} \quad (15)$$

式中, $\bar{L}_2$  是采风口通风管路堤在冬季半周期内的平均进风量。

### 1.4 采风口对通风管进风量的增强作用

总体上,通风管进风量随风速周期变化,为比较采风口通风管路堤与传统通风管路堤的具体进风能力,假设路堤水平通风管为混凝土管,距离天然地表为 0.50 m,管壁不开孔,通风管内径为 0.40 m,路面宽为 10 m,路堤高度为 3.5 m,则  $h_2 = 0.76$  m,水平通风管长度为 18.50 m,管道沿程摩阻系数和局部阻力损失系数按平均速度 3.0 m/s 取值<sup>[18]</sup>。

图 3 所示为采风口通风管路堤进风量和传统通

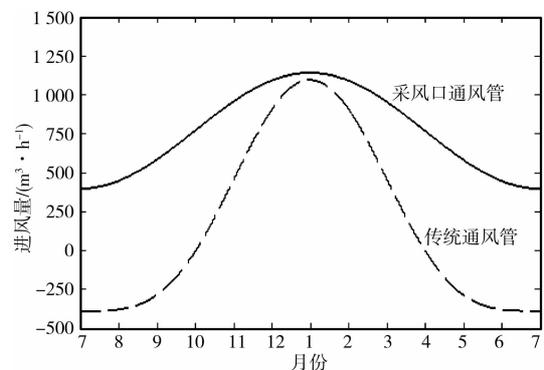


图 3 进风量随时间的变化

风管路堤进风量在年周期中随时间的变化曲线,其中,取  $h_1 = 0$ 。在 1 月份为最大,采风口通风管路堤进风量为 1146 m<sup>3</sup>/h,略高于传统通风管路堤进风量 1100 m<sup>3</sup>/h,在冬季期间通风管进风量明显比夏

季要大,整个冬季期间,在通风管加装采风口后路堤进风量能显著增加,会有更多的低温空气进入通风管,这有利于冬季路堤的冷却。另外,采风口通风管路能够适应风向的变化,采风口始终保持迎风方向,而传统通风管路进风容易受到风向变化的干扰。

图4所示为采风口通风管平均进风量与传统通风管平均进风量比值 $\bar{L}_2/\bar{L}_1$ 随采风口高度 $h_1$ 的变化曲线。在传统通风管管口加装采风口后,路堤冬季平均进风量是无采风口传统通风管路冬季平均进风量的1.552倍。当采风口装在竖向通风管顶端时,通风管平均进风量将随着竖向通风管高度的增加而增加,两者成近似线性关系。当加装采风口的竖向通风管高度为1.08 m时,采风口通风管路平均进风量约为传统通风管路平均进风量的2倍。

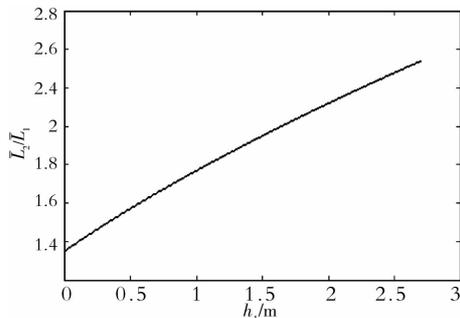


图4  $\bar{L}_2/\bar{L}_1$  随采风口高度  $h_1$  的变化

对通风管系统具体进风量的计算,可以为青藏高原多年冻土区通风管路设计提供理论依据,便于比较不同通风管系统的降温效果。

## 2 采风口对路堤降温效果的增强

### 2.1 管壁与空气之间的对流换热

对流换算是多年冻土区通风管路通过通风管与外界空气发生热交换的重要形式,对流换热量的大小直接影响通风管路的降温效果。在冬季,通风管路由于管壁与低温空气发生对流换热而冷却路堤及其下面土体<sup>[5-8,11-22]</sup>,通风管增强了路堤及其土体的降温能力,因此,冬季通风有利于抵消路堤下土体的多余蓄热。对于通风管内壁的对流换热,属于第三类边界条件,有<sup>[23]</sup>

$$-\lambda_0 \frac{\partial \theta}{\partial n} = \alpha(\theta - \theta_{a1}) \quad (16)$$

式中, $\alpha$ 是通风管管壁与空气之间的对流换热系数, $\lambda_0$ 是通风管管壁的有效导热系数, $n$ 是管壁边界的外法线方向, $\theta_{a1}$ 是通风管内的空气温度。

对于青藏高原多年冻土区路基,通风管一般采

用混凝土圆管<sup>[6,14]</sup>,且通风管内空气流动速度一般小于5 m/s,其对流换热系数采用如下公式计算<sup>[23]</sup>

$$\alpha = 5.99 + 5.46u_{y0} \quad (17)$$

式中, $u_{y0}$ 是通风管轴线方向的空气流动速度。

### 2.2 采风口对通风管路降温效果的增强作用

根据进风量定义,可由进风量计算公式(9)和(14)求出传统通风管路和加装采风口通风管路中通风管的空气流动速度。据此,代入(17)可具体分析加装采风口对通风管路冬季对流换热降温效果的影响。为便于直观分析加装采风口对通风管路降温效果的增强作用,图5给出了传统通风管路和加装采风口通风管路对流换热的变化曲线,计算时路堤相关数据同前节。计算表明,加装采风口对通风管路由冬季对流换热引起的降温效果起到了增强作用,尤其是采风口装在竖向通风管上端时这种降温效果的增强作用更为明显。在1月份,传统通风管路的对流换热系数为 $19.26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,而加装采风口时能达到 $19.82 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,在整个冬季期间,传统通风管路对流换热系数在 $5.99 \sim 19.26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 之间变化,而加装采风口时在 $15.32 \sim 19.82 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 之间变化,能保持相对恒定的对流换热降温效果。当采风口加装在2.0 m竖向通风管上端时,冬季期间的对流换热降温效果能达到 $19.96 \sim 26.68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 之间。从单纯对流换热角度看,暖季期间加装采风口会明显加大通风管对路堤的增温效应,对流换热系数达到了 $10.83 \sim 19.96 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 之间,为了消除这一增温现象需要采用自动温控技术以确保通风管路只在冬季期间通风降温<sup>[16-18]</sup>。

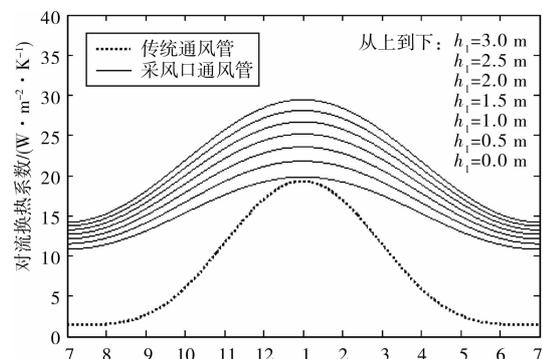


图5 通风管采风口高度对对流换热系数的影响

单纯从通风管对流换热的角度考虑,采风口安装高度越高越好,但由于路堤车辆的运行,将会扰动路堤两侧附近的风场,使风向改变。如果采风口安装较高的话会经常性地改变采风口的迎风方向,这相当程度地影响采风口的采风效率。为避免这种不

利于采风口进风的现象发生,采风口的安装高度最高应不超过路堤高度。

室内试验研究表明<sup>[13]</sup>,通风管进风口加装自然迎风的采风口有利于冻土路堤冬季降温。数值计算和实验研究有利于确定通风管路堤传热特性及通风管内空气的流动规律,但这比较费时费钱,不适合通风管路堤多工况的对比分析,而利用本文计算方法可快速比较各种路堤通风管系统的降温能力,便于工程应用。加装采风口通风管路堤与传统通风管路堤相比主要增加了采风口结构,而采风口可以用不锈钢片及PVC管等材料制成,其结构比较简单,总体费用在批量生产条件下不会太贵,因此,加装采风口通风管路堤费用也不会增加很多。

### 3 结语

1)针对青藏高原冻土区通风管路堤,论文对加装采风口对通风管路堤降温效果的增强作用进行了探索性研究。

2)对流换热是多年冻土区通风管路堤通过通风管与外界空气发生热交换的重要形式,对流换热量的大小将直接影响通风管路堤的降温效果。基于路堤通风管进风量,具体分析了加装采风口通风管路堤对冬季对流换热降温效果的增强作用。当采风口安装在竖向通风管顶端时,这种降温效果的增强作用随竖向通风管高度增加而增加。从单纯对流换热角度看,暖季期间加装采风口也会加大通风管对路堤的增温效应,为此需要采用自动温控技术以确保通风管路堤只在冬季期间通风降温。

3)从通风管对流换热的角度考虑,采风口安装高度越高越好,但由于车辆的运行将扰动路堤两侧附近的风场,使风向改变。为避免这种不利于采风口进风的现象发生,采风口的安装高度最高应不超过路堤高度。

#### 参考文献:

- [1] CHENG G D, SUN Z Z, NIU F J. Application of the roadbed cooling approach in Qinghai-Tibet Railway engineering[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(3): 241-258.
- [2] CHENG G D, LAI Y M, SUN Z Z, et al. The 'thermal semi-conductor' effect of crushed rocks[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2007, 18(2): 151-160.
- [3] MA W, SHI C H, WU Q B, et al. Monitoring study on technology of the cooling roadbed in permafrost region of Qinghai-Tibet plateau [J]. Cold Regions Science Technology, 2006, 44(1):1-11.
- [4] WU Q B, LU Z J, ZHANG T J, et al. Analysis of cooling effect of crushed rock-based embankment of the Qinghai-Xizang Railway [J]. Cold Regions Science Technology, 2008, 53(3):271-282.
- [5] LAI Y M, WANG Q S, NIU F J, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions[J]. Cold Regions Science Technology, 2004, 38(2/3):165-184.
- [6] NIU F J, LIU X F, MA W, et al. Monitoring study on the boundary thermal conditions of duct-ventilated embankment in permafrost regions [J]. Cold Regions Science Technology, 2008, 53(3):305-316.
- [7] ZHANG M Y, LAI Y M, NIU F J, et al. A numerical model of the coupled heat transfer for duct-ventilated embankment under wind action in cold regions and its application [J]. Cold Regions Science Technology, 2006, 45(2):103-113.
- [8] ZHANG M Y, LAI Y M, DONG Y H, et al. Laboratory investigation on cooling effect of duct-ventilated embankment with a chimney in permafrost regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 54(2): 115-119.
- [9] LI G Y, LI N, KANG J M. Preliminary study on cooling effect mechanisms of Qinghai-Tibet railway embankment with open crushed-stone side slope in permafrost regions [J]. Cold Regions Science Technology, 2006, 45(2):193-201.
- [10] SUN B X, YANG L J, XU X Z. Onset and evaluation on winter-time natural convection cooling effectiveness of crushed-rock highway embankment [J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(3): 218-231.
- [11] SUN B X, YANG L J, LIU Q I, et al. Numerical analysis for critical thickness of crushed rock revetment layer on Qinghai-Tibet railway [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 57(2/3):131-138.
- [12] 蒋武军,葛修润. 双能量方程在通风路基多孔介质中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1170-1176.  
JIANG WU-JUN, GE XIU-RUN. Application of double-energy equation to porous media of ventilated embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6):1170-1176.
- [13] 刘琦,孙斌祥,杨丽君,等. 透壁通风管路堤的降温特性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8):1152-1157.  
LIU Q I, SUN BIN-XIANG, YANG LI-JUN, et al. Cooling effect of embankment with perforated

- ventilation pipe[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8):1152-1157.
- [14] 胡明鉴,汪稔,葛修润,等.透壁通风管对青藏铁路路基的冷却效果试验初探[J].岩石力学与工程学报,2004,23(24):4195-4199.  
HU MING-JIAN, WANG REN, GE XOI-RUN, et al. An experimental study on cooling effect of the perforated ventilation pipes on Qinghai-Tibet railway roadbed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24):4195-4199.
- [15] 徐学燕,苏万鑫,徐春华.控制冻土融化容许值的建筑物通风管基础计算方法[J].土木工程学报,2006,39(9):98-102.  
XU XUE-YAN, SU WAN-XIN, XU CHUN-HUA. An approach for computing the ventilated foundation of buildings based on controllli the permissible value of permafrost thawing [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9):98-102.
- [16] YU Q H, SHI C H, NIU F J, et al. Analysis of temperature controlled ventilated embankment[J]. Cold Regions Science Technology, 2005, 42(1):17-24.
- [17] LI G Y, LI N, QUAN X J. The temperature features for different ventilated-duct embankments with adjustable shutters in the Qinghai-Tibet railway[J]. Cold Regions Science Technology, 2006, 44(1):99-110.
- [18] 杨丽君,孙斌祥,王伟,等.寒区路堤通风管的自然通风能力研究[J].中国公路学报,2008,21(4):25-29.  
YANG LI-JUN, SUN BIN-XIANG, WANG WEI, et al. Natural ventilation characteristics of ventilation pipe in ventilated embankment in permafrost regions [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4):25-29.
- [19] 刘奉喜,刘建坤,郭大华,等.多年冻土地区热管冷却路基数值分析[J].土木工程学报,2004,37(9):41-47.  
LIU FENG-XI, LIU JIAN-KUN, GUO DA-HUA, et al. Numerical analysis of thermosyphon in protecting the roadbed in permafrost[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(9):41-47.
- [20] 许健,牛富俊,牛永红,等.季节冻土区保温路基设计参数[J].土木建筑与环境工程,2009,31(3):83-89.  
XU JIAN, NIU FU-JUN, NIU YONG-HONG, et al. The design parameters of roadbed with insulation in seasonal frozen ground [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(3):83-89.
- [21] 黄明奎,汪稔.多年冻土区粒径改良路基稳定性分析[J].重庆建筑大学学报,2008,30(4):96-98.  
HUANG MING-KUI, WANG REN. Stability of particle-size improved roadbed in permafrost [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(4):96-98.
- [22] 陈继,盛煜,程国栋.从地表能量平衡各分量特点论青藏高原多年冻土工程中的冻土保护措施[J].冰川冻土,2006,28(2):223-228.  
CHEN J I, SHENG Y U, CHENG GUO-DONG. Discussion on protection measures of permafrost under the action of engineering from the point of earth surface energy balance equation in Qinghai-Tibetan plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2):223-228.
- [23] 刘文燕,黄鼎业,华毅生.混凝土表面对流换热系数测试验究[J].建筑材料学报,2004,7(2):232-235.  
LIU WEN-YAN, HUANG DING-YE, HUA YI-JIE. Probe into test method of heat convection coefficient of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(2):232-235.

(编辑 王秀玲)