

文章编号: 1000-7598 (2011) 06-1813-06

透壁通风管路堤土体蒸发降温的试验研究

章金钊¹, 孙斌祥², 刘琦^{1,2}, 杨丽君^{1,2}, 汪双杰¹

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 多年冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 西安 710075;

2. 绍兴文理学院 土木工程系, 浙江 绍兴 312000)

摘 要: 以多年冻土区透壁通风管路堤为研究对象, 进行了路堤蒸发降温效果的室内试验, 分析了土体水分蒸发对路堤降温效果的影响机制。分析结果表明, 路堤通风期间的水分主要通过裸露在管壁小孔的土体表面直接蒸发, 其有利于降低路堤温度。暖季空气与管壁的对流换热效应可使路堤土体增温, 同时, 通过管壁小孔的水分蒸发散热将对路堤产生降温效应, 由于融土的未冻水含量较大, 使得通过管壁小孔的水分蒸发散热降温作用也较大, 这使透壁通风管路堤总体显现出降温效果。

关 键 词: 冻土路堤; 透壁通风管; 蒸发散热; 降温效果

中图分类号: U213.1; TU445

文献标识码: A

Laboratory investigation on water evaporative cooling effect in embankment with perforated ventilation pipe

ZHANG Jin-zhao¹, SUN Bin-xiang², LIU Qi^{1,2}, YANG Li-jun^{1,2}, WANG Shuang-jie¹

(1. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology for Permafrost Regions of Ministry of Communications, CCCC First Highway

Consultants Co., Ltd, Xi'an 710075, China; 2. Department of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China)

Abstract: For the duct-ventilated embankment with a perforated ventilation pipe in permafrost regions, the laboratory experiment on the moisture evaporative cooling effectiveness was performed. The mechanism of moisture evaporation affecting on the cooling effect of duct-ventilated embankment was analyzed. It is shown that during the ventilating period water content in the embankment soil is directly evaporated from the soil surface bared in the small holes of the perforated pipe wall, thus to cool down the embankment soil. During warm time, convective heat transfer between the ambient air and the pipe wall may raise the embankment soil temperature, whereas evaporation heat removal from the small holes of the pipe wall can cool down the embankment. During warm time, the water evaporative cooling capability from the small holes of the pipe wall is stronger due to big unfrozen water content in the unfrozen soil, thus, as a whole, revealing the cooling effect in the perforated ventilation pipe embankment.

Key words: permafrost embankment; perforated ventilation pipe; evaporation heat removal; cooling effect

1 前 言

针对全球气候变暖及工程活动对多年冻土的影响, 青藏铁路建设和高速公路建设工程都需要采用“冷却地基”的地温调控新技术^[1-2], 其中, 利用对流降温效应的块(碎)石路堤^[1-5]、块(碎)石护坡路堤^[3-7]和通风管路堤^[1, 8-24]以降温效果好、造价、运营及维护成本较低而广受工程技术人员的青睐。在青藏高原高海拔多年冻土地区, 其年平均气压低、空气稀薄^[2, 25-26], 因此, 块(碎)石路堤及其护坡

路堤中由空气密度不均匀引起的冬季自然对流降温效应将会减弱很多^[3-5], 并且路堤全部采用块(碎)石填筑也会由于取料困难而增加工程造价。气象观察资料显示, 青藏铁路、公路所经多年冻土区的风速很大, 冷季风速明显要比暖季风速大^[25-26], 如何充分利用冷空气来降低路基土体温度还有很大潜力可控^[19]。目前冻土区通风管路基降温效果的理论分析^[8-11]、室内试验研究^[16-18]和现场试验^[12-15]已有许多可供工程应用的成果, 综合多种降温机制的强化通风路基降温效应的技术措施研究也越来越得到重

收稿日期: 2009-08-27

基金项目: 中交多年冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室基金项目资助 (No. HSKF2007-03, No. HSKF2007-05); 国家自然科学基金项目资助 (No. 40772194)。

第一作者简介: 章金钊, 男, 1959 年生, 博士, 教授级高工, 主要从事多年冻土区公路设计方法和施工技术研究。

通讯作者: 孙斌祥, 男, 1963 年生, 教授, 主要从事寒区工程路基稳定性及结构疲劳损伤检测等研究。E-mail: sbinxiang@263.net

视^[15-22]。

通风管壁与空气之间的对流换热是通风管路堤与外界空气发生热交换的主要形式,与冷空气的对流换热能降低路基及其土体温度,而管壁与暖空气对流换热将使路堤增温,可以在通风管口加装自动温控门来控制路堤由于暖季通风而产生的增温效应^[23-24]。在通风管口加装自动迎风的采风口能增强通风管冷空气的通风量,从而能增强通风管路堤的降温效果^[19],另外,室内外试验研究表明,透壁通风管路堤比不透壁通风管路堤有更强的降温效果^[15, 17-18],首先,与不透壁通风管路堤相同,管内冷空气与管壁发生对流换热而使路堤及下面土体产生降温效应^[8-10],然后,通风管周围土体通过透壁小孔发生水分蒸发而产生蒸发散热降温效应^[17-18]。本次对透壁通风管路堤土体的蒸发降温进行了室内试验研究,分析了土体水分蒸发对透壁通风管路堤降温效果的影响机制。

2 试验方法及试验条件

2.1 试验装置

试验系统构成示意图如图 1 所示,采用两级温控方式,分别控制内外试验箱的温度变化以减少环境温度变化对试样箱温度波动的影响。试样箱的尺寸为 100 cm×60 cm×100 cm。控温系统主要由电脑温控器、冻融循环压缩机及计算机等部件组成,测温系统由热敏电阻传感器、DT500 型数据采集仪及计算机组成,热敏电阻传感器被精确标定,传感器精度为±0.05 °C。通风管通风由安装在试样箱一端通风管口处的可调速微型风扇控制,通风管内具体风速大小按数字风速仪采集数据求平均,风速仪风速测量精度为±0.02 m/s。

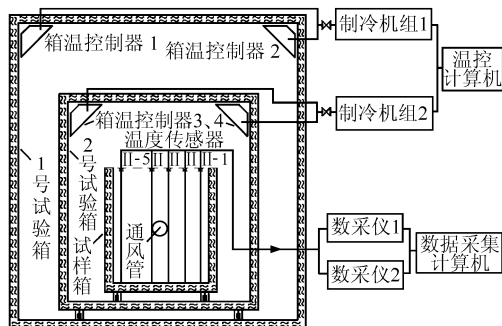


图 1 试验系统组成

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

2.2 试验方法

试验中,1 号试验箱温度控制在 2~5 °C 之间,为 2 号试验箱提供一个近似恒温环境,而 2 号试

箱用于试样箱的环境温度控制,也单独与一台制冷机相连,由计算机自动控制可按要求设定温度变化。一个试样共做 7 d,试验开始前,2 号试验箱系统先要恒温 24 h。试样箱内填装具有 10 %左右含水率的天然砂土,试样箱填土过程中要不断筑实砂土,PVC 通风管埋深距试样箱顶面 53 cm。管壁分有孔和无孔两种情况,有孔透壁通风管上开有孔径为 1 cm 的透气孔,通风管有效长度为 100 cm,内直径为 8 cm,为避免砂土从小孔进入管内引起堵塞,透壁通风管外侧要包裹一层不锈钢钢丝网。在试样箱沿长度方向布置 I、II、III 三个测温剖面,每个测温剖面沿试样深度方向布置 5 列测温点(图 1 为测温剖面 II 的 5 列测温点),每列测温点从土表向下共有 10 个测温点,其中第 1 和第 2 测温点相距 5 cm,第 10 测温点距试样底部为 5 cm,其余各测温点之间相距均为 10 cm。用热敏电阻传感器测量温度变化,每个测温传感器的空间位置都通过一个预先定制的拆卸式木框架精确定位,另外设置 2 个传感器专门用于监测 1、2 号试验箱的温度变化。所有测温传感器都被连接到能自动定时采集数据的 DT500 型数据采集仪中,并与一台计算机相连,每隔 10 min 由计算机自动采集、存贮温度读数。沿深度方向不同位置取 6 份充分搅拌均匀的砂土土样,用于测量试样的初始含水率,试验结束后在通风管边测温点列 I-4、II-4 和 III-4 深度方向取土样,从土表至试样深度为 95 cm 处间隔 5 cm 共计 10 个点,每个点同时取 2 份土样以求其含水率平均值。

利用图 1 所示试验装置,对 3 种恒温条件下的砂土试样进行了温度和水分测试,并分析了土体水分蒸发散热对路堤降温效果的影响,砂土粒径为 0~0.5 mm,具体试验情况如表 1 所列。

表 1 试验参数一览表
Table 1 Parameters of various tests

序号	通风管 类型	开孔率 /%	初始含水率 /%	密度 /(kg/m ³)	试验条件
1	PVC管	0	12.02	1 378.58	2 °C恒温,表面开放; 1号箱1.80 °C
2	PVC管	40	9.70	1 311.6	2 °C恒温,表面开放; 1号箱1.93 °C
3	PVC管	0	13.01	1 406.8	10 °C恒温,表面开放; 1号箱5.18 °C
4	PVC管	40	12.46	1 395.3	10 °C恒温,表面开放; 1号箱4.41 °C
5	PVC管	0	9.98	1 382.9	20 °C恒温,表面开放; 1号箱4.12 °C
6	PVC管	40	9.89	1 378.3	20 °C恒温,表面开放; 1号箱4.62 °C

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

通过对路堤试样 3 个测温剖面温度及含水率变化的比较,分析由于通风管透壁引起土样水分蒸发散热而使路堤产生的降温效果。从试验数据分析发现,同一土样试验 3 个剖面温度及含水率变化具有相似性,所以,本文以试样箱中部 II-4 剖面作为典型位置给出了试验 7 d 后相应数据的变化规律。

图 2 为埋设有透壁和不透壁 PVC 通风管路堤试样在恒温 1.99 °C 通风条件下的温度及含水率变化情况(试验参数见表 1 序号 1、2)。

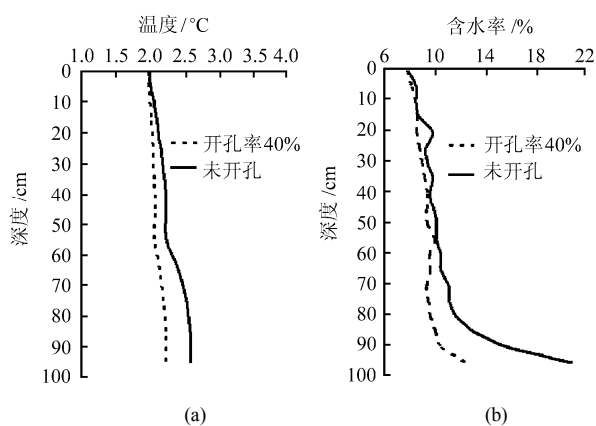


图 2 恒温 1.99 °C 时管壁开孔对土样温度和含水率的影响
Fig.2 Effect of various trepanning rates on temperature and moisture content in soils at 1.99 °C

从图 2(a)可见,土样表面 1.99 °C 恒温下,透壁和不透壁通风管路堤土样深 40~70 cm 范围内有一个凹槽,这是通风管路堤降温效应的表现(因为土样内部温度高于气温,但总体不低于表面温度),进一步比较发现开孔率 40 % 的通风管路堤土样中的温度要比不透壁通风管路堤土样中的温度低,且这种温度差随深度增强,在土样表面两者几乎相等,约为 1.99 °C。通风管位置处两者相差为 0.17 °C,到底部时两者间的温度差达 0.36 °C,这是由于通风管管壁开孔增强了路堤未冻土样的水分蒸发能力,通风期间的蒸发散热有利于路堤土体的温度下降,使得土样温度沿深度方向的梯度变小,不透壁通风管路堤土样沿深度方向温度增加的平均梯度为 0.64 °C/m,而透壁通风管路堤土样温度平均梯度为 0.26 °C/m。从图 2(b)所示含水率分布曲线得到证实,土样保持 1.99 °C 的恒温通风条件,试验结束时,开孔率 40% 的通风管路堤土样内的含水率要比不透壁通风管路堤土样内的含水率小,且这种含水率减小的趋势会随深度增加而增强,表面开放边界的透壁和不透壁通风管土样的表层含水率基本相

同,约为 7.9 %,但透壁通风管土样底部土体的含水率明显减少,即不透壁通风管土样底部附近含水率为 20.76 %,而透壁通风管土样底部附近的含水率为 12.47 %。

图 3 为埋设有透壁和不透壁 PVC 通风管路堤试样在恒温 10.33 °C 通风下的温度及含水量变化情况(试验参数见表 1 序号 3、4)。从图 3(a)可见,在土样表面正的恒温条件下,透壁和不透壁通风管路堤土样深 40~70 cm 范围内沿深度温度梯度有一个减小过程,但不透壁通风管路堤土样的减小由于气温较高而表现不太明显,总体还是体现了通风管路堤降温效应(因为土样内部温度高于气温)。进一步发现,开孔率 40% 的通风管路堤土样中的温度要比不透壁通风管路堤土样中的温度低,且这种温度降低的趋势随深度增加而增强,在通风管位置处两者温度差为 0.57 °C,到底部时两者间的温度差达 0.69 °C,这说明由于通风管管壁开孔增强了路堤土样的水分蒸发能力,并且这种蒸发散热的降温效果比前面的要强,以至土样温度沿深度方向几乎为相同,即透壁通风管路堤土样温度平均梯度仅为 0.16 °C/m,而不透壁通风管土样的平均梯度为 0.92 °C/m。这一结论也能从图 3(b)所示含水率分布曲线得到证实,虽然试样的初始含水率基本相同,但试验结束时土样含水率已有较大的差异,试验结束时,透壁和不透壁土样的表层土样含水率约为 8 %,但透壁通风管土样底部土体的含水率约为 19.14 %,而不透壁通风管路堤土样底部附近的含水率为 27.09 %。

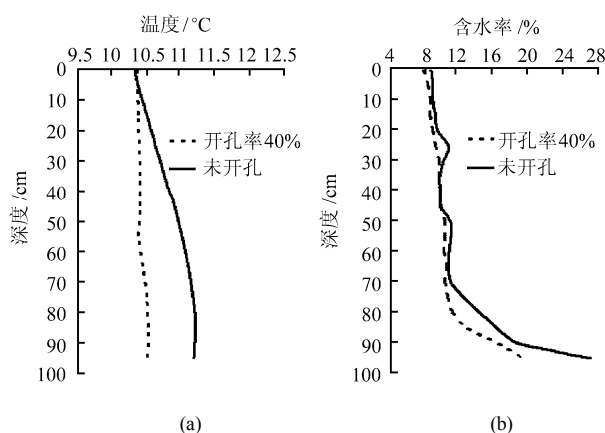


图 3 恒温 10.33 °C 时管壁开孔对土样温度和含水率的影响
Fig.3 Effect of various trepanning rates on temperature and moisture content in soils at 10.33 °C

图 4 为埋设有透壁和不透壁 PVC 通风管路堤试样在恒温 19.24 °C 通风下的温度及含水率变化情况(参数见表 1 序号 5、6)。从图 4(a)可见,在土样

表面正的恒温条件下,对不透壁通风管路堤土样深40~70 cm范围内沿深度方向温度梯度有一个明显加大,这是所谓的通风管路堤夏季增温效应(因为土样内部温度低于气温),对于透壁通风管路堤土样即使气温高达19.24℃还是表现了降温效应,进一步比较发现,开孔率40%的通风管土样中的温度要比不透壁通风管土样中的温度低,且这种温度降低的趋势随深度增加而增强,在通风管位置处两者温度差为0.57℃,到底部时两者之间的温度达0.33℃,这进一步证实由于通风管管壁开孔增强了路堤未冻土样的水分蒸发能力,通风期间的蒸发散热有利于路堤土体的温度下降,土体温度比不透壁通风管路堤土样的相应温度要低,这时透壁通风管土样温度平均梯度为-0.67℃/m,而不透壁通风管路堤土样的平均梯度为-0.32℃/m。这一结论也能从图4(b)所示含水率分布曲线得到证实,土样保持19.24℃的恒温通风条件,虽然试样的初始含水率基体相同,但试验结束时开孔率40%的通风管土样的含水率要比不透壁通风管路堤土样的含水率小。在试验结束时,表层土样含水率基本相同,约为4%左右,但透壁通风管土样底部土体的含水率相对较小,约为13.34%,不透壁通风管路堤土样底部附近的含水率为14.85%。

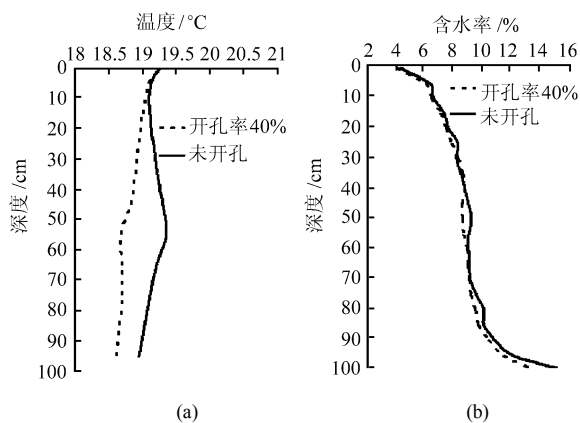


图4 恒温19.24℃时管壁开孔对土样温度和含水率的影响
Fig.4 Effect of various trepanning rates on temperature and moisture content in soils at 19.24℃

通过恒温条件下透壁与不透壁通风管路堤土样温度及含水率变化的比较,表明通风管土样在不同的通风条件及环境温度变化下均显现了一定的降温效果,由于透壁通风管土样通风期间有水分蒸发而产生蒸发散热,其具有增强路堤土体降温效果的作用。夏季路堤土体融化时,管壁对流换热将使路堤增温,同时,通过透壁水分蒸发散热效应将对路堤产生降温效应,由于融土的未冻水含量较大,使得

管壁水分蒸发散热也较大,这在一定程度上可以抵消对流换热所引起的增温效应。

3.2 透壁通风管增强路堤土体降温机制

3.2.1 管壁与空气之间的对流换热

通风管内壁与管内空气的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主要形式,对流换热量的大小将直接影响通风管路堤的降温效果,通常与管内的通风量及接触面积有关。当气温低于路堤土体温度时,通风管路堤由于管壁与低温空气发生对流换热而能冷却路堤及其下面土体,通风管通风对路堤土体起到降温作用^[8-9];当气温高于路堤土体温度时,由于管壁与暖空气发生对流换热而加热了路堤土体,这时通风管通风对路堤土体起到了增温作用^[23-24]。

3.2.2 透壁通风管蒸发散热

水分蒸发能显著降低土体温度,由于水的蒸发热很大,1个标准气压及0℃时为2501 kJ/kg,少量的蒸发就需要可观的热量消耗^[25-29]。土样水分蒸发速率除与空气的温度和湿度有关外,也与空气流动速度密切相关,还与路堤填料物理性质等因素有关^[27-29]。当冷季路堤处于冻结状态时,由于路堤土体的未冻水含量较小,通过通风管壁小孔发生的水分蒸发散热也较小,相对于管壁与空气对流换热产生的降温效果,由蒸发散热产生的降温效果也较小;当暖季路堤土体融化时,管壁与暖空气的对流换热效应将使路堤增温,但通过管壁小孔的水分蒸发散热将对路堤土体产生降温效果,由于融土的未冻水含量较大,使得通过管壁小孔的水分蒸发散热也较大,这可以抵消暖季对流换热对路堤土体引起的增温,使透壁通风管路堤总体表现出降温效果。

4 结 语

通过对不同恒温条件下透壁与不透壁通风管路堤土体温度及水分变化的比较,分析了土体水分蒸发对路堤降温效果的影响。结果表明,透壁通风管通风期间由于水分蒸发而产生蒸发散热,相当于加大了通风管与路堤之间的热交换,其有利于路堤土体的温度降低。透壁通风管路堤土体的水分通过裸露在管壁小孔的土体表面直接蒸发。当冬季路堤冻结时,由于土层的未冻水含量较小,通过管壁的水分蒸发散热也较小,而当暖季路堤土体融化时,管内空气与管壁的对流换热效应可使路堤增温,但通过管壁小孔的水分蒸发散热将对路堤产生降温效应,由于融土的未冻水含量较大,使得通过管壁小孔的水分蒸发散热也较大,这可以减轻暖季对流换

热引起的增温效应对路堤造成的不利影响。透壁通风管不仅能增强冻土路基的降温效果,而且也有利于路堤土层保持干燥。

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] JIN H J, WEI Z, WANG S L, et al. Assessment of frozen-ground conditions for engineering geology along the Qinghai-Tibet highway and railway, China[J]. **Engineering Geology**, 2008, 101(3—4): 96—109.
- [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 and 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 and Technology**, 2008, 53(3): 271—282.
- [5] 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.
- [6] SUN B X, YANG L J, LIU Qi, 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.
- [7] 魏静, 许兆义, 李成, 等. 青藏铁路清水河段片石护坡路堤温度特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 773—777.
WEI Jing, XU Zhao-yi, LI Cheng, et al. Temperature feature analysis for embankment with riprap slope protection in Qingshuihe test section of Qinghai-Tibet Railway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 773—777.
- [8] 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 and Technology**, 2004, 38(2-3): 165—184.
- [9] 李宁, 苏波, 全晓娟, 等. 冻土通风管路基的温度场分析与设计原则探讨[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 81—86.
LI Ning, SU Bo, QUAN Xiao-juan, et al. Approach on temperature field analysis and design principle of bed for ventilating pipeline in frozen soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(2): 81—86.
- [10] 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.
- [11] 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 controlling the permissible value of permafrost thawing[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, 39(9): 98—102.
- [12] 吴志坚, 马巍, 盛煜, 等. 通风管、抛碎石和保温材料保护冻土路堤的工程效果分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1288—1293.
WU Zhi-jian, MA Wei, SHENG Yu, et al. Cooling effectiveness analysis of the vent-pipe, cast-detritus and heat preservation material on protecting embankment in permafrost regions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1288—1293.
- [13] 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 and Technology**, 2008, 53(3): 305—316.
- [14] 刘志强, 马巍, 周国庆, 等. 纵向布管调控冻土路基温度场的模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1827—1831.
LIU Zhi-qiang, MA Wei, ZHOU Guo-qing, et al. Simulated experiment study on the temperature field of frozen subgrade modulated by horizontal pipes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(11): 1827—1831.
- [15] 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 Xiu-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.

- 2004, 23(24): 4195—4199.
- [16] 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.
- [17] 刘琦, 孙斌祥, 徐学祖, 等. 透壁通风管路堤降温效应的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1153—1158.
- LIU Qi, SUN Bin-xiang, XU Xue-zu, et al. Investigation of laboratory test on cooling effect of embankment with perforated ventilation pipe[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(9): 1153—1158.
- [18] 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 Qi, 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.
- [19] 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.
- [20] CHATAIGNER Y, GOSSELIN L, DORÉ G. Optimization of embedded inclined open-ended channel in natural convection used as heat drain[J]. **International Journal of Thermal Sciences**, 2009, 48(6): 1151—1160.
- [21] JØRGENSEN A S, DORÉ G, VOYER É, CHATAIGNER Y, GOSSELIN L. Optimization of the characteristics of two heat removal techniques for permafrost protection[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2008, 53(2): 179—192.
- [22] XU J, GOERING D J. Experimental validation of passive permafrost cooling systems[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2008, 53(3): 283—297.
- [23] YU Q H, SHI C H, NIU F J, NAIWU H, ROTH K. Analysis of temperature controlled ventilated embankment[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2005, 42(1): 17—24.
- [24] 李国玉, 李宁, 全晓娟. 可控通风管路基的降温效果[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3287—3291.
- LI Guo-yu, LI Ning, QUAN Xiao-juan. Cooling effect on adjustable ventilated embankment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3287—3291.
- [25] YAO J M, ZHAO L, DING Y J, et al. The surface energy budget and evapotranspiration in the Tanggula region on the Tibetan Plateau[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2008, 52(3): 326—340.
- [26] 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 Ji, SHENG Yu, 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.
- [27] 杨洋, 姚海林, 卢正. 蒸发条件下路基对气候变化的响应模型及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1209—1214.
- YANG Yang, YAO Hai-lin, LU Zheng. Model of subgrade soil responding to change of atmosphere under evaporation and its influential factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1209—1214.
- [28] 陈建斌, 孔令伟, 赵艳林, 等. 非饱和土的蒸发效应与影响因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 34—40.
- CHEN Jian-bin, KONG Ling-wei, ZHAO Yan-lin, et al. Evaporation effect in unsaturated soil and its influential factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 34—40.
- [29] 夏卫生, 雷廷武, 杨文治, 等. 蒸发条件下土壤水分再分布的动力学研究[J]. 水利学报, 2002, 33(7): 37—41.
- XIA Wei-sheng, LEI Ting-wu, YANG Wen-zhi, et al. Dynamics of soil water redistribution during evaporation[J]. **Journal of Hydraulic Engineer**, 2002, 33(7): 37—41.