

高寒区输水渠道渠基蓄热增温防冻胀 技术原型试验

江浩源^{1,2}, 王正中^{1,2,3}, 孟晓栋^{1,2}, 王 羿⁴, 谭志翔^{1,2}, 葛建锐^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 旱区寒区水工程安全研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

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;

4. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 冬季输水渠道衬砌板在基土冻胀和冰压力双重作用下, 在行水位及其上部易发生开裂、折断等破坏, 目前还未有利用太阳能或风能等绿色能源进行渠基主动、低碳增温的防冻胀技术。为此, 研发了由抛物面聚光槽、集热管、太阳追踪器、散热通道、碎石槽蓄热体与散热空气循环风机组成的渠基风光能蓄热增温系统, 其散热通道采用紧贴渠坡衬砌布置和碎石槽底部布置两种形式。通过北疆某渠道工程的现场安装与温度监测, 分析了该技术的增温效果与适用性。结果表明: 渠基风光能蓄热增温系统可有效提升土温, 削减冻深, 具有良好的工程防冻胀应用效果, 可为寒区渠道冬季输水以及渠道升级改造提供技术支撑。

关键词: 高寒区渠道; 冬季输水; 蓄热增温; 风光能利用; 防冻胀; 原型试验

中图分类号: TV698.2⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)05—0009—08

Field Investigation of the Anti-Frost Heaving Technology by Heat Storage in Canal Foundation for Water Delivery Canals in Cold Regions

JIANG Haoyuan^{1,2}, WANG Zhengzhong^{1,2,3}, MENG Xiaodong^{1,2}, WANG Yi⁴, TAN Zhixiang^{1,2}, GE Jianrui^{1,2}

(1. Cold and Arid Regions Water Engineering Safety Research Center, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

4. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: Under the coupling action of the soil frost heaving and ice pressure, the water conveyance canal lining is prone to cracking and breaking at the water level fluctuation areas and its upper part. At present, there is no anti-frost heave technology that uses green energy such as solar energy or wind energy which is active and low-carbon emission technologies to increase the temperature of the canal foundation. To this end, a canal foundation heating system with solar energy and wind energy, composed of parabolic condensing trough, heat collecting pipe, sun tracker, heat dissipation pipes, heat storage body with gravel trough and heat dissipation air circulation fan is developed. The heat dissipation pipes are arranged close to the canal slope lining and at the bottom of the gravel trough. Through the field instal-

收稿日期: 2022-06-10

修稿日期: 2022-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2003108; 51279168); 国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项(2017YFC0405103); 冻土工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLSE201801)

作者简介: 江浩源(1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为旱区寒区水工程安全。E-mail: 724263751@qq.com

通讯作者: 王正中(1963—), 男, 教授, 主要从事旱区寒区水工程安全等方面的教学与研究工作。E-mail: wangzz0910@163.com

lation and temperature monitoring of a canal project in Northern Xinjiang, the temperature increasing effect and applicability of this technology are analyzed. The results show the canal foundation heating system with wind and solar energy can effectively increase the soil temperature and reduce the freezing depth. It has a good application for engineering anti-frost heaving, and can provide technical support for water delivery canals in winter in cold regions.

Keywords: canals in cold regions; water delivery in winter; heat storage; utilization of wind and light energy; anti-frost heave; field investigation

随着西部大开发战略和一带一路战略的实施,西部地区人口、经济和社会得到了极大发展,工、农业及城市生活用水迅速增加,使得西部寒区众多已建成的供水渠道要面临冬季输水的挑战^[1-3]。当前供水工程在冬季常采用冰盖下输水的方式运行,诸如南水北调中线工程、引黄济青工程、新疆乌什水水库引水工程等^[3]。随着众多输水工程冰盖下输水的运行实践,国内外在冰盖下输水技术方面已有一定的理论基础和经验积累,冰盖下输水已经成为寒区渠道冰期运行的主流方式^[3-4]。寒区渠道冬季运行除采用冰盖下输水的方式运行外,也有使用无冰盖输水的方式运行。无冰盖输水是指通过保温或增温的方法阻止或减少渠内水体结冰,或通过水力调控手段使渠道直接以冰水二相流的方式运行,渠水上不再形成冰盖^[5-6]。

西部寒区渠道冬季输水不仅要面临冰塞冰坝等冰害问题,而且还因动冰荷载、冰盖约束力(冰盖下输水方式)、渠水渗漏等作用面临更为复杂的冻胀破坏问题^[1-2]。与冬季不输水衬砌渠道相比,冬季输水衬砌渠道行水位上的渠基土含水量高,距地下水位近,其冻胀量更大;衬砌板在基土冻胀和冰压力双重作用下,沿行水位附近易发生开裂、折断破坏,待春季消融后产生更为严重的失稳滑塌^[7]。针对冬季不输水衬砌渠道的冻胀破坏问题,专家学者已对其冻胀破坏机理、冻胀破坏解析力学模型、水-热-力耦合数值模型等展开了系统研究^[1,8-10],并提出了基土换填、保温板铺设、土工膜防渗、基土排水以及渠道断面、结构形式优化等防渗抗冻胀措施^[1,11-12]。冬季输水衬砌渠道的研究主要集中于冰情分析^[13]、冰情控制^[14]、冰期运行调度模式^[15-16]等方面,对于输水衬砌渠道的冻胀破坏研究还较少。宋玲等^[2,7]总结了冬季输水渠道的冻胀破坏特征,提出了冬季输水衬砌渠道冻胀解析力学模型;葛建锐等^[3]建立了寒区冬季输水衬砌渠道的冰-冻破坏统一解析力学模型。而在冬季输水渠道冰冻破坏防治措施方面,目前仍采用与冬季不输水渠

道相同的被动的保温和渠基土换填等措施,主动的利用自然能源进行低碳增温的防冻胀技术还较少,有待进一步研究。

我国新疆、西藏等西部多数地区的年太阳总辐射量大于 $6\ 000\ \text{MJ}/\text{m}^2$,日照时长可达 $2\ 800\ \text{h}$,属于太阳能资源一、二类地区以及风能丰富区。太阳能已在日光温室蓄热技术中得到广泛应用^[17-19],随着国家“双碳”战略的提出,太阳能、风能等清洁能源的利用将得到快速发展。太阳辐射对寒区冻土工程的研究主要集中于多年冻土区上修建的路基工程,路面的强吸热作用和路基阴阳坡差异性的太阳辐射热吸收作用,引起了一定程度的多年冻土区退化,并导致了路基结构发生了不均匀融沉、滑塌等冻害^[20-23]。而对于季节性冻土区上的路基工程和渠道工程,因太阳辐射作用而导致阳坡的冻深、变形和冻害程度均低于阴坡^[10,24-26];Jiang 等^[27]进一步结合太阳辐射作用下的寒区渠道水-热-力耦合数值模型指出,通过增大太阳辐射强度可线性削减渠道的冻深和冻胀变形。因此,对于寒区工程而言,通过增大其吸收的太阳辐射是削减渠道冻胀破坏的有效手段。

本文提出了一种利用光热以及风能防治寒区渠道冻胀破坏的增温技术,并将该技术在北疆某供水工程现场进行了原型试验。通过分析渠基与混凝土衬砌板的升温效果,对该技术的可行性和实际工程效果进行了探索验证,以期高寒区利用太阳辐射来主动增温和削减冻胀提供技术参考。

1 渠基风光能蓄热增温技术原理

渠基风光能蓄热增温系统包括渠岸光热收集系统和渠基散热系统两部分,如图 1 所示。其中渠岸光热收集系统由抛物面聚光槽、集热管、太阳光追踪系统等组成,集热管外壁为钢化玻璃,内部真空以减少热量散失,集热铜管置于真空玻璃管内。聚光槽沿东西轴向放置,并安装太阳追踪传感器,通过控制盒将光照脉冲信号转换为步进电机转动角度来调整聚光槽面,使其正对太阳直射。

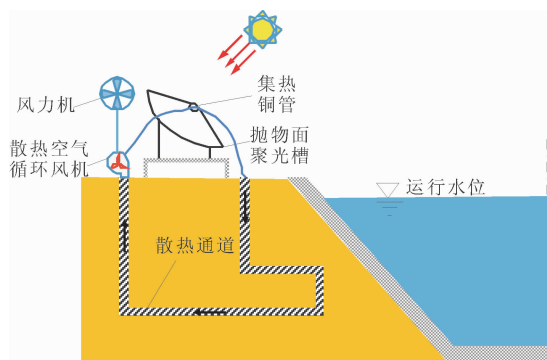


图1 风光热蓄集增温系统整体布置图

渠基散热系统由渠基内部的散热通道及散热空气循环风机组成。渠基散热通道可由烧结空心砖、钢纤维水泥砂浆砌筑或由薄壁钢管连接组成。散热空气循环风机在无人区或不具备电力条件的区域,可利用当地风能驱动,风力机结构示意图如图2所示,利用风能带动叶片转动,通过齿轮变速箱提高转速后,由竖直传动轴带动空气循环风机转动。在具备使用电力条件的区域,散热空气循环风机也可使用电力驱动。

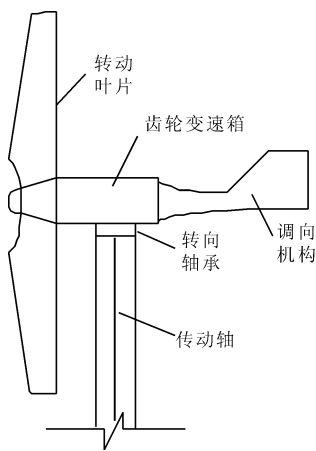


图2 风力机结构示意图

渠基内部的散热通道拟采用以下两种布设形式。一是直接将散热通道布设于渠坡衬砌板下部,以减少外部冷空气进入土体内部。二是布置在碎石槽蓄热体的底部,持续为蓄热体提供能量;该碎石槽蓄热体通过结构孔隙大、易于传递热量的碎石换填渠基土而形成,利用锅盖效应将槽底热量通过水分蒸发、迁移、冷凝相变等形式传递到碎石槽周边土体或衬砌板,以达到高效利用太阳能进行土体增温的目的。

渠基风光能蓄热增温系统的运行方式如下:聚光槽蓄集光热对铜管内空气进行加热,通过循环风机将加热的空气由散热通道送至渠基土内,采用导

热性能极佳的钢纤维水泥砂浆或薄壁钢管将空气中热量快速传导至周围土体内,从而对渠基土体或衬砌板进行加热,以削减冬季输水渠道的冰冻破坏。

抛物面槽式聚光器原理如图3所示,抛物面方程为 $y = x^2/4f$, f 为抛物线焦距值, a 为聚光槽开口宽度,集热铜管位于抛物线焦点;太阳张角大小为 $32'$, r_m 为吸热铜管中心到反射抛物面边缘的距离, d 为集热铜管直径,可由公式(1)计算得出:

$$d = 2r_m \sin 16' \quad (1)$$

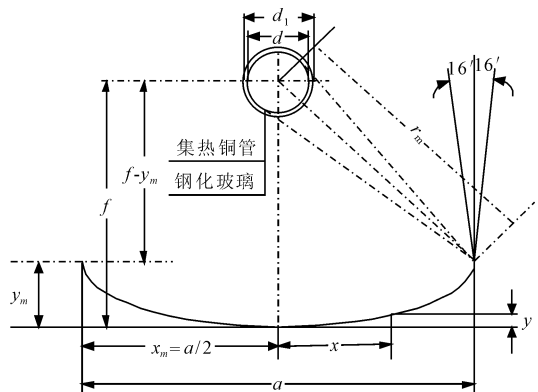


图3 抛物面槽式聚光器示意图

聚光器开口面积 A_a 与接收器上接收辐射的表面面积 A_r 之比,称为聚光集热器的聚光比,即:

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{a}{\pi d} \quad (2)$$

聚光比 C 可反映出聚光集热器使能量集中的可能程度,对于接收器为圆管的槽形抛物面集热器,当 $a/f = 4$ 时,有最大聚光比 $C_{\max} = 68.3$ [28]。

真空集热管中热交换过程可由下式表示 [29]:

$$\rho_a C_a V_a \frac{dT_a(t)}{dt} = -\rho_c C_c V_c \frac{dT_c(t)}{dt} - h \frac{\pi d_1^2}{4} [T_c(t) - T_e(t)] + \eta A_a I(t) + Q(t) \rho_a C_a [T_2(t) - T_1(t)] \quad (3)$$

式中: h 为集热管对环境的热损失系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; A_a 为聚光器开口面积, m^2 ; I 为太阳辐照度, W/m^2 ; η 为聚光器的聚光效率, %; d_1 为集热铜管外侧的玻璃管直径, m ; Q 、 T_a 、 ρ_a 、 C_a 、 V_a 分别为集热铜管内空气的流量 (m^3/s)、温度 ($^\circ C$)、密度 (kg/m^3)、比热 ($J/(^\circ C \cdot kg)$) 和体积 (m^3); T_c 、 ρ_c 、 C_c 、 V_c 分别为集热铜管的温度、密度、比热和体积; T_e 为环境温度, $^\circ C$; T_1 和 T_2 分别为集热铜管进口和出口的空气温度, $^\circ C$ 。

依据式(1)一式(3)对加热系统中聚光槽、集热管、散热管的尺寸、数量以及布置形式等进行设计。

2 现场原型试验

2.1 工程概况

试验渠段位于北疆某供水干渠的支渠上(见图 4),北纬 47.03° ,东经 88.03° ,海拔 614 m,属于典型的温带大陆性气候,夏季干热,冬季严寒。当地 11 月初气温开始进入负温,最低温度达到 -20°C 以下,最大冻深约为 2 m。梯形渠道为南北走向,渠顶宽 8.6 m,渠底宽 2 m,渠深 2.15 m,衬砌为 20 cm 厚的 C20 现浇混凝土板,如图 5 所示。渠基土为北疆含砾白砂岩,地下水埋深为 2.1 m~2.3 m,渠道在渠底中心、渠坡下 1/3 部分冻胀破坏严重。渠道每年 4 月初开始供水,9 月下旬停止供水进行现场检修。根据试验段附近气象站统计数据,试验现场多年平均日照时数达到 2 700 h 以上,太阳光照资源丰富。



图 4 试验段渠道现场照片

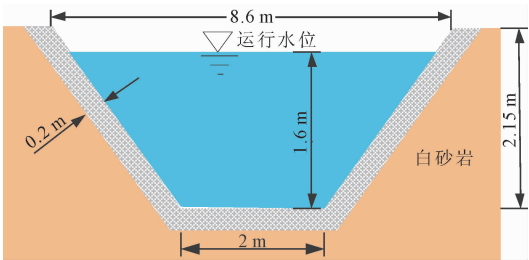


图 5 试验段渠道横断面图

2.2 试验设计

本次试验在试验段渠道纵向 10 m 范围内进行,开挖掉该范围内左侧渠坡上部的衬砌板后,再沿渠顶边缘开挖深度为 3 m,底宽为 1 m,纵向长为 3 m 的直角梯形槽,在槽内换填粗砾石作为蓄热体,其具体形状和位置如图 6 所示。

散热管道分两种方式于两段铺设,一段贴于衬砌板下表面布置(以下称贴坡加热段),纵向长 3 m。另一段则水平布置于直角梯形槽底部(以下称碎石槽加热段),纵向长 3 m。散热管道使用直径 40 mm 的薄壁钢管,水平段与贴坡段均成“几”字形布置,

横管竖管长度均为 1 m,连接处采用耐高温丁基防水胶布密封。渠岸外露的通风管道均使用橡塑保温套管包裹保温。渠基内部管道布置情况如图 6 所示,试验现场布置照片如图 7 所示。试验段渠道采取两端筑坝,中间人工注水的方式模拟冬季行水工况,水位高度 1.6 m。

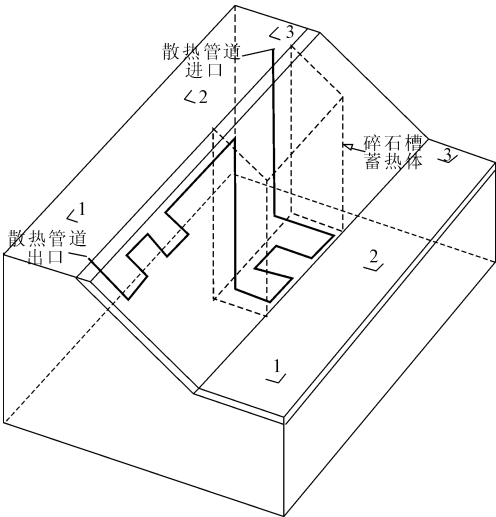


图 6 渠基散热管道及监测断面布设示意图

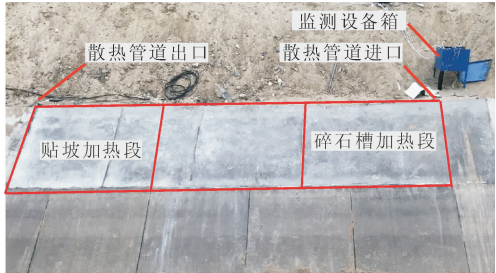


图 7 试验现场布置照片

2.3 试验材料及设备

聚光槽采用镜面不锈钢加工制成,单个聚光槽长度 $l=1.5\text{ m}$,抛物线焦距 $f=0.3\text{ m}$,槽体开口宽度 $a=1.2\text{ m}$, $a/f=4$,试验现场共计加工 4 块抛物面聚光槽,总长度为 6 m。

集热管使用中国西电集团陕西宝光真空电器股份有限公司生产的 2 m 中温真空集热管,集热管具体技术参数如表 1 所示。试验现场共计使用 3 根真空集热管,安装于抛物面不锈钢聚光槽的焦线位置。

试验段渠道附近管理站具备使用电力条件,在集热铜管进口安装鼓风机为管道循环空气,风机额定功率 370 W,额定转速 2 800 r/min。风机的启动和关闭由电路中安装的光控开关加以控制,白天集热系统工作时自动开启,为渠基输送热量,夜晚自动

关闭。试验现场安装完成后的渠岸光热蓄集系统如图 8 所示。

表 1 真空集热管主要技术参数

序号	技术参数	参数值
1	集热管长度/m	2
2	吸热铜管外径/mm	40
3	玻璃管外径/mm	95
4	吸收率/%	≥95
5	工作压力/MPa	4
6	使用温度/℃	≤350
7	平均热损(400℃)/(W·m ⁻¹)	≤80
8	真空度(20℃)/Pa	5×10 ⁻³
9	重量/kg	8
10	使用寿命/a	20

此外,现场安装一台超声波一体式气象站,用以采集现场空气温度、湿度、风速、风向及光照等参数,气象站采集数据通过 GPRS 信号无线传输,可远程下载气象站监测数据。

此次原型试验主要材料、设备、挖填土石方费用及人工费共计花费 7 720 元,其中太阳能集热管 2 400 元(800 元×3 根),槽式不锈钢聚光槽 1 600 元



图 8 渠岸光热蓄集系统现场照片

(400 元×4),电动风机 520 元(1 台),薄壁钢管 300 元,其余零星材料费共计 500 元,小型挖机费用为 600 元(8 个台时),人工费为 1 800 元(2 人×5 d×180 元/人/d),费用为每延米平均造价 1 287 元。

2.4 数据采集系统

本次试验共设置 3 个监测断面,其中在贴坡加热段和碎石槽加热段各设置一个监测断面,另在试验对比段设置一个监测断面,各监测断面位置如图 6 所示,各断面传感器位置布设情况如图 9 所示。另在集热管进口与出口管壁各布设一个单点温度探头,监测管道进口与出口空气温度。传感器数据采用美国 Campbell 公司生产的 CR3000 型数据采集仪采集,通过远程模块传送监测数据。

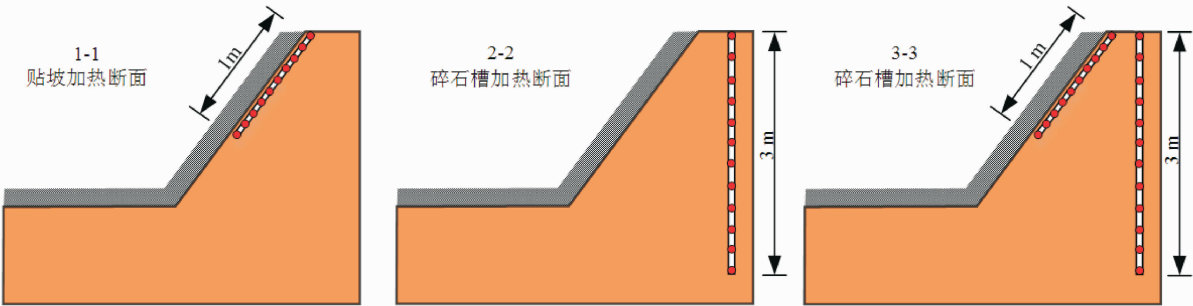


图 9 各监测断面传感器布设情况示意图

3 监测结果分析

试验自 2019 年 11 月 12 日开始,连续 1 周每隔 60 min 采集各监测断面温度数据、散热管道进出口温度数据及现场环境数据。

图 10 为试验现场架设的小型气象站测得的 2019 年 11 月试验现场气温随时间变化曲线图。可以看出,自 11 月 12 日开始试验现场气温已开始进入零下,最低气温达到 -23℃,11 月 12 日到 30 日现场平均气温 -10℃。

图 11 为 11 月 13 日—19 日渠基散热管道进、出口温度随时间变化曲线图,从图中看出,加热系统白天可有效工作 7 h 以上,当地时间每天 14:00 左

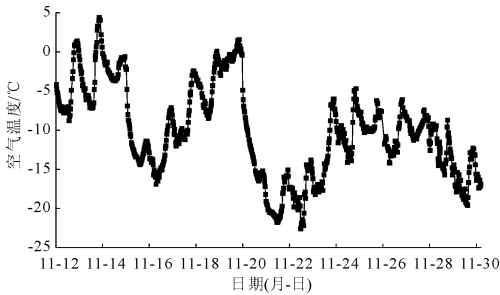


图 10 2019 年 11 月试验现场气温变化曲线

右散热管道进口温度达到最大值,试验现场天气条件良好时,散热管道进口最高温度均可达到 80℃ 以上,最高可达到 140℃。散热管道出口温度基本与现场气温一致,说明散热管道内空气携带的热量已

在渠基土内完全释放。

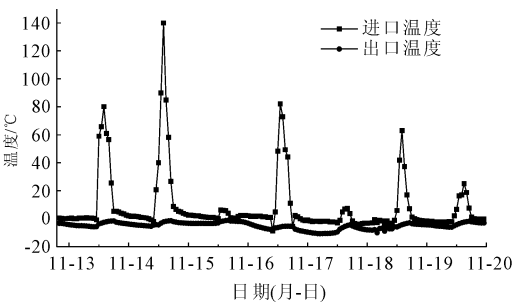


图 11 散热管道进口及出口温度随时间变化曲线

3.1 系统集热效率分析

系统集热的集热效率采用下式计算：

$$\eta = \frac{\int q dt}{A \int G dt} \tag{4}$$

式中： η 为集热系统的集热效率，%； G 为投射到聚光槽光孔上的太阳辐射值， W/m^2 ； A 为聚光器光孔的面积， m^2 ； q 为集热系统有效能量收益功率， W 。

计算时只考虑太阳直射辐射强度，并采用 Hottel 晴空模型计算，该模型因对北方寒区有较好的适用性和通用性，被广泛用于计算北方寒区的太阳辐射值^[9,27]。选择2019年11月14日晴朗天气的实验数据进行计算。太阳直射辐射强度计算公式如下：

$$G_{tb} = G_0 (\alpha_0 + \alpha_1 e^{-k/\sin\alpha_s}) \cos i / \sin\alpha_s \tag{5}$$

式中： G_0 为太阳射线到达大气层外切平面的太阳辐射强度； α_s 为太阳高度角； i 为太阳入射角； k, α_0, α_1 为标准晴空大气常数，根据文献^[28-29]计算。

集热系统有效能量收益功率采用下式进行计算：

$$q = q_m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \tag{6}$$

式中： q_m 为集热管中空气的质量流量； C_p 为空气比热容； T_2 为集热管内空气出口温度； T_1 为集热管内空气进口温度。

系统集热效率及太阳直射辐射强度结果如图 12 所示。由图可知，系统集热效率与太阳辐射强度存在基本一致的变化规律。首先随着太阳辐射强度的增加，系统集热效率逐渐增大，当地正午时刻 14:00，太阳辐射强度值达到最大，系统效率达到最高值 46%。随后系统集热效率随着太阳辐射强度的降低而减小。

3.2 系统加热效果分析

通过对比碎石槽加热段与无措施段相同位置处的渠基温度，以及贴坡加热段与无措施段相同位置处的衬砌板下表面温度，进一步分析系统的加热效果。试验对比结果如图 13、图 14 所示。

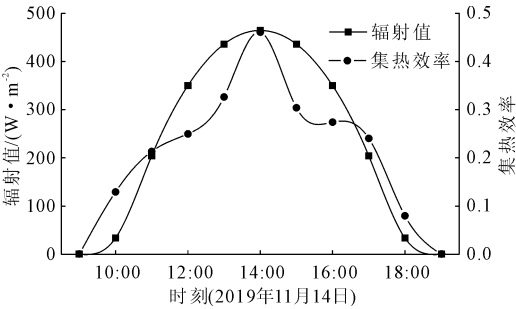


图 12 关键时刻点太阳直射辐射值及系统效率分布曲线

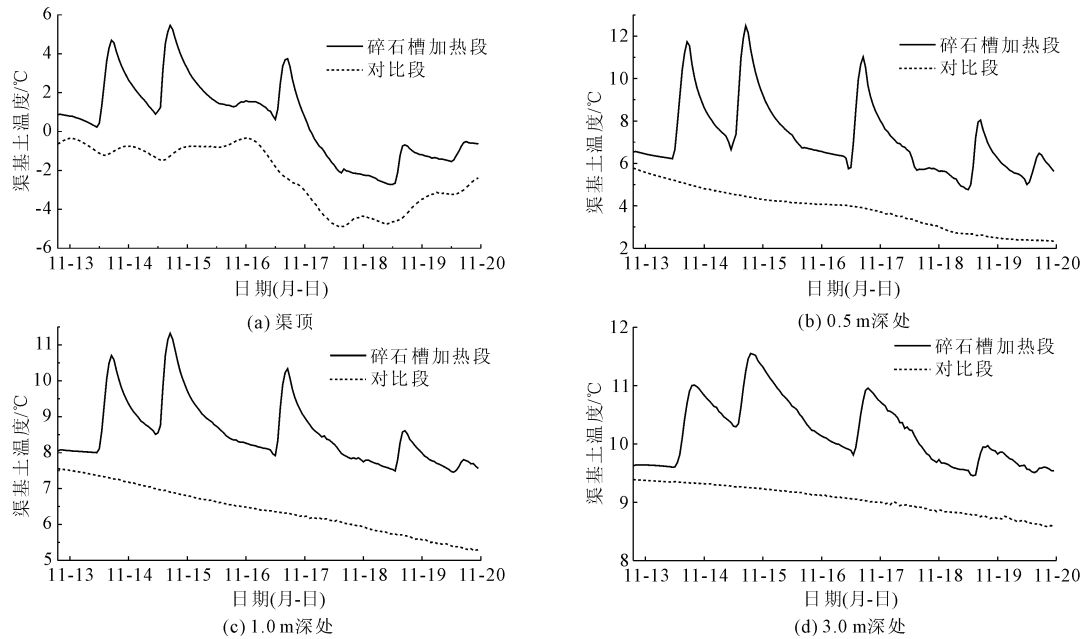


图 13 碎石槽加热段及对比较段不同深度处渠基土温度随时间变化曲线

从图 13 碎石槽加热段及对比段不同深度渠基温度随时间的变化曲线可以看出,同一天内,日间加热系统工作时,碎石槽加热段不同深度处的渠基温度较对比段均有明显提升,渠基温度最高可提升 6℃左右,每日 18:00 左右碎石槽加热段渠基升温效果达到峰值,此后至次日 11:00 左右,即加热系统停止工作时间段,碎石槽加热段渠基依靠渠基蓄热体白天储存的热量,仍能与对比段渠基温度保持 2℃左右温差。次日 11:00 始,加热系统开始继续运行,碎石槽加热段渠基温度又进一步提升。结合现场气温变化曲线图可以看出,试验期内渠顶表层土温随环境温度变化而变化,但与无措施段对比,仍具有显著的增温效果;在 0.5 m 深度以下,渠基土温不再受环境影响,而是维持较高正温;3.0 m 以下土层温度随系统运行时间增加在缓慢升高。这说明该系统可持续向渠基土内蓄集太阳光热,并能缓慢释放为渠道提供热量,延缓表层冻结同时阻止冻深进一步增加,防冻害效果显著。

从图 14 贴坡加热段及对比段不同深度处衬砌板下表面的温度变化可以看出,由于散热管道位于土层与衬砌之间,接近地表,同时混凝土热传导系数大于土体的原因,此处散热迅速。因此贴坡加热段衬砌板下表面升温效果较槽底加热段渠基升温效果有一定下降,同时受环境温度变动影响显著。但贴坡加热段自渠顶 0.2 m、0.5 m、1.0 m 坡长处衬砌板下表面温度较对比段均有一定程度提升,自渠顶 1.0 m 坡长处衬砌板下表面温度最大提升 2℃左右。原先土体散失的热量,通过光热蓄集增温系统的热量弥补,从而削减了衬砌下方土体的冻结深度,对于衬砌的冻胀破坏具有防护作用。

4 结 论

在北疆大型供水工程示范试验基地开展了渠基光热蓄集增温技术系统的安装与现场试验监测研究,验证其对寒区渠道低温运行防冻胀破坏的实际工程效果和适用性。现场原型试验结果表明,天气条件良好时,加热系统白天可有效工作 7 h 以上,系统集热效率最高可达到 46%。当地时间每天 14:00 左右管道进口温度达到最大值,散热管道进口空气温度最高可达到 140℃,碎石槽加热段渠基温度最高可提升 6℃左右,贴坡加热段衬砌板温度最高可提升 2℃左右。碎石槽可将太阳能蓄集在渠基土内并缓慢释放,延缓表层土体冻结,系统长期运行可不断提高渠基土温。贴坡散热管热量抵消土体向环境中的散热量,削减衬砌板下方土体冻结深度,有效防止衬砌冻胀破坏。

该技术充分利用了西部地区丰富的风能、光能资源,在无人值守的荒漠区可独立工作,且工程应用造价低。原型试验结果证明了其可行性及良好的工程实际应用效果,通过合理配置集热系统数量,可有效防治寒区渠道冬季冻胀破坏问题。研究成果为保障寒区渠道冬季安全输水提供了一种新方案,对未来寒区渠道的建设提供了技术支撑。

参考文献:

[1] 王正中,江浩源,王 羿,等. 旱寒区输水渠道防渗抗冻胀研究进展与前沿[J]. 农业工程学报,2020,36(22):120-132.

[2] 宋 玲,欧阳辉,余书超. 混凝土防渗渠道冬季输水运行中冻胀与抗冻胀力验算[J]. 农业工程学报,2015,31(18):114-120.

[3] 葛建锐,王正中,牛永红,等. 冰盖输水衬砌渠道冰冻破坏统一力学模型[J]. 农业工程学报,2020,36(1):

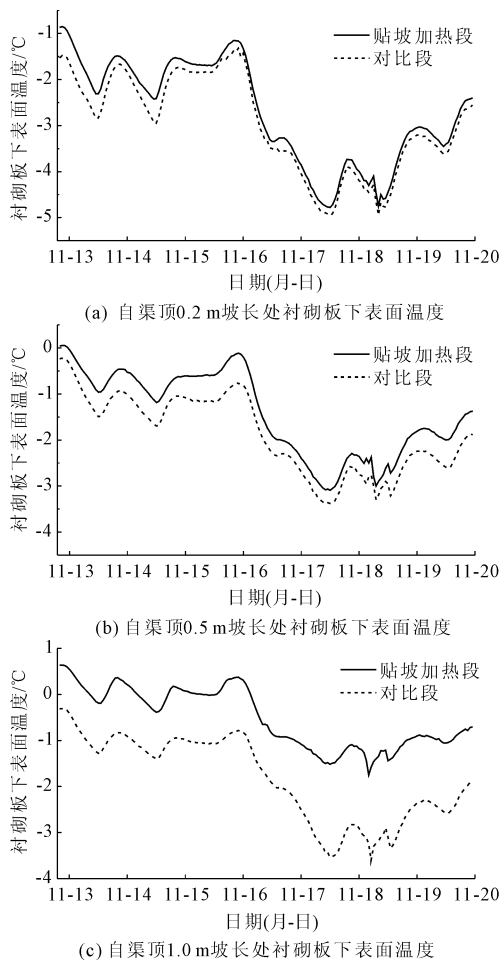


图 14 贴坡加热段及对比段衬砌板下表面温度随时间变化曲线

- 90-98.
- [4] 刘国强. 长距离明渠冬季安全输水模式和措施探讨[J]. 人民珠江, 2015, 36(4): 102-106.
 - [5] 穆祥鹏, 陈文学, 郭晓晨, 等. 高纬度地区渠道无冰盖输水的冰情控制研究[J]. 水利学报, 2013, 44(9): 1071-1079.
 - [6] 穆祥鹏, 曹 平, 陈文学, 等. 冰期宽浅式渠道无冰盖输水技术及冰水二相流水力调控影响因素研究综述[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 132-136.
 - [7] 宋 玲, 余书超. 寒区冬季输水渠衬砌的冻胀破坏及防治措施研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(6): 96-97, 100.
 - [8] 王 羿, 王正中, 刘铨鸿, 等. 寒区输水渠道衬砌与冻土相互作用的冻胀破坏试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1799-1808.
 - [9] 王正中. 梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2004(3): 24-29.
 - [10] 江浩源, 王正中, 刘铨鸿, 等. 考虑太阳辐射的寒区衬砌渠道水-热-力耦合冻胀模型与应用[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 589-602.
 - [11] 李甲林, 王正中. 渠道衬砌冻胀破坏力学模型及防冻胀结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
 - [12] 江浩源, 王正中, 王 羿, 等. 大型弧底梯形渠道“适缝”防冻胀机理及应用研究[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 947-959.
 - [13] 黄国兵, 杨金波, 段文刚. 典型长距离调水工程冬季冰凌危害调查及分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 144-149.
 - [14] 穆祥鹏, 陈文学, 刘 爽, 等. 南水北调中线干渠冰期拦冰索水力控制条件研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(2): 90-97.
 - [15] 刘孟凯, 关 惠, 黄明海. 封冻期渠系运行方式[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 195-201.
 - [16] 刘孟凯. 南水北调中线工程总干渠冰期输水调控仿真研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 95-104.
 - [17] 鲍恩财, 曹晏飞, 邹志荣, 等. 节能日光温室蓄热技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 1-14.
 - [18] 凌浩恕, 陈 超, 陈紫光, 等. 日光温室带竖向空气通道的太阳能相变蓄热墙体体系[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 336-343.
 - [19] 陈 超, 张明星, 郑宏飞等. 日光温室用双集热管多曲面槽式空气集热器性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 245-252.
 - [20] Ma W, Mu Y H, Wu Q B, et al. Characteristics and mechanisms of embankment deformation along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 67: 178-186.
 - [21] Chou Y L, Sheng Y, Zhu Y P. Study on the relationship between the shallow ground temperature of embankment and solar radiation in permafrost regions on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 78: 122-130.
 - [22] Zhang M Y, Pei W S, Li S Y, et al. Experimental and numerical analyses of the thermo-mechanical stability of an embankment with shady and sunny slopes in permafrost regions[J]. Apply Thermal Engineering, 2017, 127: 1478-1487.
 - [23] Song Y, Jin L, Peng H, et al. Development of thermal and deformation stability of Qinghai-Tibet Highway under sunny-shady slope effect in southern Tanglha region in recent decade[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(2): 342-355.
 - [24] Liu H, Niu F J, Niu Y H, et al. Effect of structures and sunny-shady slopes on thermal characteristics of subgrade along the Harbin-Dalian passenger dedicated line in Northeast China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 123(1): 14-21.
 - [25] Tai B W, Liu J K, Yue Z R, et al. Effect of sunny-shady slopes and strike on thermal regime of subgrade along a high-speed railway in cold regions, China[J]. Engineering Geology, 2018, 232: 182-191.
 - [26] 姜海波, 田 艳. 季节冻土区刚柔混合衬砌梯形渠道冻胀机理试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 145-151.
 - [27] Jiang H Y, Liu Q H, Wang Z Z, et al. Frost heave modelling of the sunny-shady slope effect with moisture-heat-mechanical coupling considering solar radiation[J]. Solar Energy, 2022, 233(11): 292-308.
 - [28] 何梓年. 太阳能热利用[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2009: 150-170.
 - [29] Duffie J A, Beckman W A. Solar Engineering of Thermal Processes[M], fourth edition, Wiley, New York, 2013.